



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
"ARAGÓN"

**IMPLEMENTACIÓN DE APUNTES PARA LA  
ASIGNATURA DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
INDUSTRIALES DE LA CARRERA DE INGENIERO  
MECÁNICO ELECTRICISTA DE LA E.N.E.P.  
ARAGÓN.**

**TESIS**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

**PRESENTAN:**  
JESÚS ANTONIO CHICO VENANCIO  
JULIÁN CHICO VENANCIO  
Asesor: ING. ARQUÍMEDES SOLÍS TÉLLEZ.

**FALLA DE ORIGEN**

San Juan de Aragón, Estado de México.

1995



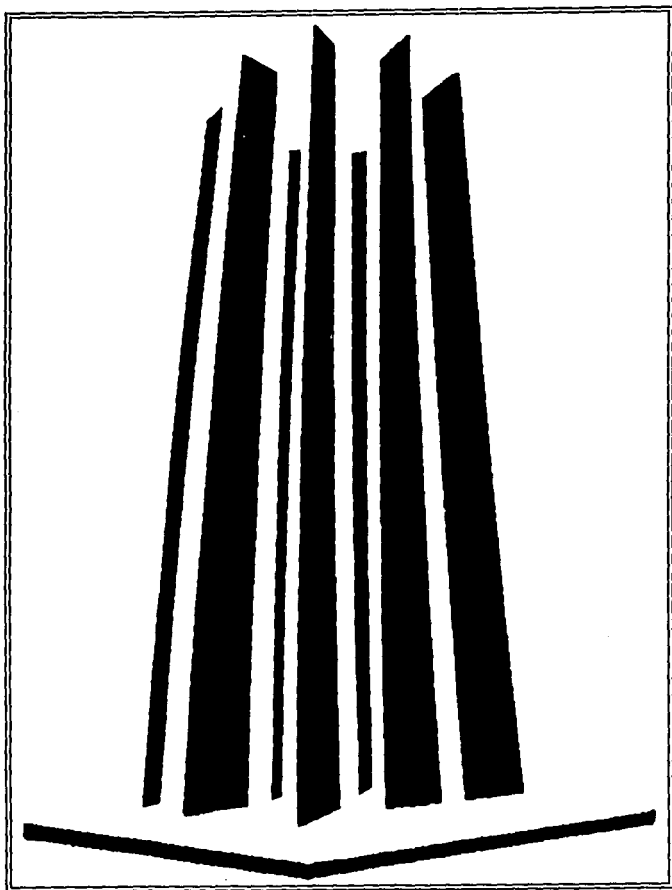
## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.







UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCIÓN

JULIAN CHICO VENANCIO  
PRESENTE.

En contestación a su solicitud de fecha 26 de mayo del año en curso, presentada por Jesús Antonio Chico Venancio y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el señor profesor, Ing. ARQUIMEDES SOLÍS TÉLLEZ pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "IMPLEMENTACIÓN DE APUNTES PARA LA ASIGNATURA DE INGENIERÍA DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA CARRERA DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA DE LA E.N.E.P. ARAGÓN", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento, me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., 29 de mayo de 1995  
EL DIRECTOR

  
M en I CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO

c c p Jefe de la Unidad Académica.  
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
c c p Asesor de Tesis.

CCMCAIR/ta.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
CAMPUS ARAGÓN

UNIDAD ACADÉMICA

Ing. RAÚL BARRÓN VERA  
Jefe de la Carrera de Ingeniería  
Mecánica Eléctrica,  
P r e s e n t e .

En atención a la solicitud de fecha 25 de septiembre del año en curso, por la que se comunica que los alumnos JESÚS ANTONIO CHICO VENANCIO y JULIAN CHICO VENANCIO, de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, han concluido su trabajo de investigación intitulado "IMPLEMENTACIÓN DE APUNTES PARA LA ASIGNATURA DE INGENIERÍA DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA CARRERA DE INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA DE LA E.N.E.P. ARAGÓN", y como el mismo ha sido revisado y aprobado por usted se autoriza su impresión; así como la iniciación de los trámites correspondientes para la celebración del examen profesional.

Sin otro particular, le reitero las seguridades de mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., 27 de septiembre de 1995  
EL JEFE DE LA UNIDAD

  
Lic. ALBERTO IBARRA ROSAS

c c p Asesor de Tesis.  
c c p Interesado.

AIR/la.



A LA GRAN MEMORIA DE NUESTRO PADRE:

JUAN CARLOS VENTURA

A NUESTRA MADRE:

MARGARITA E. VELAZCO HERNANDEZ

GRACIAS POR DEDICARNOS PARTE DE SU EXISTENCIA Y POR AYUDARNOS E  
IMPULSARNOS CONTINUAMENTE A LA TAREA DE SUPERACIÓN COMO PERSONAS Y  
PROFESIONISTAS. HEMOS LUCHADO FUERTES Y COSECHADO NUESTRO MEJOR  
MOMENTO. CON LO QUE FINALMENTE ALCANZAMOS TODA LAS METAS DESEADAS  
A LO LARGO DE NUESTRA VIDA. LO CUAL ES AHORA UNA REALIDAD QUE FUERTES  
COMPARTIMOS.

GRACIAS A:

NUESTROS HERMANOS.

MARIA GILDA ANGELES, MARIA DEL CARMEN TRINIDAD JIMENEZ Y MARIA ROSA,  
CON TODO NUESTRO CARIÑO, POR EL APOYO DESTACADO ASÍ COMO SU  
COMPRESIÓN DURANTE NUESTRA VIDA Y ESTUDIOS

A NUESTROS AMIGOS, ESCUELA Y A TODOS LOS PROFESORES  
QUE COLABORARON EN NUESTRA FORMACIÓN ESCOLAR.



## PREFACIO

El propósito de este trabajo está enfocado a familiarizar al estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón con la Ingeniería de Procesos, dada la relación existente con esta área de la ingeniería no es difícil que el estudiante llegue a tener contacto con ella durante su vida profesional.

El Consejo Técnico Universitario ha designado cinco temas para impartir el curso de la Asignatura de Ingeniería de Procesos Industriales que se han tomado como base para la elaboración de esta tesis. El primero de ellos trata sobre la evolución histórica de la Ingeniería de Procesos, así como los fenómenos económicos actuales en el mundo y su repercusión a la industria mexicana. Se menciona como se encuentran divididas las industrias en determinadas agrupaciones y se sitúa la industria química en estas clasificaciones y se menciona la interacción de la Ingeniería Mecánica Eléctrica con la industria de procesos.

El Segundo tema está dedicado a presentar las reglas y procedimientos para elaborar los diagramas empleados en ingeniería de procesos. Esto se hace utilizando los procesos de las industrias típicas de nuestro país para usarlo como modelo del proceso. Haciendo notar la diferencia entre las formas diferentes de elaboración de diagramas, utilizando simbologías, códigos y algunos otros artificios como pueden ser líneas con letras, códigos, etc., además se da una explicación generalizada de estos procesos dividida en las siguientes secciones: Introducción, proceso de fabricación y para algunos procesos se menciona el aspecto ambiental.

Para poder entrar al tercer tema que está designado a los balances de materia y energía, se debe hablar primero sobre lo que son las operaciones unitarias. Después a partir de los enunciados de las leyes de conservación de materia y energía para sistemas abiertos se comienza el planteamiento de las ecuaciones de continuidad para operaciones unitarias y se hacen ejemplos numéricos con los que se establece la importancia de hacer estos balances.

En el cuarto tema con los conocimientos adquiridos sobre operaciones unitarias se tratan los fenómenos de transporte en los equipos que más se utilizan en las industrias de proceso como son Tuberías, Bombas, Intercambiadores de Calor, Evaporadores, Torres de destilación, Torres de enfriamiento, Reactores y Secadores.

El último tema está compuesto por las características y composición de los principales materiales utilizados en la ingeniería, así como el análisis de el fenómeno de la corrosión a través de los conceptos de oxidación y reducción, también se muestran algunas formas de corrosión que ocurren a medio ambiente y se dan métodos para su prevención.

Para terminar se da un apéndice que contiene algunos tipos de Diagramas de flujo, así como Simbología y Claves para equipo de proceso y Diagramas de Selección de Materiales considerando propiedades de las sustancias a que estén expuestos y de los propios materiales.







Esperamos que nuestra contribución para la elaboración de estos apuntes cumpla con el proceso de enseñanza y aprendizaje, pero es importante recalcar al lector que si desea ahondar más en el conocimiento de algún tema o punto específico debe consultar la bibliografía indicada y si con esto no se está conforme se sugiere investigar en obras específicas.

De manera muy especial queremos expresar un agradecimiento a todas aquellas personas que contribuyeron a que se hiciese posible esta tesis, ya que sería injusto no mencionar su importante aportación.

Jesús Antonio Chico Venancio.  
Julián Chico Venancio.



## TEMARIO



## TEMARIO

### TEMA I.

#### INTRODUCCIÓN.

	PAG.
I.1 Evolución histórica del diseño de procesos.	5
I.2 Fenómenos económicos actuales en el mundo.	10
I.3 Agrupación de las industrias en México.	11
I.4 Relación de la IME con la Ingeniería de procesos.	12

### TEMA II.

#### DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE FLUJO.

II.1 Diagramas de flujo.	15
II.2 Planos de Proceso.	19
II.3 Proceso de Obtención del Azufre.	21
II.4 Proceso de Obtención del Ácido Sulfúrico.	25
II.5 Proceso de Obtención de la Sosa.	32
II.6 Proceso de Obtención del Cloro.	35
II.7 Fabricación del Jabón.	39
II.8 Fabricación de Detergentes.	45
II.9 Proceso de Tratamiento de Aguas Residuales.	53
II.10 Fabricación del Azúcar.	63
II.11 Proceso de Obtención de la Celulosa.	79
II.12 Proceso de Obtención del Papel.	88
II.13 Fabricación del Cemento.	98

### TEMA III.

#### BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.

III.1 Operaciones Unitarias.	119
III.2 Ley de la Conservación de la Masa.	120
III.3 Balances.	121
III.4 Cálculos para los Balances de Masa.	125
III.5 Balances De Masa en Procesos de Unidades Múltiples.	136
III.6 Ley de la Conservación de la Energía.	139
III.7 Formas de Energía.	140
III.8 Balances de Energía en Sistemas Abiertos.	141
III.9 Procedimientos para el Balance de Energía.	146





<b>TEMA IV. FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN EQUIPO DE PROCESO.</b>	<b>PAG.</b>
IV.1 Tuberías.	153
IV.2 Bombas.	168
IV.3 Intercambiadores de Calor.	180
IV.4 Evaporadores.	194
IV.5 Torres de Destilación.	205
IV.6 Torres de Enfriamiento.	220
IV.7 Reactores.	235
IV.8 Secadores.	247
<b>TEMA V. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS.</b>	
V.1 Características y Composición de los Metales.	259
V.2 Materiales para Altas y Bajas Temperaturas.	263
V.3 Preámbulo a la Corrosión.	266
V.4 Teoría de la Corrosión.	270
V.5 Mecanismo General de la Corrosión.	271
V.6 Factores que Influyen en la Corrosión.	274
V.7 Formas de Corrosión.	276
V.8 Métodos de Control de Corrosión.	293
V.9 Guía de Preparación para Recubrimientos.	294
V.10 Teoría de los Recubrimientos.	299
V.11 Tipos de Recubrimientos.	299
<b>CONCLUSIÓN.</b>	<b>305</b>
<b>APÉNDICE.</b>	<b>309</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>353</b>



**TRABAJO DE TESIS:**  
**"IMPLEMENTACIÓN DE APUNTES PARA LA  
ASIGNATURA DE INGENIERÍA DE PROCESOS  
INDUSTRIALES DE LA CARRERA DE INGENIERO  
MECÁNICO ELECTRICISTA DE LA E.N.E.P.  
ARAGÓN".**

**OBJETIVO GENERAL:**

OFRECER A LOS ALUMNOS UN PANORAMA DE LAS INDUSTRIAS DE PROCESOS MÁS SIGNIFICATIVAS EN MÉXICO, INCLUYENDO UNA INTRODUCCIÓN A LAS OPERACIONES UNITARIAS QUE LAS COMPONEN. ADEMÁS DE LAS SESIONES NORMALES EN EL SALÓN DE CLASES SE REALIZAN VISITAS A VARIAS PLANTAS INDUSTRIALES PARA ENRIQUECER EL CONOCIMIENTO DE LOS ALUMNOS.

## TEMA I INTRODUCCIÓN.

### OBJETIVO:

OFRECER AL ESTUDIANTE UN PANORAMA DE LA INDUSTRIA DE PROCESOS Y DEL PAPEL QUE EN ELLA JUEGA LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.



## INTRODUCCIÓN

### I.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL DISEÑO DE PROCESOS.

Hasta hace menos de medio siglo el diseño de un proceso estaba a cargo fundamentalmente del químico, quien para ello se basaba en la reacción en síntesis de que había seleccionado en el laboratorio. Usualmente la primera fábrica industrial no era muy grande (la demanda de un mercado de todavía incipiente para ese producto no justificaba una gran escala de producción) y por lo tanto no se invertía mucho esfuerzo en optimizar cada parte del proceso. Predominaba la preocupación de duplicar las especificaciones de calidad de la primera producción experimental, ya que ella había servido de base para establecer la norma del mercado, y el renglón más importante del costo solía ser el de las materias primas.

Los dos cambios principales que se reconocían al pasar del laboratorio a la planta industrial (en aquel entonces no era muy usual el trabajo en planta piloto) eran la necesidad de definir materiales de construcción y el manejo de los materiales de proceso. Típicamente, en el laboratorio es fácil utilizar equipo de vidrio, y el manejo de materiales se puede hacer a mano, levantando y moviendo todo el recipiente y vertiendo su contenido en el recipiente que se va a utilizar a continuación.

El manejo de volúmenes mayores de producción requería de recipientes que no era factible hacer de vidrio, por lo que había que recurrir a materiales de construcción menos frágiles. El acero presenta muchas ventajas, pero muchos productos químicos lo atacan, contaminando la reacción y corroyendo el equipo. Muchos de los equipos usados en esa época se construían de madera más inerte ante muchos productos químicos. Como el equipo de vidrio de laboratorio no se presta para operar a grandes vacíos o a grandes temperaturas o presiones, la gran mayoría de los procesos industriales se diseñaron a presión atmosférica y temperaturas moderadas. No fue sino hasta muchos años después cuando se reconoció la influencia de la temperatura sobre la velocidad de la reacción (una regla frecuentemente usada es suponer que por cada 10°C de aumento de temperatura se duplica la velocidad de la reacción). Mientras se creaba la conciencia del gran potencial que ofrecen estas interrelaciones fisicoquímicas para optimizar un proceso, se seguían usando tanques y reactores de acero o de madera, abiertos a la presión atmosférica, que copiaban a los matraces y retortas de vidrio usados en el laboratorio.

El manejo de materiales se concebía nada más como un problema por resolver al transvasar de un tanque a otro. La tecnología disponible llevó a la solución obvia: tuberías y bombas o, alguna que otra vez, flujo por gravedad.

Cada proceso se seguía considerando como un todo, y solo se descomponía en sus partes para diseñar cada recipiente siguiendo los principios de analogía geométrica, y para mover el material de un recipiente al otro. Esta consideración global, que se ha perdido con la especialización, incluía desde el conocimiento de las materias primas hasta el de las especificaciones del producto final, pasando por las reacciones alternativas y el equipo disponible, todo ello dentro del contexto de un conocimiento íntimo del medio en el cual se estaba desarrollando ese proceso.





Para los procesos más comunes (nitración, sulfonación, acetilación, cloración, hidrólisis) se fueron desarrollando soluciones paquete, fuertemente perjudicadas por la mezcla de condiciones que fueron influyendo en su desarrollo evolutivo.

Al seguir creciendo la demanda de esos productos en el mercado, se aumentaba la capacidad mediante la repetición del mismo diseño una y otra vez, ya que los materiales y las técnicas de construcción de equipo disponibles en los años treinta hacía difícil aumentar mucho el tamaño de un equipo. Una vez llegado al límite de volumen de un reactor (entre 2000 y 5000 l) o de un tanque de madera (de 5000 a 15000 l) el siguiente paso era repetir ese diseño. Así en aquella época en las grandes industrias químicas de Alemania, Francia e Inglaterra crecieron verdaderos bosques de idénticos conjuntos de proceso.

La demanda de materiales estratégicos durante la Segunda Guerra Mundial y la demanda creciente de productos después de la guerra para satisfacer mercados cada vez mayores de una clase media activamente consumidora obligan a buscar otras soluciones. Por un lado, se formaliza el concepto de las operaciones unitarias; por el otro, se reconoce el extraordinario potencial del proceso continuo en la industria química. Ambos conceptos tuvieron como consecuencia la generación de una nueva profesión: la de ingeniero químico. El químico industrial se dejaba llevar por el prejuicio de pensar en función de nitraciones, reducciones, hidrólisis, etc. y concedía un segundo lugar al como filtrar, destilar, secar o transportar los materiales, todos ellos fenómenos físicos o, a lo sumo, fisicoquímicos. Requirió un cambio radical de estructura mental llegar a reconocer que quizás se podría alterar la reacción para satisfacer ciertas condiciones del proceso. Hasta entonces, si se podía hacer en el laboratorio, se podía hacer igual o mejor en la planta, y no había argumentos suficientemente fuertes, en la mayoría de los casos, que hiciesen al químico cambiar las condiciones de su proceso por miedo a alterar las especificaciones y el rendimiento del producto final. Un caso anecdótico que ilustra el punto es que hasta no hace muchos años, todavía existían procesos industriales que llevaban a cabo cierta etapa de la reacción de 15 a 18 horas, tiempo heredado del estudio de laboratorio en que se dejaba una reacción trabajando toda la noche para venir a terminarla a la mañana siguiente.

El rápido aumento de la demanda crea una gran competencia, que trata de superarse ofreciendo nuevas variedades del producto con especificaciones cada vez más estrictas, y preocupándose por reducir costos para poder competir favorablemente a los precios del mercado.

La formalización del concepto de operaciones unitarias como disciplina de la ingeniería de procesos permitió dar un gran paso adelante a la productividad de la industria química, al estimular la formación de expertos dedicados a optimizar una sola operación unitaria, mediante el estudio a fondo de sus mecanismos, de las variables de las que dependía y de los mejores equipos para llevarla a cabo. La interacción del químico tecnólogo, conocedor del producto y de los pasos necesarios de la reacción química para obtenerlo, con los ingenieros químicos conocedores de cada operación unitaria, permitió en las últimas cuatro décadas optimizar los procesos, aumentar su capacidad de producción, disminuir los costos (muy en especial los derivados del uso de la mano de obra, cuyo costo subió rápidamente en estas cuatro décadas, en paralelo con el aumento de productividad) y mejorar la







confiabilidad del equipo. Permitió también normalizar las características del equipo, sus materiales de construcción, la seguridad en su manejo y la evolución hacia más y mejores variedades de equipo, favorecida por la especialización, es uno de los aspectos más importantes que tenemos que tomar en cuenta cuando, años después y en otro país, con circunstancias diferentes, nos abocamos a la tarea de rediseñar el proceso, ya que si bien es cierto que en su tiempo ayudo a optimizar dicho proceso en el contexto en que se estaba comercializando, también es cierto que a través de los años da lugar a muchos prejuicios implícitos a descartar otros tipos de equipo o simplemente al pasar por alto la posibilidad de considerarlos.

Al mismo tiempo, el desarrollo del concepto del proceso continuo dio lugar a otra herramienta poderosa en el diseño de procesos: la teoría de fenómenos de transporte, que no se formalizó como tal sino hasta la década de los cincuenta.

El proceso continuo aumenta la productividad de la planta por dos razones principales: si llega a un equilibrio en las condiciones del proceso (en el estado estacionario o de régimen permanente) que permite un mejor sobre un flujo más grande de los materiales, y al combinar la reacción y la separación con el manejo de materiales reduce las necesidades del equipo y de personal para operarlo.

Así como el químico tecnólogo de principios de siglo tenía como objetivo principal entender el mecanismo de la reacción para mejorar su rendimiento, el del ingeniero químico de operaciones unitarias ha sido minimizar el costo de mover, separar y purificar los productos finales; la teoría de fenómenos de transporte se desarrollo para entender mejor las complejas interrelaciones de las variables y de los parámetros fisicoquímicos para poder explorar mejores rangos de presiones y temperaturas muy distintos a los atmosféricos que pudiesen dar lugar a condiciones de equilibrio y velocidad de la reacción, más favorables desde un punto de vista económico.

La tecnología producida por la combinación de la teoría de los fenómenos de transporte y el concepto de proceso continuo capitalizó otros muchos desarrollos de los últimos 40 años: mejores materiales de construcción, mejores técnicas de diseño y fabricación de equipo, herramientas matemáticas complejas que permitieron la simulación en una computadora de las condiciones de un proceso, y sobre todo, el uso intensivo de la experimentación en planta piloto, ya que las nuevas condiciones de operación de estas tecnologías hacen impráctico en muchos casos el trabajo en banca de laboratorio. El otro factor implícito en el desarrollo de estas tecnologías, aunque no necesariamente intrínseco a su concepción, es la gran escala de producción para la que están diseñadas, resultando de los grandes mercados de los veinte años.

En este mismo período surge otro cambio fundamental: el reconocimiento de la necesidad de los llamados países subdesarrollados, o en su desarrollo, de alcanzar un nivel de industrialización que genere empleos para su población y que produzca productos que satisfagan las necesidades de sus clases medias en constante crecimiento.

El fenómeno que ocurre en estos países, aunque ampliamente cubiertos en la literatura, es de tal importancia en el tema que nos ocupa que vale la pena volverlo a mencionar aquí.





Lo que se conoce como mundo subdesarrollado, Tercer mundo, o países en desarrollo, representa más de la mitad de la superficie terrestre, con más de las tres cuartas partes de la población, menos de 15% de la generación total de riqueza (medida en términos del producto nacional bruto) y fragmentado en más de 120 países con gobiernos independientes y normalmente nacionalistas. La situación se agrava más si se considera que de ese 15% de la riqueza mundial a repartir entre las tres cuartas partes de la población a menos de 20% de la población recibe más de 80% de la riqueza y 80% de la población vive a niveles de subsistencia con ingresos menores a los 200 dólares per capita por año.

Es interesante observar sin embargo que este nivel de ingresos se ha mantenido prácticamente constante en los 5 a 8000 años de historia de la humanidad de que se dispone información. Haciendo un recordatorio la población bajo el imperio Han chino, el imperio Romano y aún la población tan cercana a nosotros como la del siglo de oro del imperio Español (siglo XVI) tenía un ingreso promedio per capita que oscilaba entre los 100 y los 300 dólares al año. No es sino hasta hace poco más de dos siglos cuando unos cuantos países empiezan a despegarse de esta tendencia con un crecimiento geométrico del ingreso per capita que hoy en día sobrepasa en Japón, Estados Unidos y algunos países de Europa los 4 y 5000 dólares por año.

En los países subdesarrollados, en las últimas tres décadas, se ha estado buscando la forma de reproducir aceleradamente este fenómeno de despegue que ocurrió en los últimos doscientos años en forma natural en los pocos países hoy conocidos como "industrializados". La Segunda Guerra mundial trajo como consecuencia muchos cambios económicos, políticos y sociales: la gran demanda de materias primas permitió la acumulación de divisas en muchos países subdesarrollados y los desarrollos socio-tecnológicos en el campo de las comunicaciones ha coadyuvado, cada una desde un ángulo distinto, al deseo, la necesidad y la oportunidad de fomentar el desarrollo económico a través del crecimiento industrial.

Una característica común en casi todos los planes de industrialización de estos países en desarrollo en los últimos 30 años ha sido la presión del tiempo: la urgencia de llevar a cabo ciertas etapas con rapidez capitalizando las oportunidades existentes aun a costa de sacrificar eficiencia, productividad, independencia tecnológica, etc., por satisfacer cuanto antes la creciente demanda social de empleos, de más actividad económica y de mayor disponibilidad de bienes y servicios. Esta presión a llevado a tomar muchas veces el camino fácil, aunque no necesariamente el mejor a largo plazo y entre otras cosas, ha resultado en el uso indiscriminado de tecnologías, descuidando la selección y la adaptación de las mismas, sin pensar en otras opciones para una tecnología apropiada, tanto en sus productos como en sus insumos y en su metodología.

Ahora bien ¿Porque hablamos de la necesidad de una tecnología apropiada? Se ha hablado tanto de ese punto en los últimos años que podría parecer redundante el hablarlo una vez más. Sin embargo, es importante volver a poner énfasis, en forma explícita y objetiva en aquellos aspectos que hacen importante la necesidad de una tecnología adecuada.





En primer lugar están los aspectos de escala y uso relativo de capital y de mano de obra. La tecnología química que hoy se usa comercialmente es muy nueva, en los últimos casos desarrollada en las últimas dos o tres décadas. Más de 95% de esa tecnología ha sido desarrollada por unos pocos países altamente industrializados, en medio de su fuerte competencia en el mercado, que hacen necesario buscar todas las posibles economías. En la mayoría de los subsectores de la industria química se pueden encontrar alternativas tecnológicas muy sensibles a las economías de escala, lo que ha favorecido la concentración de la producción en unas cuantas fábricas de gran tamaño. Puesto que el desarrollo de estas tecnologías se ha hecho en países en donde la mano de obra es cara, se ha buscado sustituirla con equipo, que es más barato que en los países en desarrollo. Además como los volúmenes de producción son altos unas cuantas horas de pérdida de producción representan mucho dinero lo que justifica la instalación de mucho equipo de control, equipo auxiliar o secundario o equipo de emergencia.

En segundo lugar, es conveniente recordar que la mayoría de las zonas industriales del mundo se encuentran en regiones de climas extremos y a nivel del mar, mientras que las zonas industriales de muchos países en desarrollo están situadas en altitudes superiores a los 1000 m sobre el nivel del mar y en regiones tropicales, subtropicales o desérticas. Esto da lugar a cambios importantes en el diseño, unos a favor y otros en contra. Por ejemplo la temperatura afecta en forma directa a la velocidad de reacción; la presión influye indirectamente sobre la temperatura de la reacción y puede afectar en forma directa o inversa la velocidad de reacción y el rendimiento. Las diferencias de clima pueden hacer innecesario el uso de aislamientos de ventilación y calefacción, de estructuras para soportar cargas de nieve, etcétera.

En tercer lugar está el aspecto de los productos finales. La alta competencia en el mercado de países industriales hace que se ofrezcan muchos tipos y subtipos del mismo producto, incorporándoles a veces propiedades superfluas solo por hacerlos más atractivos al consumidor, o que resultan superfluas en un mercado limitado. Como ya se menciona anteriormente, un análisis cuidadoso de este punto suele producir valiosas economías.

Hay una consideración más, cuya importancia le concede mayor prioridad que a todas las anteriores: todas nuestras consideraciones se basan en la premisa de que la tecnología es buena porque fomenta una industria productiva y que esta a su vez es buena para un país porque lo ayuda a desarrollarse y mejora la calidad de vida de sus habitantes. Ahora bien, en los países en desarrollo solo un 20% de la población se beneficia de este tipo de industrialización basada en tecnologías modernas, y el 80% restante sigue marginado.

Las consideraciones anteriores, de implementarse adecuadamente, pueden hacer que ese 20% reciba productos cada día más asequibles, al ir adaptando tecnologías cada vez con más éxito, pero no ayudaran mucho al otro 80%, que requiere:

- ♦ Más fuentes de trabajo, y es preciso reconocer que la tecnología química moderna no es una gran fuente de empleo en función del capital que requiere.
- ♦ Productos más adecuados a sus recursos y necesidades. Es necesario diseñar productos factibles, idóneos al nivel de ingresos de ese 80% de la población que





vayan mejorando sus condiciones de vida en forma paulatina. Mejorando implementos agrícolas y productos agroquímicos para el pequeño agricultor sin recursos; mejores equipos pesqueros; mejores materiales para que el individuo pueda construir su propia casa, rural o urbana; medio de transporte, etcétera.

- Métodos (procesos) para producir mejor y a menor precio todos esos productos, junto con sistemas de distribución y financiamiento más adecuados a las necesidades de ese grupo.

## 1.2 FENÓMENOS ECONÓMICOS ACTUALES EN EL MUNDO

Debido a que la competencia internacional se agudiza, los países han optado por organizarse en agrupaciones, esto con el fin de llegar a sumar esfuerzos y llegar a tener mejores perspectivas económicas, es por esto que los países que no se lleguen a agrupar se atrasarán.

La revolución científica y tecnológica permite producir mayores cantidades de bienes, mejor hechos y más baratos que compitan en todos los mercados. Para lograrlo los países necesitan:

- Reglas claras y permanentes que aseguren un clima de confianza.
- Acceso a tecnologías variadas.
- Sumar y aprovechar las ventajas de cada país.
- Especialización en la producción de ciertos productos.
- Mercados amplios que permitan bajar el costo por unidad producida.

Entre las agrupaciones que se han formado en el mundo mencionaremos a la **Comunidad Europea** que cuenta con 323 millones de habitantes y 4.3 billones de dólares de producto interno bruto (PIB), entre los países que lo conforman se encuentran el Reino Unido, Portugal, España, Francia, Italia, Grecia, Alemania y Holanda. Otra agrupación que podemos mencionar es la **Cuenca del Pacífico** que esta encabezada por Japón, ellos han utilizado exitosamente los llamados "procesos de producción compartida" que quiere decir que un producto combina partes fabricadas en Corea, Taiwan, Hong Kong o Singapur. También el **América Latina el Pacto Andino** y el **Mercosur** son intentos para sumar esfuerzos en América del Sur.

Debido a esta nueva dinámica de cambio los países que no se incorporen corren el riesgo de quedarse solos, sin nuevas tecnologías, fuera de las corrientes de inversión y sin acceso a los grandes mercados. Ello se traducirá en falta de empleos, bajos salarios y productos caros o de mala calidad.

Por lo que respecta a nuestro país se ha asociado con Canadá y los Estados Unidos en el **Tratado de Libre Comercio (TLC)** que se supone creará la zona de libre comercio más grande del mundo con 358 millones de habitantes y un producto interno bruto de seis billones de dólares con lo que superaría a la Comunidad Europea y a la Cuenca del Pacífico. Además nuestro país ha establecido relaciones para tener pactos de libre comercio con países Centroamericanos y de América Latina.





### 1.3 AGRUPACIÓN DE LAS INDUSTRIAS EN MÉXICO.

Las industrias en México están divididas en diversas agrupaciones y están conformadas por Cámaras y Asociaciones, así podemos encontrar por ejemplo a la Cámara Nacional de la Industrias de la Celulosa y el Papel, a la Cámara Nacional de la Industria Azucarera y Alcohólica, a la Cámara Nacional de la Industria del Cemento, a la Cámara Nacional de la Industria de Aceites, Grasas y Jabones, por mencionar algunas y estas a su vez se encuentran afiliadas a un organismo Cúpula al que se le denomina CONCAMIN (Confederación de Cámaras Industriales). Aunque no se ahondará en este punto es importante hacer mención que aparte de estos tipos de industrias existe la micro, pequeña y mediana industria.

La industria Química ha formado una Asociación que se identifica con las siglas de ANIQ (Asociación Nacional de la Industria Química) y esta dividida en diversos sectores con la finalidad de facilitar el intercambio de experiencias y crear un foro permanente y representativo en el cual se planteen los problemas que afectan al sector y se busquen soluciones conjuntas a los mismos.

Existe una incertidumbre en lo que respecta al tratado de libre comercio debido a la turbulencia de eventos sociales políticos y económicos acaecidos en nuestro país, que sacudieron no solo a los mexicanos, sino al mundo entero, han dejado, además de la crisis financiera en la que se encuentra sumergido nuestro país, una secuela de grandes cuestionamientos acerca del modelo neoliberal aplicado en México y aparentemente con éxito en otras economías emergentes.

A pesar de que el año pasado fue un buen año para la industria química, los efectos de la devaluación drástica e inesperada, provocaron de manera inmediata una súbita descapitalización para las empresas de este sector, inmersas en procesos cotidianos de comercio internacional, además de un grave deterioro en sus flujos de efectivo. Sin embargo fue un buen año en términos de volumen y en la mayoría de los casos en rendimientos sobre costos de operación pero dramáticamente afectados por pérdidas cambiarias y costos financieros.

Frente a la súbita contracción de la demanda interna, no se puede ni se debe soslayar, el daño eventualmente irreversible, que se puede causar a la industria y particularmente a la industria química, que depende, por su característica de industria global, de un mercado interno sólido y proporcionalmente grande y competitivo mercado hoy seriamente constreñido por la crisis.

México tiene la gran ventaja, de la cual carecen muchos otros países, de contar con grandes reservas de hidrocarburos, con costo de exploración y extracción muy competitivos. Lamentablemente por la falta de recursos presupuestales para aumentar la capacidad de producción de energéticos y petroquímicos reservados al Estado, se ha ocasionado un déficit casi permanente en el suministro de muchos de ellos.

El futuro de la industria química se vislumbra prometedor se considera el enorme potencial de su mercado interno, la amplia base de recursos naturales con los que dispone, las oportunidades que se generan como resultado de los cinco tratados de





libre comercio firmados por México y el comportamiento favorable del ciclo Internacional de precios.

Sin embargo, para poder crecer y afrontar con éxito los retos del futuro, la industria química mexicana requiere decisiones fundamentales de gobierno.

#### **I.4 RELACIÓN DE LA IME CON LA INGENIERÍA DE PROCESOS.**

Es primordial mencionar que la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica crea profesionistas que utilizan los conocimientos de las ciencias físicas y matemáticas y las técnicas de Ingeniería, de economía, y de administración, para transformar la naturaleza por medio de dispositivos mecánicos y eléctricos en beneficio de la sociedad y para optimizar la integración y el funcionamiento de sistemas productivos por hombres y máquinas.

Dado que en la Ingeniería de Procesos se trata sobre el desarrollo, evaluación y diseño de procesos químicos, el ingeniero mecánico eléctrico puede intervenir en la planeación, diseño, fabricación, instalación, operación y mantenimiento de máquinas y dispositivos mecánicos, de sistemas eléctricos de potencia, de maquinaria eléctrica, dispositivos y sistemas electrónicos, de comunicación y control automático y además tiene a su cargo la integración de sistemas productivos formados por hombres, máquinas y otros recursos, con el propósito de aumentar la productividad social de dicho sistema.

Podemos mencionar con un sencillo ejemplo esta interacción. En la ingeniería de procesos son usados equipos de transferencia de masa como son intercambiadores de calor, bombas, evaporadores, cristalizadores, etc.,. El ingeniero mecánico esta capacitado para realizar el diseño, instalación y mantenimiento de estos equipos.

En cuanto a la relación que tiene la Ingeniería Mecánica Eléctrica con la Ingeniería Química se puede mencionar este vínculo en una forma global por ejemplo la Ingeniería Mecánica se relaciona con la Ingeniería Química en lo referente a la Tecnología de Transporte de materia y energía y el intercambio de masa calor y momentum. Y su relación con la ingeniería Eléctrica es con respecto a Celdas Electrolyticas, Corrosión, Galvanoplastia, Procesos Termoeléctricos y por último Calderas y Hornos Eléctricos.



**TEMA II**  
**DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS DE FLUJO.**

**OBJETIVO:**

**EJERCITAR AL ESTUDIANTE EN EL USO E INTERPRETACIÓN DE LOS DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS MÁS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS.**



## II.1 DIAGRAMAS DE FLUJO.

Para el ingeniero químico es muy importante poder usar el balance de materiales y energía, y el diagrama de flujo, ya que este lo ayudará para poder visualizar y resolver sus problemas de diseño y operación de una manera más rápida y directa.

Bosquejar un diagrama de flujo es una manipulación casi instintiva para el ingeniero químico experimentado. En el diseño y construcción de una planta, un diagrama de flujo más completo, llamado de ingeniería de flujo de proceso, se convierte en el engrane vital para transmitir la información de proceso a todos los departamentos de un grupo de ingeniería de diseño.

**DIAGRAMA DE CUADROS.**- El diagrama de cuadros es el más simple, pero el menos descriptivo de los diagramas esquemáticos. Como su nombre lo indica, consiste en un cuadro que por lo general representan una sola operación unitaria en una planta, o bien, toda una sección de la planta. Estos cuadros están conectados por flechas que indican la secuencia del flujo.

El diagrama de cuadro es un extremo muy útil en las etapas iniciales de un estudio de proceso y es particularmente valioso para presentar los resultados de estudios económicos u operaciones, ya que dentro de los cuadros pueden colocarse los datos significativos.

**DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO.**- El diagrama de flujo de proceso, es utilizado con mayor frecuencia por el ingeniero de proceso en trabajos de diseño y en estudios de proceso. Debe estar dibujado de manera que el flujo y las operaciones de proceso destaquen de inmediato. Esto se logra omitiendo todo aquello que no sea esencial, utilizando frecuentes flechas para indicar la dirección del flujo, empleando líneas más gruesas para las líneas principales de flujo, e indicando temperaturas, presiones y cantidades de flujo en diversos puntos significativos del diagrama. Se presentan ciertos datos pertinentes del diseño de proceso, tales como la capacidad en servicio de cambiadores de calor, datos de diseño de recipientes y requerimientos especiales, como las elevaciones requeridas de cierto equipo.

A menudo se usan símbolos convencionales para renglones estándar de equipo, tales como bombas y cambiadores de calor. Excepto cuando se necesitan para dar claridad al proceso las válvulas, líneas de servicio y partes de repuesto del equipo se omiten. Únicamente se ilustran instrumentos esenciales al control del proceso.

Los principales criterios para un buen diagrama de flujo de proceso son la claridad, la exactitud y la utilidad. Este diagrama se usa en todas las fases iniciales del diseño de la planta y muchos ingenieros deben observarlo y comprenderlo.

**DIAGRAMA GRÁFICO DE FLUJO.**- Se utiliza con más frecuencia en publicidad, reportes financieros de compañías e informes técnicos, en los cuales ciertas características del diagrama de flujo requieren énfasis adicional. Pocas reglas pueden sugerirse para este tipo de diagramas, dado que muchas veces cierta desusada originalidad logra más efectivamente el propósito deseado. Este diagrama debe







presentar de manera clara la información deseada y de un modo fácil de apreciar y que además de novedoso sea informativo.

**DIAGRAMA DE INGENIERÍA DE FLUJO DE PROCESO.**- Durante las etapas iniciales del estudio y desarrollo del proceso, los diversos diagramas esquemáticos de flujo sirven bastante bien. Cuando los cálculos de proceso están terminados y se ha hecho el contrato de construcción, se requiere el diagrama de ingeniería o mecánico de flujo, más completo.

Este diagrama es la fuente central de información para todos los grupos de diseño. Estos grupos incluyen diseñadores en los aspectos eléctricos, de tuberías, estructuras, instrumentos, mecánica, etc. Dado que tantas personas de diferentes disciplinas se deben referir a él, la estandarización es esencial, con objeto de evitar confusiones innecesarias. Ninguna información importante debe ser omitida ni información inútil alguna debe ser incluida.

Los puntos principales que deben ser incluidos en un diagrama de ingeniería de flujo de proceso, son los siguientes:

1. **EQUIPO DE PROCESO.**- En el diagrama se muestran todos los renglones de equipo de proceso, incluyendo los de repuesto. Por lo general se emplean vistas sencillas de elevaciones, pero alteradas de tal modo que todas las conexiones aparezcan sobre el plano del diagrama. No es práctico hacer estos diagramas a escala, puesto que los equipos más pequeños serían reducidos a tamaños indebidos. Sin embargo, se recomienda conservar una cierta proporción en las diferencias relativas de tamaño, por lo cual a veces se puede lograr utilizando diferentes escalas en lo horizontal y en lo vertical.
2. **NOTACIONES.**- Adyacentes a cada renglón de equipo, se debe proporcionar cierta información esencial. Estas notaciones deben suministrar de una manera concisa los datos requeridos por cada usuario del diagrama. La experiencia ha dictado la información que requieren ciertos renglones comunes de equipo como bombas y recipientes. Para equipo especial, con frecuencia se dan las dimensiones globales y las principales características de operación. Se han sugerido las siguientes notaciones.

DESIGNACIÓN DE EQUIPO TÍPICO			
Bombas	GA	Compresores	GB
Turbinas	GT	Torres de Proceso	DA
Reactores	DC	Homos	BA
Tanques de Almacenamiento	FB	Recipientes de Proceso	FA
Cambiadores de Calor de Tubos y Envolverte	EA	Cambiadores de Calor Enfriados por Aire	EC
Cambiadores de Calor de Tubos Concéntricos	ED	Sistema de Secado de Aire de Instrumentos	PA





3. **NUMERACIÓN INDIVIDUAL.**- A todas las unidades del equipo se les debe de asignar un número individual que debe aparecer junto al equipo. Si el sistema de numeración individual se planea con cuidado, presta una gran ayuda en el uso del diagrama de flujo y en la ejecución de todas las fases del trabajo de diseño y construcción. Un sistema típico que ha sido empleado con éxito en casos en donde la unidad de proceso esta dividida en área o secciones, utiliza una clave, como por ejemplo: GA-101; la letra indica el equipo, en este caso una bomba; el 101 indica que la bomba es la número 1 en el área 100. Si esta bomba tiene un repuesto idéntico, este puede determinarse de la siguiente manera: GA-101A.
4. **INFORMACIÓN DE PROCESO.**- También debe proporcionarse una lista con información importante sobre el proceso. La siguiente son sugerencias importantes para diversos renglones comunes de equipo.
- a) **RECIPIENTES**  
servicios, diámetro, altura, espesor  
características especiales (revestimientos, etc.)  
condiciones de operación  
condiciones de diseño
  - b) **CAMBIADORES DE CALOR**  
servicio, caída de presión  
Área de transmisión de calor  
capacidad en servicio (Kw o BTU/hr.)  
condiciones de diseño  
condiciones de operación (temperatura y presiones a la entrada y a la salida).
  - c) **BOMBAS**  
servicio, tamaño y tipo  
fluido, temperatura de la bomba  
densidad del fluido a la temperatura de la bomba  
gasto en galones por minuto de diseño de la bomba  
carga neta positiva de succión (CNPS)
  - d) **COMPRESORES**  
servicio, número de pasos de compresión  
condiciones de succión, succión en el primer paso  
succión en el segundo paso  
descarga en el segundo paso, potencia al freno  
capacidad (pies cúbicos estándar por minuto SCFM)
5. **TUBERÍA Y VÁLVULAS.**- En los diagramas de ingeniería de flujo se muestran todas las líneas de proceso y líneas de servicio para el equipo de proceso. A menudo las líneas de proceso principal se dibujan mas gruesas a manera que el flujo primario sea mas evidente. Las líneas de servicio se dibujan usando varios símbolos para permitir una fácil diferenciación de los diversos servicios. Todas las válvulas se indican, incluyendo las de retención, pero las bridas y accesorios no se muestran, excepto en el equipo. Dado que el diseñador de tubería emplea el diagrama de flujo como su principal fuente de información, muchos datos deben ser proporcionados en el diagrama. Se deben de suministrar temperaturas y presiones, flujos y descripción de los fluidos. Además se deben dar las





especificaciones para las líneas a modo de que para cada línea también se conozca el tamaño, material y espesor de tubería, clase de brida y capacidad normal de válvulas y accesorios. Esta información puede ser proporcionada por medio de un sistema de numeración de líneas, en la cual cada línea que va de un equipo a otro tiene un número individual.

Estos números pueden registrarse en las mismas formas en las que se registra el flujo, presión, temperatura y fluido. Un sistema típico emplea un número tal como: 3"06403E.

3"	0	6
Tamaño de línea	Clase de fluido	Número de área
403		E
Número de línea		Especificación de tubería

6. **INSTRUMENTACIÓN.**- En este diagrama se deben de mostrar toda la instrumentación para el control, registro e indicación de la operación de la planta. Por lo general, el ingeniero de proceso indica de manera esquemática la instrumentación en el diagrama de flujo de proceso. Posteriormente este diagrama se adiciona al diagrama de ingeniería de flujo con toda la instrumentación requerida. La Sociedad Norteamericana de Instrumentos ha preparado un conjunto de símbolos estándar para instrumentos, los cuales deben ser observados para evitar confusiones.
7. **ARREGLO DEL DIAGRAMA.**- Un arreglo bien planeado del diagrama de ingeniería de flujo puede contribuir bastante a asegurar una eficiente y alta calidad de mano de obra de todas las etapas del trabajo. Si cuando se dibuja el diagrama de flujo se tiene cierta idea del plano real de la distribución de la planta, es muy útil arreglar el diagrama de manera similar en la medida de lo práctico. Dicho arreglo ayuda al personal de distribución de equipo y a los diseñadores de tubería a visualizar la planta lo más rápidamente y evitar el sobreacentamiento de una línea que en realidad puede ser bastante corta, pero que aparece larga debido al arreglo del diagrama de flujo. El diagrama de ingeniería de flujo, para ser leído y entendido con facilidad no debe estar aglomerado. Para representar un proceso, con frecuencia se necesitan varios planos por separado. Las líneas que pasan del equipo de una hoja al de otra, se mantiene a una misma altura a modo de que la línea en la siguiente hoja puede ser encontrada con facilidad.
8. **INFORMACIÓN CONFIDENCIAL.**- Debido a lo completo que resultan, los diagramas de flujo de proceso, los diagramas de ingeniería de flujo y, algunas veces los diagramas de cuadro contienen información confidencial. Nunca deben ser distribuidos libremente, ni su reproducción debe ser permitida por personas desautorizadas. Si se permite que individuos sin escrúpulos copien un diagrama de flujo, ellos pueden obtener una ventaja desleal ya que están evitando el tiempo, esfuerzo y gastos requeridos para producir un diagrama completo de flujo. Dicha práctica viola todos los códigos de ética conocidos.





## II.2 PLANOS DE PROCESO.

Después de terminar los diagramas ingenieriles de flujo y antes que empiece el diseño detallado de conductos, estructuras e instalaciones eléctricas, debe planearse la distribución de las unidades de proceso en la planta, así como el equipo dentro de estas unidades de proceso.

En el diseño de una planta de proceso, la preparación de un plano es la función más importante. Es la clave para una buena operación, para una construcción económica, para una distribución funcional del equipo y edificios y para un mantenimiento bien planeado y eficiente. Una construcción estéticamente agradable y limpia es la clave para mantener buenas relaciones públicas y contentos a los trabajadores y empleados.

**PLANO MAESTRO DE CONJUNTO.**- Con objeto de lograr una mayor claridad, en el plano maestro de conjunto o plano de localización general de equipo, se han omitido las dimensiones. Por lo general, la planta se divide en bloques separados por calles en la forma más conveniente. La localización de las calles y la distribución de los bloques se ve influida por factores numerosos. Algunos de estos factores son:

1. **TERRENO TOPOGRÁFICO.**- El sistema de drenaje puede ser planeado a partir de del plano topográfico del terreno. A continuación pueden escogerse tanto las calles como las áreas generales que van a ser destinadas a las unidades de proceso y a edificios. Para este fin se escogen las áreas que menos necesidad de nivelación tengan y en las que las características de carga del terreno sean mejores. Las áreas de mayor nivel pueden usarse ventajosamente para almacén de productos terminados de tal manera que sea posible la carga por gravedad de carros tanques.
2. **VÍAS DE COMUNICACIÓN.**- Las oficinas y almacenes deberán tener libre acceso a la carretera y los patios de los almacenes así como las áreas para carga de productos deben estar convenientemente localizados en las inmediaciones al ferrocarril más cercano. Si la planta debe tener instalaciones para embarques marítimos, el almacén de productos terminados debe estar en la vecindad de los muelles.
3. **TIPOS DE UNIDADES DE PROCESO.**- Con frecuencia se simplifican la operación, el mantenimiento y la distribución de las instalaciones colocando las unidades semejantes en una sección de la planta.
4. **SERVICIOS GENERALES.**- La planta de energía, talleres, almacén y vestidores, deberán estar localizados no solamente para obtener de ellos la máxima eficiencia y conveniencia sino también para evitar al máximo la interferencia con los procesos de operación.

**PLANOS UNITARIOS.**- Los planos unitarios se preparan en forma similar al plano maestro de conjunto, excepto que los detalles son mayores debido al gran número de elementos que forman la unidad de proceso. En esta etapa principian los modelos a escala y su desarrollo es de gran ayuda para el progreso del diseño. Los pasos a seguir en la preparación de los planos unitarios son:

1. Enlistense todas las piezas del equipo mayor, tales como recipientes, cambiadores de calor, bombas y compresores. Indíquese el tamaño y peso de cada una.





2. Decídase cual equipo deberá estar elevado. Por lo general la elevación del equipo es determinada por los requisitos de succión de bombas o algunos otros requisitos del proceso mismo. La elevación del equipo es siempre costosa y deberá hacerse estrictamente por necesidad de operación satisfactoria del proceso.
3. Estúdiense los procesos de flujo y procedimientos de operación. La secuencia de flujo y la función de cada pieza de equipo deberá ser entendida completamente de tal manera que su distribución en el plano sea funcional.
4. Determinense los métodos de mantenimiento de cada pieza de equipo de tal manera que los equipos que requieren mantenimiento frecuente sean de fácil acceso.
5. Estúdiense todos los peligros de operación, de tal manera que puedan preverse la distribución más segura del equipo.
6. Planéense las áreas de trabajo del equipo de acuerdo a las siguientes reglas:
  - No se acerquen las bombas a más de 3 pies (1.0 mts.), espacios menores dificultan el mantenimiento.
  - El equipo con partes cambiables debe estar distribuido de tal manera que las partes puedan quitarse sin desmantelar grandes longitudes de tubería o tener que mover otros equipos. Es necesario el acceso de grúas móviles.
  - Recuérdese que las cimentaciones, a menudo exceden las dimensiones del equipo que soportan. Por lo tanto, el tamaño de los equipos como el de las cimentaciones deben ser tomados en cuenta.
  - Estúdiense los problemas de instalación de todos los equipos. Siempre que sea posible, su localización debe facilitar la instalación.
7. Estúdiensé los problemas de instalación de todos los equipos. Siempre y cuando esto sea posible, su localización debe de facilitar su instalación.

En la preparación de los planos depende más del juicio basado en la experiencia que de ajustarse a un conjunto de reglas previamente establecidas.

Los diversos tipos de diagramas de flujo y planos enunciados anteriormente los podemos observar en el apéndice. Además se agrega una simbología para la preparación de diagramas de flujo en el mismo apéndice.

Habiendo mencionado a grandes rasgos en este tema mediante los procesos de obtención de azufre, ácido sulfúrico, sosa, cloro, jabones, detergentes, tratamiento de aguas, azúcar, celulosa, papel y cemento respectivamente se podrán observar las diferentes clases de diagramas de flujo que se mencionan anteriormente en los que además se incluyen una explicación generalizada para cada uno de ellos.





### II.3 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL AZUFRE.

**INTRODUCCIÓN.-** El azufre, S, No. atómico 16, Peso atómico 32.064, ésta en el grupo VI, período 3 del sistema periódico de los elementos. Se cree que su nombre se deriva del sánscrito Kulvere a través del latín Sulfurium o Sulfurum.

A pesar de que el azufre es conocido desde hace ya miles de años, se le consideró como una tierra extraña hasta que Antonio Lorenzo Lavoisier demostró que es una sustancia elemental.

El primer azufre industrial de los tiempos modernos es el que se obtuvo en Sicilia a principios del Siglo XV. Pero no comenzó la competencia por la posesión del azufre hasta el año de 1735, cuando se hizo el descubrimiento de un procedimiento para la producción del ácido sulfúrico por medio del azufre.

**ESTADO NATURAL.-** El azufre nativo esta formado en cristales piramidales o tabulares del sistema ortorrómbico. También se le encuentra en masas térreas y estalactitas. Tiene color amarillo brillante, tal vez oscurecido o amortiguado por las impurezas, su lustre es resinoso y la fractura es concoidea e irregular.

Muchos de los depósitos importantes están asociados con caliza, yeso y anhídrita; frecuentemente ocurre que hay materia carbonacéa en forma de petróleo o betún en la roca que contiene azufre o en las formaciones asociadas. El ácido sulfhídrico también ésta presente, ordinariamente, en solución en las aguas de la formación. Se cree que el azufre de estos depósitos procede de los sulfatos asociados.

Se hallan depósitos de azufre en regiones de actividad volcánica, originados por los gases y vapores emitidos por los cráteres activos, las solfataras y las fuentes termales. Estos gases y vapores han depositado el azufre en las fracturas de las rocas o en los sedimentos de los lagos o por reemplazo en la roca misma. Los minerales comunes asociados son la pirita, la marcasita y otros sulfuros, sulfatos y minerales silíceos hidratado, como el ópalo. Los depósitos se encuentran ordinariamente en las tobas, corrientes de lava, y rocas volcánicas análogas; pueden asimismo encontrarse en formaciones sedimentarias e intrusivas.

### MÉTODO DE EXTRACCIÓN.

Un método de extracción es el procedimiento de Frasch en la que el requisito primario es una fábrica de energía que suministre el gran volumen de agua caliente necesario, juntamente con aire comprimido para extraer con bombas el azufre fundido y energía eléctrica para el equipo de perforación de los pozos, iluminación y sostenimiento de las operaciones, equipo de carga del azufre para el embarque y operaciones análogas.

El agua aproximadamente a una temperatura de 163°C y con una presión de 17.5 kg./cm<sup>2</sup>, es inyectada por una tubería de 20 cm. de diámetro y penetra en las formaciones porosas de azufre a través de las perforaciones del extremo inferior del tubo. El calor del agua funde el azufre, el azufre líquido, cuya densidad es





aproximadamente doble que el agua, fluye a través de la roca porosa, y se reúne en un "charco" en el fondo del pozo. Cuando el nivel de este charco sube hasta sumergir la boca del tubo para el azufre, la presión de la formación obliga al azufre fundido a subir hasta cierta altura en el tubo.

Desde este lugar se le eleva hasta la superficie por medio de aire comprimido que se introduce por el tubo para el aire. El agua caliente que se le inyectó se le elimina del campo de operación por medio de pozos de sangrado abiertos en localidades alejadas de la mina con el fin de retener la mayor cantidad posible de calor en el yacimiento. En la superficie, el azufre líquido es transportado por una tubería calentada por vapor hasta un separador donde se le extrae el aire, y después, por medio de la bomba, se le traslada a tinajas de almacenaje en las cuales se le deja solidificar.

Una instalación típica del equipo de un pozo para extracción de azufre se muestra en la fig. II-1.

Además de los depósitos de azufre nativo, otras fuentes, tales como el gas natural sulfurado, el gas de refinería, las piritas y otros minerales sulfurados, y los gases de chimenea de las fundiciones de minerales suministran hoy azufre a los mercados mundiales.

#### PROCESO DE OBTENCIÓN DE AZUFRE DEL GAS NATURAL.

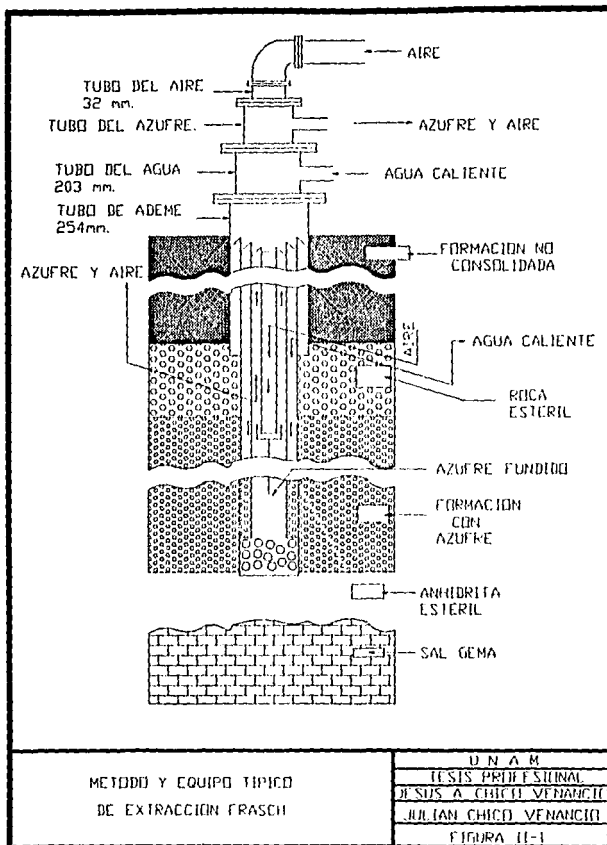
En la primera etapa de este procedimiento, el ácido sulfhídrico es separado del gas crudo. Existen diversos tipos de métodos para poner en libertad el azufre. Uno de ellos es la absorción del ácido sulfhídrico en solución de alquilamina. Por el calor la solución de amina cede el ácido sulfhídrico en forma concentrada y el anhídrido carbónico que pudiera existir en el gas crudo. El gas sulfhídrico concentrado se prende entonces en la cámara de combustión y se quema de tal manera que un tercio de su volumen queda convertido en gas sulfurado. Después de refrigerados, los productos de la combustión pasan por un convertidor en que un catalizador hace que el gas sulfhídrico y el gas sulfurado reaccionen para producir vapor de azufre y vapor de agua. El vapor de azufre se condensa mediante un lavado con azufre líquido.

Además de estos procesos se cuenta con otros procedimientos para la recuperación del ácido sulfhídrico o del azufre de gases de hornos de coque o del gas pobre, entre ellos el Thylox y el de Fenolato de Sodio.

Además existen el proceso Orkla (obtención de azufre de la pirita de cobre) y el proceso Noranda.

El esquema de la Fig. II-2 presenta el esquema de fabricación generalizado para la preparación de azufre con sulfuro de hidrógeno.

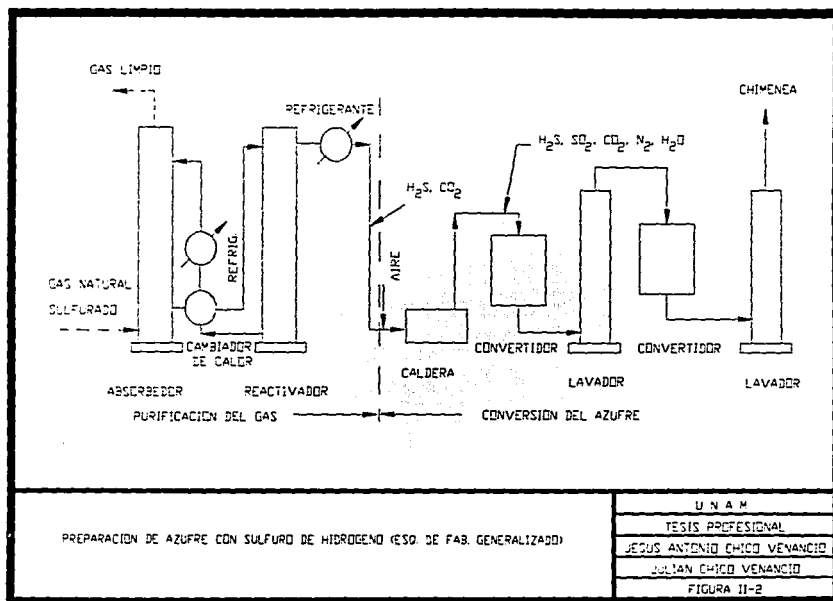




## FALLA DE ORIGEN









## II.4 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO

**INTRODUCCIÓN.-** El ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ , peso mol 98.082, es un líquido oleoso, corrosivo, incoloro. Considerado como el fundamento de la industria Química inorgánica.

Las materias primas más importantes para su obtención son el azufre y varios sulfuros metálicos, como los de hierro (pirita,  $FeS_2$ , y pirrotita  $FeS$ ) y Zinc, esfarelita ( $ZnS$ ), es tostado para obtener óxido de zinc, y el gas sulfuroso, producto secundario, es empleado en la fabricación del ácido. Entre los sulfuros metálicos, solamente la pirita y la pirrotita se extraen de las minas precisamente expresamente para la manufactura del ácido.

Hay duda acerca de la fecha del descubrimiento del ácido sulfúrico, pero se cree que quizá fue hacia el año 1000.

Para la obtención del ácido sulfúrico los métodos más utilizados son el de las cámaras de plomo y el de contacto.

Solamente trataremos los procesos anteriores, pero cabe aclarar que entre 1898 y 1902 se patentaron 3 nuevos procedimientos: el de Mannheim, empleaba una primera etapa de conversión utilizando una columna con relleno de óxido férrico y una segunda etapa con platino; el de Schroder-Grillo, basado en el sulfato magnésico impregnado de platino como catalizador y el proceso de Tentelew Chemical Company, usaba el principio de filtración y lavado final con una solución alcalina diluida.

### FABRICACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO POR EL MÉTODO DE LAS CÁMARAS DE PLOMO

Originalmente, en el procedimiento de las cámaras de plomo se empleaba el gas sulfuroso producido por el azufre, después fue sustituido por el gas de los hornos de tostación o de fundición de sulfuros. El procedimiento emplea las unidades principales siguientes a las cuales deben añadirse los transportadores, bombas y otros accesorios:

- a) La Torre de Glover recibe gas caliente del quemador y es alimentada en la parte superior con el ácido sulfúrico nítrico desde la torre de Gay-Lussac y con ácido de  $52^{\circ}$  Bé. (65%) desde las cámaras. Sus funciones son desnitrificar el ácido de Gay-Lussac con lo que se reduce la necesidad de nitró a una pequeña restitución por las pérdidas en el proceso; evaporar el agua del ácido de las cámaras concentrándolo hasta unos  $60^{\circ}$  Bé. (78%); enfriamiento del gas hasta la temperatura en que puede ser introducido sin riesgo en las cámaras de plomo; y suministro de vapor de agua, equivalente a un tercio, aproximadamente, de la necesidad del equipo (cuando se produce ácido de  $52^{\circ}$  Bé).
- b) Una serie de grandes cámaras de plomo, en número de tres a diez, en las cuales se verifican las reacciones entre el anhídrido sulfuroso, el oxígeno del aire, los





- óxidos de nitrógeno y el agua, con la producción resultante del ácido de las cámaras.
- c) Ordinariamente, dos torres de Gay-Lussac en serie, en las que los óxidos de nitrógeno que salen de la cámara final son absorbidos en el ácido sulfúrico de 60° de Bé., aproximadamente, formando el ácido sulfúrico nítrico.
  - d) Un eyector o ventilador para proporcionar la corriente de aire que se necesita a través del sistema. El eyector puede situarse en la chimenea de salida de la torre de Gay-Lussac, pero en general se coloca un ventilador entre la cámara final y la torre de Gay-Lussac (a veces entre la torre de Glover y la primera cámara, aunque esta situación no es preferida debido a la alta temperatura que hay en ese punto).

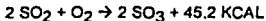
La Fig. II-3. presenta un esquema del procedimiento original de las cámaras.

**PERFECCIONAMIENTO DEL PROCESO.-** El estudio crítico del proceso descubrió que de 20 a 25% del ácido se formaba en la torre de Glover; ciertamente la velocidad de la reacción en la zona de desnitración de la torre de Glover era de 100 a 150 veces la velocidad de reacción en el espacio real de las cámaras. La porción del frente de la primera cámara era asimismo muy activa; pero la reacción era lenta en la parte de atrás. De 50 a 60% del ácido total se formaba en la primera cámara. La actividad aumentaba un poco en la porción delantera de la segunda cámara; pero más allá se hacía lenta, y ésta variación se repetía en escala decreciente de actividad en el resto del equipo. Esta actividad reducida podía atribuirse en parte a la constante disminución de anhídrido sulfuroso del gas, pero se alegaba que la razón principal era la falta de adecuada refrigeración y mezcla de los gases. Esto condujo a numerosas propuestas encaminadas a un trabajo más intenso del proceso de las cámaras.

Un descubrimiento posterior, y el más extensamente empleado es el de las cámaras de Mills-Packard refrigeradas con agua, las cuales se construyen en forma de cono truncado, con diversos tamaños. La capacidad de radiación térmica de las paredes de plomo es aumentada dejando fluir una película de agua por el exterior de aquellas, y esto al mismo tiempo alarga la vida de las cámaras. En algunos casos se instalan éstas cámaras en combinación con las antiguas cámaras rectangulares; pero por regla general consta el equipo exclusivamente de aquellas, interpuestas entre las torres de Glover y de Gay-Lussac.

### FABRICACIÓN DEL ÁCIDO SULFÚRICO POR EL MÉTODO DE CONTACTO

En la fabricación del ácido sulfúrico por este método, el dióxido de azufre es oxidado en forma directa con oxígeno de aire, en un catalizador (vanadato de potasio sobre dióxido de silicio como portador) y con desprendimiento de calor:



La reacción es reversible, ya que el  $\text{SO}_3$  (trióxido de azufre) se descompone nuevamente por encima de los 600°C. La temperatura mínima de trabajo que requiere el catalizador y, por lo tanto, la que hay que emplear por lo menos es de 400°C. En la práctica se opera a temperaturas de entre 400 y 500°C.





En los países en los que se puede disponer de azufre, este se utiliza para la fabricación de dióxido de azufre, quemándolo en hornos rotatorios con abundante entrada de aire. Donde no se dispone de azufre, se hace uso de la tostación de minerales sulfurados, en la que se obtiene gran cantidad de  $\text{SO}_2$ . Esencialmente, se emplea pirita ( $\text{FeS}_2$ ) como materia prima. Esta muy extendido el empleo de hornos de tubos giratorios, en los que la pirita se carga por el extremo superior, mientras que por el extremo inferior se introduce aire en exceso. En lugar de hornos rotatorios se emplean también hornos de pisos estos consisten en una cámara que esta recubierta de material refractario en la que hay platos concéntricos uno sobre otro y con orificios de caída. Sobre cada plato gira un rastrillo que conduce el material al agujero de caída. La zona de combustión se encuentra entre el primer y el segundo tercio inferior. En esa zona es quemado el sulfuro, por debajo entre la corriente de aire. La parte superior del horno sirve para precalentar la pirita hasta la temperatura de combustión y la parte inferior sirve para el enfriamiento de las "cenizas".

- 1. Tostación en lecho fluido.**- En una vasija cilíndrica de acero, revestida de material refractario, es colocado el material a tostar sobre una parrilla de malla muy fina y en cuanto se enciende la pirita se sopla desde abajo una fuerte corriente de aire que, de una parte se mantiene flotando. De esta forma, la pirita queda rodeada de aire por todas las partes y por lo tanto se quema rápidamente.
- 2. Purificación del gas.**- En todos los procesos de fabricación de ácido sulfúrico es indispensable purificar el dióxido de azufre bruto. Esta purificación tiene lugar en cámaras de polvo, en la que la corriente de gas se frena súbitamente y las partículas de polvo se depositan. Un mejor desempolvado se consigue con ciclones, debido a que posibilitan la eliminación del 80% del polvo frente a solo el 50% en las cámaras de polvos. En los métodos de cámaras de plomo y de torres, el objetivo principal del desempolvado es la eliminación de impurezas para que no se incorporen al ácido sulfúrico, por lo que es suficiente una purificación relativamente simple de los gases. En el método de contacto, las impurezas, especialmente el arsénico, actúan como venenos del catalizador, por tal motivo, se requiere de una purificación especialmente fina. El gas se purifica primeramente en un electrofiltro y luego se purifica y enfría en dos torres en las que se inyecta ácido sulfúrico pulverizado. Se elimina el arsénico en otro electrofiltro y por último es secado el gas pasándolo por otra torre rociada con ácido sulfúrico de alta concentración.
- 3. Oxidación.**- La oxidación tiene lugar en el horno de contacto. Los hornos de contacto son contruidos de diferentes maneras. Existen hornos de contacto tubulares, en los que el catalizador se carga en tubos que se disponen concéntricamente en el espacio disponible. El gas de tostación sube lamiendo primero la pared exterior de los tubos, y una vez calentado de éste modo penetra en el interior de los tubos y se pone en presencia del contacto. Otros hornos tienen parrillas dispuestas en pisos, sobre las que se coloca el catalizador. Es de gran importancia para la oxidación el control térmico del horno, lo que requiere la presencia de cambiadores de calor adecuados. La temperatura de reacción no debe ser menor a los  $800^\circ\text{C}$ . Normalmente, una instalación dispone de tres hornos de contacto, cada uno de los cuales tiene conectado en cabeza un cambiador de calor, en el que se calienta el gas de tostación purificado. El proceso transcurre a  $430\text{-}500^\circ\text{C}$ , así que se obtiene un rendimiento casi total, es decir, casi del 100%. En el primer horno se mantiene a una temperatura de  $450^\circ\text{C}$ , en el segundo de  $500^\circ$  y en el tercero de  $450^\circ\text{C}$ .





4. **Absorción.**- El gas de reacción que contiene ahora el trióxido de azufre es llevado a las columnas de absorción. Aunque el  $\text{SO}_2$  es el anhídrido del ácido sulfúrico, no se le puede hacer reaccionar con agua, pues ésta no la moja. Por el contrario se puede absorber muy bien en ácido sulfúrico concentrado, en el que se disuelve fácilmente con formación de óleum, con mayor o menor contenido en  $\text{SO}_3$ .
5. **Mezclado y Destilación.**- Para producir ácido más diluido, el concentrado se deja fluir sobre la cantidad necesaria de agua, con refrigeración y agitaciones simultáneas. No se debe verter agua sobre el ácido concentrado, pues debido al gran desprendimiento de calor se producirían sobrecalentamientos locales con proyección del ácido hirviendo. El óleum no se debe diluir con agua en ningún caso, pues esto traería como consecuencia una violenta explosión. El óleum se diluye mezclándolo con la cantidad necesaria de ácido sulfúrico de 80-90% hasta llegar a sulfúrico puro, exento de óleum y después se diluyen con agua en la forma descrita arriba hasta la concentración deseada. Por destilación de óleum del 25% se obtiene trióxido de azufre puro. Es favorable regular la temperatura del agua de refrigeración de modo que el trióxido de azufre condense en estado líquido y sea recogido así.

La Fig. II-4 muestra el diagrama de flujo de la fabricación del ácido sulfúrico por el método de contacto.

**ASPECTO AMBIENTAL.**- La fabricación del ácido sulfúrico conlleva la emisión a la atmósfera de uno de los contaminantes atmosféricos más importantes y perjudiciales: el  $\text{SO}_2$ .

El  $\text{SO}_2$  es un gas incoloro con un olor irritante y es un factor importante en la llamada "lluvia ácida"; en la atmósfera puede causar la formación de otros contaminantes latentemente más peligrosos.

Debido a sus características, muchos países, a través de sus leyes y reglamentos han fijado normas estrictas para su emisión, esto con el fin de que se altere lo menos posible la calidad del aire.

En México, todavía no existe un reglamento que limite estas emisiones, aunque se esta estudiando la manera de cubrir este aspecto.

Las posibilidades de aumentar el grado de conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , ha motivado el estudio de nuevas tecnologías para la fabricación del ácido sulfúrico. Esos estudios y esfuerzos han culminado en nuevos procesos que combinan aumentos de la eficiencia global del proceso, de la producción y productividad con una disminución en la emisión de contaminantes.

En nuestro país la gran mayoría de plantas de ácido sulfúrico se basaban en el proceso de simple contacto-simple absorción. A partir de mejores procesos, tanto desde el punto de vista de eficiencia como el de protección ambiental, se empezaron a establecer únicamente plantas que utilizan el proceso de doble contacto-doble absorción, con lo que se ha logrado que las emisiones de  $\text{SO}_2$  cumplan con los requerimientos que señala la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos).





El proceso de simple contacto-simple absorción se efectúa en tres etapas:

1. Combustión del azufre.
2. Conversión del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ .
3. Absorción del  $\text{SO}_3$ .

El proceso doble contacto-doble absorción se efectúa en las etapas siguientes:

1. Combustión del azufre.
2. Conversión del  $\text{SO}_2$  (1er. Contacto catalítico).
3. Absorción del  $\text{SO}_3$  (1era. Absorción).
4. Conversión del  $\text{SO}_2$  (2do. Contacto catalítico).
5. Absorción del  $\text{SO}_3$  (2da. Absorción).

La diferencia principal que existe entre estos procesos consiste en que para aumentar la eficiencia de la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , es efectuada una absorción intermedia del  $\text{SO}_3$  formado en el primer contacto catalítico.

Para finalizar podemos decir que el proceso de doble contacto-doble absorción nos da la oportunidad que, desde la fase misma de diseño, una planta de ácido sulfúrico cumpla, en cuanto a sus emisiones de  $\text{SO}_2$ , con límites tan estrictos como los que señala la EPA Norteamericana.



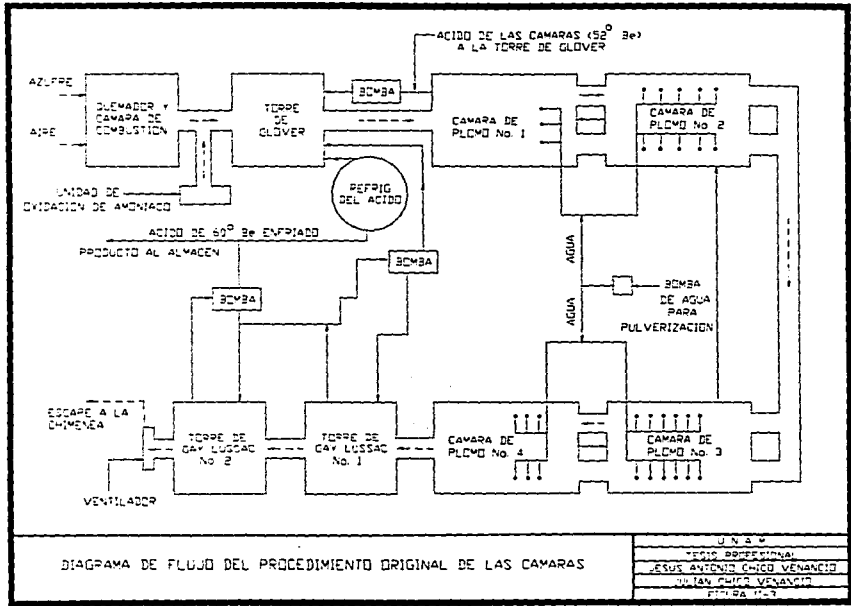
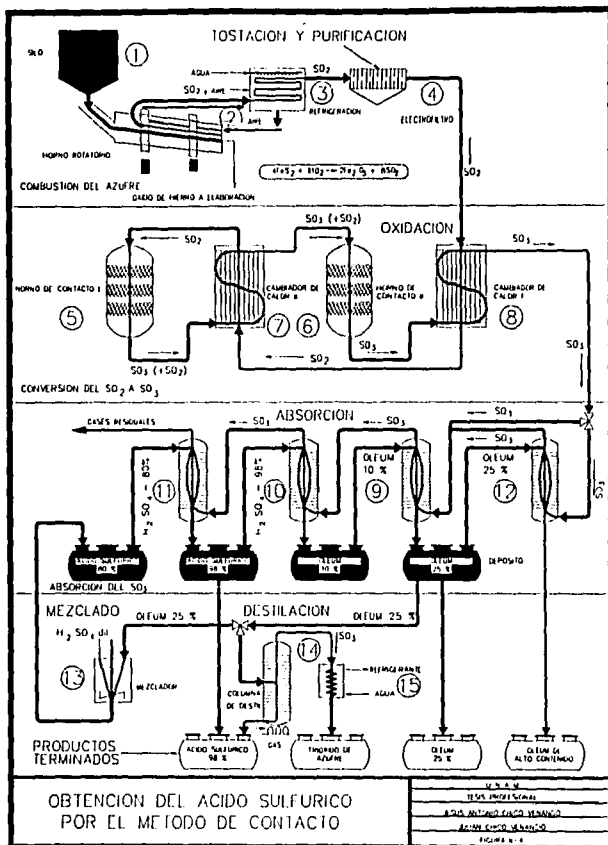


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO ORIGINAL DE LAS CAMARAS









## II.5 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA SOSA.

**INTRODUCCIÓN.**- Sosa es el nombre que se usa desde hace mucho tiempo para designar el carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , pero no pertenece a la nomenclatura química. Este compuesto tiene diversas aplicaciones, especialmente en fabricación de vidrios y jabones. Abandonado el proceso de Leblanc, que fue uno de los primeros procedimientos de la industria pesada y contribuyó poderosamente al desarrollo y progreso de la industria química, se preparaba la sosa por tratamiento de cloruro sódico con ácido sulfúrico y calcinación posterior con carbón y caliza, el método empleado actualmente es el proceso Solvay. Este se basa en el tratamiento de una solución preparada de cloruro de sodio con amoníaco y dióxido de carbono; precipita el carbonato ácido de sodio (poco soluble en tales condiciones), el cual por calentamiento pasa por carbonato. El proceso Solvay es económicamente rentable, ya que previó la recuperación casi total del amoníaco.

Con el nombre de la sosa cáustica se designa el hidróxido de sodio,  $\text{NaOH}$ , también de enorme importancia en la industria debido a sus propiedades de álcali fuerte, se utiliza para la fabricación de jabones y colorantes; para obtener celulosa de la madera y paja; para la fabricación de seda artificial; como decapante, etc. El principal método de preparación consiste en la electrólisis de una solución de cloruro sódico con cátodo de mercurio; la amalgama de sodio obtenida se descompone a continuación con agua, formándose hidróxido de sodio e hidrógeno.

### PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN SOLVAY.

**REALIZACIÓN PRÁCTICA.**- En un recipiente o *vasija de disolución (1)* es preparada una disolución saturada en frío de cloruro sódico que contiene unos 300 kg. de  $\text{NaCl}$  por  $\text{m}^3$ . El agua que se destina para ésta disolución contiene, según su origen, cantidades mayores o menores de sulfatos y carbonatos ácidos de magnesio y de calcio que es preciso suprimir, pues de no hacerlo precipitarán como óxidos y carbonatos en cuanto se añadiese amoníaco. Por ésta razón, la salmuera se lleva a liras con fondo cónico y se añade hidróxido cálcico y carbonato sódico, con lo que las combinaciones de calcio y de magnesio se transforman en hidróxidos y carbonatos insolubles.

Precipitan carbonato de calcio, hidróxido de magnesio y carbonato básico de magnesio que se depositan en el cono de las liras. De allí es extraído el precipitado en forma continua o a intervalos (no se representa en el diagrama de flujo). La "salmuera" sale por la parte superior de las vasijas (vasijas de decantación) y se quitan las impurezas sólidas que arrastre en el *filtro prensa (2)*. La salmuera pura y filtrada pasa ahora al absorbedor de amoníaco, que es una alta torre cilíndrica que simultáneamente a una columna de destilación, está provista con algunos de los diferentes sistemas de distribución, como platos de borbotadores, platos perforados o simplemente con material de relleno. Desde la parte superior fluye continuamente la salmuera saturada y por la parte inferior se inyecta en contracorriente gas amoníaco.

Es necesario saturar primeramente la salmuera con amoníaco, por ser éste más soluble que el dióxido de carbono. Del saturador de amoníaco pasa ahora la disolución de  $\text{NaCl} + \text{NH}_3$  al *absorbedor (6)*, en el que se introduce al mismo tiempo





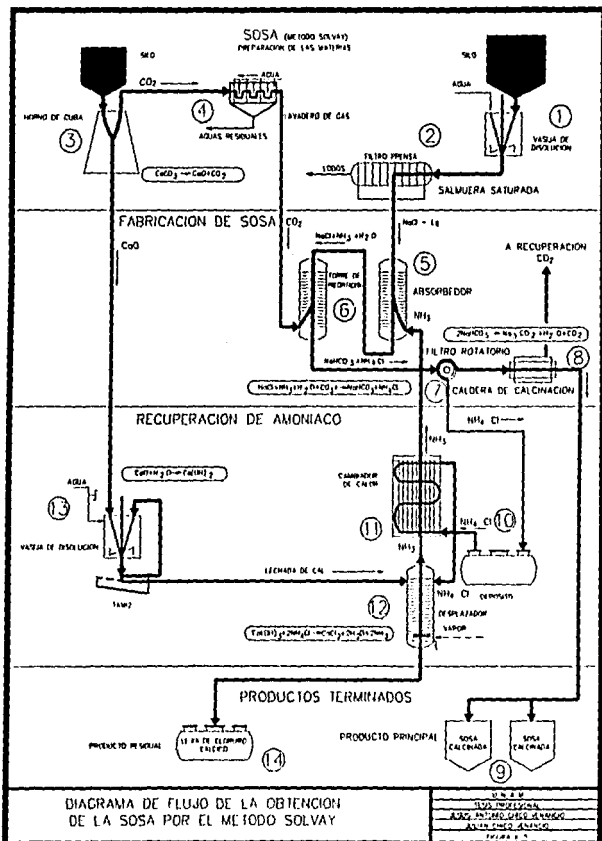
por debajo dióxido de carbono. Este absorbedor se llama también "torre de precipitación". Es preciso tener cuidado de que en la torre de precipitación se mantenga una temperatura de  $55^{\circ}\text{C}$  porque ésta es primordialmente favorable para la formación del carbonato ácido de sodio.

En ésta torre se forma pues carbonato ácido de sodio, difícilmente soluble, que se separa de la disolución en el *filtro de tambor (7)*. El sólido filtrado se lava con poca agua y se calcina en el *horno rotatorio (8)* que tiene calefacción exterior y llega a alcanzar una temperatura de  $180^{\circ}\text{C}$ , produciéndose carbonato sódico anhidro que se almacena en el *silo (9)*.

La lejía que sale del *filtro de tambor (7)* contiene el amoníaco en forma de cloruro amónico y se deposita en el *tanque de almacenaje (10)* para recuperar el amoníaco. Para esto se lleva la lejía, pasando por el *cambiador de calor (11)* a la descomposición en el *desplazador (12)* debido a la introducción simultánea de lechada de cal (disolución y suspensión de hidróxido de cálcico en agua) proveniente de la *vasija de disolución (13)*, cuyo contenido es calentado mediante un serpentín de caldeo con vapor. El gas amoníaco se desprende pasando por el *cambiador de calor (11)* y se recicla. Del *desplazador (12)* sale como residuo una disolución acuosa de cloruro cálcico (lejía de cloruro cálcico).

La Fig. II-5 presenta el proceso de obtención de sosa por el método Solvay.







## II.6 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL CLORO.

**INTRODUCCIÓN.-** El cloro es un gas amarillento verdoso, aproximadamente 2.5 veces más pesado que el aire; su punto de fusión,  $-100.98^{\circ}\text{C}$ ; su punto de ebullición,  $-34.05^{\circ}\text{C}$ ; densidad 3.214g. por litro a  $0^{\circ}\text{C}$ , temperatura crítica,  $144^{\circ}\text{C}$  y 760 mmHg; calor específico a presión constante 0.1149 cal./g a  $15^{\circ}\text{C}$ ; calor de vaporización, 4878 cal/mol a 760 mm.; límite de explosividad de mezclas de cloro e hidrógeno: máximo 91.9 % de cloro, mínimo 14.3% de cloro. El cloro tiene reactividad química, de la que depende sus aplicaciones industriales. Reacciona con muchos elementos y compuestos. Los metales no nobles (incluido el cobre) son raudamente atacados si hay humedad presente con formación de cloruros. Mezclado con hidrógeno forma la "mezcla detonante de cloro" que si se enciende o por la acción de la luz del sol, provoca una explosión violenta.

Debido a su gran capacidad de reacción, es imposible que el cloro exista en la naturaleza en estado elemental. Pero esta muy extendido en forma de cloruros en los suelos y en el agua de mar, por ejemplo sal de gema, cloruro potásico, cloruro de magnesio, silvina, carnalita, etc. En la fabricación del cloro se obtiene como coproductos muchas sustancias químicas muy importantes. El hidróxido de sodio o potasio y el hidrógeno son coproductos en la electrólisis de las salmueras respectivas. El sodio y el magnesio metálicos resultan de la electrólisis de los cloruros fundidos. El nitrato sódico es un subproducto del tratamiento de la sal común con ácido nítrico para obtener cloro elemental. Pero el más importante de todos es, sin duda, el hidróxido de sodio o sosa cáustica. La sosa cáustica como sustancia química industrial, es más antigua que el cloro. A principios de este siglo se producía poca cantidad como subproducto del cloro y competía con la sosa cáustica con cal y carbonato sódico.

El cloro se produce casi enteramente por métodos electrólíticos con cloruros alcalinos fundidos o soluciones acuosas de cloruros de metales alcalinos. En la electrólisis de la salmuera, se produce cloro en un ánodo de grafito, e hidrógeno, junto con hidróxido de sodio o potasio, en el cátodo. Para conservar separados los productos del ánodo y cátodo se han inventado y perfeccionado muchas y muy ingeniosas celdas. Salvo en los primeros tiempos, cuando se uso la campana para cubrir el ánodo, todos estos aparatos han sido variantes de un tipo de celda de diafragma o del método con cátodo de mercurio. Desde el principio se vio que la campana requería mucho voltaje y restaba eficacia en las cubas de gran capacidad.

### PROCEDIMIENTOS DIVERSOS PARA PRODUCIR CLORO.

**ELECTRÓLISIS CLORO-ÁLCALI.-** Los productos de la electrólisis de el cloruro sódico, cloro y sosa cáustica, ya estaban asociados con anterioridad, pues ambos están en relación de la fabricación de sosa por el método de Leblanc. El cloro se obtenía del ácido clorhídrico, producto secundario del método de Leblanc, la sosa cáustica a partir del producto principal, de la sosa misma. Al pasar al método Solvay fue preciso obtener cloro a partir de otras fuentes de ácido clorhídrico, sin que se alterase el cuadro en lo que se refiere a la sosa cáustica.





En 1888 se descubrió el método de diafragma y se realizó la primera electrólisis técnica cloro-álcali. La cual se expandió por todo el mundo y fue pieza primordial para nuevos desarrollos técnicos de procesos electroquímicos. A partir de entonces el cloro y la sosa cáustica están íntimamente ligados y el aumento de consumo de uno de ellos se traduce frecuentemente en exceso de producción del otro.

**ELECTRÓLISIS EN FASE FUNDIDA POR EL MÉTODO DE DOWN.-** De los distintos métodos describiremos tres que son típicos en la célula revestida con *ladrillos de chamota (1)* el ánodo de grafito (a) penetra por la parte inferior, mientras que el cátodo de hierro (b) rodea el ánodo anularmente. Como se mostrará en la figura II-8.

El espacio catódico está separado por ambos lados del resto de la célula mediante una tela metálica sobre el ánodo hay una campana (c), que capta el cloro gaseoso (d) para que no se ponga en contacto con el sodio fundido (b) así que se puede obtener en forma separada el sodio fundido y el cloro gaseoso. El cloro se congresa sobre el ánodo (a) y se saca por (d), el sodio flota sobre el fundido de NaCl, sobre el cátodo, donde se saca en (e) y se pasa a un *depósito (2)*.

La producción de fundido tiene lugar en el espacio superior (f) por encima de la campana, donde se va cargando ininterrumpidamente cloruro sódico sólido.

**MÉTODO DEL DIAFRAGMA.-** La célula horizontal en el método del diafragma, la *célula Billiter (3)* está separada por el diafragma (a) (formado frecuentemente por varias capas de asbesto) en un espacio anódico (b) y otros espacios catódicos (c) también aquí se emplean como ánodos electrodos de grafito (d) y como cátodos parrillas de hierro (e). El electrolito es una disolución purificada y saturada de cloruro sódico (4) que entra continuamente por la parte superior (f). Mediante la aplicación de una corriente continua de unos 4 voltios, los iones del cloro van al ánodo, se descarga, se unen para dar moléculas y abandonan en forma de gas (g) el espacio anódico. De los iones de Na<sup>+</sup> e H<sup>+</sup> presentes en el cátodo se descargan solamente los últimos de su potencial de separación más positivo. El hidrógeno se recoge por debajo del diafragma y se atrae por (h). En el espacio catódico queda una disolución de lejía de sosa que contiene cloruro sódico; por litros hay unos 120 gr. de sodio o hidrógeno y 140 gr. de NaCl. La disolución se extrae por (i). Unas 50 o 100 células se unen para formar una batería.

**MÉTODO DE AMALGAMA.-** En la célula, algo inclinada hacia un lado (5), el ánodo consta también de varios electrodos de grafito (a) mientras que el cátodo lo construye el mercurio que cubre el suelo y que fluye lentamente en él. La célula no tiene diafragma. El electrolito es también aquí disolución purificada y saturada de cloruro sódico que entra continuamente por (c). Se trabaja con corriente continua con 4 o 6 voltios y el cloro formado en el ánodo sale en forma gaseosa (d). Los iones sodio se descargan en cátodos de mercurio y rápidamente forman con el amalgama del sodio que fluye fuera de la célula con un contenido en sodio de alrededor de 0.2% (e). Por medio de una *bomba (6)* se hace pasar la amalgama a un *depósito (7)*, una torre llena con grafito la que produce la descomposición de la amalgama con agua, con producción de mercurio, lejía de sosa (e) el hidrógeno (f). El mercurio puro se recoge en el fondo de la torre y se *bomba (8)* de nuevo a la célula de electrólisis.





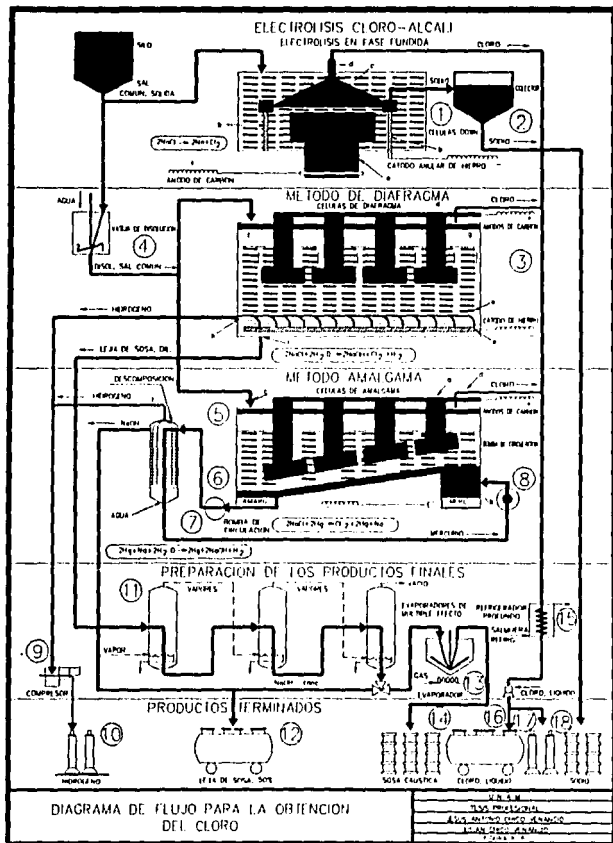
**TRATAMIENTO DE LOS PRODUCTOS DE ELECTRÓLISIS.**- El hidrógeno producido en los métodos de diafragma y de la amalgama es de 95% la mayoría de las veces se saca un ácido sulfúrico concentrado y mediante *compresores (9)* se le almacena en *botellas de acero (10)* si no se tiene para el aplicaciones en fábricas propias.

La LEJÍA DE SOSA del método de diafragma es solo del 12% que contiene mucho cloruro sódico. Se le concentra fuertemente en *evaporadoras de múltiple efecto (11)*, con lo que la mayor parte del cloruro sódico precipita y se separa por centrifugación. La lejía de sosa purificada de esta manera es de 50% y contiene 2% de cloruro de sodio NaCl. Si se requiere de mayor pureza, el tratamiento necesario (recristalización, etc.). Es muy laborioso. La *lejía de sosa* de 50% se vende como tal (12) o se *evapora (13)* hasta obtenerla en forma sólida y es envasado en *barriles (14)*.

El CLORO se *licua (15)* y es expandido en *vagones tanque a presión (16)* o en *botellas de acero (17)*. El sodio metal procedente de la electrólisis en fase fundida, no necesita más purificación y se envasan en latas o *barriles herméticos (18)* para su entrega en el comercio.

La Fig. II-6 presenta el diagrama de flujo de la obtención del Cloro.







## II.7 FABRICACIÓN DEL JABÓN.

**INTRODUCCIÓN.**- Se le da el nombre de jabones a la sal alcalina, particularmente las de sodio y potasio de los ácidos grasos superiores. En su estado natural, los ácidos grasos son los constituyentes principales de los aceites y grasas, vegetales o animales (terrestres o marinos), en los cuales existen en forma de ésteres de la glicerina.

Los Galos fueron los primeros en proceder empíricamente a la saponificación del jabón (proceso que consiste en transformar grasas en jabón a causa de su descomposición por una base en sal de ácido graso y glicerina), fue hasta principios del siglo XIX cuando Eugene Chevreul describió el fenómeno de la saponificación: una lejía alcalina es capaz de escindir los lípidos en dos fases: por una parte, una fase hidrosoluble, que le llamo "Principio Dulce de los Aceites", cuya naturaleza de triol no se conoció hasta bastantes años después, con el nombre de glicerina; por otra parte, una fase lipídica, constituida por los ácidos procedentes de la materia prima si la aportación del álcali es baja. Si el porcentaje de álcali sobrepasa ligeramente la cantidad teórica correspondiente a la saturación de los ácidos grasos después de su liberación de la glicerina, se obtiene directamente el jabón. En el primer caso, se trata de una reacción catalítica que se puede producir utilizando una pequeña cantidad de óxido metálico (óxido de zinc por ejemplo). El mismo resultado se puede obtener actuando en medio ácido (ácido sulfúrico especialmente), o en presencia de compuestos del grupo de los alquilarsulfonatos. Finalmente, la escisión de los lípidos se produce, en los seres vivos, mediante una reacción enzimática. En el siglo XIX se realizaron varios ensayos a nivel industrial para aplicar este método de hidrólisis, pero sin éxito.

### MATERIAS PRIMAS.

**ACEITES Y GRASAS DE ORÍGENES DIVERSOS.**- Cualquier materia prima oleaginosa puede en principio transformarse en jabón, con excepción de ciertos aceites de animales marinos, la elección gira siempre en torno de las características económicas y técnicas de cada materia. La industria jabonera emplea una extensa gama de aceites y grasas, sobre todo los de copra y palmiste, el de palma, diversos aceites vegetales y grasas animales "concretos" y "fluidos", cada vez se tiene más en cuenta la naturaleza y propiedades de los ácidos grasos que constituyen sus glicéridos. Las grasas de copra y almendra de palma (palmistes), llamadas "mantecas" por su consistencia, son ricas en ácido láurico, cuya sal de sodio presenta propiedades espumantes excepcionales, lo cual les hace indispensables en las mezclas destinadas a la fabricación del jabón. Los cebos de buey y de cordero están constituidos por glicéridos, y cuentan con 16 (ácido palmítico) o 18 (ácido esteárico) átomos de carbono. Los aceites fluidos poseen cadenas ácidas que cuentan generalmente con 18 átomos de carbono, como el esteárico, pero con uno o varios enlaces etilénicos. Su mezcla confiere al carbón su untuosidad. De todos modos, de entre las materias primas disponibles, la industria del jabón tiende a la elección de aquellas que no son comestibles.

**ACEITES BRUTOS DE ALTA ACIDEZ.**- Los granos oleaginosos y los tejidos adiposos animales en malas condiciones proporcionan aceites y grasas alteradas, cuya acidez







es demasiado elevada para que una simple neutralización y un afinado (decolorado, desodorizado) puedan transformarlos en aceites comestibles. En principio, estas materias primas, de las cuales una parte de los ácidos grasos se ha liberado ya de la glicerina, deberían ya ser muy apreciadas por la industria del jabón. De hecho, aparte de la acidificación, se han producido ya en ellas otras alteraciones simultáneas, como la oxidación de los ácidos etilénicos que contienen, lo cual reduce notablemente en la calidad técnica del jabón obtenido, el cual resulta apto para aplicaciones industriales, a menos que se haya sometido a una purificación previa a la saponificación.

**ACEITES LLAMADOS "ÁCIDOS".**- Una de las operaciones más importantes del refinado de aceites es la neutralización, que elimina los ácidos grasos libres, siempre presentes, en cantidades variables, en aceite bruto. Teóricamente basta con tratar el aceite mediante una solución sódica diluida, provocando la emulsión de la mezcla, y someterla a un centrifugado o, como antiguamente, a la decantación espontánea de la fase acuosa para separar una "pasta de neutralización", constituida por un exceso de álcali, por el jabón formado, y una cierta cantidad de aceite neutro retenida por la solución jabonosa alcalina. Sin embargo esta pasta de neutralización utilizada en esta forma se altera rápidamente, ya que es muy sensible a los ataques microbianos, por lo que se le añade un ácido mineral en el momento de su separación del aceite neutro, lavándola luego con agua hasta la eliminación completa de los compuestos minerales que pueda contener. El "aceite ácido" obtenido así, está dispuesto para la fabricación del jabón.

**ACEITES GRASOS NATURALES Y ÁCIDOS DE SÍNTESIS.**- Con el fin de adaptar los jabones a los distintos usos a los que se destinan, se tiende a utilizar, en vez de los aceites y grasas, los propios ácidos grasos más o menos purificados y seleccionados, teniendo en cuenta la longitud de la cadena que los constituye, y la proporción conveniente de compuestos saturados y etilénicos.

## PROCESOS DE ELABORACIÓN.

**1. Procedimiento Marsellés.**- El jabón de tocador, llamado antiguamente "jabón de Marsella" por haberse localizado en dicha villa mediterránea uno de los centros productores más importantes en el siglo XI, debe tener un contenido de su peso en ácidos grasos. A la salida de fabricación se presenta en panes o barras de 500 g., lo que corresponde a 315 g. de ácidos grasos. Se admite que su peso disminuya durante su almacenamiento (pérdida de humedad por desecación), pero la pastilla comercializada debe justificar, en análisis, la presencia de los 315 g. de ácidos grasos.

El procedimiento tradicional comprende varias etapas que se pueden apreciar en la Figura II-7.

**ETAPA 1. La Saponificación** propiamente dicha (o "ampaste") necesita de un contacto íntimo entre la materia prima oleaginoso y la solución alcalina, este contacto es imposible que se realice espontáneamente, ya que las dos fases no son miscibles. Por lo tanto debe utilizarse un agente emulgento, en forma de solución jabonosa, separada en una operación anterior. Al ser la reacción exotérmica, se debe cargar la caldera progresivamente, mediante





aportaciones parciales y sucesivas de lípidos y de solución alcalina. Esta primera fase dura de 10 a 12 hrs.

- ETAPA 2.** Con el fin de recuperar la mayor parte de la glicerina liberada, se procede al "salado", es decir, se añade sal marina, que provoca un "alargamiento" del jabón y la separación de la masa en 2 partes: una capa jabonosa que flota y una solución de glicerina, que se recoge en el fondo del recipiente. Esta solución se evacua, se purifica mediante sucesivos lavados con agua salada, luego se concentra y, finalmente, es destilada.
- ETAPA 3.** Para completar la saponificación y acelerar su proceso, se procede a la "cocción": se introduce en el recipiente una nueva cantidad de lejía alcalina, y se lleva a ebullición toda la mezcla durante horas, gracias a una circulación de vapor por unos serpentines sumergidos en la masa. Después de algunas horas, se procede a un nuevo alargamiento por medio de sal marina, y la solución de glicerina que se obtiene se añade a la que ya se había obtenido en la primera fase, para sufrir las mismas operaciones de purificación.
- ETAPA 4.** En este momento se hace necesario "lavar" el jabón con soluciones de cloruro sódico para eliminar el exceso de álcali; es la "licuación" o "liquidación". Solo debe subsistir una ligera alcalinidad, para evitar la degradación del jabón durante su conservación.
- ETAPA 5.** A continuación, el jabón debe empobrecerse en electrólito, en exceso de álcalis y en impurezas diversas. La operación resulta delicada, aunque sencilla, ya que se trata de adicionar agua, para provocar la separación del "jabón puro", limitando al máximo una solubilización que influiría en el rendimiento del producto final.
- ETAPA 6.** El jabón puro se evacua y enfría, para luego cortarlo en barras y moldearlo, lo que exige que su superficie haya adquirido una cierta dureza, gracias al paso a través de una estufa tubular, en la cual el jabón avanza con mayor o menor rapidez.

## FABRICACIÓN EN CONTINUO

2. El procedimiento Scharpley utiliza mezcladores continuos que provocan una división a fondo de la materia prima, lo que permite una acción rápida de la sosa y la separación de las lejas de glicerina, muy poco alcalinas, después de lo cual el paso por la centrifugadora acelera la separación de la mezcla. La saponificación llega a su término con una nueva aportación de lejía y de sal; con un segundo centrifugado y varios lavados se obtiene ya el jabón liso.
3. El procedimiento Alfa-Laval opera a contracorriente, haciendo circular en sentido inverso las materias primas y la solución sódica, repitiéndose la operación 2 veces, durante las cuales se produce la saponificación.
4. El procedimiento Monsavon es el que se utiliza en la mayoría de los países ya que representa un progreso considerable, en parte por la rapidez del sistema y en parte por el ahorro de espacio. La saponificación propiamente dicha se acelera mediante la utilización de un agente homogeneizante que se carga con ayuda de bombas volumétricas; la finísima emulsión obtenida se dirige al vértice de una torre de reacción, por la que desciende con lentitud. Al llegar a la parte baja del aparato, la operación está prácticamente terminada, y el jabón pasa a la cuba de jabón bruto. El jabón bruto pasa a continuación a una torre de lavado, atravesándola de





abajo hacia arriba, mientras desciende por ella una lejía alcalina. Cada piso de la torre consta de una zona de agitación y de una zona de decantación. Al llegar al plato inferior, las aguas glicerinosas son evacuadas para ser concentradas y purificadas, y la glicerina bruta se destila. El jabón que llega a la parte superior de la torre es mezclado con agua, agua salada, y solución sódica, mediante bombas reguladas automáticamente, y el conjunto se somete a una agitación intensa. Finalmente la mezcla se dirige a una caldera, y se deja decantar. Resulta más económico disponer de dos o más cubas de decantación, que provocaría en continuo por procedimientos mecánicos. La cantidad de jabón arrastrada por las aguas de lavado no sobrepasa el 0.2%. La duración de la decantación es de 8 a 12 horas, una vez llena la caldera.

La Figura II-8 muestra el Diagrama de Flujo de la elaboración del jabón por el procedimiento Monsavon.

### DISTINTAS CLASES DE JABONES

Utilizando variaciones en el proceso anterior, esto en mayor o menor grado, es posible obtener una gran variedad de clases de jabón, entre las que destacan las siguientes:

**Jabones de Tocador.** En el cual se utilizan para su fabricación materias primas que den jabones lo menos pigmentados posible, esto impone el empleo de ácidos grasos purificados y fraccionados por destilación. De éste modo se eliminan en gran medida los olores desagradables en el producto final, además que les es agregado perfume.

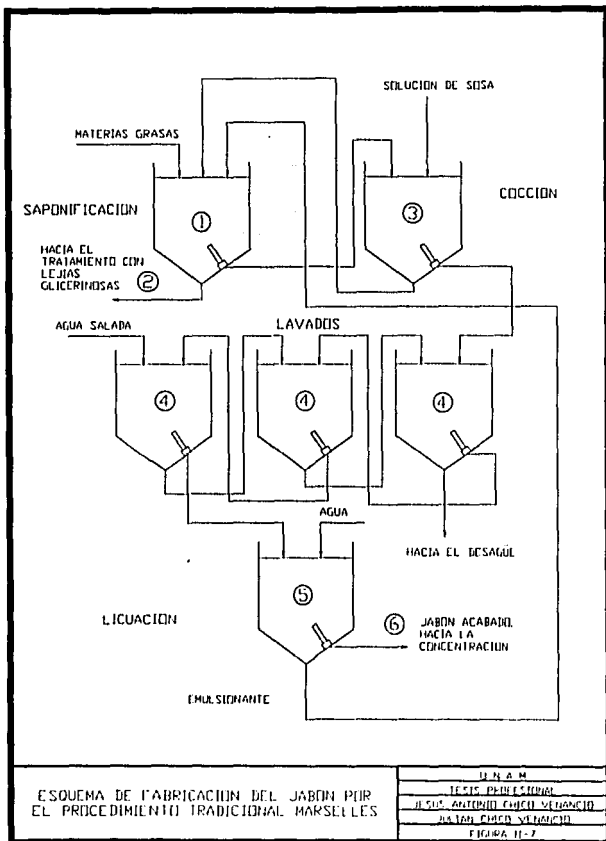
**Jabones Medicinales.** En éstos el valor antiséptico se aumenta mediante la adición de formol. Preparados en laboratorios farmacéuticos, los jabones medicinales se fabrican actualmente a escala semindustrial en laboratorios especializados.

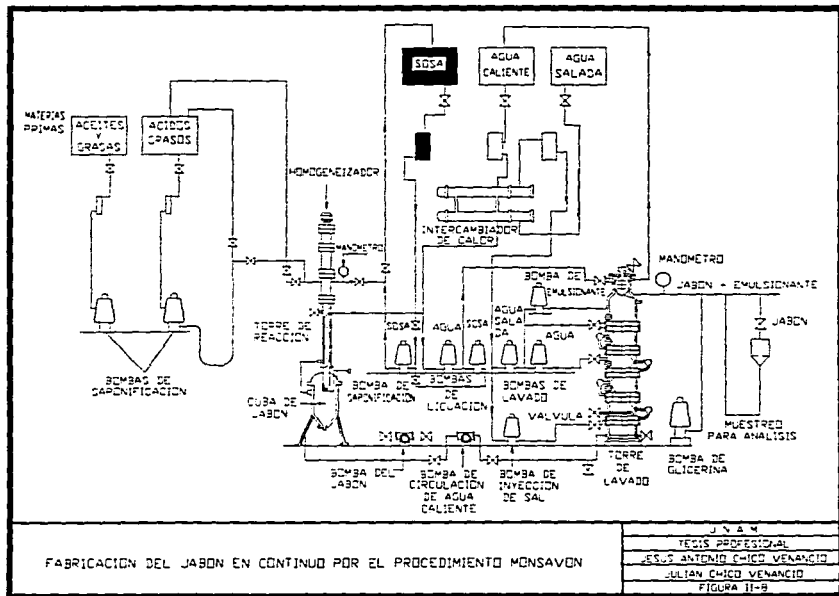
**Jabones Desodorantes.** La mayoría de los olores corporales se deben a fermentaciones microbianas, lo que lleva a introducir bacteriostáticos en los jabones de tocador, buscando sustancias no irritables y lo menos tóxicas posibles.

**Jabones Adalgazantes.** Están constituidos por una pasta sobreengrasada o en forma de ungüento, servido en tubo, la mezcla adalgazante, contiene casi siempre Yoduro de Potasio.

**Jabones Parasitocidas e Insecticidas.** Los jabones con DDT, a azufre y al polisulfuro sódico son utilizados por las personas expuestas a los insectos, generalmente lavando la ropa que visten con este tipo de jabones.









## II.8 FABRICACIÓN DE DETERGENTES.

El detergente es un producto capaz de separar de su soporte y de poner en solución o en suspensión las manchas o suciedad que se adhiere a las superficies. Los detergentes deben su origen al decaimiento del jabón, debido a la escasez de sus materias grasas naturales en la Segunda Guerra Mundial.

Un sistema típico de lavado consta de los siguientes elementos:

1. Un objeto sólido que hay que limpiar, llamado "substrato".
2. Mugre o suciedad unida al substrato, que se ha de eliminar.
3. Baño líquido que se aplica al substrato sucio.

El substrato puede tener diversos tipos de superficie, debe ser liso y plano como un vidrio o presentar una superficie muy compleja como en el caso de las telas.

### COMPONENTES.

El detergente típico es una mezcla de varios componentes, cada uno de los cuales realiza una función específica. Se formulan los detergentes para que actúen en las condiciones del lavado y para que se llenen las exigencias del substrato que va a lavarse.

Los detergentes mixtos de fórmula adecuada producen mejor efecto de lavado que el mejor detergente formado por una sola sustancia y pueden dividirse en los siguientes grupos:

1. **Surfactantes.**- Estas sustancias actúan sobre la superficie del sistema substrato-mugre. Se conocen como agentes de superficie activa o agentes tensoactivos. Dentro de estos agentes tensoactivos, están incluidos los jabones y las sustancias sintéticas de superficie activa.
2. **Salas, ácidos y bases inorgánicas.**- Estos elementos se llaman coadyuvantes si contribuyen para mejorar el efecto de detergencia de la mezcla, si no contribuyen, se llaman diluyentes o rellenos. Los componentes inorgánicos más importantes de los detergentes pueden agruparse en seis categorías: álcalis, fosfatos, silicatos, sales neutras solubles, ácidos y coadyuvantes inorgánicos.

-Los álcalis no atrapan las partículas de metales pesados, y su efecto suspensor sobre los sólidos de suciedad es muy escaso. Mantienen elevado el pH y producen buen efecto limpiador en objetos de cerámica y de vidrio. El producto más usado para tal fin es el carbonato de sodio, más conocido industrialmente como "soda ash".

-El coadyuvante más usado en la formulación de detergentes sintéticos es el tripolifosfato de sodio (TPS), es un compuesto básico para aquellos detergentes destinados a servicio pesado en limpieza de todo tipo de telas. Su poder de suspensión y secuestro de la suciedad es bastante alto en comparación con el de otras sustancias usadas para el mismo fin.





-El silicato es el ingrediente limpiador más importante en los productos que se utilizan para lavar platos, son inhibidores efectivos de la corrosión y reducen la acción corrosiva que tienen los agentes coadyuvantes alcalinos sobre el aluminio, latón y otros metales que se usan en las máquinas lavadoras. Se emplean para el lavado de ropa en el hogar y platos.

-Las sales solubles neutras, como el sulfato de sodio obra como diluyente y como compuesto de normalización del efecto de lavado, reduce la concentración necesaria de surfactante y, en consecuencia, reduce la cantidad requerida de detergente para realizar un buen lavado.

-Algunas veces se agregan ácidos a los detergentes con el fin de disolver o aflojar por acción química la suciedad, que sería muy difícil de desprender. Los ácidos también controlan el pH de los cosméticos y otros detergentes que deben tener un pH menor de 7, se emplean ácidos orgánicos como el acético y el cítrico.

-Algunos detergentes incluyen a algún tipo de coadyuvantes inorgánicos tales como el caolín y las arcillas.

**3. Reforzadores Orgánicos.-** Son sustancias que no poseen propiedades tensoactivas son incorporados para realizar algunas de las siguientes funciones:

- Disminuir el redeposición de la suciedad al sustrato.
- Aumentar el poder espumante y la estabilidad de la espuma.
- Aumentar el poder limpiador.
- Inhibir efectos nocivos del detergente sobre el sustrato.
- Evitar la irritación de la piel.

La carboximetilcelulosa sódica (NaCMC), es la mejor sustancia que mantiene en suspensión la suciedad y evita el redeposición sobre el sustrato en el proceso de lavado.

**4. Aditivos Especiales.-** Modifican o mejoran la forma física de los detergentes, también pueden ser sustancias de blanqueo, bactericidas, degradantes biológicos y aromatizantes. Dentro de las sustancias que se utilizan se encuentran los colorantes. El desarrollo más significativo de la industria de los detergentes en los últimos años, lo constituyen la adición de enzimas a la formulación de detergentes domésticos. La enzima descompone o transforma algunas materias orgánicas, tales como proteínas, almidones y grasas o aceites. Estas transforman la proteína en compuestos fáciles de disolver en agua, y en el caso de que no transformen toda la proteína contenida en la suciedad, la degradan de tal forma que facilitan el mecanismo de lavado.

**5.** Por último a los detergentes, se les suele agregar algún tipo de perfume, para mejorar la presentación del producto, haciéndolo más atractivo para el consumidor.

## TIPOS DE DETERGENTES.

Por lo general, los detergentes se aplican al sustrato sucio en forma de un baño muy diluido. Sin embargo, los detergentes se fabrican y se venden en gran variedad de formas físicas en relación con usos especiales y problemas específicos de producción y formulación. En muchos casos, se incluye un ingrediente en la fórmula del





detergente con el único fin de modificar o de controlar la forma física. Según la forma, la mayoría de los detergentes pertenecen a uno de los siguientes grupos: polvos, pastas, barras, líquidos o escamas. Las condiciones importantes que rigen la formulación de un detergente son: temperatura de baño; la relación entre el peso del baño y el peso de la mugre y el sustrato; Una consideración final en la formulación de todos los tipos de detergentes es la compatibilidad de los ingredientes y la estabilidad del producto.

De acuerdo al uso los detergentes, estos se pueden clasificar dentro de alguno de los siguientes grupos:

- 1. Detergentes para el Tratamiento de textiles en el proceso.-** La elección de detergentes para quitar la suciedad y los lubricantes de la hilaza, de los artículos tejidos y de los géneros de punto depende en gran parte de la clase de fibra. Los artículos de algodón se hierven en grandes calderas con sosa cáustica débil o sosa cáustica y silicato de sodio como componente principal del detergente. El rayón y las fibras sintéticas se desengrasan con detergentes comunes, no útiles en los artículos de lana. La combinación de cloruro de sodio y detergente es particularmente útil para quitar de la lana el aceite mineral. Los tejidos estampados se lavan con jabón y carbonato de sodio para desprender el color suelto en la superficie y los residuos de tinta, pero hoy se tiende a usar detergentes del tipo sulfonado, con fosfatos y CMC (carboximetilcelulosa), en fórmulas semejantes a las que se emplean en el lavado del algodón.
- 2. Detergentes para el Lavado Doméstico.-** En el lavado de telas y ropas en el hogar se distinguen el lavado fino y el lavado fuerte. El lavado fino se hace a mano y se aplica a las medias, ropa interior, suéteres de lana, etc. El lavado fuerte o pesado de trajes o artículos de algodón y de lino se efectúa en máquinas lavadoras o a mano. Las formulaciones de detergentes con coadyuvantes para trabajo fuerte están formados esencialmente por un detergente orgánico no jabonoso, un fosfato, una sustancia que evita el redepósito (usualmente la Carboximetilcelulosa), cantidades menores de activos especiales, como sustancias anticorrosivas, estabilizadores de espuma, blanqueadoras ópticas, etc., y el resto es humedad y sulfato de sodio.
- 3. Detergentes para el Lavado Comercial.-** Las fórmulas de detergentes usados en las lavanderías contienen generalmente mayores cantidades de coadyuvantes que los paquetes de detergentes que se venden para uso doméstico. El TPS y el silicato de sodio son preferidos a otros álcalis. La CMC (carboximetilcelulosa) es la sustancia más usada para conservar la blancura. En las lavanderías la cantidad de ropa es mayor y las máquinas deben ser más grandes, de manera que la acción mecánica es más intensa; la temperatura es más alta; se usa hipoclorito; se acostumbra hacer un remojo previo y además se controlan las condiciones del agua empleada en los lavados.
- 4. Detergentes para Superficies Duras.-** Su fórmula incluye una cantidad de tensoactivos más pequeña que la acostumbrada para los detergentes textiles. En algunas ocasiones y dependiendo del tipo de sustrato que se va a lavar, se agrega al detergente algún tipo de abrasivo ligero para pulir la superficie que se lava.







Los tipos de detergentes mencionados son los más usuales y conocidos, así por ejemplo encontraremos detergentes lavavajillas, desmanchadores diversos, etc., los cuales los podemos ubicar dentro de alguno de los grupos descritos previamente.

**MÉTODOS DE ELABORACIÓN DE DETERGENTES SINTÉTICOS.**- Existen gran variedad de detergentes sintéticos, el que se produce en mayor volumen es el que se elabora con surfactantes del tipo alquil aril sulfonato, que es un compuesto químico que consta de tres partes básicas: una cadena lineal de átomos de carbono, que viene siendo el alquil; una cadena cerrada de átomos de carbono, que llamaremos anillo y el radical sulfonato. En la práctica industrial, la producción de alquil aril sulfonato consta de una etapa de sulfonación y otra de neutralización. La sulfonación es la reacción del compuesto  $\text{SO}_3$  con un alquil arilo, cuyo producto es un ácido denominado alquil aril sulfónico. La neutralización es la reacción entre el ácido alquil aril sulfónico y un agente alcalino, obteniéndose el alquil aril sulfonato. Aquí es conveniente mencionar que el agente alcalino que se usa en mayor volumen, es el hidróxido de sodio, que industrialmente se conoce como sosa cáustica.

Refiriéndonos al caso específico de los detergentes sintéticos a base alquil aril sulfonatos, las diferencias entre los diversos métodos de fabricación, consisten básicamente en los mecanismos de sulfonación utilizados.

Industrialmente existen dos métodos para efectuar la sulfonación :

- a) Sulfonación con Óleum.
- b) Sulfonación con gas  $\text{SO}_3$ .

El óleum solo puede ser empleado para sulfonar determinado tipo de materiales sulfonables, mientras que el  $\text{SO}_3$ , es útil prácticamente para todos los tipos de materiales sulfonables. Por las múltiples ventajas que tiene la técnica de sulfonación con  $\text{SO}_3$  algunas empresas optan por seleccionar el proceso Sulfure, como también es conocido el proceso con  $\text{SO}_3$ , para la fabricación del agente tensoactivo.

Dentro de la gran diversidad de detergentes sintéticos, los alquil aril sulfonatos son los más importantes. Existen muchas razones para esto. Las materias primas utilizadas son las más fáciles de conseguir. El alquil arilo más importante en la fabricación de detergentes, es el dodecil benceno (DDB). La principal fuente de DDB, es la industria petrolera.

#### ELABORACIÓN DE DETERGENTE POR SULFONACIÓN CON TRIÓXIDO DE AZUFRE.

El azufre se recibe en polvo, con una pureza aproximada de 95%, siendo transferido a un tanque disolvidor, donde por medio de serpentines con vapor, es fundido y mantenido a una temperatura aproximada de  $140^\circ\text{C}$ . Debe ser a esta temperatura porque en esas condiciones presenta una velocidad mínima, facilitando su transporte a través de tuberías. Una vez disuelto, el azufre es filtrado y bombeado a tanques de almacenamiento, de donde posteriormente se tomará para proceso.





El aire empleado en el proceso debe estar limpio y libre de humedad ya que esta propicia la formación de ácido sulfúrico, compuesto que es altamente corrosivo, alterando además las características de los productos principales. La humedad del aire es eliminada por medio de enfriamiento y absorción. El aire es primeramente enfriado hasta 2°C, condensándose una parte de humedad. Esto se consigue con una unidad frigorífica que emplea un tipo especial de salmuera como agente enfriador del aire, siendo una vez, enfriada constantemente por medio de gas Freón. Esta salmuera que contiene etilenglicol, se emplea porque tiene un punto de congelación muy por abajo de cero grados centígrados en tanto que el agua se congela a cero grados centígrados normalmente. La humedad no se condensa en la unidad frigorífica, es absorbida por medio de sílica gel en secadores posteriores. Una vez que la sílica gel está saturada de humedad, se regenera secándose con aire caliente.

El aire seco se emplea para quemar el azufre, obteniendo  $\text{SO}_2$ . La combustión es altamente exotérmica (generadora de calor), saliendo la corriente gaseosa del quemador con una temperatura aproximada de 600 grados centígrados. Posteriormente, la corriente gaseosa proveniente del quemador de azufre, es introducida a un convertidor catalítico para convertir el  $\text{SO}_2$  en  $\text{SO}_3$ . El convertidor catalítico consta de tres lechos de peróxido de Vanadio, que es el compuesto que permite la conversión de  $\text{SO}_2$  en  $\text{SO}_3$ . Esta conversión también es exotérmica, por lo que en cada paso se elevará la temperatura de la corriente gaseosa. Las características de la conversión indican que la corriente gaseosa no debe exceder de 450°C, por lo cual, se debe enfriar hasta una temperatura comprendida en el intervalo de 400 a 450°C a la entrada de cada uno de los tres pasos del convertidor.

Después de la obtención del  $\text{SO}_3$ , el paso siguiente en el proceso, es la sulfonación del DDB. Esto se lleva a cabo en una serie de reactores en los que se alimentan simultáneamente y en forma continua, el  $\text{SO}_3$  y el DDB. El producto que se obtiene es el ácido dodecil bencen sulfónico, usualmente denominado ácido sulfónico simplemente. El ácido sulfónico es una pasta viscosa de color café oscuro y olor característico, que al neutralizarlo con sosa cáustica, produce el dodecil bencen sulfonato de sodio, conocido también como sulfonato de sodio o simplemente como base. Esta base es el ingrediente principal de los detergentes, ya que será el material activo. Por lo anterior cuando no se habla del contenido de activo en la base y en los detergentes, nos estaremos refiriendo al contenido de sulfonato de sodio en los mismos. La base junto con los demás ingredientes, es mezclada en proporción adecuada para cada tipo de detergente.

La pasta que se obtiene en los mezcladores, es pasada a través de desaeradores, en donde se les elimina el aire para mejorar el proceso de secado. Después de los desaeradores, la pasta es bombeada a las torres de secado, en donde por medio de espreas, se forma una lluvia que es secada por medio de aire caliente que es alimentado usualmente por la parte inferior de la torre. El detergente seco sale por la parte inferior de la torre, mientras que el aire húmedo sale por la parte superior. El aire húmedo arrastra gran cantidad de partículas finas de detergente, las cuales son separadas por medio de separadores ciclónicos, ya que no deben ser emitidas a la atmósfera. El polvo que se recoge en los ciclones, se conoce como polvo de ciclón o como los "finos" del detergente.

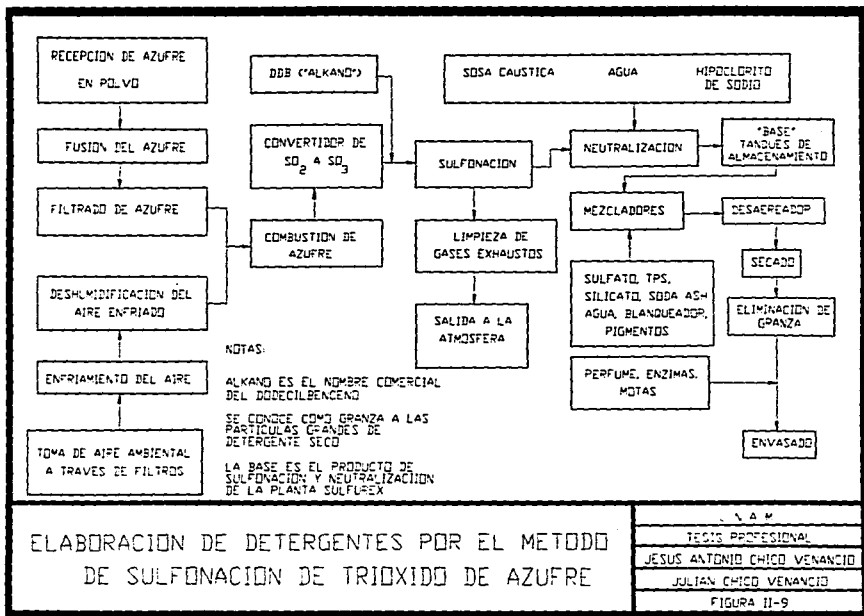


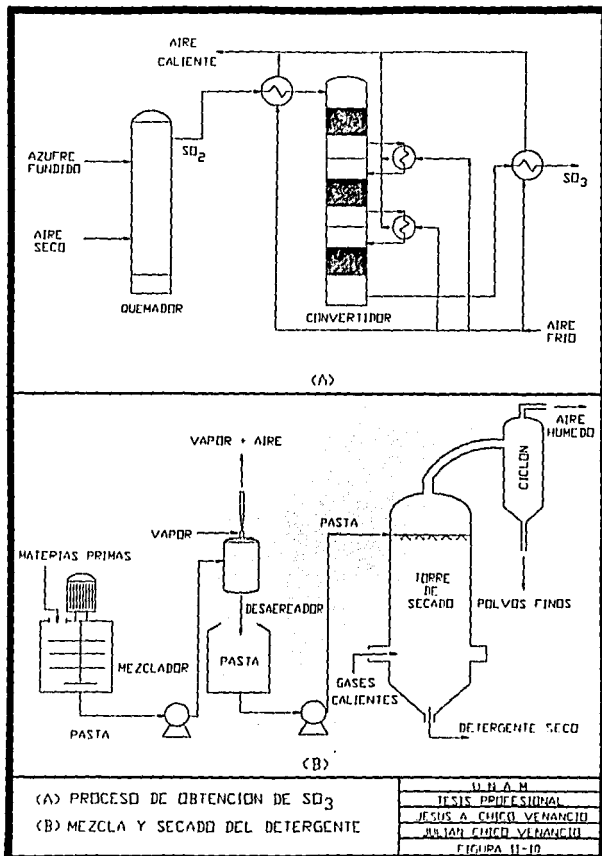


El detergente en polvo que sale de la torre de secado es succionado por medio de un elevador neumático (air lift), enfriándose para poder ser envasado sin problemas. Del air lift, cae a unos separadores mecánicos (zarandas), donde le son eliminadas las partículas grandes de detergente. Una vez que sale de las zarandas, el detergente es transportado por medio de bandas hasta el departamento de envasado. En el transcurso, le son adicionados el perfume, las motas de color y las enzimas; ya que estas materias no deben ser expuestas a las condiciones que se necesitan en la torre de secado. El detergente que no reúne los requisitos necesarios para envasarse es reprocesado.

En los diagramas siguientes, se representan el diagrama de bloques de la elaboración de los detergentes y los procesos de obtención de  $SO_2$  y el de mezcla y secado del detergente por medio de torres de aspersión (Figs. II-9 y II-10).









## II.9 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

**INTRODUCCIÓN.**- La sola construcción de un buen sistema de alcantarillado, no es la solución total al problema que se presenta con las aguas negras, si no que para llegar a completarlo y darle una solución que sea la correcta, es necesario idear la forma de la eliminación de las aguas mencionadas que son conducidas por estos sistemas, ya que con esto se logra que los desechos ofensivos y potencialmente peligrosos para la salud sean parcialmente removidos de su peligrosidad, con lo cual se evitan contaminaciones en corrientes superficiales (ríos, lagos, etc.), así como mantener libre de polución las aguas subterráneas que en muchos de los casos son fuentes de abastecimiento para las poblaciones. A continuación se da una clasificación del objetivo principal del tratamiento adecuado de las aguas negras:

1. Que no provoquen perjuicios a zonas de recreo y balnearios.
2. No crean condiciones indeseables a la vista y al olfato.
3. Mantener libre de problemas fuentes de aguas que son utilizadas para fines agrícolas, comerciales e industriales.
4. Evitar la eliminación de zonas afectadas de vida acuática, que se pueden aprovechar como alimento.
5. A los desechos que provienen de la industria se les dará un tratamiento previo, antes de su descarga en el sistema de alcantarillado para:
  - Evitar sobrecargas orgánicas que crearían problemas en las plantas de tratamiento.
  - Eliminación de desechos tóxicos que puedan afectar el tratamiento posterior de su mezcla con el agua del alcantarillado.
6. Debido a la creciente demanda de agua en las poblaciones y a limitaciones de fuente de abastecimiento, pueden ser explotadas de inmediato o económicamente; las aguas negras serán tratadas con fines de utilización para algunas necesidades que no requieran agua de la calidad de la potable, como por ejemplo:
  - En el riego de zonas verdes.
  - Para la alimentación de lagos para recreo y ornato.
  - Enfriamiento de productos de laminación.
  - Enfriamiento en plantas de vapor para generación de energía.
  - Utilización en procesos industriales.
  - Como fuente para la producción de agua de la mejor calidad para diferentes procesos industriales como tenerías, en el curtido de pieles, etc.
  - Para el uso en el combatimiento de incendios.

Como se ha observado las necesidades son demasiadas, que se cumplen al solucionar en forma correcta o adecuada, el tratamiento de las aguas negras y la elección del mismo se determinará por el uso y objetivo que se persiga en dicho tratamiento.

### IMPUREZAS POR ELIMINAR.

- a) En las aguas negras domésticas: deyecciones humanas sólidas y líquidas, residuos de comidas, grasas y aceites, papeles, trapos, etc., bacterias y protozoarios.
- b) En aguas residuales industriales, además de las anteriores: materia orgánica animal y vegetal, sustancias químicas, grasa, ácidos, etc.





## ETAPAS DE TRATAMIENTO.

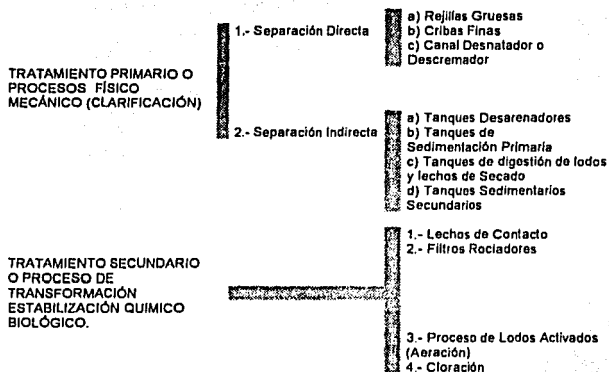
Los procesos primordiales que el agua necesita para su tratamiento, son dos:

1. Proceso Primario.
2. Proceso Secundario.

En un proceso primario los sólidos flotantes en suspensión o sedimentables se reducen por sedimentación libre, tamización fina o en fosas sépticas.

En el proceso secundario se reciben las aguas procedentes del proceso primario y comprende un tratamiento mecánico, químico o biológico para disminuir los sólidos en suspensión o disueltos y la demanda bioquímica de oxígeno.

## PLANTAS DE TRATAMIENTO



Auxiliándonos de esta clasificación daremos una descripción breve de cada uno de los elementos que son requeridos en el tratamiento de las aguas negras en cada uno de los procesos indicados.

### TRATAMIENTO PRIMARIO (FÍSICO-MECÁNICO)

Al primer proceso (Tratamiento Primario) se le puede dividir en:

- 1.- Separación Directa.
- 2.- Separación Indirecta.





En la que los elementos que forman parte de la separación directa son los siguientes:

**a) Rejillas Gruesas.-** Consisten en rejas construidas de solera de hierro que se colocan generalmente a la corriente de las aguas negras, su objetivo es interceptar y separar los sólidos gruesos, tales como papeles, trapos, palos, botellas de vidrio, envases de metal, etc., que pueden destruir el equipo de bombeo de la planta (en caso de que sea necesario), o bien alterar el proceso de tratamiento. La limpieza de las rejillas normalmente es realizada a mano.

**b) Cribas Finas.-** Tienen por objeto la retención de una parte de los sólidos en suspensión. Normalmente se usan como tratamiento único. Los tipos más usados son las cribas de banda, de disco, de tambor, de aletas y las concentradoras. Tienen el defecto debido a los espacios demasiado pequeños, de obstruirse con facilidad, lo que hace necesario una limpieza periódica, la cual se lleva a cabo por medios mecánicos. Los productos recogidos de las rejillas y cribas es sumamente peligroso, por lo que es recomendable se incinere o se entierre.

**c) Canal Desnatador o Descremador.-** Es utilizado cuando las aguas negras contienen grandes cantidades de aceite y grasas que pueden suspender el funcionamiento de algunos aparatos usados en el tratamiento e inhibir el crecimiento de filamentos en el material filtrante. Una vez que las aguas han pasado por las rejillas y cribas, se encausan hacia un canal en donde se encuentra un aspa giratoria en su superficie, esto permite arrastrar las natas y espuma a pequeños vertederos que se ubican en ambos lados del canal.

Otro método muy usado para quitar la grasa y aceite es el que se realiza por medio de aereación, agitando las aguas negras a un tanque mediante difusión de aire en donde dichas partículas de grasa y aceite se adhieren a las burbujas ascendentes de aire y son llevadas a la superficie formando espuma que se extrae superficialmente a través de un vertedor.

**2.- Separación Indirecta.-** Es la fase del tratamiento en donde se efectúa la clarificación de las aguas negras.

Cuando las aguas han circulado por las instalaciones anteriores, han dejado una cierta cantidad de sólidos flotantes pero aún les quedan gran parte de materia sólida en estado de suspensión, así como una parte de materia en estado coloidal que es necesario separarlas, para lo cual hacemos uso de las instalaciones siguientes:

**a) Tanques Desarenadores.-** Son necesarios cuando el sistema de alcantarillado es combinado. El procedimiento que se usa consiste en la disminución de la velocidad lo suficiente para que los materiales más pesados se sedimenten tales como el cascajo, la arena, etc., en tanto que la materia orgánica más ligera sigue en suspensión. Una velocidad de 0.30 m/seg., es suficiente para retener las materias minerales por sedimentación.

**b) Tanques de Sedimentación Primaria.-** En estos se efectúa el fenómeno de sedimentación debido únicamente a la acción de la gravedad, sin que se ayude o







modifique mediante la adición de materias químicas o medios mecánicos. Se considera que un período de 45 minutos a 2 horas es necesario para que se sedimenten las materias que son normalmente de naturaleza orgánica. Las aguas así parcialmente clarificadas salen del tanque, dejando el lodo que forman los sólidos asentados en el fondo.

c) **Tanques de digestión de lodos y lechos de secado.**- Al retirar los lodos orgánicos asentados en el tanque de sedimentación primaria, pasan a las plantas digestoras en donde la materia orgánica es digerida por medio de acciones bacterianas. Una vez que dichos lodos han sido digeridos, se secan en lechos de arena para subsiguientemente ser usados en rellenos, fertilizantes o bien incinerarlos utilizando como combustible los gases producidos por la digestión de lodos.

d) **Tanques Sedimentarios Secundarios.**- Una parte de los sólidos en suspensión, muy finos, y los que se mantienen en estado coloidal en las aguas negras crudas se pueden quitar mediante tratamiento con sustancias químicas. Para el tratamiento de las aguas negras se usan bastantes sustancias químicas como precipitadores, alumbre, cal, sales de hierro y ácido sulfúrico o bióxido de azufre; de estas sustancias las más usadas son las sales de hierro, particularmente cloruro férrico y sulfato férrico. En general, las aguas negras y las sustancias químicas son introducidas en una cámara mezcladora en proporciones apropiadas. Después de haber sido mezcladas perfectamente en esta cámara, pasan a un tanque floculador de mezclado lento y de allí a tanques sedimentarios donde el floculo se precipita. En la mayor parte de las plantas son usados mezcladores mecánicos. El período de retención en el tanque depende de la composición de las aguas negras y de la clase de materias químicas usadas. El tratamiento con sustancias químicas es esencialmente conveniente en el tratamiento de las aguas residuales industriales, o bien en el de las aguas negras domésticas que contienen elevados porcentajes de residuos industriales. En algunas plantas, para activar el proceso de floculación, se inyecta en estas unidades una pequeña parte de lodos orgánicos.

## TRATAMIENTO SECUNDARIO (QUÍMICO-BIOLÓGICO)

El estado que guardan las aguas negras después del tratamiento primario es aún indeseable y peligroso. Por esto es necesario asentar la materia que aún llevan en suspensión y dilución, lo cual es demostrable dando un tratamiento de oxidación hasta lograr conseguir que la materia orgánica sea reducida a formas más estables para que no se continúe la descomposición anaerobia en su consecuente producción de olores.

Los métodos comunes en el tratamiento secundario son los siguientes:

1.-**Lechos de contacto.**- Con objeto de obtener estructuras de mayor eficiencia que los filtros intermitentes de arena se ideó un filtro con granos más gruesos y se substituyó la arena por grava o piedra quebrada, esta sirve como material de sostén para la película biológica que se forma sobre la superficie. Como estos lechos, formados por granos gruesos, dejaban pasar las aguas con gran rapidez, se ideó mantener el material en tanques y usar el sistema de llenado y vaciado, al que se les





modifique mediante la adición de materias químicas o medios mecánicos. Se considera que un período de 45 minutos a 2 horas es necesario para que se sedimenten las materias que son normalmente de naturaleza orgánica. Las aguas así parcialmente clarificadas salen del tanque, dejando el lodo que forman los sólidos asentados en el fondo.

**c) Tanques de digestión de lodos y lechos de secado.**- Al retirar los lodos orgánicos asentados en el tanque de sedimentación primaria, pasan a las plantas digestoras en donde la materia orgánica es digerida por medio de acciones bacterianas. Una vez que dichos lodos han sido digeridos, se secan en lechos de arena para subsiguientemente ser usados en rellenos, fertilizantes o bien incinerarlos utilizando como combustible los gases producidos por la digestión de lodos.

**d) Tanques Sedimentarios Secundarios.**- Una parte de los sólidos en suspensión, muy finos, y los que se mantienen en estado coloidal en las aguas negras crudas se pueden quitar mediante tratamiento con sustancias químicas. Para el tratamiento de las aguas negras se usan bastantes sustancias químicas como precipitadores, alumbre, cal, sales de hierro y ácido sulfúrico o bióxido de azufre; de estas sustancias las más usadas son las sales de hierro, particularmente cloruro férrico y sulfato férrico. En general, las aguas negras y las sustancias químicas son introducidas en una cámara mezcladora en proporciones apropiadas. Después de haber sido mezcladas perfectamente en esta cámara, pasan a un tanque floculador de mezclado lento y de allí a tanques sedimentarios donde el floculo se precipita. En la mayor parte de las plantas son usados mezcladores mecánicos. El período de retención en el tanque depende de la composición de las aguas negras y de la clase de materias químicas usadas. El tratamiento con sustancias químicas es esencialmente conveniente en el tratamiento de las aguas residuales industriales, o bien en el de las aguas negras domésticas que contienen elevados porcentajes de residuos industriales. En algunas plantas, para activar el proceso de floculación, se inyecta en estas unidades una pequeña parte de lodos orgánicos.

## TRATAMIENTO SECUNDARIO (QUÍMICO- BIOLÓGICO)

El estado que guardan las aguas negras después del tratamiento primario es aún indeseable y peligroso. Por esto es necesario asentar la materia que aún llevan en suspensión y dilución, lo cual es demostrable dando un tratamiento de oxidación hasta lograr conseguir que la materia orgánica sea reducida a formas más estables para que no se continúe la descomposición anaerobia en su consecuente producción de olores.

Los métodos comunes en el tratamiento secundario son los siguientes:

**1.-Lechos de contacto.**- Con objeto de obtener estructuras de mayor eficiencia que los filtros intermitentes de arena se ideó un filtro con granos más gruesos y se substituyó la arena por grava o piedra quebrada, esta sirve como material de sostén para la película biológica que se forma sobre la superficie. Como estos lechos, formados por granos gruesos, dejaban pasar las aguas con gran rapidez, se ideó mantener el material en tanques y usar el sistema de llenado y vaciado, al que se les





dio el nombre de lechos de contacto. Estos lechos trabajan bajo el mismo principio que los filtros intermitentes de arena; una gran parte de la materia sólida y coloidal se retiene en los intersticios del lecho, en tanto que la bacteria aeróbica fija en la película biológica que cubre la superficie de la grava, convierte la materia orgánica en substancias estables.

El lecho se llena de aguas negras, manteniéndose lleno durante cierto tiempo; después se vacía y se mantiene vacío, también por un tiempo. Los periodos de contacto más apropiados son de 30 a 45 minutos, de esta forma se evita que las aguas se hagan sépticas. El tiempo de tanque vacío debe ser alrededor de 4 horas. Este periodo es demasiado trascendental porque durante él, la bacteria realiza la disminución de la materia orgánica que se encuentra en el material del lecho, tomando oxígeno del aire que penetra en los vacíos del material del sostén. Los lechos de contacto bien operados, recibiendo aguas negras bien presedimentadas y sujetando el efluente a sedimentación secundaria, hacen disminuible el contenido de materia en suspensión del 80 al 90%; la demanda bioquímica de oxígeno del 65 al 85%, y la bacteria del 80 al 80%. La operación puede llevarse a cabo bien manejando a mano la corriente de aguas o bien mediante dispositivos que funcionan automáticamente.

**2.- Filtros Rociadores.-** En esta unidad las aguas negras son rociadas sobre un lecho de piedras gruesas con desagües permitiendo el deslizamiento a través de las mismas con lo cual se logra oxidar la materia orgánica impidiendo en parte la disgregación de la misma; se remueven a la vez gran cantidad de gases y por consiguiente gran cantidad de olores desagradables; también las formas de crecimiento biológico en las piedras remueven mucha materia orgánica en estado de solución coloidal. En esta unidad normalmente las descargas se hacen en forma intermitente con lo que se permite así la recuperación de oxígeno entre los huecos del material filtrante.

**3.- Procesos de Lodos Activados (Aereación).-** Aquí las aguas negras son puestas en contacto íntimo con el aire y lodos activados biológicamente, los cuales han sido obtenidos previamente. El proceso se ejerce en tanques que están diseñados para dar una mezcla total y una acción continua de agitación. Los procesos esenciales son similares a aquéllos que se usan en los filtros rociadores, obteniéndose una mayor remoción.

**4.-Cloración.-** Este proceso consiste en aplicar el cloro, gas o solución de hipoclorito u otros agentes, a los líquidos ya tratados con la intención de desinfectarlos. Algunas veces se aplica el cloro para controlar olores en las plantas de tratamiento.

El diagrama que se presenta a continuación es el de diversos procesos que se realizan en una planta para el tratamiento de aguas negras Fig. II-11.

**LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.-** Estas instalaciones pueden definirse como estructuras para represado que están sujetas a normas de control en cuanto a formas, profundidad y superficie. Están diseñadas y construidas específicamente para el tratamiento de aguas negras, por proceso de purificación biológicos, químicos y





físicos. El funcionamiento de estas lagunas esta basado en dos formas primitivas de vida, algas y bacterias. El punto de partida de la energía es el sol, esta energía unida a la propiedades fotosintéticas de las algas, las capacitan para utilizar los desechos orgánicos escasamente fermentados, básicamente bióxido de carbono para producir más células de algas y liberar oxígeno que precipita las actividades de las bacterias aerobias.

Su principal aplicación es el tratamiento completo de aguas negras y ciertos desechos industriales. Tienen las siguientes ventajas:

1. Costos mínimos de operación y mantenimiento.
2. Tratamiento efectivo de alto grado.
3. Bajas inversiones de capital.

Cuando son diseñadas para recibir desechos pre-tratados o se usan como tratamientos secundarios, después del tratamiento primario convencional, se llama laguna de oxidación.

Desde el punto de vista de la salud pública, deberán tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

Deberá evitarse el contacto humano con el contenido de las lagunas. Deberá denegarse cualquier uso de las lagunas con fines recreativos, además el ganado no debe tener ingreso a ellas.

De ser posible, deberá impedirse su ubicación en zonas de suelo poroso y formaciones de roca fisurada o en su defecto tomar precauciones especiales para lograr un sellado efectivo del piso y bordos.

### REACTOR ANAEROBIO.

Cabe hacer mención que en nuestro país el Instituto de Ingeniería de la UNAM diseñó un reactor para el tratamiento anaerobio de aguas residuales. Es una tecnología que puede llegar a convertir ese proceso en una fuente de ahorro para la industria. Este proceso significa bajos costos de operación y mantenimiento, no solo consume energía sino que la produce. La Coordinación de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha llegado a desarrollar innovaciones tecnológicas para resolver el problema. Una de las más novedosas y eficaces es el tratamiento por la vía anaerobia, el cual utiliza micro-organismos que no necesitan oxígeno para degradar la materia orgánica. Este tratamiento es utilizado cuando los principales contaminantes presentes en el agua son biodegradables; en tal situación se encuentran los desechos líquidos de la industria alimentaria, la papelera, la agroindustria, así como algunos desechos de la petroquímica y de la farmacéutica, además de las aguas negras municipales.

La tecnología anaerobia posee tres ventajas que se traducen en bajos costos de operación y mantenimiento: consume poca energía, puede producir la necesaria para su operación y desecha pocos lodos. Los procesos anaerobios no utilizan oxígeno, es por ello que sus requerimientos energéticos son muy bajos. No es necesario trasladar



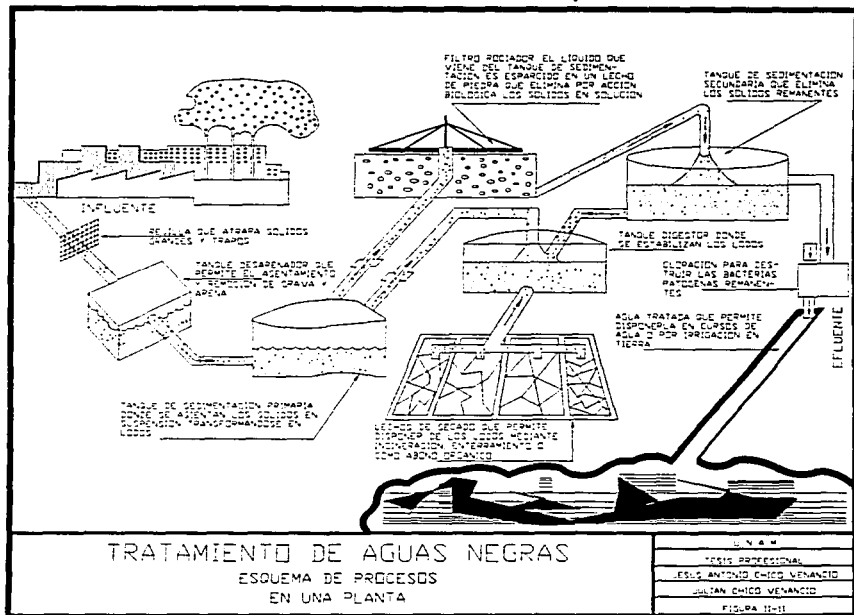


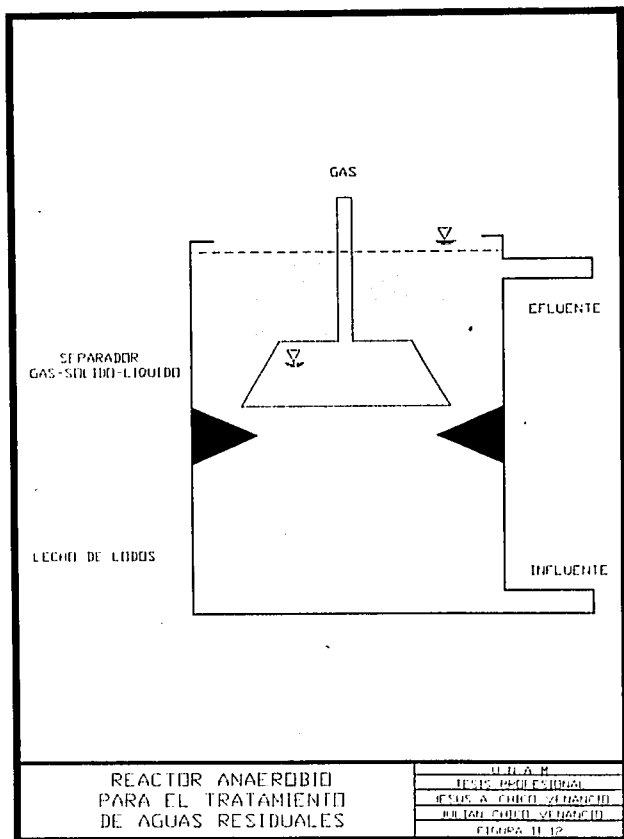
oxígeno con agitadores o compresores, como ocurre en los procesos aerobios. Además, al convertir la materia orgánica de las aguas residuales esencialmente en gas metano, producen energía. La energía del gas metano puede utilizarse en forma directa como energía calorífica o transformarse en energía mecánica o eléctrica. Esto se debe a que la materia orgánica se convierte en gas metano, la cantidad de microorganismos que se producen durante el proceso es muy pequeña lo cual reduce en poca producción de lodos. Esto se considera como una ventaja porque los lodos son desechos sólidos que también deben ser tratados. La legislación en la materia no permite la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales si estas no cuentan con el dispositivo para el tratamiento de sus lodos. Hasta hace poco las industrias tiraban esos lodos al drenaje o los evacuaban en el campo; ahí se descomponían o eran arrastrados por las lluvias a los cuerpos de agua y los contaminaban.

Habitualmente los reactores anaerobios se inoculan con lodos provenientes de reactores similares. Como nuestros reactores son los primeros que se construyen en México, se ha desarrollado tecnología para producir las bacterias que formen los lodos requeridos de tipo granular, esa es una segunda patente que se desarrolló en colaboración con la UAM (Universidad Autónoma Metropolitana) y el ORSTOM (Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación). Los reactores anaerobios reúnen determinada cantidad de lodos, se desalojan y en lugar de desecharlos pueden venderse. Esto se realiza comúnmente entre los países Europeos, Japón, Brasil y Estados Unidos. Para funcionar cada reactor requiere lodo equivalente al 10% de su volumen total. El proceso anaerobio puede generar ingresos netos mediante la recuperación del gas metano producido. Por otro lado requiere de equipo mínimo y relativamente simple; además, es un proceso adecuado en la industria de temporada porque los lodos necesarios en el proceso pueden resistir períodos prolongados sin alimentación. Sin duda esta es la única tecnología que puede transformar al tratamiento de aguas residuales en una fuente de ahorro para la industria. Por lo pronto cuatro empresas consultoras en ingeniería ambiental han comprado la patente para su comercialización. Este reactor tiene funcionamiento en importantes industrias mexicanas.

A continuación se muestra el esquema de este reactor Figura II-12.









### CONTEXTO NACIONAL.

En nuestro país la infraestructura para prevención y control de la contaminación del agua es preocupante. Según datos que fueron proporcionados en 1988 por la Comisión Nacional del Agua, en las 650 poblaciones del país con más de 10 mil habitantes existen 256 plantas para el tratamiento de aguas residuales. Esto representa sólo el 12% del total del caudal evacuado (120 m<sup>3</sup>/s.).

Pero lo más grave es que el 65% de esas plantas no funcionan; 7% trabaja con una eficiencia menor al 40%; el 23% logra entre 40 y 80% de eficiencia y sólo el 5% alcanza eficiencias mayores a 80 puntos porcentuales.

Desde 1988 la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología normó (mediante la ley General de Protección al Ambiente y al Equilibrio Ecológico) la contaminación del agua por desechos domésticos e industriales. Posteriormente, en 1991, la ley Federal de Derechos en Materia de Aguas, autorizó a la Comisión Nacional del Agua para que realizará cobros por descargas de aguas residuales. Ahora, los empresarios buscan como tratar sus aguas en forma eficiente y económica.

Los procesos convencionales no constituyen, en todos los casos, una solución a todas las necesidades de saneamiento de los cuerpos acuíferos del país.







## II.10 FABRICACIÓN DEL AZÚCAR.

**INTRODUCCIÓN.**- Antiguamente los Hindúes la denominaron "Gur" o "Sacara", que significa guijarro o piedrecita; un médico griego le asignó la palabra "Sacharum", la cual los árabes cambiaron por el vocablo "Sukkar", del que se originó la palabra azúcar.

El azúcar es una sustancia neutra, soluble en el agua y de sabor dulce, que por acción de fermentos se descompone en alcohol y anhídrido carbónico. El nombre de azúcar se aplica a todas aquellas sustancias que contengan: dextrosa, glucosa, meliculosa, etc. El azúcar que se utiliza para endulzar los alimentos que ingerimos diariamente es la sacarosa. La fórmula de la Sacarosa es  $C_{12}H_{22}O_{11}$  y es producida en todas las plantas por el proceso de fotosíntesis. De todas las plantas existentes las que almacenan un mayor contenido de sacarosa son la caña de azúcar y la remolacha azucarera.

En nuestro país se elaboran los siguientes tipos de azúcar:

- ◆ Azúcar crudo o Mascabado.
- ◆ Azúcar Estándar o Sulfitado.
- ◆ Azúcar Refinado.

Por lo que expondremos a grandes rasgos y en forma descriptiva, en que consiste y como se elaboran estos azúcares, sin olvidar a la Remolacha Azucarera.

### ANÁLISIS HISTÓRICO DE LA CAÑA DE AZÚCAR.

La caña de azúcar es originaria de la Isla de Nueva Guinea; su primera utilización fue como planta de jardín que se mascaba. En la India se presentan los primeros cruzamientos con cañas silvestres de la región.

La difusión de la caña de azúcar en el Mediterráneo se debe a los árabes. Los egipcios, con sus conocimientos de química, perfeccionaron la limpieza del azúcar refinándola con cenizas de diversas plantas. La introducción al Continente Americano fue en 1493, en el cual Cristóbal Colón emprendió un viaje a las Indias llevando caña de azúcar procedente de España. Esta fue plantada en un lugar llamado la Isabel, localizado en la costa norte de lo que hoy es la República Dominicana. Fray Bartolomé de las Casas cuenta que en el año de 1515, Gonzalo de Velosa construyó el primer trapiche o molino, para extracción del jugo. El vocablo "ingenio", por decir industria, maña o arteificio, se utilizó para distinguirlo del trapiche; ya que en el ingenio se utilizó la fuerza hidráulica para el accionamiento de los molinos.

En 1524 Hernán Cortés introdujo la caña de azúcar a la Nueva España aprovechando los logros obtenidos en las Antillas y construyó el primer ingenio en la Villa Rica de Veracruz, el cual bautizó con el nombre de "Tuxtla". En los años de la Guerra de la Independencia la industria azucarera se encontraba mutilada y nuevamente durante la revolución de 1911 a 1915, gran parte de la maquinaria de los ingenios fue destruida.





Durante los gobiernos de Alvaro Obregón y Plutarco Elías Calles, hubo un nuevo auge en la industria azucarera; Obregón creó un código que declaraba inafectables las tierras en donde se sembraba la caña de azúcar. Actualmente la industria azucarera de Nuestro País, se haya dividida en ingenios manejados por el Sector Privado, y por el Sector Público e ingenios manejados bajo la forma de Cooperativas.

### **AZÚCAR CRUDO (MASCABADO)**

La entrega de la caña al batey, puede ser caña cruda o quemada, la mayoría de ingenios puede procesar caña quemada.

**BATEY (1).**- La caña se transporta por camiones o góndolas de ferrocarril al batey, su preparación de la caña en el batey tiene por objeto lograr la mayor extracción de jugo posible de la caña (se le llama guarapo), por lo que una vez pesada se descarga por medio de grúas a las mesas alimentadoras y de éstas al conductor principal y de éste al conductor auxiliar que tiene una pendiente para elevar la caña a la desfibradora. Estos conductores comúnmente llevan dos niveladores de caña (llamados gallegos), con el fin de hacer que el colchón se vaya haciendo uniforme conforme transite la caña por el conductor, posteriormente, se tienen dos juegos de cuchillas del tipo hojas rectas, reversibles con objeto de tener mejor preparación aún y finalmente una desfibradora de martillo. Es de suma importancia el tener una buena preparación de caña, para conseguir un alto nivel en la extracción del jugo de la caña que pasa a través del tándem de molinos. El criterio general para una buena preparación es la rotura de células, esto se logra mediante el corte de los tallos, a través de los sistemas de cuchillas, convirtiéndolos en astillas, seguidas por una desfibradora concienzuda. Debido a la aplicación de tecnología más moderna para lograr mayor producción y también a la escasez de mano de obra, las fábricas han instalado equipos adicionales como mesas lavadoras de caña, electroimanes, etc., con el objeto de reducir los costos de mantenimiento, especialmente en cuchillas, mazas de molinos, etc.

**EXTRACCIÓN (2).**- Aquí se cuenta con una desmenuzadora y un tándem de molinos, la extracción se logra mediante la compresión de la caña entre las mazas, para lograr mayor extracción se rocía el colchón del bagazo al salir de cada molino con chorros de agua o jugo. Este proceso llamado de imbibición o con menor frecuencia maceración o saturación, tiene muchas variantes. El sistema usado comúnmente para lograr mayor extracción, es el de maceración compuesta. Todo el jugo que sale de los molinos, pasa primero por un colador de guarapo, llamado pachaquil, con el objeto de separarle la mayor cantidad de bagacillo, antes de enviarlo al Depto. de Clarificación.

**CLARIFICACIÓN DE CRUDO (3).**- Se cuenta con una báscula para el pesado del guarapo, con el objeto de controlar la cantidad de jugo que llega al departamento y tanques para recibir el jugo pesado. La clarificación tiene por objeto remover del jugo la cantidad máxima de impurezas, el proceso de clarificación por medio de calor y lechada de cal, es el más comúnmente empleado en todo el mundo. En la lechada de cal, ésta cal neutraliza la acidez natural del jugo y forma sales insolubles de cal, principalmente en forma de fosfatos de calcio. Posteriormente el jugo pasa a los calentadores para elevar su temperatura con el objeto de que se lleve a cabo la





reacción, hirviendo a 96°C o sobrecalentando a 110°C, éste calentamiento normalmente se lleva a cabo en dos etapas (calentamiento primario y secundario). De aquí pasa el jugo al clarificador, en donde se separa el precipitado del jugo, obteniéndose jugo clarificado por la parte superior y el precipitado o cachaza por la parte inferior. La cachaza que sale de la parte baja del clarificador, se envía a la estación de filtros, normalmente rotativos al vacío, en estos filtros se recupera la sacarosa contenida en la cachaza. El jugo de los filtros retorna o se añade directamente al jugo claro y la cachaza se tira o se lleva a los campos como fertilizante. El jugo clarificado de color café oscuro se envía a los evaporadores sin sufrir tratamiento adicional.

**EVAPORACIÓN (4).**- En la evaporación el jugo clarificado que posee casi la misma composición que el jugo extraído, con excepción de las impurezas precipitadas que fueron extraídas por el tratamiento en el Depto. de Clarificación, contiene aproximadamente el 85% de agua, las 2 terceras partes de ésta agua se evaporan, para lo cual se disponen de sistemas de evaporación de múltiple efecto al vacío, que consiste en una sucesión (generalmente 4), de celdas de ebullición al vacío llamados cuerpos dispuestos en serie, para que en cada cuerpo haya más vacío que en el cuerpo inmediatamente anterior y el jugo que dicho cuerpo contiene hierva a menor temperatura, así los vapores producidos en un cuerpo, podrán calentar a ebullición el jugo que contenga el siguiente.

**CRISTALIZACIÓN (5).**- Se lleva a cabo en recipientes al vacío llamados tachos, en donde se concentra la meladura (producto final del evaporador) hasta quedar saturada de azúcar, al llegar a éste punto, se introducen cristales de siembra, para que sirvan de núcleo a los cristales de azúcar y se les va añadiendo más meladura a medida que se evapora el agua. Los cristales originales que fueron formados por la destreza del operador o por control mediante instrumentos (cuitómetros), etc., crecen sin que se formen cristales adicionales a medida de que en ellos se va depositando azúcar procedente de la masa de ebullición. Este crecimiento continúa hasta que al quedar lleno el recipiente ha alcanzado un tamaño previamente determinado. La mezcla de cristales y miel madre queda concentrada hasta quedar una masa densa (se le llama masa cocida), y a la templa o contenido del tanque se descarga a través de una válvula inferior hacia un mezclador o cristalizador con elementos enfriadores para las masas cocidas de templas de A, B o C, se pueda contar con gusanos de distribución de la masa cocida en los cristalizadores, con trampas de descarga y grupos moto-reductores de impulsión.

Los cristalizadores suelen ser intermitentes o continuos para masa "A" y "B", operan entre 1 1/2 y 8 hrs. de retención casi siempre debido a su alta pureza, la masa se vuelve de alta consistencia, es decir, se endurece, por lo que necesita lubricación para lo cual se le aplica miel diluida, tratando de evitar la destrucción del grano. Los cristalizadores para templas de "C" su tiempo de retención varía de 8 a 60 hrs. dependiendo del tipo del sistema de enfriamiento, en donde la masa "C" es enfriada y posteriormente calentada y sirve para agotar las mieles madres que integran las templas. Los recipientes en donde se reciben la meladura y la miel, están localizados anteriormente a los tachos. También se cuenta con porta-templas, semillero o graneros, bombas, etc.





**CENTRIFUGACIÓN (6).**- Aquí es donde se tienen baterías de centrifugas para plantas de A y B y plantas de C. De los cristalizadores de masa "A", pasa al departamento de centrifugas, éstas se utilizan para el trabajo de las masas cocidas de "A", cuentan con carga y descarga.

El canasto cilíndrico de la centrifuga ésta suspendido de una flecha, tiene sus costados perforados y forrados, el forro perforado retiene los cristales de azúcar y las mieles madres pasan a través del forro impulsadas por la fuerza centrífuga que por ellas se ejerce y cuando el azúcar queda purgado se descarga de la centrifuga. Posteriormente se descarga por una parte el azúcar, el cuál pasa a transportadores localizados bajo las centrifugas de "A", para llevar el azúcar húmedo hacia el departamento de manejo de azúcar y la miel se regresa a un tanque en el departamento de tachos, como material a usarse. En los cristalizadores de masa "C", la planta pasa a las centrifugas de masa "C", a través de mezcladores distribuidores de masa cocida "C". Para las centrifugas continuas éstas necesitan recibir una masa con cierta fluidez, viscosidad, concentración etc., para lograrlo, se aplica una lubricación a la masa, la que se hace con la miel de la purga de la misma centrifuga. También en algunos casos se usa agua simple. Estas centrifugas cuentan con espreas para aplicación de vapor, para evitar acumulación de residuos de miel o de azúcar que puedan provocar vibraciones además de eliminar obstrucciones que afecten la purga, también cuentan con espreas para la aplicación de agua, con el objeto de evitar el contacto en seco para que no se rompa el grano. De éstas centrifugas de "C", el azúcar se descarga a un transportador de hélice para llevarla hacia la planta de magma, en donde es mezclado por un mezclador de maga (mingler) con agua, esto es con el fin de hacer un maga y usarla como semilla, de aquí se envía por medio de bombas rotativas de tipo especial para masas cocidas, hacia el semillero abierto en el departamento de cristalización. Por otra parte, la miel que ya no puede utilizarse en el proceso por ser incristalizable (material pesado y viscoso), se envía por medio de bombas rotativas para miel final.

**MANEJO DE AZÚCAR (7).**- Como último paso el azúcar procedente de las centrifugas de "A", por medio de transportadores, llevan el azúcar hacia un elevador de cangilones, por el cuál se lleva el azúcar hacia una báscula para controlar la cantidad de azúcar y posteriormente se transporta hacia la bodega.

### AZÚCAR ESTÁNDAR

Básicamente para elaborar azúcar estándar, se utiliza el mismo proceso para obtener azúcar mascabado, pero con algunas operaciones adicionales que tienen por objeto, reducir la coloración del azúcar, la humedad y envasar el producto.

Las operaciones adicionales son las siguientes:

1. Sulfitación.
2. Lavado en las Centrifugas.
3. Secado y Envasa.
4. Manejo de Azúcar.





**1.- SULFITACIÓN.-** Tiene por objeto decolorar el jugo que al final del proceso dará un azúcar de menor coloración.

Existen varios procesos de sulfitación que difieren entre sí por las distintas combinaciones que se pueden hacer de las operaciones de alcalización, uno o varios calentamientos, la sulfitación y la clarificación, ocurriendo todas ellas antes de la evaporación.

Algunos de los procesos mencionados son:

- a) Sulfitación en frío.
- b) Sulfitación después de alcalizar.
- c) Sulfitación en caliente.
- d) Procedimientos fraccionados.

**a) Sulfitación en frío.-** El jugo se bombea a través de una torre de sulfitación por la parte superior en contracorriente con el anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), que es el que decolora al jugo y que entra por la parte inferior procedente de un horno de azufre. El jugo, absorbe el anhídrido sulfuroso pasando después a un tanque en donde se agrega lechada de cal para alcalizar a un PH de 7.0 y se calienta para bombearlo a los clarificadores donde se separan los precipitados insolubles.

**b) Sulfitación después de alcalizar.-** Para este procedimiento es agregada lechada de cal al jugo y se sulfito de la misma manera que en el método anterior.

**c) Sulfitación en caliente.-** La ventaja fundamental de este procedimiento, radica en reducir la solubilidad del sulfito de calcio, lo cual se logra calentando a  $75^\circ\text{C}$ , ya que a esta temperatura dicho compuesto es insoluble y se sedimenta separándose por decantación en el clarificador. Para lograrlo se sigue la secuencia siguiente:

- ◆ Calentamiento del jugo a  $75^\circ\text{C}$ .
- ◆ Sulfitación.
- ◆ Alcalización.
- ◆ Calentamiento hasta hervir con el objeto de obtener mayor sedimentación.
- ◆ Clarificación.

**d) Sulfitación fraccionada.-** Este procedimiento consiste en la alcalización con lechada de cal a un PH de 11.0 y después se sulfito agregando simultáneamente más lechada para controlar un PH entre 7.5 y 8.0, para después clarificar.

Los equipos que intervienen en un proceso de sulfitación en caliente, son los siguientes:

- 1.- Calentadores de jugo.
- 2.- Torre de Sulfitación.
- 3.- Tanque de Alcalización.
- 4.- Clarificadores.

Y para obtener la preparación de la lechada de cal y obtención del bióxido de azufre, se requieren los siguientes equipos:





- 5.- Tanque de preparación de lechada con su agitador y bomba.
- 6.- Homo de azufre.

Existen otros procesos para reducir el color del jugo y entre otros tenemos la carbonatación, pero su elevado costo resulta antieconómico. El más sencillo por su realización y bajo costo es la sulfitación y dentro de este, el tipo de sulfitación que ha tenido mayor difusión en Nuestro país es el de sulfitación en frío, el cuál siendo bien controlado satisface los requerimientos para lograr producir un azúcar estándar, dentro de las normas de calidad establecidas.

**2.- LAVADO EN LAS CENTRIFUGAS.-** Cuando en un ingenio se produce azúcar estándar, se afina el control de cada una de las operaciones del proceso efectuando una buena clarificación y una buena sulfitación. Lo anterior se complementa con un lavado adicional en las centrifugas de "A" pasando previamente por las etapas: Evaporación, Cristalización y Centrifugación, siendo en ésta última etapa. Donde se efectúa un lavado del azúcar con agua caliente de la mayor pureza posible, como lo es el condensado del vapor, antes de descargar el azúcar, con el objeto de lavar los cristales de ésta quitando la miel residual e impurezas que lleve.

**3.- SECADO Y ENVASE.-** El azúcar lavado y húmedo se obtiene en las centrifugas, se hace llegar a través de transportadores y un elevador de cangilones, hasta la parte alta de un secador rotatorio a través del cuál se desliza por gravedad el azúcar entrando en contacto y a contracorriente con aire caliente, el cuál va sacando el cristal. Posteriormente el azúcar seco obtenido en el secador, se descarga a unas tolvas de almacenamiento, las cuales descargan por la parte inferior a una báscula automática donde se llenan los sacos, pasando enseguida a una cosedora de sacos que los cierra.

**4.- MANEJO DE AZÚCAR.-** El azúcar envasado se lleva a una bodega a través de un conductor de sacos, descargando en toboganes laterales, remontadores y estibadores, para lograr un apilamiento adecuado de los sacos.

## AZÚCAR REFINADO

El azúcar refinado consta de una operación cuyo objetivo es obtener, a partir del azúcar crudo (mascabado o estándar) un producto con cualidades específicas, como son: un mayor grado de pureza, color más claro, textura característica granulada y otras características, dentro de las normas establecidas para azúcar refinada. La refinación se basa en la decoloración del azúcar crudo por medio de absorbentes, como el carbón animal, carbones vegetales granulados, carbones pulverizados, etc.

Las etapas que constituyen un proceso completo de refinación son las siguientes:

- 1.- Derretido o fundido.
- 2.- Tratamiento Químico.
- 3.- Calentamiento.
- 4.- Clarificación.
- 5.- Primera filtración.
- 6.- Decoloración.





- 7.- Segunda filtración.
- 8.- Cristalización.
- 9.- Centrifugación.
- 10.- Secado.
- 11.- Envaso de azúcar.
- 12.- Manejo y almacenaje de azúcar.

**1.- DERRETIDO O FUNDIDO.-** El azúcar crudo recibido, debe ser disuelto y fundido en un tanque diseñado para tal fin, regulándose la densidad, la temperatura y el flujo. El azúcar crudo se disuelve en aproximadamente la mitad de su peso en agua, en un tanque dotado de espas mezcladoras al cuál se aplica vapor vivo por medio de un serpentín perforado (barboteador), para ayudar la disolución. Para ésta operación se utiliza agua de condensados, libre de contaminación. El producto obtenido recibe el nombre de fundido, el cuál es bombeado a través de coladores que separan las impurezas mayores contenidas.

**2.- TRATAMIENTO QUÍMICO.-** El fundido obtenido contiene algunas materias insolubles, tales como bagacillo fino, arcilla o arena, etc. Por otra parte, el fundido tiene reacción ácida por los ácidos orgánicos contenidos en el azúcar. Por tal motivo, se hace necesaria la eliminación de dichas impurezas mediante la operación de clarificación, la cuál va precedida de un tratamiento químico. Este tratamiento tendrá por finalidad la formación de flóculos que atrapen las impurezas, coloides y parte de las substancias colorantes, en forma de conglomerados que podrán ser separados mecánicamente. Por otra parte se ajustará el PH neutralizando los ácidos orgánicos presentes. El más antiguo de los procedimientos de clarificación que todavía se usa es el tratamiento con ácido fosfórico o algún fosfato soluble, cal y calor. El licor obtenido se hace pasar en flujo continuo por un tanque aireador, en el cuál el aire introducido provoca la flotación de las impurezas. Todos los sistemas de la actualidad están basados en éste principio, en el cuál el licor se impregna de aire y después se somete a un calentamiento, de forma tal que el material insoluble flota y se deposita en la parte superior del líquido.

**3.- CALENTAMIENTO.** Después de airear el licor tratado, se calienta para completar y acelerar la separación de las impurezas y para contrarrestar la caída de la temperatura provocada durante la operación de aireación, ésta operación se realiza en forma continua y automática. El licor calentado se recibe en tanques de distribución, para pasarlo enseguida a los clarificadores

**4.- CLARIFICACIÓN.-** El principio básico de la clarificación es la aireación del licor tratado químicamente y su calentamiento. Las burbujas de aire formadas durante ésta operación ascienden arrastrando los flóculos, formando una capa de espuma que se deposita en la parte superior del tanque clarificador, la cuál se separa mediante un mecanismo de arrastre y pasa a un canal de lodos, en tanto que el licor claro se extrae por tuberías situadas en el cuerpo del clarificador. La separación de la espuma formada se realiza en forma continua. Sin embargo algunos recomiendan la remoción periódica de la capa a intervalos de 8 horas aproximadamente. La experiencia lograda ha demostrado que la forma del clarificador importa muy poco, excepto en lo que respecta a la capacidad.





**5.- PRIMERA FILTRACIÓN.-** El licor clarificado es bombeado a través de filtros a presión para eliminar las impurezas en suspensión que no se hayan removido durante la clarificación, para lo cual existen muchos diseños de filtros, llamados también filtros-pressa o auto filtros. Para efectuar ésta operación es indispensable el uso de un auxiliar que puede ser tierra de diatomáceas o de infusorios, pulpa de papel, o alguna otra materia granulada o fibrosa. Se empieza a preparar la suspensión de los auxiliares de la filtración, llamados filtros-ayudas, en un tanque con agitación mecánica; dicha suspensión recibe el nombre de precapa, compuesta del filtro-ayuda y agua. Antes de iniciar el filtrado del licor se hace pasar la precapa por el filtro, con el propósito de depositar una capa uniforme del filtro-ayuda sobre las telas. Una vez realizada ésta operación, se bombea el licor. Cuando las presiones de trabajo han llegado al límite, que puede ser de 60 libras/pulg.<sup>2</sup>, se detiene la filtración y se lleva a cabo el lavado de la torta resultante depositada sobre las telas o las mallas. El lavado se práctica después que ha sido extraída y transportada a otros recipientes y filtros. El agua de lavado llamada agua dulce, la cuál contiene azúcar en solución es utilizada en la licuación de mieles del departamento de crudo y los lodos resultantes de la filtración se desechan. El licor filtrado se recibe en un tanque de almacenamiento, antes de enviarse a las columnas de decoloración.

**6.- DECOLORACIÓN.-** Los licores que han sido colados, clarificados y filtrados por cualquiera de los procesos disponibles, siguen conteniendo cantidades considerables de impurezas disueltas y coloidales que no pueden extraerse más que por la acción de absorbentes. Los absorbentes industriales más utilizados en la actualidad son el carbón animal y sus substitutos sintéticos, los carbonos granulados, los carbonos pulverizados y las sustancias permutadoras de iones. Cada uno de estos materiales puede ser regenerado y volver a usarse una y otra vez. Las operaciones con absorbentes granulados, tratándose de uno de los sistemas más utilizados, se pueden dividir en dos sistemas a su vez: de cama fija y de cama móvil. En el primer caso el licor fluye a través de una cama estacionaria de absorbente y en el segundo caso el licor y el absorbente se mueven en contracorriente. El contacto entre el carbón y el licor se lleva a cabo en columnas de carbón que constituyen verdaderos filtros.

**7.- SEGUNDA FILTRACIÓN.-** Lo más seguro es que a la salida de las columnas, el licor decolorado lleve en suspensión una considerable cantidad de carbón, por lo que el licor se hace pasar por una trampa o filtro de carbón, el cuál puede ser por un separador vibrador con malla de acero inoxidable de 0.0110" de abertura o en autofiltros. El licor obtenido se almacena en tanques para licor y purgas de refinado, de donde continuarán su recorrido hacia los tachos de refinado.

**8.- CRISTALIZACIÓN.-** Como resultado del proceso de decoloración, los licores llegan a los tanques de depósito de los tachos con un color blanco transparente, blanco sucio o amarillo, dependiendo de la eficiencia de la refinería. Este licor se somete a cocimiento en concentradores llamados tachos, con lo que se lleva el licor a un grado tal de concentración que se sobresature de azúcar y se provoquero la formación de cristales. La concentración se lleva a cabo al alto vacío, recibiendo el nombre de templa la carga de cada tacho. Una vez que se ha obtenido el grado de cristalización conveniente, se descarga el tacho a los mezcladores, en donde por agitación mecánica se evita que los cristales se redissuelvan. Estos mezcladores tienen boquillas de descarga para alimentar a las centrifugas de refinado.







**9.- CENTRIFUGACIÓN.-** La separación entre los cristales y la miel de la masa cocida, que constituye el purgado de las templeas de refinado, se efectúa en centrifugas similares a las usadas en la obtención del azúcar estándar. La operación se realiza en forma intermitente o por cargas. La solución de azúcar producto de las purgas de las templeas de refinado se denomina "sirope". El sirope de la última templa de refinado se envía al departamento de crudo. El azúcar purgado es lavado con agua caliente a 90 - 95°C para eliminar todo el sirope adherido; la cantidad de agua que se usa en cada carga es cuidadosamente medida por aditamentos automáticos. Al terminar el ciclo de lavado entra en acción el arado que desprende el azúcar de la tela, descargándose en un transportador helicoidal que lo lleva al secador.

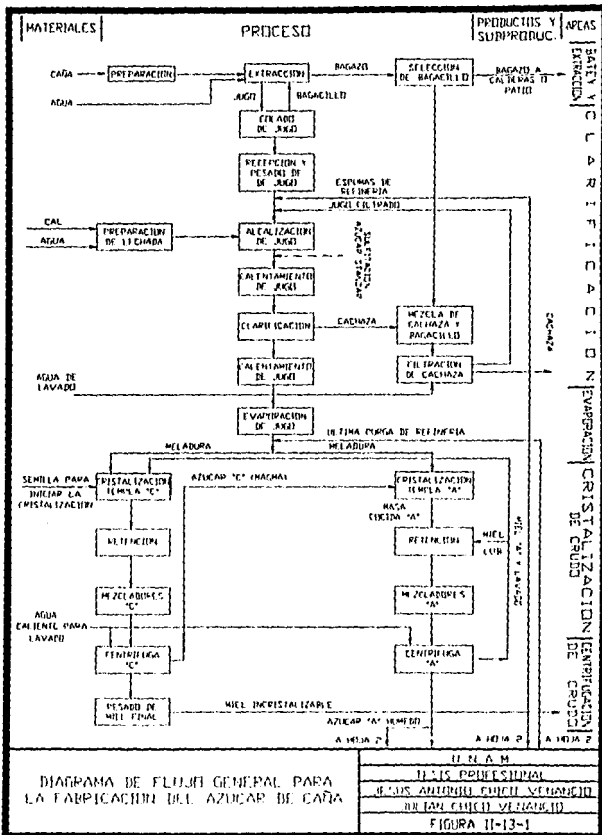
**10.- SECADO.-** Al final de su recorrido el azúcar se descarga en la parte inferior del secador. El azúcar seco se transporta mediante elevadores de cangilones a una tolva, desde la cuál se pasa a un tamiz que lo clasifica por tamaño, extrayendo o separando los terrones o granza y los polvos más finos y el azúcar tamizado se entrega directamente a envasado. La granza y el polvillo son generalmente refundidos y enviados a los tachos de refinado.

**11.- ENVASE DE AZÚCAR.-** El azúcar seco y tamizado se envasa en sacos, se cose cada saco mediante máquinas destinadas para tal fin y se transportan a la bodega para su almacenamiento.

**12.- MANEJO Y ALMACENAJE DE AZÚCAR.-** Para el manejo de los sacos de azúcar se hace uso de conductores, elevadores y estibadores mediante los cuales se almacenan en la bodega destinada para tal fin, hasta su embarque.

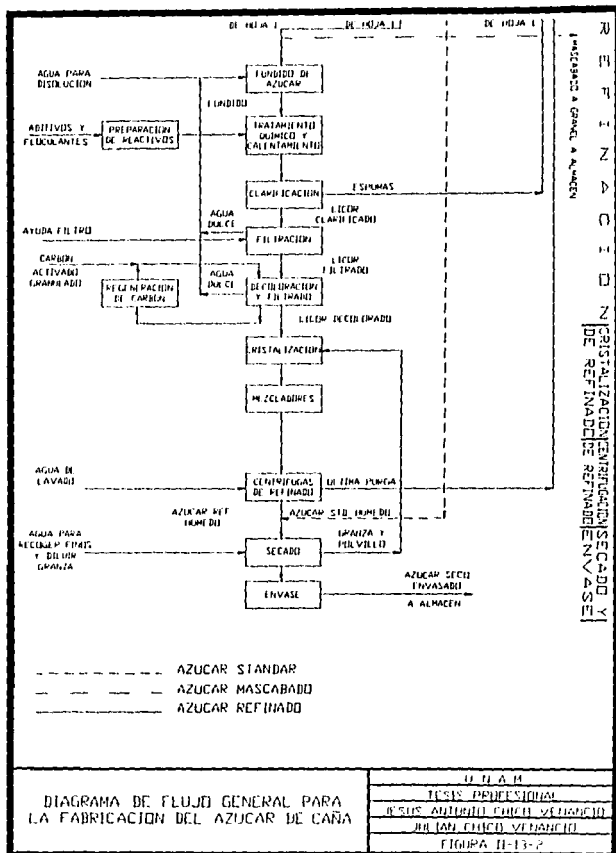
A continuación se presentan en primer lugar el diagrama de bloques (Fig. II-13-1, II-13-2) y luego el diagrama de flujo generalizado para la obtención del azúcar (Fig. II-14):





Handwritten text: "AZÚCAR DE CAÑA"



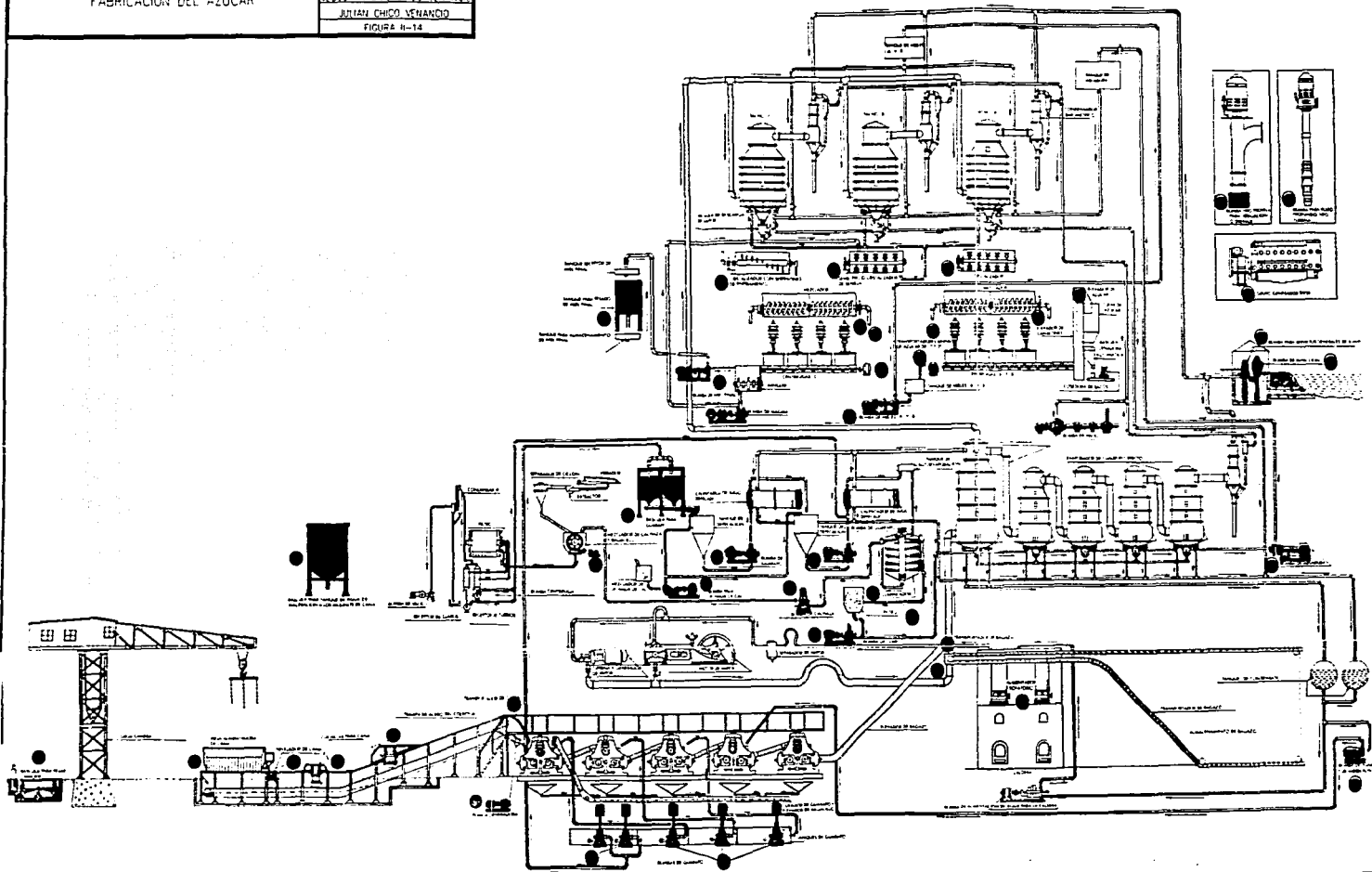


FALLA DE ORIGEN



DIAGRAMA DE FLUJO GENERALIZADO DE LA FABRICACION DEL AZUCAR

U N A M  
 TESIS PROFESIONAL  
 JESUS ANTONIO CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 FIGURA N-14





## ASPECTO AMBIENTAL.

Es difícil y costoso tratar de eliminar desperdicios de todos tipos en los ingenios como en cualquier industria. En los ingenios hay contaminantes para aguas residuales como: grasas, aceites, ácidos, detergentes, cachaza y en los ingenios con fábrica de alcohol se aumentan desechos que contaminan fuertemente con olores desagradables.

El ruido hasta la fecha no se ha tomado en cuenta, porque se considera entre los niveles industriales aceptables.

La contaminación a la atmósfera, es la más notable y a la que más importancia se le ha dado, por lo que a continuación se presentan prioridades para el control de la contaminación ambiental.

### PRIORIDADES DE ATENCIÓN DE LOS EFLUENTES Y EMISIONES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL.

Para el control de la contaminación ambiental en un ingenio, la SEDESOL ha establecido ciertas prioridades de acuerdo al saneamiento de las cuencas hidrologicas contaminadas orgánicamente. Estas prioridades se basan en el manejo óptimo de los subproductos contaminantes, en la disposición y tratamiento más económico, por el momento, idóneo para nuestro país. Asimismo en la reutilización de los mismos, pues se tiene gran ventaja de que los productos subcontaminantes en la industria azucarera son altamente orgánicos y susceptibles de ser usados y/o transformados.

Las prioridades de atención por elementos ambientales son:

- 1.- Control de la contaminación del agua.
- 2.- Control de la contaminación del aire.
- 3.- Control de la contaminación por residuos sólidos.

Independientemente de las prioridades que se fijen, específicamente para el control de la contaminación de los diferentes elementos, en la actualidad, la actividad primordial y prioritaria que deben de realizar todos los ingenios es la operación y manejo adecuado de la contaminación ya consideradas debido que las notificaciones de infracciones impuestas a los ingenios son por una falta total de operación y mantenimiento adecuado a sus obras que tienen construidas.

La atención a los subproductos contaminantes en forma prioritaria son las siguientes:

- |             |    |   |
|-------------|----|---|
| 1.- CACHAZA | a) | Manejo en forma sólida, tal y como sale de los filtros de vacío y distribuida a los campos cañeros. |
|             | b) | Si se maneja con agua a riego de campos cañeros.  |
| 2.- VINAZAS | a) | Riego de campos cañeros diluida con agua.   |
|             | b) | Concentrada y comercializada para alimento balanceado.  |





- |  |    |  |
|--|----|--|
| 3.- HUMOS Y POLVOS                       | a) | Precipitación con cortinas de agua. Esta obra puede ser de prioridad 1, cuando la zona aledaña al ingenio se ha conurbado. |
| 4.- GRASA Y ACEITES                      | a) | Recuperación con trampas de grasas y reuso como combustible para calderas.   |
| 5.- LAVADOS, ÁCIDOS Y ALCALINOS          | a) | Neutralización y dilución en aguas de enfriamiento.  |
| 6.- AGUA DE CONDENSADORES Y ENFRIAMIENTO | a) | Enfriamiento y recirculación.  |
| 7.- AGUAS NEGRAS                         | a) | Lagunas de estabilización facultativas.  |
|  | b) | Lodos activados.   |

En ambos casos, reuso del efluente en riego de campos cañeros.

### AZÚCAR DE REMOLACHA.

**INTRODUCCIÓN.-** El consumo de azúcar de remolacha es relativamente reciente. Las remolachas han sido cultivadas desde antes de la era cristiana; pero hasta el año de 1747, en que lo demostró Andreas Marggraf, de Alemania no se supo que el jugo de la remolacha contenía azúcar. Cuarenta años después su discípulo Karl Achard, consiguió aumentar el contenido en azúcar de las remolachas por el cultivo y extrajo el azúcar por procedimiento práctico. En 1802 Federico Guillermo II de Prusia proveyó a Achard de los medios para la construcción de una fábrica de azúcar de remolacha.

Hacia el año 1897, la producción de azúcar de remolacha se había desarrollado en proporción aproximadamente igual a la del azúcar de caña y esta posición se mantuvo hasta el comienzo de la Primera Guerra Mundial.

**CULTIVO.-** La remolacha variedad blanca de la especie Beta Vulgaris. La raíz tiene forma de un cono invertido. El azúcar formado por fotosíntesis en las hojas, emigra hacia las raíces y se almacena en ellas en cantidad media aproximada de 15% de azúcar. La remolacha azucarera prospera en climas templados. Son convenientes el calor, días soleados, noches frías, lluvia aproximada de 400 mm. al año o su equivalente en riego para alcanzar elevado contenido en azúcar. Antes se sembraba la semilla en su forma original, tal como se cosechaba; pero desde hace pocos años los glomérulos se someten a un tratamiento el cual separa las capas exteriores suberosas y la semilla queda reducida a un tamaño uniforme mediante cribado y eliminación de materia inútil por separación con aire. Las remolachas son transportadas desde la estación receptora a la fábrica en vagones góndolas que se vacían por el fondo.

**PROCESO.-** Los cargamentos de remolacha se pesan a medida que llegan a la fábrica o estación receptora. El cargamento se vacía, y las remolachas pasan sobre una criba que devuelve la basura al vehículo, el cual se pesa de nuevo. Las muestras se pesan, se descabezan y se cepillan para separar la basura adherida. La muestra limpia y descabezada se pesa de nuevo para determinar el porcentaje de tara. Las remolachas se envían por un canal de agua a la fábrica. Pasan por un colector de basura y un lavador. Después se pesan en básculas automáticas. Luego pasan por el





rebanador, tambor giratorio en el cuál son forzadas contra cuchillos de filo aserrados montados en la periferia del tambor, las raíces salen del tambor cortadas en tiras o virutas llamadas cosetas. La extracción del azúcar de esas tiras tiene lugar en una batería de 10 a 12 celdas de difusión, tanques cilíndricos cerrados, en formación circular o lineal. Por la serie de celdas se hace pasar en contracorriente agua caliente. La disolución del azúcar ocurre probablemente de 3 maneras:

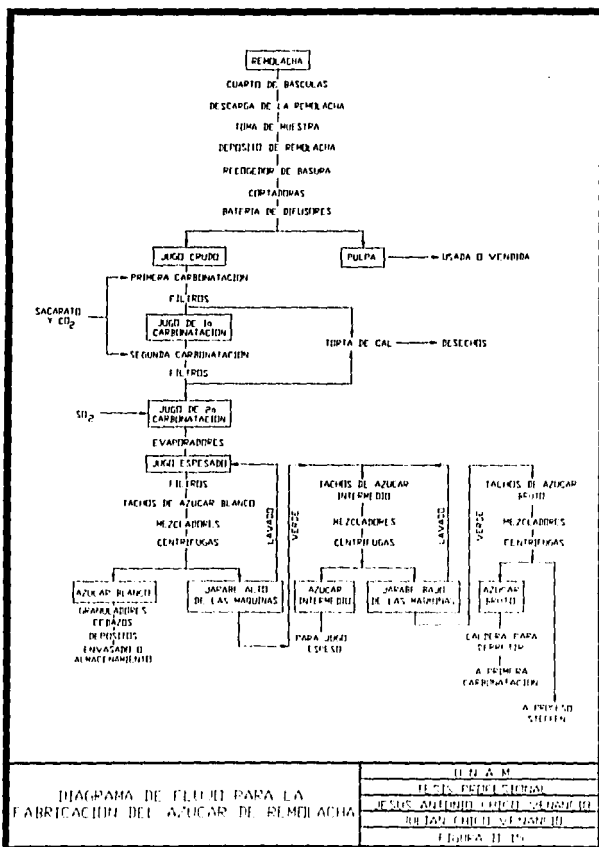
- 1) Desde las células de la raíz rotas en el rebanado.
- 2) Desde las células hinchadas y rotas por ósmosis del agua a través de la pared celular.
- 3) Por diálisis del azúcar a través de la pared de las células que no han sido rotas por el rebanado ni por hinchamiento.

Las impurezas solubles pasan juntamente con el azúcar, pero en mínima porción.

La pulpa pasa sobre una criba de desagüe y después se filtra a presión o se almacena en un silo de pulpa húmeda. La solución que sale de la celda llenada se llama jugo de difusión. El jugo de difusión se calienta con lechada de cal, y se somete a doble carbonatación. La carbonatación del jugo hasta casi el punto neutro en una operación da un precipitado que es difícil de filtrar y hace que algo del precipitado se redissuelva; por consiguiente, la carbonatación se efectúa en 2 etapas. Se puede o no filtrar para separar el ligero precipitado formado de esta suerte. El jugo purificado se llama jugo delgado. El jugo delgado se concentra en evaporadores; éste es el jugo espeso. El azúcar intermedio e incluso el "azúcar crudo" es derretido en el jugo espeso; la mezcla resultante, llamada líquido normal, es empleado para la cocción del azúcar blanco. En muchas fábricas para la cocción del azúcar blanco y la cocción del azúcar intermedio, el líquido de lavado se mantiene separado del centrifugado original. En la cocción del azúcar blanco, la fracción de lavado va al jugo espeso para elaboración de azúcar blanco, mientras que el jarabe verde va a los tachos o evaporadores intermedios para la separación del azúcar intermedio. El azúcar granulado producido en las fábricas de azúcar de remolacha se deseca, se criba y se envasa en sacos. Los azúcares granulados de remolacha se disuelven para hacer azúcares líquidos.

En seguida se presenta el diagrama de flujo del Azúcar de Remolacha (Fig. II-15).









## II.11 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA CELULOSA

**INTRODUCCIÓN.**- La celulosa es un componente del carbono (el más abundante); es el principal componente de la pared celular de los vegetales, el cual se forma como resultado de la fotosíntesis. La celulosa se encuentra en la pared celular de las maderas, pajas, pastos, fibras liberianas y polos de semillas. En la fabricación de pulpa para la elaboración de papel, la celulosa resiste la oxidación y las operaciones de blanqueo al eliminar las impurezas de la misma (pulpa). La pasta de papel, también llamada pulpa, es un producto celulósico industrial, obtenido principalmente de la madera. La pasta de madera se prepara por procedimiento mecánico o químico. En el procedimiento mecánico, la madera se desmenuza hasta formar una pasta (madera molida). En el procedimiento químico, la celulosa de la madera queda desprovista de la mayor parte de la lignina y otras sustancias no celulósicas mediante un tratamiento con sustancias químicas que forman compuestos solubles con las materias no celulósicas y dejan inalterada la celulosa, que luego se lava y descolora. Los dos métodos principales para hacer pasta química son el del sulfito y el proceso kraft o del sulfato. La pasta semiquímica se obtiene por un procedimiento en virtud del cual son ablandados suficientemente los trozos de madera para permitir la separación mecánica de las fibras. Esto puede conseguirse utilizando una solución de sulfito ligeramente alcalina, o una solución de la misma composición que la empleada en el proceso del sulfato, pero más diluida.

En general estos son los procedimientos más utilizados por lo que a continuación pasaremos a explicar en forma generalizada estos procesos.

### PASTA MECÁNICA

Este proceso utiliza prácticamente toda la fibra de madera que existe en el tronco, en la que se incluye tanto a la celulosa como a la lignina, mientras que los diferentes procesos químicos disuelven la lignina en distinto grado, de modo que el rendimiento de las pulpas químicas es el aproximado a la mitad del de la pasta mecánica. Puesto que las fibras de esta pasta en realidad se desgarran de la madera, varían en longitud y composición.

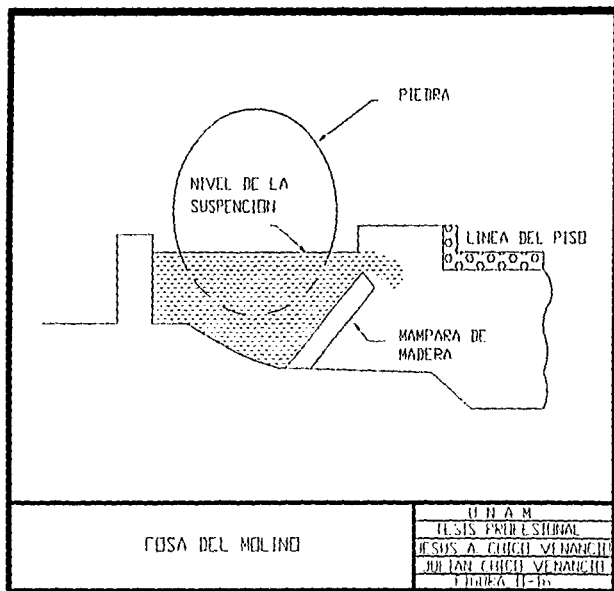
El proceso se inicia con la entrega a la fábrica de los troncos de madera para pulpa, limpios y descortezados. El volumen de la madera se mide en estibas o por algún otro medio, y los troncos individuales se colocan dentro de la prensa del molino, y son reducidos a pasta mecánica por la piedra del mismo para mantener una temperatura apropiada, se agrega agua a la piedra, y la pulpa va entonces de la fosa del molino hacia los depuradores gruesos o de astillas en donde se separan pedazos de madera relativamente grandes y astillas. Luego, la suspensión diluida se bombea a los depuradores finos, y la pulpa aceptada, a los espesadores o a los prensapastas en donde, respectivamente, se prepara para su uso en la fábrica de papel, o para su embarque en forma de hojas o paquetes húmedos. La pasta mecánica es una mezcla de haces fibrosos, fibras fibriladas individuales, fibras rotas y harina fina de madera. El papel hecho a partir de pasta mecánica es suave, voluminoso, absorbente y opaco. Es también débil y esta sujeto a deteriorarse con el tiempo, especialmente a la luz solar.



ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



La Figura II-16 nos muestra la fosa del molino donde se elabora la pasta.





## PULPAS QUÍMICAS

**EL PROCESO KRAFT O AL SULFATO.**- Dentro de los procesos alcalinos de obtención de pulpa a partir de madera, el denominado al sulfato o "kraft" es el más difundido a nivel nacional. El nombre de "proceso al sulfato" es, quizá, una designación incorrecta, ya que haría pensar que en el proceso real de cocción más bien se use sulfato y no sulfuro. El sulfato de sodio es, no obstante el producto químico que se repone en el proceso al sulfato, y el sulfuro de sodio es un producto de reducción del sulfato en el horno de recuperación, que es donde se agrega el producto químico de reposición. El equipo y el método de preparación de la madera para el procedimiento del sulfato son análogos a los empleados en el procedimiento del sulfito. Los digestores son algo más pequeños, porque han de soportar una presión interna más alta

El proceso al sulfato se puede resumir como sigue:

-Los troncos de madera se descortezan en descortezadores y son convertidos en astillas en astilladores de varias cuchillas. El tamaño de la astilla es un factor importante en la preparación de la madera. Las astillas que son demasiado chicas, resultarán sobrecocidas, y una astilla grande puede no recibir cocimiento alguno en el centro. La experiencia de fábrica determina el tamaño óptimo para la digestión en cada caso particular de astillas de madera. Después del astillado, las astillas se tamizan, y solo aquellas de tamaño permisible se mandan a los digestores. Los rechazos más grandes de los tamices se reastillan y se vuelven a mandar a los tamices.

-Las astillas se llevan por medio de transportadores, desde los silos de almacenamiento hasta los digestores, a los cuales se alimenta la cantidad máxima de ellos, por la parte superior del digestor. Al mismo tiempo se agrega el licor de cocción. El reactivo utilizado denominado "licor blanco", es una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfato de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), este último tiene como función reponer la cantidad de sosa que se vaya consumiendo en las reacciones de deslignificación. la relación de astillas y licor se controla cuidadosamente (se emplea entre 2.5 y 3.5 lb de licor por lb de madera), así como la concentración del licor, el contenido de humedad, y otras variables.

-Las astillas de madera se cuecen, durante el tiempo prescrito, bajo las condiciones apropiadas de presión y temperatura. El tiempo usual de cocción es de unas 2 a 4 horas, a una presión aproximada de 7-8 kg./cm<sup>2</sup> y temperatura de 175°C. Al cocerse la madera, destilan el aguarrás y otros constituyentes volátiles, los cuales se condensan para venderse como subproductos. En este período se hidrolizan mediante reactivos alcalinos determinados enlaces de la lignina. El ataque químico se lleva de tal manera que asegure el menor degradamiento de las fibras celulósicas.

-Al final de la cocción, la pulpa y el licor se "soplan" dentro del tanque de descarga. El vapor a presión en el digestor es el propulsor de ésta descarga, y hace que el digestor este limpio listo para otra cocción. El vapor de la descarga se utiliza en calentar agua para uso de la fábrica.





-En el tanque de descarga quedan la pulpa y el licor negro (que es una mezcla compleja de material orgánico y reactivos sobrantes) que contienen los reactivos de cocción gastados, así como la lignina y otros sólidos extraídos de la madera. La pulpa y el licor negro se diluyen con licor negro diluido y se bombean, pasando por los separadores de nudos, a los lavadores de pulpa sucia, en donde el licor, que contiene el residuo soluble de la cocción, se separa de la pulpa por lavado.

-La pulpa lavada se depura entonces y se envía a la planta de blanqueo o a la fábrica de papel. Parte del licor negro de los lavadores se usa como diluyente para el licor de cocción y para la suspensión de pulpa sucia. el resto se manda a la unidad de recuperación de la fábrica de pulpa, en donde se regeneran los productores químicos usados en la digestión.

En la Figura II-17 se ilustra un diagrama de flujo de la parte de preparación de la pulpa, en el cual se muestra el flujo de pulpa y licor, desde la materia prima hasta el producto acabado.

**EL PROCESO AL SULFITO.-** En el proceso de obtención de pulpa al sulfito se utilizan las bases de Calcio, Amoníaco, Magnesio y Sodio.

A continuación explicaremos éste proceso con base de Calcio.

-Para la preparación del líquido de cocción ácido, se emplea el gas sulfuroso obtenido por combustión del azufre o de las piritas. Una vez puesto en marcha el quemador, se forma un charco de azufre fundido en la base del quemador y parte de él se reparte por sus paredes por efecto de la lenta rotación. Los gases y vapores originados al arder el azufre pasan a la cámara de combustión, en donde se quema todo el vapor de azufre.

-El tipo corriente de refrigerante consiste en una serie de tubos de fundición conectados con un tubo colector, y el conjunto sumergido en un depósito de agua. Los gases que salen de éste depósito ascienden por una serie de tubos de plomo paralelos que son enfriados por una lluvia de agua. Un ventilador sirve para aspirar el gas a través del sistema y conducirlo al equipo de absorción.

-Para la formación de la solución de bisulfito el sistema jensen, es el que consiste en dos torres que están dispuestas de modo que el gas frío de los quemadores entra por el fondo de cada torre. El gas que sale por la parte superior de la torre de entrada pasa al fondo de la segunda torre y sale a la atmósfera por la parte superior de la misma. A estas torres se les da el nombre de "torre débil" y "torre fuerte". El agua introducida por la parte superior de la torre débil se recoge en un colector donde se bombea a la cúspide de la torre fuerte. Se conduce gas al interior de la torre fuerte; después se admite gas por el fondo de la torre débil, que entonces pasa a ser torre fuerte. El ácido que sale de la torre se llama ácido "crudo", éste es llevado a los tanques de almacenamiento, donde se fortifica con gas sulfuroso.

-Para la cocción de la madera la pulpa al sulfito se prepara cociendo la madera en una solución de bisulfito que contiene determinado exceso de gas sulfuroso libre. Las astillas se introducen en el digestor por la abertura superior. Una vez lleno el digestor





se introduce el ácido por bombeo (por lo general se agregan unas 5 lb. de licor por cada libra de madera seca a la estufa) abriendo la válvula superior para dar salida al aire. Después de haber desplazado el aire, se cierra la válvula para iniciar la calefacción. A medida que la temperatura sube, la presión aumenta al salir del líquido gas sulfuroso y el volumen del líquido aumenta a consecuencia de la dilatación. La presión en el digestor se regula de modo automático o manualmente descargando el gas sulfuroso por medio de válvulas de escape.

-Terminado el proceso, se disminuye la presión en el digestor y se abre la válvula de descarga situada en el fondo del digestor. El contenido del digestor va hacia un tanque de descarga, cerca del fondo del digestor algunas veces se encuentran localizadas unas espumas de limpieza que permiten la introducción de agua o licor gastado, con objeto de lograr una descarga "limpia".

-La corriente de astillas y de licor que sale del digestor hacia el tanque de descarga, se dirige, por lo general, contra un blanco constituido por una placa de acero inoxidable, y el impacto de las astillas suaves contra éste blanco, rompe la estructura de las astillas, que se reduce a fibras individuales de pulpa que se juntan en el fondo del tanque de descarga.

-La presión del gas en el digestor durante la cocción se aligera constantemente por medio de válvulas a medida que la temperatura sube; éste gas de descarga se recoge en un sistema de acumuladores. Por lo regular, hay un acumulador para alta presión y otro para baja presión. El ácido crudo almacenado en los tanques se bombea a los dos acumuladores. El gas caliente de los digestores y cierta cantidad de líquido de descarga procedente de la primera parte de la cocción, se llevan al acumulador de alta presión que suele diseñarse para una presión máxima de  $3.5 \text{ kg/cm}^2$ ; una vez alcanzada ésta presión, se hace pasar el gas al acumulador de baja presión. El gas sobrante del acumulador de baja presión va a parar a los tanques de almacenamiento del ácido crudo, donde es absorbido el gas que sale durante la descarga del digestor al final de la cocción va a uno u otro de los acumuladores según la presión del chorro. Durante la cocción, la concentración del gas sulfuroso libre y la temperatura del ácido en el acumulador de alta presión alcanzan el punto conveniente de concentración ácida.

El licor sulfítico gastado, se drena por el fondo del tanque de descarga y puede descargarse al drenaje o juntarse para su proceso de recuperación. La pulpa acuosa que queda en el fondo del tanque de descarga, se lava entonces con agua hasta que esté casi libre de licor gastado. Luego se suspende la pulpa en agua y se pasa por separadores de nudos, depuradores planos, y areneros, o limpiadores centrífugos, para separar nudos y haces de fibras u otros materiales.

En la Figura II-18 se muestra el diagrama de flujo simplificado del proceso de obtención de pulpa al sulfito con base de calcio.





## PULPAS SEMIQUÍMICAS

Desde la Segunda Guerra Mundial ha habido un rápido incremento en la producción de pulpa semiquímica. Esta pulpa se obtiene por un tratamiento suave que ablanda las astillas lo suficiente para que pueda hacerse la separación mecánica de las fibras.

Existen dos procedimientos para la obtención de la pulpa semiquímica que son el del Sulfito Neutro y el del Sulfato o Kraft, estos se dividen a su vez en una etapa química y una etapa mecánica.

En la primera etapa el material fibroso se sujeta a una acción química con o sin aplicación de calor, tiene como objetivo principal un debilitamiento químico del complejo lignina-carbohidrato de la unión entre fibras.

En la etapa mecánica, el material fibroso, parcialmente convertido en pulpa, se sujeta a las acciones independientes, pero casi siempre superpuestas, de separación de las fibras (desfibración) para obtener una pulpa y procesado de la misma (refinación) para adaptarla a la fabricación de papel.

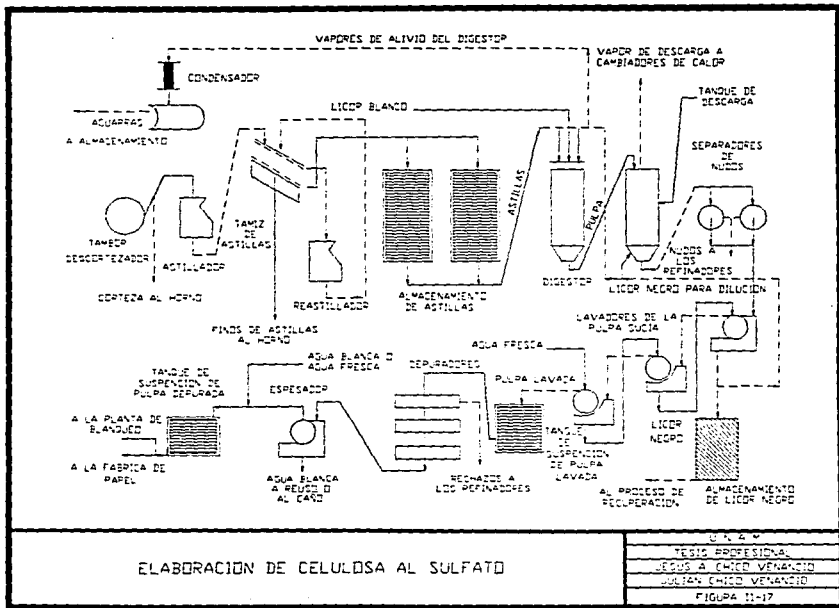
En el procedimiento del Sulfito Neutro el principal agente de cocción es el sulfito de sodio. Generalmente se añade carbonato de sodio para mantener el pH del lado alcalino durante el proceso. El otro procedimiento utiliza un líquido de cocción de la misma composición que el de la pulpa ordinaria al sulfato, pero más diluido para impedir la completa pulpificación. Este tipo de pulpeo se inicia al introducir la materia prima celulósica en éste caso astillas de madera en una tolva la cual descarga a un alimentador de tornillo. Dicho alimentador tiene como objetivo forzar a que entre el material celulósico por un tubo digestor, el cual, se encuentra presurizado por la adición de sosa/sulfito de sodio a fin de que a su paso por el digestor provoque una deslignificación moderada en la madera. La adición simultánea de vapor y reactivos químicos conlleva a instalar menor potencia en la etapa de desfibrado del proceso.

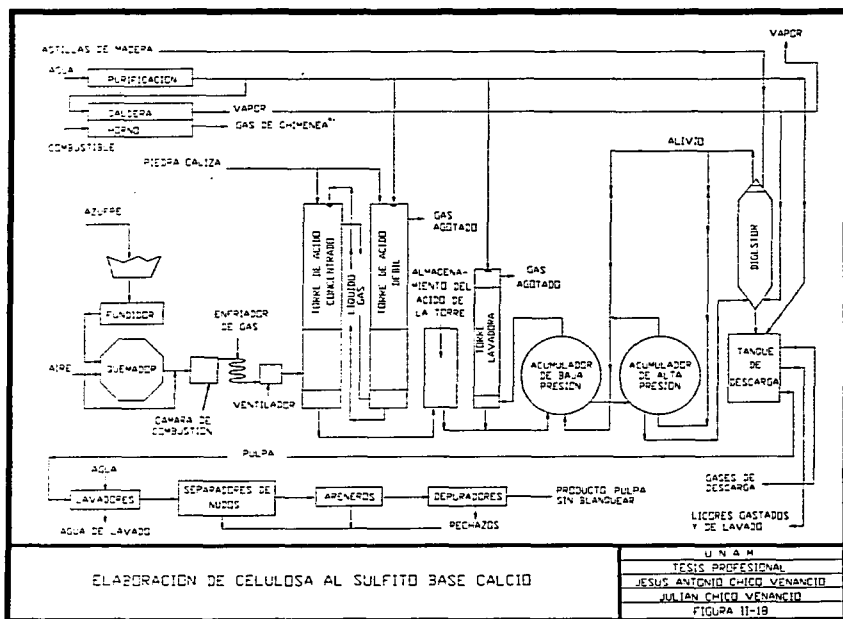
La pasta ablandada que sale del digestor, es lavada y depurada para de aquí desfibrarse en un tándem de refinadores de doble disco. Dependiendo del mercado, la pulpa cruda obtenida puede laminarse para venta o bien para blanquearse utilizando peróxido de hidrógeno.

Cabe aclarar que la obtención semiquímica de pulpa actualmente se efectúa en una gran variedad de equipo, y no existe el molino "estándar" por lo que en la Fig. II-19 se muestran los distintos digestores continuos.

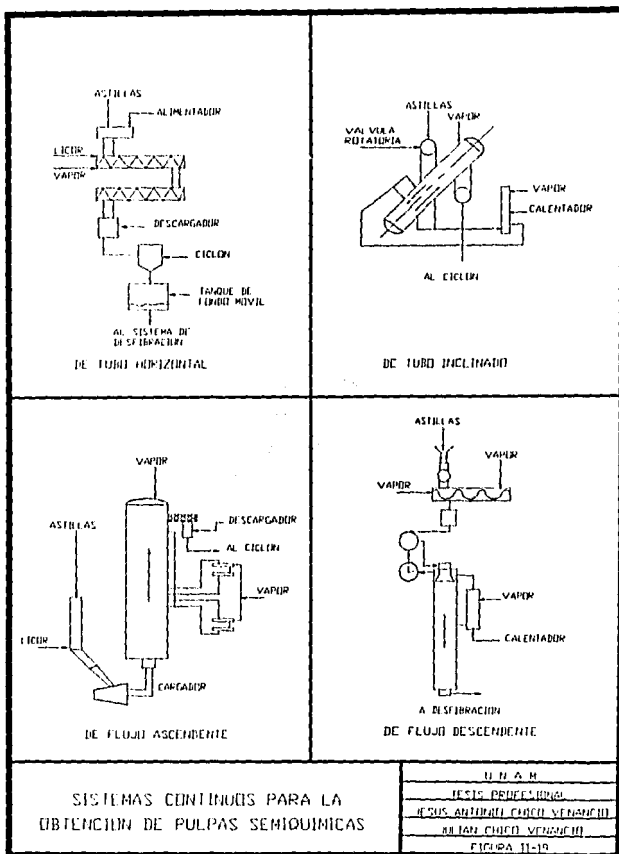


FALLA DE ORIGEN









FALLA DE ORIGEN



## II.12 FABRICACIÓN DEL PAPEL.

**INTRODUCCIÓN.-** Papel es un vocablo que se emplea para designar las diversas clases de hojas fibrosas de estructura análoga al fieltro, por lo general compuestas de fibras vegetales, pero a veces minerales, animales o sintéticas y formadas por depósito sobre una tela metálica fina de una suspensión de las fibras en agua. Este nombre se deriva del griego PAPHYROS, nombre de una planta egipcia (Cyperus papyrus), de cuyo tallo los egipcios sacaban láminas para escribir sobre ellas. En virtud del gran número de tipos de papel que se producen sería muy extenso hacer referencia a cada uno de ellos, Sin embargo, a manera muy general, podemos decir que la manufactura de papel comprende operaciones esencialmente mecánicas, las cuales se basan en la tendencia de las fibras celulósicas en suspensión acuosa a unirse entre sí cuando se secan. El proceso de elaboración se lleva a cabo en 2 grandes áreas la primera se refiere a la preparación de pastas, mientras que en la segunda atañe a la formación del papel propiamente dicha.

La preparación de la papilla comprende las siguientes operaciones tales como:

- a) la recepción y almacenamiento de las materias primas.
- b) desleimiento de la pulpa o Repulpeo.
- c) batido o refinación.
- d) limpieza o depuración.
- e) relleno.
- f) apresto.
- g) coloración.

La mezcla de materiales en suspensión que ha de convertirse en papel se llama pasta. Para el área de la formación del papel se encuentran implicadas el proceso de formación de la hoja, la sección de prensas y la sección de secado.

La lista de las funciones básicas que se tienen que efectuar en la sección húmeda o sección formadora de la hoja de una máquina de papel son las siguientes:

- 1.- Diluir la suspensión fibrosa hasta una consistencia lo suficientemente baja para un fácil movimiento relativo entre fibras y, por consiguiente, un alto grado de uniformidad en la dispersión de las fibras.
- 2.- Distribuir la suspensión diluida de fibras, uniforme y constantemente, en la sección formadora, al mismo tiempo que mantener las fibras uniformemente dispersadas.
- 3.- Depositar uniformemente las fibras individuales en la tela metálica formadora, conforme el agua de la suspensión drene a través de la tela.
- 4.- Compactar la red fibrosa, para obtener un contacto íntimo de fibra a fibra y un acercamiento de la estructura porosa de la hoja.
- 5.- Separar por succión la mayor cantidad del agua atrapada en la hoja, antes de que pase a la sección de prensa húmeda. con esto la resistencia de la hoja húmeda aumenta al disminuir el contenido de agua.

En la sección de prensas se reduce el contenido de agua de la hoja, esto dependiendo de la velocidad de la máquina.





Para la sección de secado, la hoja se seca por medio de rodillos calentados por vapor y por último antes de ir hacia el almacén el papel recibe un tratamiento de calandreado para ajustar el calibre como la lisura de la hoja y dependiendo de las características deseadas, se le puede adicionar un recubrimiento de pintura por una o ambas partes.

### PREPARACIÓN DE LA PASTA

**MATERIAS PRIMAS.-** Estas consisten de pulpas vírgenes de celulosa, fibras secundarias, encolantes y cargas. Las fibras vírgenes provienen del pulpeo de madera o de plantas anuales. Las fibras secundarias o fibras recobradoras obtenidas del reprocesamiento del cartón y del papel del desperdicio. Entre los encolantes más usuales se encuentran las breas de colofonia, los almidones modificados, la carboximetilcelulosa, y recientemente las resinas sintéticas. Como cargas se pueden citar a los silicatos -tal como el caolín, el talco y asbestinas etc.

**DESLEIMIENTO DE LA PULPA O REPULPEO.-** En el repulpeo se convierte en una suspensión fibrosa o pasta a todo aquel material celulósico que se reciba en forma seca, adicionando la cantidad necesaria de agua en el hidrapulper o "molino". Este es un recipiente metálico, de forma cilíndrica vertical, en cuyo fondo se encuentra un rodete o rotor, acoplado a un motor eléctrico. El continuo accionar del rotor provoca que los diferentes materiales en estado sólido se abran dejando a su vez en libertad las fibras de celulosa. La descarga de la pasta, cuya consistencia (proporción de fibra en agua) es cercana al 5%, se realiza a través de una placa perforada ubicada en el fondo del hidrapulper y que actúa como criba al evitar el paso de partículas extrañas al proceso tales como grapas, alambre, etc. Es importante mencionar que durante la operación de repulpeo se efectúa la adición de polvos minerales (cargas), así como un encolado interno de las fibras. Después la pasta se bombea a un tanque de almacenamiento. El tanque tiene un agitador para que no se asiente la pasta. Con otra bomba, la pasta pasa al tanque de almacenamiento y de ahí al regulador de consistencia en el que por gravedad pasa la pasta a los refinadores.

**BATIDO Y REFINACIÓN.-** Las fibras de celulosa son inapropiadas para la manufactura del papel, por lo que deben de someterse a un tratamiento de modificación superficial, a través de equipos denominados batidoras o refinadores. Hoy se tiende a eliminar esa distinción y se emplea el vocablo "refinación" en un sentido que incluye las operaciones y efectos de ambos procedimientos de batir y refinar. El batido acrecienta la superficie y la flexibilidad de las fibras y disminuye su longitud. Con el batido aumentan la densidad de la hoja y la resistencia a la tracción, al estallido y al doblado, y disminuyen la opacidad, la brillantez, la extensibilidad y la resistencia al desgarro. Anteriormente, la operación se efectuaba en una "pila holandesa", hoy se realiza en refinadores del tipo jordán (cónicos) o del tipo doble disco. Los últimos presentan más ventajas operacionales que los del tipo cónico. La consistencia de la suspensión alimentada a refinadores es del orden del 5%. El refinado origina en las fibras cambios del mismo género que los producidos por las batidoras pero es mayor el corte en la refinadora.

A continuación se presenta la siguiente tabla en la que se muestran comparaciones del batido con el refinado.





## COMPARACIÓN DEL BATIDO CON EL REFINADO

	BATIDO	REFINADO
OPERACION	DISCONTINUO	CONTINUO
EQUIPO	CILINDRO Y PLANCHA EN TINA	ROTOR Y ESTATOR CÓNICOS, DISCOS
ROTOR, R. P. M.	150	300-500 <sup>a</sup> , 1200-1800 <sup>b</sup>
VELOCIDAD EN LA PERIFERIA, n/min	600	1050 <sup>a</sup> , 3600 <sup>b</sup>
POTENCIA POR TON.	ALTA (75% PARA LA CIRCULACIÓN)	NO TAN ALTA COMO EN LA BATIDORA
MANO DE OBRA POR TONELADA	ELEVADA	BAJA
FLEXIBILIDAD	ELEVADA	BAJA
DESGASTE	BASTANTE UNIFORME	DESIGUAL
ACCIÓN EN LAS FIBRAS	FROTAMIENTO, HIDRATACIÓN, ALGUNOS CORTES	CORTE Y ALGO DE FROTAMIENTO

<sup>a</sup> En el tipo de rotor cónico.

<sup>b</sup> En el tipo de discos.

**LIMPIEZA O DEPURACIÓN.**- Un área de preparación de pastas debe contar con dispositivos que permitan seguir procesando la suspensión. Entre los dispositivos de limpieza más comunes, se encuentran los hidrociclones. Estos son recipientes de fondo cónico en cuya parte superior se suministran tangencialmente y bajo presión la suspensión fibrosa diluida aproximadamente a un 5% de consistencia. La fuerza centrífuga que éste suscita proyecta a las partículas más pesadas que la fibra contra las paredes del recipiente provocando que desciendan hasta el fondo de éste. En este punto, las partículas son expulsadas como rechazos. En la parte central del hidrociclón, la suspensión se encuentra ya clarificada saliendo por la parte superior a través de un tubo buzo llamado "vórtice". Por otra parte, en la operación de limpiadores centrifugos se aplica un vacío parcial que permite la eliminación de aire entrampado en la suspensión. La exclusión de aires es importante para evitar anomalías al momento de formarse la hoja de papel y de suma relevancia cuando éstos son elaborados en gramajes bajos.

**RELLENOS.**- Las cargas, son las materias de relleno. Adicionadas con moderación, confieren al papel características especiales tales como hacerlo menos transparente, compensar desigualdades de superficie, aumentar el coeficiente de lisura, controlar su inflamabilidad y entre otras cosas dar más suavidad y flexibilidad a las hojas de papel.

**APRESTO.**- El papel aprestado es debido a los encolantes. Sus objetivos principales son otorgar al papel propiedades permeables, aumentar su resistencia a la tensión, al doblez, a la explosión y, junto con las cargas, propiciar una superficie que sea adecuada a la escritura e impresión.

**COLORACIÓN.**- El color de la mayor parte de los papeles y cartones se obtiene por la adición de colorantes. Por lo general, los tintes se agregan al material en la refinadora o en otros lugares del curso de la pasta en la máquina que hace el papel. Alguna vez se colora la hoja de papel haciéndola pasar en el curso de su formación a través de una solución del colorante (teñido por inmersión) o aplicando la solución en la





calandria (coloración y satinado del cartón). Hasta 1856, la coloración era "marginal", hecha con productos naturales. Pero con el desarrollo del primer colorante sintético, la maunina, se desencadenó en esta industria el uso de colorantes químicos sintéticos. Divididos en tres grandes grupos -básicos, ácidos y directos- se emplean alrededor de 150 productos diferentes que ponen a disposición de los productores una variedad completa de colores y tonos.

### LA MÁQUINA DE HACER PAPEL

La conversión de la suspensión de fibras en hojas de papel implica 3 fases:

- 1.-Sedimentación de las fibras en forma de una lámina húmeda.
- 2.-Eliminación de una parte del agua de la lámina de fibras mediante presión húmeda, con lo cual se aprietan las fibras y adquiere compacidad la lámina.
- 3.-Eliminación progresiva del agua sobrante por medio del calor.

**LA SECCIÓN HÚMEDA FOURDRINIER Y EL SISTEMA DE PASTA.-** Las fibras refinadas y mezcladas, junto con cualesquiera cargas o aditivos de pila, tales como colorantes, se almacenan antes de la máquina en el tanque de la máquina. En éste tanque la pasta es agitada para así evitar el asentamiento y la separación de los sólidos. Una bomba eleva la pasta en éste tanque hasta un regulador de consistencia y una caja de cabezal constante de donde pasa, a través de una compuerta reguladora de flujo, al jordan de la máquina. El operador de la máquina usa el jordan de la máquina para ajustar la longitud de fibra y propiedades del drenado de la pasta con objeto de obtener la formación deseada en la hoja y las condiciones óptimas de drenado sobre la máquina. Del jordan, la pasta pasa hacia la entrada de la bomba de abanico de la máquina. En ésta bomba la pasta se diluye con agua que es recirculada de la fosa o un tanque colector de agua blanca. La pasta diluida puede entonces limpiarse por medio de limpiadores de tipo vórtice, seguidos por depuradores, abiertos o cerrados a presión, de placas perforadas. La pasta limpia y depurada fluye entonces al sistema de distribución de entrada que reparte el flujo a todo lo ancho de la máquina, descargando la pasta en la caja de entrada, en donde el flujo es estabilizado. El flujo estabilizado de pasta pasa entonces, a través de un orificio ajustable, llamado regla, sobre una tela metálica móvil, fourdrinier que es una banda sinfín, que viaja alrededor y entre grandes rodillos, el cilindro de pecho, que es sólido, en el extremo de la caja de entrada, y el cilindro de retorno de la tela,\* en el otro extremo.

La tela ésta soportada por medio de una combinación de una o más cajas de formación estacionarias, rodillos desgatadores sólidos o ranurados, cuchillas de agua, y deflectores, después de lo cual pasa sobre varias cajas de succión. Sobre ésta sección el agua es eliminada por drenado en la cual la hoja de papel es dejada en la superficie superior. La hoja se separa de la tela en o muy cerca del extremo de la zona de succión del cilindro de retorno, y el viaje de regreso de la tela lo soportan unos cuantos rodillos que se usan para tensar y guiar la tela. Al tiempo que unas regaderas de agua le lavan las fibras sueltas o grumos de fibras que pueden haberse quedado adheridos a ella.

Se acostumbra recortar unos cuantos centímetros de cada extremo de la hoja, conforme ésta sale de la tela formadora. Por lo general, los extremos de la hoja son





menos pesados y contienen puntos débiles. El corte se hace por medio de chorros finos de agua, a alta presión, que se localizan sobre la tela entre la última caja de succión y el cilindro de succión. Los recortes pasan alrededor de éste cilindro y al lavar la tela caen hacia la fosa del cilindro, en donde se redesfibran y son vueltos a utilizar en el sistema.

Para máquinas de mediana o baja velocidad, la hoja se levanta de la tela en el cilindro de retorno y se pasa, sin soporte alguno, a través del claro existente, de la tela hacia un fieltro móvil de lana, el cual la deposita entonces en la primera prensa húmeda. En la mayoría de las máquinas de alta velocidad el paso de la hoja de la tela hacia la primera prensa se efectúa mediante un cilindro de succión y un fieltro que se pone en contacto con la hoja sobre la tela. La hoja se transfiere al fieltro, el cual la transfiere al fieltro, el cual la deposita a la primera prensa.

\* En Español se le llama prensa húmeda, manchón, prensa de tela y en inglés Couch roll.

**SECCIÓN DE PRENSAS.-** La sección de prensas de la Fourdrinier consta generalmente de 2 o 3 juegos de rodillos compresores, cada uno con su propio sistema de fieltros. Es muy importante que la primera prensa no ejerza tanta presión que aplaste la hoja. La primordial función de la sección de prensas es reducir el contenido de agua de 78-82% a 60-70%. Al mismo tiempo que la presión húmeda deshidrata la hoja, la hace compacta, reduce las desigualdades de su superficie sin daño de la estructura y en algunos casos mejora las cualidades físicas de la hoja. Las prensas exprimen el agua, que los fieltros recogen y eliminan. En igualdad de condiciones, la cantidad de agua extraída depende de la velocidad de la máquina. Las grandes velocidades requieren mayor presión, pues de lo contrario se impone a la sección de secado sea más difícil tarea. El grado de compresión que admite la hoja depende de la clase de pulpa (la pulpa mecánica se comprime menos que la pulpa química), del grado de batidora que se sometió la pulpa, etc.

**SECCIÓN DE SECADO.-** La hoja que sale de la sección de prensas es suficientemente fuerte para sostener su propio peso. En la sección de secado, la hoja húmeda pasa por un par de rodillos alisadores, en los que las desigualdades de la superficie desaparecen por la presión. Esto es posible porque 60-70% del agua que lleva la hoja permite el deslizamiento interno en frío por la sola presión. Del par de rodillos alisadores, el superior ésta recubierto de caucho y el inferior es de superficie metálica. El mismo efecto se obtiene intercalando un par de rodillos de hierro en un punto conveniente de la sección de secado. De los cilindros alisadores, la hoja pasa a los desecadores. El número y dimensiones de estos últimos depende de la cantidad de agua que es preciso eliminar en determinado lapso, cantidad que es función de la velocidad de la máquina y del peso de la hoja. Comúnmente la sección de secado consta de una serie de rodillos metálicos calentados por vapor (desde una docena hasta un ciento o más) y movidos por engranajes. Las hojas de peso ligero se secan en contacto con la cara del rodillo, mediante una lona o un fieltro, que también elimina agua mecánicamente.

El contenido de humedad de la hoja, que era de 60-70% al salir de la sección de prensa queda reducido por el secado a 4-7%. El peso real del agua eliminada es muy grande. Al fijar las transmisiones de velocidad variable en la sección de secado es preciso conceder una tolerancia por el 5-9% de estiramiento de la hoja, que se





produce al tirar de ella durante el secado. La velocidad de la sección debe aumentarse gradualmente para compensar la creciente longitud de la hoja. Para tener un mejor control de la extracción se recomienda conservar la humedad (humedad absoluta o punto de rocío), lo más alta posible sin tener condensación o goteo dentro de la campana y sin crear condiciones inconvenientes en la sala de máquinas de papel. Un volumen bajo de extracción significa menor costo de ventilación, y la humedad alta tiende a mejorar la uniformidad tanto del secado como de la calidad de la hoja.

**CALANDREADO.**- La función básica del calandreado es reorientar las fibras superficiales en las hojas o el recubrimiento aplicado sobre su superficie, ya sea debido a compresión, fricción o una combinación de ambas. La diferencia principal entre las supercalandrias y los otros tipos de calandrias, consiste en que en lugar de tener un conjunto completo de rodillos de hierro enfriado, las supercalandrias tienen, alternadamente, rodillos con relleno de fibra. La supercalandria es el único tipo de calandria que no está directamente en tándem con la máquina de papel, y su trabajo, más que una función del proceso de fabricación del papel, se considera normalmente una operación del departamento de acabado.

#### MÁQUINA CILÍNDRICA.

Otro dispositivo de uso común para la formación de papel es la máquina cilíndrica, ésta difiere de la fourdrinier exclusivamente en la sección de formación de la hoja. Aquí, en lugar de una malla continua, se utiliza una serie de fieltros cilíndricos los cuales giran a velocidades periféricas cercanas a los 125 metros por minuto y cuyo diámetro no es mayor a 91 cm. Cada cilindro se encuentra parcialmente sumergido en una tina a la cual se le ha hecho llegar la suspensión fibrosa diluida. Conforme gira el cilindro, el agua es drenada a través del fieltro, consiguiéndose simultáneamente la formación de una delgada tela de papel en su periferia.

Al llegar a la parte superior del cilindro el pliego es separado y adherido a una tona que circula a todo lo largo de la sección de formación de la máquina. Un efecto similar se registra en cada uno de los demás cilindros, obteniéndose al final de la operación una hoja de elevado gramaje, la cual se integró por la adición sucesiva de capas de fibras. El tipo de máquina formadora aquí descrito se destina generalmente a la manufactura de papeles de empaque. Las Figuras que se presentan son el diagrama de flujo (Fig. II-20) que comprende las 2 etapas (la preparación de la pasta y la formación del papel) y la Figura II-21 es otro diagrama de flujo simplificado, pero sólo de la máquina de papel Fourdrinier.

#### MEJORAMIENTO AMBIENTAL

Desde mucho tiempo atrás, las industrias de la celulosa y el papel en distintas formas, se han preocupado por la conservación del medio ambiente tanto en aspectos de reforestación como en el tratamiento de sus aguas y el control de sus emisiones a la atmósfera. Esta preocupación se ha visto reforzada a partir de la homologación de diversos ordenamientos sobre control ambiental, iniciados con la publicación del Diario Oficial de la Federación del 23 de marzo de 1971 de la ley Federal para la Prevención





y Control de la Contaminación Ambiental. A continuación se presentan estudios realizados para el mejoramiento del aspecto ambiental por parte del sector industrial paplero.

**MICROBIOLOGÍA DE LAS FABRICAS DE PAPEL.-** En las fábricas de papel se añaden agua al almidón, cola, y otras sustancias que tienen valor nutritivo para los microbios, que en esas condiciones median y con sus masas forman el llamado "lodo". Este lodo trastorna la corriente normal de la pasta, forma grumos e impide la formación regular de la hoja.

Fundamentalmente, el remedio es crear condiciones impropias para la propagación de los microorganismos formadores de lodo. En muchos casos son muy eficaces las aplicaciones de cloro o cloramina, con lavados frecuentes o sin ellos. Existen antisépticos y desinfectantes, los cuales se clasifican en tres categorías: clorofenoles, los mercuriales orgánicos y detergentes.

Otro aspecto tiene importancia en el funcionamiento eficaz de las máquinas de papel. Muchas veces las conducciones de agua contienen microorganismos proteolíticos que atacan a los fieltros de las máquinas y acortan su vida útil. Se combaten esos microbios tratando los fieltros con clorofenol, seguido con un baño de ácido diluido.

**ASPECTO SANITARIO DEL ELEMENTO PAPEL COMO ELEMENTO DE ENVASE.-** Hace mucho tiempo que el papel se usa para proteger y empaquetar sustancias alimenticias sin detrimento de la salud pública. Sin embargo, cuando en los años treinta, algunos funcionarios de sanidad pública pensaron en las posibles repercusiones sanitarias del empleo del papel para envolver alimentos, especialmente para la leche e incitaron a iniciar una investigación. El examen bacteriológico demostró que en las muestras las bacterias que quedaron eran de especies inofensivas y carentes de importancia en relación con la salud pública. Se concluyó que los envases de papel para alimentos no son peligrosos para la salud pública; antes bien, poseen cualidades higiénicas muy estimables.

**EFFECTOS DE CONTAMINACIÓN POR LOS DESECHOS DE LAS FABRICAS DE PAPEL.-** Las materias residuales de las industrias producen efectos nocivos en las corrientes de agua y en sus habitantes en tres formas:

- 1) Por su consumo de oxígeno (demanda bioquímica de oxígeno), que reduce la cantidad de oxígeno en el agua en forma peligrosa para la vida acuática.
- 2) Por contener sustancias tóxicas.
- 3) Por los sólidos inertes que se asientan en el lecho de la corriente y destruyen así su valor como morada acuática.

El grueso del volumen del agua de desperdicio de una fábrica de papel se elimina con las aguas blancas. Por regla general, esas aguas no muestran gran demanda bioquímica de oxígeno y en la mayor parte de los casos es absorbida por las corrientes que las reciben sin consecuencias adversas para estas. En la manufactura de especialidades de papel puede ser contraria la situación; pero ésta se remedia mediante un tratamiento especial del agua de desecho. Normalmente, las aguas





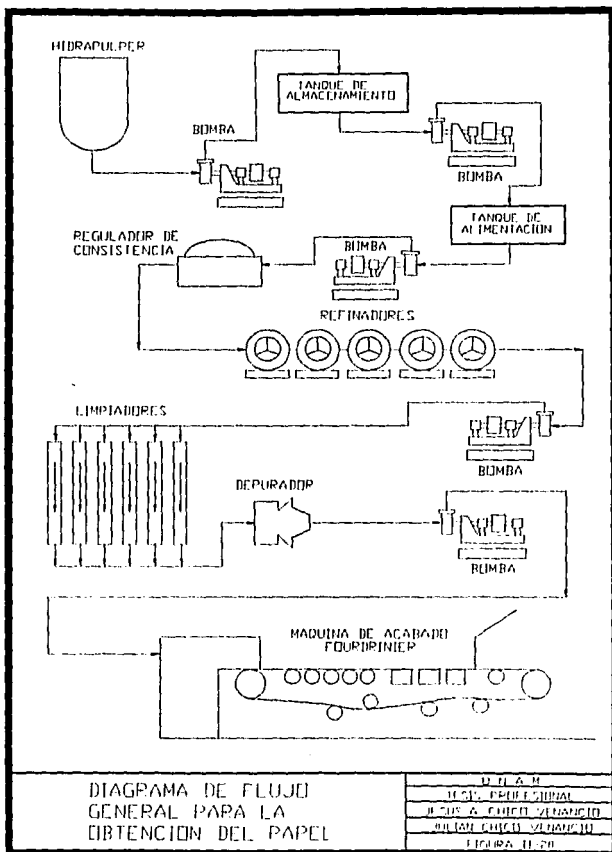


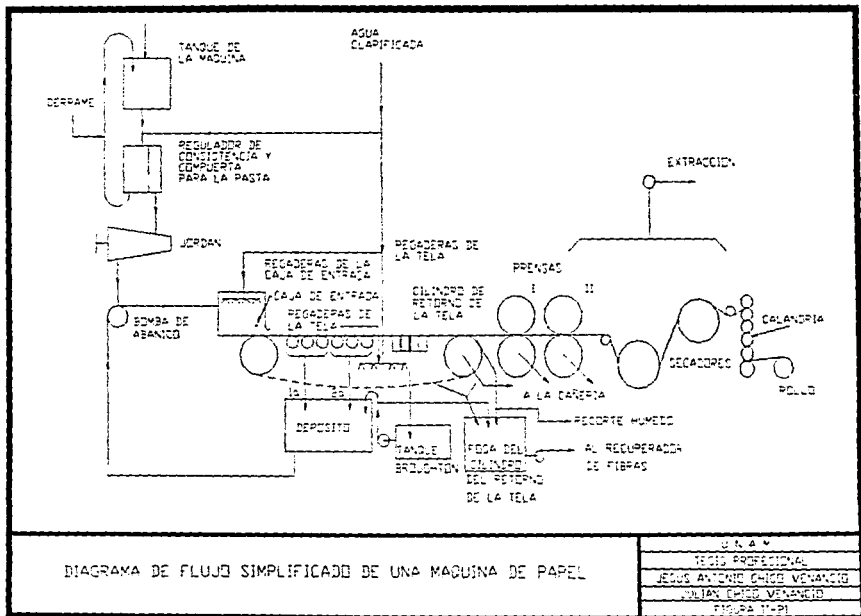
blancas no contienen cantidades apreciables de materias tóxicas. Se concibe, desde luego, que en la manufactura de papel de asfalto laminado lleguen compuestos fenólicos hasta la corriente. El empleo de cantidades excesivas de agentes contra el todo microbiano puede ser perjudicial para la corriente receptora. Sin embargo estos casos son raras excepciones de la regla general.

La pérdida de sólidos inertes es el mayor peligro de contaminación en las fábricas de papel. Hace muchos años funcionaban las máquinas en sistema "abierto" es decir, el agua se desechaba después de emplearla una sola vez para la suspensión de la pasta y la formación de la hoja. Así no era raro que la pérdida de fibras llegara a 10%. Por el contrario, hoy en el sistema de aguas blancas se mantiene lo más "cerrado" que sea posible; es decir: se devuelve al ciclo la mayor cantidad de agua compatible con la operación eficaz de las máquinas, con lo cual se reduce grandemente la pérdida de fibras y aditivos sólidos, particularmente de caolín. Muchos operadores estiman que sería posible mayor economía si se pudiera, recobrar las fibras que hoy se pierden con las aguas blancas. Para ello se emplean tres procedimientos: filtración, flotación y sedimentación. Con buen funcionamiento, la pérdida de fibras queda reducida a menos del 1%. La filtración se efectúa en un cilindro cubierto con tela fina metálica y que flota en el agua blanca; ésta pasa por succión a través de la malla, en la que se concentran las fibras y los otros materiales en la forma de torta, que se recupera para utilizarla. El tipo de sedimentación éste representado por un cono invertido en el que continuamente se asientan las fibras y otros sólidos, para ser extraídos mediante una válvula y usados nuevamente.

Algunas fábricas están situadas junto a corrientes de agua en las que las autoridades sanitarias no toleran ni el 1% de pérdida de fibras. En tales casos se eliminan estas fibras haciendo pasar el agua blanca por tanques de sedimentación. Usualmente, las fibras eliminadas de esa manera no pueden ser de nuevo utilizadas, pero son periódicamente extraídas de los tanques de sedimentación y destruidas.









## II.13 FABRICACIÓN DEL CEMENTO.

**INTRODUCCIÓN.-** El nombre de cemento es derivado del latín *Caementum* que significa argamasa (mezcla de cal, arena y agua). El cemento es un polvo más fino que el talco que se mide por medio de una minúscula caldilla fotoeléctrica y en un sólo saco de cemento se encuentran millones de granos. Estos pequeños granos están formados por diversos cristales y vidrios, que, al llegar a mezclarse con agua, producen una jalea de silicatos de calcio, excelente pegadura capaz de unir un gran número de fragmentos pétreos, arena y grava, para formar un conglomerado moldeable, durable resistente e impermeable a voluntad, que constituye la piedra plástica y versátil de los tiempos modernos, adaptable a miles de usos.

La industria del Cemento es una de las más sólidas de Nuestro país a nivel internacional y sus productos son altamente competitivos en calidad y condiciones frente a los otros países. El principal producto de esta industria es el cemento gris y en menor escala se producen otros tipos de cemento, como el blanco y el tipo mortero.

El cemento hoy en día es el material de construcción más utilizado mundialmente en todo tipo de edificaciones, ya que permite crear la infraestructura necesaria, para realizar con eficiencia cualquier actividad humana.

**NOTAS HISTÓRICAS.-** Desde hace más de veinte siglos, los Otómies, los Toltecas y los Mayas en nuestro país, y los Griegos y los Romanos en Europa, emplearon morteros hidráulicos con gran éxito en sus construcciones como puede apreciarse hoy en día, en restos de sus obras que han perdurado.

Ya sea que los conocimientos de los antiguos sobre esta materia fuesen meramente de carácter empírico o que se perdiesen al paso del tiempo, lo cierto es que hasta principios del Siglo XIX no se conoció nada del mecanismo del fraguado de dichos morteros. Los primeros ensayos de producción de cementos mediante la cocción de mezclas preparadas artificialmente con caliza y arcilla, se efectuaron en Francia, donde Vicat las realizó con éxito a principios del siglo XIX. Sin embargo no se sacó partido práctico de tales ensayos, y fueron los ingleses quienes trabajaron nuevamente en la materia. Quien consiguió tras largos ensayos un excelente aglomerante hidráulico, fue Aspdin en 1824, cocinando a temperatura muy elevada una mezcla bien dosificada de cal apagada y arcilla. Le dió el nombre de Cemento Portland por su aspecto parecido a las piedras del puerto de Portland, Condado de York, de la Gran Bretaña. El prototipo del cemento moderno fue obtenido en 1845 por Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta la formación de clinker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto fuertemente cementoso.

### MATERIAS PRIMAS.

La composición química del cemento está constituida generalmente en un 95% por los siguientes cuatro elementos principales:





64%	CaO	Oxido de Calcio	"Ca"
22%	SiO <sub>2</sub>	Dióxido Silico	"Silice"
6%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de Aluminio	"Alúmina"
3%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxido de Hierro	"Hierro"

El componente más importante del cemento es la cal u óxido de cal, siguiendole a gran distancia la sílice a ésta el óxido de aluminio y al final el óxido de hierro.

Además de estos componentes principales hay una serie de otros elementos, subordinados a los primeros, pero que a pesar de su pequeño contenido, influyen en las características del cemento. El primer requisito importante es la materia prima para la elaboración del cemento en un determinado contenido de cal que pueda combinarse con el resto de los elementos principales de manera que durante la calcinación no se produzca cal libre. Esto es logrado normalmente por medio de la mezcla de un material base con alto contenido de cal y otro con gran contenido de arcilla, presentándose a veces el caso de en que hay que añadir materiales correctivos para alcanzar un determinado valor de los módulos hidráulicos y de fundente. En ocasiones el uso de una sola materia que por naturaleza tiene la composición química y adecuada para la elaboración del cemento, ésta recibe el nombre de roca natural de cemento. Este es un caso muy especial y sumamente raro. El uso de dos componentes principales, de los cuales uno consiste del elemento principal CaCO<sub>3</sub> y el otro de los demás elementos principales que son SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Los tres últimos elementos se encuentran en la naturaleza en rocas sedimentarias arcillosas. El componente que contiene principalmente CaO (en una forma de CaCO<sub>3</sub>) se llama Componente Calcáreo y el componente que consiste principalmente de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se llama Componente Silíceo. Se da el caso muy común que con la mezcla de estos dos componentes no se obtiene una mezcla adecuada para la elaboración del crudo, y es necesario agregar algún material correctivo para alcanzar la composición química deseada. Dentro del extenso campo de las materias primas también se consideran los (aditivos) que se agregan a la mezcla cruda o al clinker con la finalidad de que el cemento tenga una característica determinada.

**COMPONENTES CALCÁREOS.**- Son considerados componentes calcáreos aquellas rocas con un contenido de CaCO<sub>3</sub> mayor del 75% o sea mayor que los valores requeridos para una mezcla cruda de cemento que se determina por titulación. Según el contenido de CaCO<sub>3</sub> las rocas calcáreas se subdividen de la manera siguiente:

CONTENIDO DE CaCO <sub>3</sub>	DENOMINACIÓN
95 - 100	Caliza de alto porcentaje
85 - 95	Caliza
75 - 85	Caliza Margosa

Dentro del termino "CALIZA" se consideran todas las rocas con un alto contenido de calcio independiente de las variaciones y diferencias litológicas y estructurales. Con el objeto de dar una idea del gran número de variaciones en las rocas calcáreas, se enuncian las siguientes rocas: Caliza, Caliza Margosa, Greda, Caliza Coralífera,





Mármol, Bancos de conchas, Arena calcárea, Cantos rodados y Gravas de naturaleza calcárea, etc. En una muestra de material calcáreo y dentro de ciertos límites, entre más bajo sea el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$ , más alto será el porcentaje correspondiente de arcilla y eventualmente se acercará a tener la composición química teórica adecuada para mezcla de crudo de cemento. Si la relación del porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  y arcilla, corresponden a los requerimientos químicos teóricos de la mezcla de crudo se trata de una roca de cemento se menciona anteriormente y evidentemente es la materia prima ideal que no requerirá aditivos. Por lo tanto es erróneo considerar que el valor económico de una caliza para la elaboración de cemento aumenta con el contenido de carbonato. En cambio si se eleva el valor económico en el caso que sea necesario utilizar caliza de alto contenido de cal como correctivo o aditivo y que éste sea transportado desde gran distancia. Por contrario si se trata de una caliza más o menos homogénea se prefiere una titulación de 80 a 85% de  $\text{CaCO}_3$  a una de 95 a 100% de  $\text{CaCO}_3$ , porque sólo para mencionar algunos puntos primeramente la molienda de una caliza de alto porcentaje resulta más costosa y segundo porque en una caliza de menor porcentaje los elementos principales de cal y arcilla están distribuidos homogéneamente lo que no se obtiene fácilmente con la homogeneización mecánica y sin embargo es importante para evitar dificultades en la calcinación. Teniendo una caliza Margosa de bajo porcentaje de cal se puede dar preferencia a una caliza de alto porcentaje siempre y cuando:

- El yacimiento se encuentre en un lugar cercano a las instalaciones de la fábrica.
- Que su constitución geológica sea uniforme y convenga para una explotación del tipo usual en la industria del cemento.
- Que en el componente arcilloso no varíe mucho en su contenido de  $\text{CaCO}_3$ .
- Que la relación de componentes sea aceptable para la elaboración del crudo y sin necesidad de grandes correcciones.

**COMPONENTE ARCILLOSO.-** Como componente arcilloso se define a aquella componente principal que tenga un contenido de  $\text{CaCO}_3$  menor de 75% y referente a los factores hidráulicos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) la relación con la caliza será adecuada para ser usada en la elaboración de una mezcla cruda para elaborar cemento portland. Debido a que la composición química de arcillas constituidas principalmente por  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  puede mostrar grandes variaciones, tenemos en recompensa una gran diversidad de rocas en la naturaleza conteniendo estos elementos.

La lista que se presenta a continuación da una clasificación y características especiales:

Porcentaje de $\text{CaCO}_3$	Denominación
60 - 75	Marga Calcárea
40 - 60	Marga
25 - 40	Marga Arcillosa
10 - 25	Arcilla Margosa
0 - 10	Arcilla





Además de las posibles materias primas de origen sedimentario ya mencionadas, también se pueden considerar como componentes silíceas rocas de origen volcánico o metamórfica como ejemplo mencionamos a las Tobs Volcánicas, Pizarra Metamórfica, Filita, Anfibolita (roca metamórfica). Basándonos únicamente en las posibilidades que nos ofrecen los materiales podemos encontrar más de una solución y antes de tomar una decisión debemos recurrir a considerar ciertos factores como los siguientes:

- Composición química de la componente calcárea disponible.
- Influencia en el proceso de calcinación y en calidad del cemento.
- Distancias de transportes, etc.

**MATERIALES CORRECTIVOS.-** En caso de que los componentes principales no tengan la composición química deseada o se desea producir cemento con propiedades especiales, se requiere emplear materiales correctivos o aditivos. Con un material correctivo, se logra variar el contenido de uno de los factores hidráulicos o sea  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Debido a que en la mayoría de los casos los materiales correctivos tiene que ser transportados de lugares a grandes distancias es necesario obtener materiales con alto porcentaje del elemento correctivo, con el fin de tener que transportar volúmenes pequeños para lograr la corrección deseada. Como material correctivo rico en hierro es el mineral de hierro o las escorias de laminación de fundidoras, el material correctivo rico en alúmina es la bauxita, también la laterita, y la caolinita y el material correctivo rico en sílice es la cuarcita y la arena de cuarzo de estas dos se prefiere la arena de cuarzo ya que la cuarcita es una roca compuesta y requiere de un gran esfuerzo su trituración. Otra fuente de menor pureza en sílice es la arenisca con feldespatos, areniscas y siltitas.

**MATERIAS PRIMAS PARA ADITIVOS.-** Como aditivos se consideran aquellas materias, que se agregan a la mezcla cruda para obtener ciertas propiedades sin que la composición química sea influenciada considerablemente o materias primas agregadas en forma natural, simultáneamente con la molienda del clinker. Como fundente se usa la fluorita ( $\text{CaF}_2$ ). La adición de cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$  producto artificial), influye la volatilización de los álcalis. Para regular el tiempo de fraguado del cemento se agrega anhídrido ( $\text{CaSO}_4$ ) o yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) al clinker. Además se considera como aditivos la escoria de altos hornos y las puzolanas (toba volcánica con propiedades hidráulicas latentes) para la elaboración de cementos especiales.

### PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO.

Para la fabricación del cemento existen 2 tipos de formas por vía seca y por vía húmeda. Es importante hacer la observación que en la mayoría de las plantas de cemento de nuestro país se utiliza el procedimiento de fabricación por vía seca.

#### PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN POR VÍA SECA.

El proceso consiste en síntesis, en reducir a polvo las materias primas, calcinarlas y transformarlas en cemento.





**LA CALIZA Y LA ARCILLA (1).**- El proceso se inicia con la selección de las canteras que contienen dos de las materias primas básicas: la caliza y la arcilla.

**BARRENACIÓN DE CANTERAS (2).**- La extracción de las materias primas se hace en forma de escalones o bancos descendentes previendo el control de la contaminación de polvo, ruidos y vibraciones. La extracción se inicia barrenando las canteras utilizando equipo neumático de alta potencia (barrenador de oruga).

**EXPLOSIÓN DE CANTERAS (3).**- Dentro de los barrenos se introducen los explosivos que tumban paredes de roca muy grandes. Para evitar ruidos y vibraciones son colocados retardadores de tiempo entre barrenos y barrenos. Los explosivos son de una avanzada tecnología y confiabilidad explotan y generan gases de alta energía que presionan, fraccionan y tumban los bloques de cantera convirtiéndolos en piedras de distintos tamaños.

**CARGA DE MATERIA PRIMAS (4).**- La carga del material a los camiones transportadores la hacen cargadores frontales muy poderosos, equipados con llantas de gran versatilidad de movimiento, forradas algunas de ellas con cadenas para protegerlas de los picos cortantes de las rocas. El cargador más potente es capaz de llenar el camión más grande, con solo levantar aproximadamente 3 cargas de material de 16 toneladas cada una.

**TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS (5).**- Para el transporte de las materias primas son utilizados dos tipos de camiones: uno de los llamados trailers de dos y tres ejes con capacidad de carga de 30 y 40 toneladas respectivamente y los otros son más grandes e imponentes con una capacidad de desplazamiento de más de 50 toneladas. Los primeros transitan en carreteras y calles y los segundos solo dentro de las canteras y plantas.

**TRITURACIÓN DE MATERIAS PRIMAS (6).**- Dentro de la planta, los trituradoras de martillos reducen la caliza y la arcilla a piedras de un máximo de 2.5 centímetros. Para comprobar la calidad fisicoquímica de las 2 materias, se hacen en el laboratorio análisis con muestras de cada material. A partir de la trituración, las bandas transportadoras entran en operación llevando la caliza a un almacén y la arcilla al prehomogeneizador.

**PREHOMOGENEIZACIÓN Y SECADO DE ARCILLA (7).**- La prehomogeneización es la combinación proporcional de los diferentes tipos de arcilla en un gran almacén. Se depositan horizontalmente las capas del material y posteriormente una excavadora de cangilones las va recogiendo verticalmente obteniendo la mezcla requerida para el proceso. Al pasar al secador, la arcilla recibe calor para eliminar la humedad que trae de la cantera.

**SILOS DE ARCILLA, ÓXIDO DE HIERRO Y CALIZA (8).**- Al proceso de producción se integra una nueva materia prima: el óxido de hierro y la caliza son depositados en los silos. Estos son cilindros muy altos con paredes de concreto gruesas y resistentes capaces de contener miles de toneladas de materiales a ser procesado.







**ALIMENTACIÓN DOSIFICADA DE MATERIAS PRIMAS (9).**- Debajo de los silos, las bandas transportadoras reciben las materias primas y al avanzar a distintas velocidades las van depositando en una banda común. La dosis de materiales varían según el tipo de cemento que se produce. Para el cemento de uso común, la caliza predomina con un 59%, le sigue la arcilla con un 40% y el mineral de hierro con 1%.

**MOLIENDA DE HARINA CRUDA (10).**- La caliza, la arcilla y el óxido de hierro pasan a un gran molino donde recibe los impactos de cientos de bolas de acero contenidas en los dos compartimientos que dividen al molino. El movimiento de rotación rápido provoca el choque de las bolas entre sí y con las paredes, mezclando y pulverizando totalmente los materiales. El polvo resultante de esta molienda es llamado harina cruda.

**SEPARADOR DE AIRE, BOMBA NEUMÁTICA Y SILOS (11).**- La harina cruda sale del molino y es enviada a un separador de aire, donde las partículas "gruesas" regresan a ser molidas y las "finas" son enviadas a los silos de homogeneización mediante una bomba neumática. La utilización de la bomba de aire comprimido y tubos de gran diámetro son otro excelente medio de transporte en el proceso de producción.

**CONTROLES DE OPERACIÓN Y DE CALIDAD (12).**- El flujo de producción desde los alimentadores dosificadores hasta los silos de homogeneización es dirigido desde el centro de control de operación. El control de calidad de la harina cruda es efectuado en el laboratorio, donde una muestra es analizada con un espectrómetro de rayos x. Los datos de este análisis son procesados en una computadora y de acuerdo a los resultados, se ajustan las dosis de materiales antes de entrar al molino.

**CLINKERIZACIÓN (13).**- La harina cruda sigue su flujo al ser precalentada, precalcínada y finalmente calcínada dentro del horno rotatorio, que constituye el corazón del proceso. El horno es un cilindro gigantesco de acero, que llega a tener una longitud de 60 a 100 metros, cuyo interior se encuentra totalmente recubierto de ladrillo refractario. Su giro es permanente y su ligera inclinación hace que la harina cruda introducida por el lado más elevado se desplace por gravedad hacia la parte más baja. El interior del horno tiene diferentes zonas de calor, la más elevada llega a los 1450°C, aquí la materia prima es transformada en distintos compuestos, predominando los silicatos cálcicos, que son los principales componentes del cemento. Los gases del horno, cargados de polvo, son reunidos en un colector de polvo y enviados nuevamente al horno.

**CONTROL DE LA CLINKERIZACIÓN (14).**- Durante la etapa de clinkerización la operación se controla a través de instrumentos electrónicos, monitores de video, graficadores selectivos, computadora e impresora de datos, ubicados en una sala diseñada para ello. La automatización de las operaciones da por resultado una mejor utilización de la maquinaria y equipos, una calidad más estable de los materiales y una operación de la planta más simple y segura.

**FORMACIÓN DEL CLINKER (15).**- El clinker es un producto intermedio del proceso, resultante de la calcinación de las materias primas. Las altas temperaturas dentro del horno hacen que parte de la harina cruda cambie a estado líquido originando la





formación del clinker en forma de bolas de hasta 30 milímetros de diámetro, mismas que al salir del horno y enfriarse adquieren un color gris verdoso.

**ALMACENAJE DE CLINKER (16).**- Al salir del enfriador, un triturador separa las bolas del clinker que vienen adheridas entre sí, y algunas muestras de este nuevo material son enviadas al laboratorio donde se prueba su calidad. El clinker continúa su flujo en el proceso sobre un transportador de cubos que lo lleva, elevándolo, a la parte superior de un gran almacén, donde es depositado.

**TRANSPORTE DE CLINKER (17).**- Algunas plantas de gran capacidad de producción envían a otras plantas y a los mercados de exportación parte de su producción de clinker. Los medios de transporte utilizados son buques mercantes de 25 mil toneladas de capacidad, y carros de ferrocarril y camiones que cargan en promedio 70 y 30 toneladas respectivamente.

**EL YESO, COMO MATERIA PRIMA (18).**- La última materia prima que se integra al proceso es el yeso. El propósito del yeso es alargar el tiempo de fraguado del cemento cuando éste llegue a ser utilizado en una construcción. Esto es, hacer que la mezcla de cemento, con agua y agregados, permanezca fluida y manejable por un período de varias horas, para que el constructor tenga tiempo de darle a su obra la forma previamente proyectada.

**TRITURACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD (19).**- El yeso llega a la planta en camiones. Estos lo depositan en una gran tolva, y de allí pasa a un triturador de martillos. Ya reducido, un transportador de bandas lo lleva a un silo en espera de ser molido junto al clinker. La calidad del yeso se comprueba en el laboratorio en donde se controla tanto su pureza química como su composición cristalográfica.

**DOSIFICACIÓN DE CLINKER Y YESO (20).**- El clinker y el yeso son conducidos a una tolva separadas entre sí. De allí ambos materiales son alimentados en dosis muy diferentes a una banda común. El clinker en proporciones de 94 a 95% y el yeso de 6 a 5%. La banda lleva los dos materiales al molino de bolas para cemento.

**MOLIENDA DE CEMENTO (21).**- El clinker y el yeso pasan a un molino igual al de harina cruda, el cual uno de sus compartimientos contiene bolas de 50 a 80 milímetros y el otro, bolas de 20 a 25 milímetros. El molino, en forma de cilindro, gira a alta velocidad y convierte en polvo los materiales contenidos. Las plantas cuentan con molinos capaces de moler un promedio de 160 toneladas por hora.

**SEPARADOR DE AIRE Y BOMBA NEUMÁTICA (22).**- El rendimiento útil de cemento portland depende de la finura de sus granos; a mayor finura, mayor capacidad de adherencia. Es por ello que los granos "gruesos" que salen del molino son enviados por un separador de aire a ser molidos nuevamente. Y los finos son bombeados neumáticamente a los silos de cemento.

**CONTROL DE OPERACIÓN Y DE CALIDAD (23).**- Todas las fases de la molienda de cemento son activadas desde el centro de control de operación, mientras que la calidad del Cemento es controlada en el laboratorio, donde se hacen los análisis con





rayos x, se establecen los balances químicos y se aplican otras técnicas especializadas.

**'EL CEMENTO" (24).**- Resumiendo el proceso anterior, definimos que el cemento es el producto artificial resultante de calcinar hasta el punto de fusión mezclas rigurosamente homogéneas de caliza, arcilla y otras materias primas. De tal calcinación, se obtiene un producto intermedio llamado clinker, mismo que mezclado con yeso da por resultado el cemento.

**VENTAS DE CEMENTO A GRANEL (25).**- El cemento es un producto que se compra por toneladas. Una parte de los distribuidores y de los constructores que lo utilizan lo adquieren a granel, para ellos a su vez almacenarlo en sus propios silos o tolvas y de allí enviarlos a las obras de construcción en forma de concreto premezclado, listo para su aplicación.

**TRANSPORTE DE CEMENTO A GRANEL (26).**- Los medios de transporte de cemento a granel son los buques mercantes, los carros tanques de ferrocarril y los camiones pipa. Estos dos últimos transportes se colocan directamente bajo los altos silos y allí reciben la carga en sus cajas de almacenamiento, las cuales al cerrarse herméticamente, mantienen el producto en perfecto estado.

**VENTA DE CEMENTO EN SACOS (27).**- Gran parte del cemento producido en la planta sale a la venta en sacos de papel con capacidad de 50 kilogramos. Para el ensacado, los operadores accionan las máquinas que automáticamente descargan el producto en cada saco, lo cierran y lo envían a las bandas conductoras cuyo destino final son los medios de transporte.

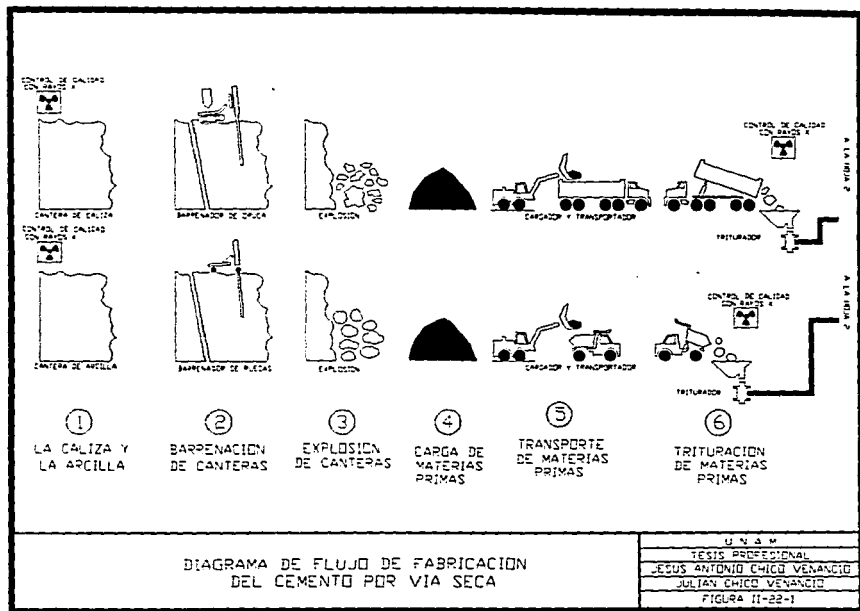
**TRANSPORTE DE CEMENTO EN SACOS (28).**- Al igual que el clinker y el cemento a granel, el cemento en sacos es transportado por mar y tierra. Los buques que llevan el cemento a los mercados de exportación desplazan cargas de hasta 25,000 toneladas por viaje, mientras que un carro de ferrocarril carga 70 toneladas y un camión de 30 toneladas promedio para envíos a mercados nacionales y del extranjero.

**PESO EN BÁSCULAS Y SALIDA AL MERCADO (29).**- Toda carga de los distintos cementos que se producen en las plantas es pesada a precisión antes de salir al mercado.

Cabe hacer la observación que la información para el proceso de fabricación de Cemento por la Vía Seca fue proporcionado por el Grupo de Cementos Mexicanos.

En seguida se presenta el diagrama de flujo del proceso de fabricación vía seca Figs. II-22-1 a la II-22-5.





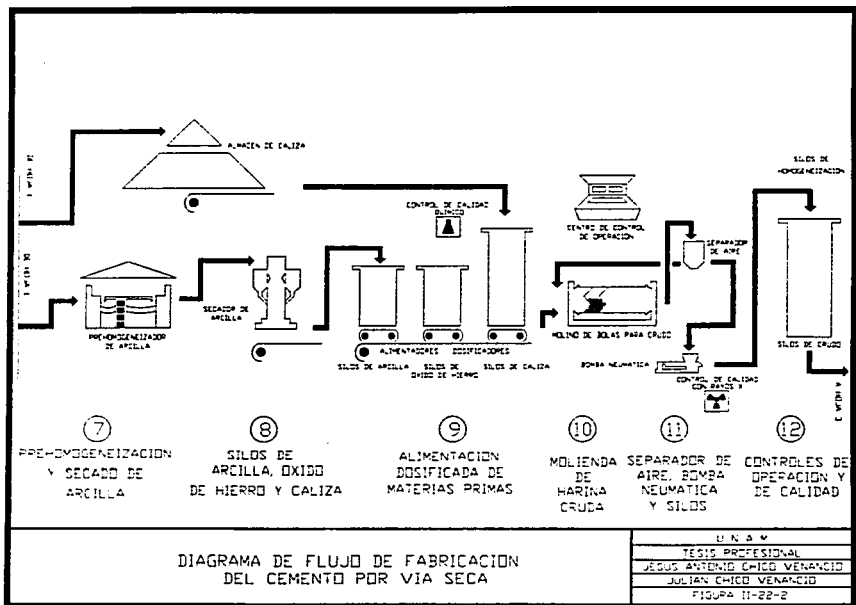
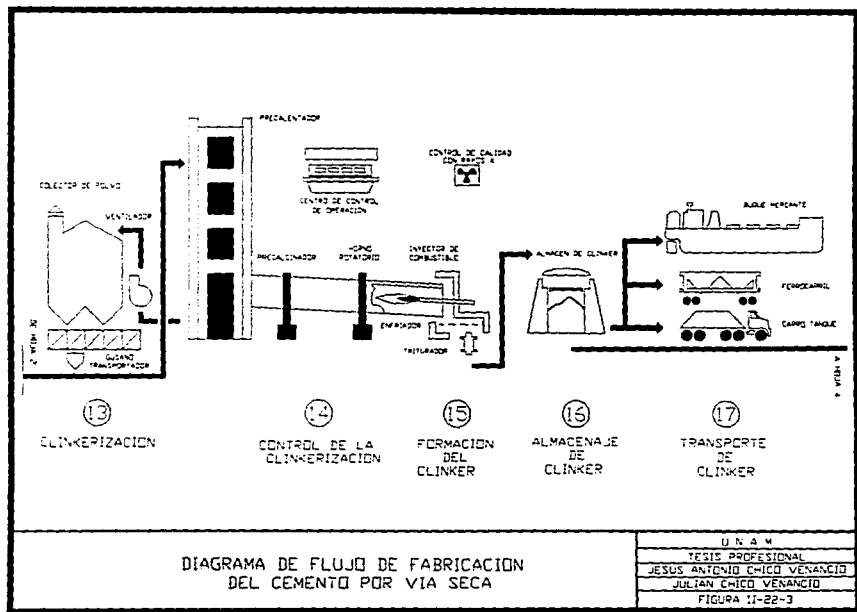


DIAGRAMA DE FLUJO DE FABRICACION DEL CEMENTO POR VIA SECA

U. N. S. M.
TESIS PROFESIONAL
JESUS ANTONIO CHICO VENANCIO
JULIAN CHICO VENANCIO
FIGURA II-22-2





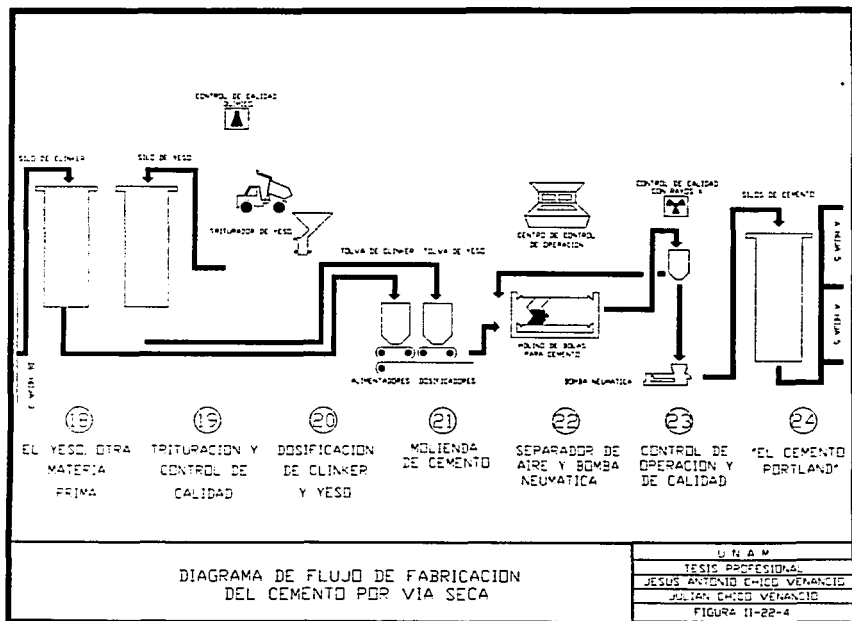
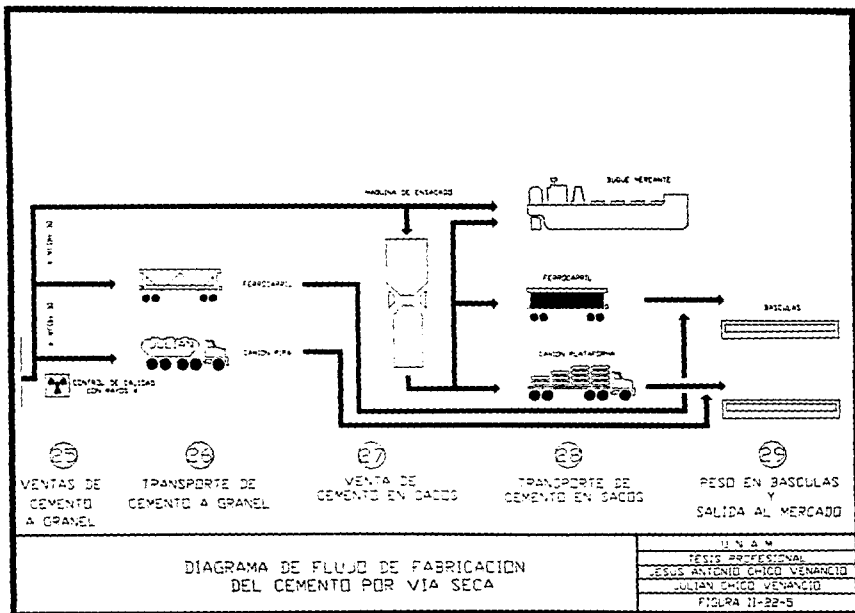


DIAGRAMA DE FLUJO DE FABRICACION DEL CEMENTO POR VIA SECA

U N A M
TESIS PROFESIONAL
JESUS ANTONIO EMIGD VENANCIO
JULIAN EMIGD VENANCIO
FIGURA II-22-4







## PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN POR VÍA HÚMEDA.

Una vez localizadas las canteras, la explotación se efectúa por cortes sucesivos con la ayuda de diversos medios (explosivos, excavadoras, etc.). Los materiales se recogen y se cargan sobre vehículos y se conducen hacia la fábrica después de haber sufrido, algunas veces un desmenuzamiento previo. Raramente se encuentran aglomeraciones de marga presentando la composición adecuada para la fabricación del cemento. Puesto que el carbonato de calcio entra en mayor proporción en la composición del cemento, se sitúa la fábrica generalmente en las proximidades de una cantera caliza a la vez que se localizan en las cercanías un banco de arcilla susceptible de aportar los elementos complementarios; sílice, alúmina y óxido de hierro. Las materias primas extraídas pueden tener una dureza variable. Muchas canteras suministran materiales quebradizos que se deshacen cómodamente en el agua. Esta puesta en suspensión favorece la creación de una mezcla íntima entre diversos elementos, condición sin la cual, no se tendría buena cocción.

**DESLEIMIENTO (1).**- Es efectuada normalmente esta operación en un estanque de unos 10 metros de diámetro aproximadamente alimentado por agua y en el interior del cual gira un carusel provisto de un rastrillo. Este rastrillo es el que desmenuza y divide la materia así mojada.

**TRITURACIÓN (2).**- La pasta que sale de esta cámara es muy frecuentemente basta. Eventualmente debe tamizarse (cuando contiene, por ejemplo, sílex u otras impurezas no convenientes) y triturarse. Es sabido que cuantos más elementos heterogéneos son triturados finamente más posibilidades se tienen de combinarse en la cocción subsiguiente a la que serán sometidos.

**DOSIFICACIÓN (3).**- Los diversos materiales tratados son mezclados en proporciones convenientes y son enviados a un depósito de gran capacidad que sirve de reserva y que alimenta directamente a el horno.

**ALMACENAMIENTO (4).**- La pasta triturada se envía a los depósitos de almacenamiento en donde su homogeneidad es mantenida mecánicamente merced a un agitador sobre el cual se han fijado canalizaciones de aire comprimido. Las burbujas de aire que se fugan del fondo de la cubeta crean un movimiento ascendente que se opone a la sedimentación de partículas de la pasta.

La pasta así preparada o pasta cruda, contiene en proporción.

$$\frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de la pasta}} \text{ aproximadamente de } 0.40$$

siendo su densidad aproximadamente de 1.6.

Debe intentarse hacer una disminución de la cantidad de agua contenida en la pasta conservando en esta última una fluidez igual. Esto se consigue recurriendo a la ayuda de coadyuvantes, tales como el carbonato o el metafosfato de sosa, los extractos





tánicos o las lejías sulfúricas utilizadas en dosis próximas del 1% (en relación del peso de la materia seca).

**COCCIÓN (5).**- La pasta cruda es introducida en un horno rotatorio. Este horno está constituido de un tubo largo de acero que está dotado de un material refractario y tiene una longitud que puede llegar a alcanzar los 160 metros estando su diámetro comprendido entre los 3 y 4 metros. Este tubo sostenido de trecho en trecho por rodillos está ligeramente inclinado con una pendiente de 5% y gira alrededor de su propio eje a una velocidad aproximada de una vuelta por minuto.

La pasta penetra por la parte alta del horno. Se desplaza hacia la parte baja del horno llegando a sufrir transformaciones sucesivas que conducen al acabado del producto al que se le llama clinker.

Es en esta etapa cuando la pasta sufre:

- un secado en una zona de cambio constituida generalmente por cadenas que guamecen el horno en una quinta parte de su longitud. Al contacto de gases calientes que provienen de la parte baja, la pasta pierde en este sector las tres cuartas partes de agua que contiene. Los gránulos que salen de esta zona de cadenas llegan a contener todavía la suficiente agua para no desmenuzarse ni romperse, y, por consiguiente, una producción anormal de polvo. En el secado se consumen un gran número de calorías (cerca del 50% de las calorías necesarias para la cocción del clinker, es decir, cerca de 700 calorías por kilogramo de clinker).
1. Una descomposición de las materias arcillosas.
  2. Una decarbonatación aproximada de 900 grados.
- Una cocción a 1450 grados. Esta cocción es obtenida mediante una larga llama que viene de la parte baja del horno y paralelamente al eje del mismo. Esta llama puede ser alimentada por carbón pulverizado, pero también por fuel o, por gas natural. Es en la zona de clinkerización donde se forman por fusión parcial los diversos silicatos y aluminatos que constituyen el cemento.

**ENFRIAMIENTO (6).**- El clinker sale del horno a una temperatura aproximada a los 1000 grados, y debe ser enfriado. Este enfriamiento puede efectuarse en cilindros rotatorios o sobre rejillas apropiadas (fuller). Generalmente se busca rescatar una parte de las calorías perdidas por el clinker para llegar a utilizarlas en diversos empleos, tales como el secado del carbón, calentamiento de aire secundario, etc.

**TRITURACIÓN (7).**- El clinker es conservado, en la medida de lo posible, durante 10 o 15 días en silos, esto con el fin de lograr que la pequeña cantidad de óxido carbónico libre que contiene frecuentemente pueda hidratarse libremente y no corra el riesgo de provocar posteriores accidentes (destrucción de obras por expansión). El clinker adicionado con yeso (este es un regulador para el fraguado) es reducido enseguida a polvo con la colaboración de trituradores. Los trituradores utilizados son, molinos de bolas; y están compuestos por un tubo cilíndrico (llega a alcanzar una longitud de 9 a 12 metros por un diámetro de 2 a 3 metros) el cual está dividido frecuentemente en compartimientos, revestidos interiormente por un blindaje protector y equipado por





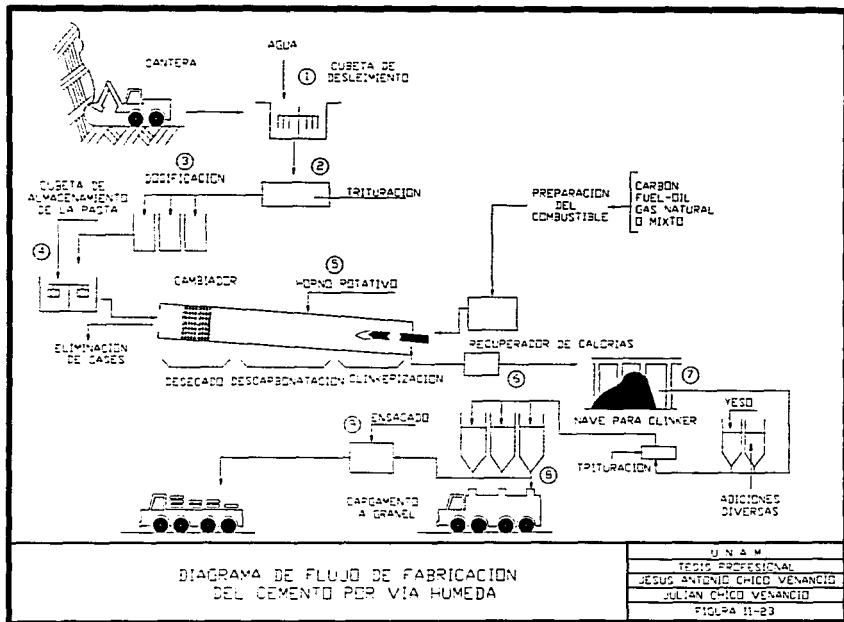
cuerpos triturantes de acero, de tamaño y forma variable. Los clinkers y escorias son materiales bastante duros y su trituración en la fabricación del cemento origina un gran consumo de energía: se cuenta con una media de 30 kw/hr. por tonelada de clinker molido. La potencia del motor de alimentación de un tubo triturador puede llegar a alcanzar de 800 a 1000 Kw.

**ACONDICIONAMIENTO DEL CEMENTO (8).**- El cemento que sale del triturador es conservado en silos con el fin de que el yeso formado por la deshidratación del yeso en el momento de su paso por el triturador, pueda rehidratarse bajo la influencia del aire atmosférico (lo cual permite evitar el falso fraguado siguiente del cemento). A menudo se fluidifica el cemento con el fin de hacerlo transportable por medio de bombas. Entonces se le envasa mediante máquinas automáticas en sacos de papel, o bien se transvasa directamente del silo a las sistemas montadas sobre vagones o camiones.

**CONTROL DE FABRICACIÓN (9).**- La mezcla en bruto se controla periódicamente tanto desde el punto de vista de sus características físicas como químicas: finura, densidad, fluidez de la pasta (en el caso de vía húmeda), contenido de carbonato cálcico, módulo sílico. Enseguida se presenta el examen del carbón (contenido en materias volátiles y cenizas), del clinker salido del horno (análisis químico, búsqueda de cal libre, examen microscópico), del cemento (finura, ensayos de resistencia a la tracción y a la compresión, medida de la contracción del inflamamiento, etc.).

A continuación se presenta el diagrama de flujo del proceso de fabricación del cemento por la vía húmeda Fig. II-23.







## IMPACTO ECOLÓGICO DE UNA PLANTA DE CEMENTO Y SU SOLUCIÓN.

En la actualidad, la elaboración de cemento es realizada mediante un proceso que se llega a considerar como "ecológicamente benigno" debido a la naturaleza de sus materias primas que son empleadas y de acuerdo a las características de los productos intermedios y finales.

En una fábrica de cemento no se generan desechos o residuos industriales, por el contrario, el proceso es capaz de absorber sin ningún problema cantidades importantes de elementos indeseables, continuamente asociados a los combustibles convencionales o alternos. Los materiales captados en los filtros de gases, se recuperan y son reciclados totalmente al mismo sistema de producción.

La explotación de materias primas se hacen normalmente de canteras y bancos a cielo abierto, alterando si acaso el contorno topográfico pero sin llegar a causar algún daño a el equilibrio ecológico en una forma lamentable.

Las oquedades dejadas después de la explotación de los materiales pueden integrarse fácilmente a sus condiciones de flora y fauna naturales pudiéndose, en última instancia, transformar en estanques o sitios para confinamientos controlados de diversos desechos ayudando así a resolver otro tipo de problemas ecológicos.

El manejo, trituración, molienda, homogeneización y almacenamiento de las materias primas son operaciones en las que se pueden generar emisiones de partículas sólidas a la atmósfera; los hornos de los gases rotatorios también arrastran partículas de los materiales en proceso. No obstante, cabe hacer la observación que este tipo de partículas corresponde a materiales naturales inertes, que no son tóxicos ni causan daño a la salud.

En lo que respecta a el control de las emisiones de polvo, en todas las fases del proceso de manufactura, son utilizados diversos procedimientos y equipos para la separación y captación de las partículas sólidas, la industria del cemento utiliza diversos tipos de equipos colectores.

Los de tipo mecánico, comprenden los ciclones centrífugos y, en escala menor las cámaras de sedimentación; además, se tienen los filtros de mangas o de filtrado por tejidos, los de capas de gravilla y, finalmente, los filtros electrostáticos. Para poder responder a las normas relativas a emisiones no es remoto combinar distintos tipos de colectores según la concentración, el tamaño y la temperatura de las partículas emitidas. Ya no se usan en esta industria aquellos dispositivos que emplean agua como elemento activo en la separación de las partículas, en virtud de las complicaciones derivadas del manejo de los lodos resultantes.

Los colectores se valoran según su rendimiento. Este se define como la relación, expresada, en porcentaje, de las partículas recogidas por el filtro a la recibida por este, por lo tanto, si en un colector se capturan 99 gramos de material de 100 gramos que entran, el rendimiento o eficiencia del mismo es de 99%. Hoy en día los equipos de captación de polvo se han perfeccionado al grado de lograrse un grado de eficiencia superior al 99.5% en las instalaciones modernas.





La pequeña porción de partículas sólidas que escapan a los sistemas de control de polvo constituye, prácticamente, la única fuente de emisiones que afecta al medio ambiente. Es en este renglón, en donde se centra la mayor parte de la preocupación y del esfuerzo que realiza la industria del cemento para abatir la contaminación.

Los gases que se generan de los procesos de secado y calcinación están formados primordialmente por bióxido de carbono y vapor de agua, aunque también se producen pequeñas cantidades de óxidos de azufre y nitrógeno. No hay ninguna emisión de monóxido de carbono aunque sabemos que se podría producir dentro del proceso, no saldría a la atmósfera ya que siempre es crítico el mantener cierto exceso de oxígeno en la combustión tanto por razones de eficiencia como de seguridad del equipo.

De los efluentes que se mencionaron anteriormente, el bióxido de carbono y el vapor de agua no son contaminantes y los gases de azufre y de nitrógeno son neutralizados y prácticamente absorbidos en forma total por el producto en el proceso ya que son retenidos en el material al combinarse con caliza para producir sulfatos inertes.

Por otra parte, actualmente se estudia la posibilidad de quemar en los hornos de cemento algunos residuos industriales con poder calorífico tales como llantas, o aceites usados, con la intención de obtener un doble efecto benéfico para el medio ambiente, esto es, la eliminación del desecho y la conservación del energético fósil que sustituye.

De la mano con esta prevención y protección ecológica, va la preocupación de la industria cementera por mantener bajos índices en la gravedad y frecuencia de los accidentes en sus instalaciones motivando y apoyando la creación de comisiones mixtas de Higiene y Seguridad Industrial y proporcionando el equipo adecuado y suficiente de seguridad a todo el personal.

Se tiene una colaboración estrecha con las Instituciones oficiales correspondientes, para la evaluación, control y supervisión de todo lo relacionado con el cumplimiento de las reglamentaciones vigentes.



**TEMA III**  
**BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA.**

**OBJETIVO:**

**EJERCITAR AL ESTUDIANTE EN EL CÁLCULO DE BALANCES  
SIMPLES DE MATERIA Y ENERGÍA.**



### III.1 OPERACIONES UNITARIAS.

En las industrias de procesos químicos y físicos, así como en las de procesos biológicos y de alimentos, existen muchas semejanzas en cuanto a la forma en que los materiales de entrada o de alimentación son modificados o procesados para llegar a obtener los materiales finales de productos químicos o biológicos. Se puede llegar a considerar estos procesos químicos, físicos o biológicos, supuestamente diferentes, y clasificarlos en una serie de etapas individuales y distintas a las que se les denomina operaciones unitarias. Estas operaciones unitarias se describen de manera cualitativa y cuantitativa. La descripción cualitativa se puede hacer haciendo uso de modelos matemáticos, aplicando los principios y leyes que los rigen; la descripción cuantitativa necesita, por un lado, de la demarcación del sistema, la identificación de sus corrientes y de sus componentes, y por otro de la caracterización del equipo en el que se realiza el proceso y la medición de la relación de las diferentes variables.

En sí las operaciones unitarias estudian primordialmente la transferencia y los cambios de energía, transferencias y cambios de materiales que se llevan a cabo por medios físicos, pero también por medios fisicoquímicos.

Los cambios físicos y químicos que se realizan en las operaciones y los procesos unitarios requieren de un análisis, una medición y un control, es por eso que se aplican a estas operaciones unitarias dos principios esenciales de conservación de la física y la química que son:

1. Conservación de la masa (procesos no nucleares).
2. Conservación de la energía, (como ejemplo la 1a. Ley de la termodinámica); los cuales son conocidos como balances de materia y energía.

Estos balances incluyen las cantidades de materiales y energía que entran y salen de cada etapa de un proceso y se elaboran con base en los rendimientos, de productos intermedios y finales, y en los consumos de servicios y de energía previstos, de acuerdo con la experiencia de los proveedores de la tecnología y las investigaciones de tipo experimental realizadas en apoyo del proyecto que se realice.

Además los balances permiten determinar las capacidades de cada una de las unidades industriales y los requerimientos de servicio de las mismas. Asimismo, permiten conocer los volúmenes de subproductos y desechos que deben esperarse de la operación de la planta.

Para llegar a la información señalada, primeramente se elaboran balances unitarios de cada operación. Después los resultados obtenidos se integran en balances de proceso, en su conjunto, mismos que señalan los insumos necesarios para procesar una tonelada de materia o para obtener una tonelada de producto. Finalmente, los datos unitarios se multiplican por las capacidades de producción para obtener una serie de balances globales que permiten determinar los tamaños y las especificaciones de los equipos y los requerimientos de servicios.

Una vez señalada la relación existente de los balances de materia y energía con la operaciones unitarias presentaremos algunos ejemplos de estas operaciones. Para comenzar la primera operación unitaria llamada destilación consiste en la separación







de los componentes de una mezcla líquida por medio de una ebullición basada en las diferencias de presión de vapor. Algunos de sus usos son para separar alcohol en la industria de las bebidas y también para separar los hidrocarburos en la industria del petróleo.

El secado es la separación de líquidos volátiles, generalmente agua, de los materiales sólidos. El secado de granos y otros alimentos es similar al secado de maderas, precipitados filtrados y estopa de rayón.

La evaporación es un caso especial de transferencia de calor, que estudia la evaporación de un disolvente volátil (el caso del agua), de un soluto no volátil como la sal o cualquier otro tipo de material en solución. La evaporación de soluciones salinas en la industria química es similar a la evaporación de soluciones de azúcar en la industria alimenticia.

Enseguida hablaremos de las leyes de conservación de masa y energía para sistemas abiertos y comenzaremos a entrar en forma más amplia en los balances de materia energía.

### III.2 LEY DE LA CONSERVACIÓN DE LA MASA.

Existen ciertas restricciones que la naturaleza impone, estas deben de tomarse en cuenta a la hora de diseñar un nuevo proceso o durante el análisis de uno ya existente. Pongamos el ejemplo de un reactor que tiene una entrada de 100 gramos de plomo, en su salida no puede tener 200 gramos, otro caso, si el carbón que se quema diariamente en la caldera de una planta eléctrica contiene 1500 lb. de azufre, no es necesario hacer un análisis de las cenizas y gases de chimenea para saber que 1500 libras de azufre abandonan diariamente la caldera de una forma u otra.

El punto de partida para estas dos observaciones radica en la ley de la conservación de la masa, esta ley establece que la masa no puede crearse ni tampoco destruirse (esta ley no incluye las reacciones nucleares para las cuales no se cumple).

Aseveraciones que se basan en la ley de conservación de masa tales como "masa total a la entrada" = "masa total a la salida" constituyen ejemplos de balances de masa. El diseño de un nuevo proceso o el análisis de uno ya existente no esta completo hasta que queda establecido que las entradas y las salidas de todo el proceso y de cada unidad individual satisfacen ecuaciones de balance aplicadas a cada uno de los materiales que intervienen en el proceso.

Antes de hacer la formalicen de un balance de masa sobre un sistema de proceso, debe de conocerse en que categoría esta clasificado el proceso a estudiar. Debido a lo anterior se presenta la clasificación de procesos.

#### CLASIFICACIÓN DE PROCESOS.

Los procesos químicos pueden clasificarse de la manera siguiente:





- **Proceso Continuo:** Las entradas y salidas fluyen en forma continua durante toda la duración del proceso.
- **Proceso Intermitente:** Es cargada la alimentación a un sistema al iniciarse el proceso, eliminándose los productos de una sola vez algún tiempo después. La masa no cruza los límites del sistema entre el momento de alimentación y el momento del vaciado del producto.
- **Proceso Semi-Intermitente:** Las entradas son casi instantáneas, mientras que las salidas son continuas, o viceversa.

Un ejemplo de proceso continuo es el bombeo de una mezcla de líquidos con un flujo constante a una torre de destilación, y eliminación uniforme de corrientes de líquido y vapor desde los extremos superior e inferior de la torre.

La agregación rápida de reactivos a un tanque, y eliminación de productos y reactivos no consumidos algún tiempo después, cuando el sistema ha alcanzado el equilibrio. Constituye un ejemplo de proceso intermitente.

Por último un ejemplo de proceso semi-intermitente es el permitir que el contenido de un recipiente que contiene gas a alta tensión, escape a la atmósfera; mezclar lentamente varios líquidos dentro de un tanque del cual nada se está extrayendo.

Si los valores de todas las variables de un proceso (o sea, todas las temperaturas, presiones, volúmenes, flujos, etc.) no sufren alteraciones a lo largo del tiempo, a excepción de posibles pequeñas fluctuaciones alrededor de valores medios constantes, se dice que el proceso está operando a **régimen permanente**. Si alguna de las variables del proceso cambia su valor con el tiempo, se dice que existe una operación transiente o en **régimen transitorio**. Debido a su propia naturaleza, los procesos intermitentes o semi intermitentes son operaciones en régimen transitorio, mientras que los procesos continuos pueden ser ya de régimen transitorio o permanente.

Los procesos intermitentes se utilizan frecuentemente cuando deben de producirse cantidades relativamente pequeñas de un producto en una sola ocasión, mientras que el procesamiento continuo se ajusta mejor para grandes ritmos de producción. Los procesos continuos generalmente son llevados a cabo en condiciones lo más cercanas posible al estado permanente, las condiciones de régimen transitorio se producen durante las etapas de puesta en marcha y en los sucesivos cambios (sean intencionales o no) de las condiciones de operación del proceso.

### III.3 BALANCES

Existen dos tipos de balances que se presentan a continuación:

1. **BALANCES DIFERENCIALES**, o balances que indican que sucede en un sistema en un momento dado. Cada término de la ecuación de balance nos da como resultado una velocidad (velocidad de entrada, velocidad de generación, etc.) y posee unidades de la cantidad sobre la cual se efectúa el balance, dividida está por la unidad de tiempo (personas/año, g SO<sub>2</sub>/s, barriles/día). Este es el modelo de balance que se aplica a menudo a un proceso continuo.



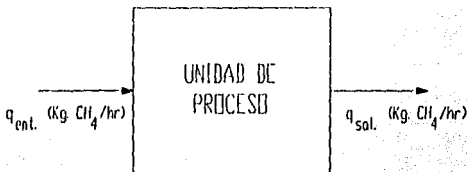


2. **BALANCES INTEGRALES**, o balances que especifican que ocurre entre dos instantes. Cada término de la ecuación resulta entonces una cantidad de la substancia medida, y posee las unidades correspondientes (personas, g  $\text{SO}_2$ , barriles). Este modelo de balance suele acomodarse a un proceso intermitente; los dos instantes son el momento después de llevarse a cabo la entrada y el momento anterior a la salida del producto.

En este estudio nos preocuparemos esencialmente por los balances diferenciales a sistemas continuos en régimen permanente.

#### ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MASA.

Para tener una mejor comprensión de como se formula esta ecuación veamos el ejemplo siguiente en el que suponemos que el metano es un componente tanto en la corriente de alimentación como de salida de una unidad de proceso continua, y que en una forma de comprobación para determinar si la unidad está trabajando tal como se pensó al diseñarla, se miden los flujos máscicos en ambas corrientes encontrándose que no son las mismas.



Existen sólo cuatro explicaciones posibles para justificar la diferencia observada entre los flujos medidos.

1. La unidad pierde metano por alguna otra parte.
2. Se está consumiendo metano como reactivo, o se está generando como producto dentro de la unidad.
3. Se está acumulando metano dentro de la unidad (probablemente al absorberse sobre las paredes).
4. Las mediciones contienen errores.

Si la mediciones son correctas y no existen fugas, las otras posibilidades (generación o consumo en una reacción, y acumulación dentro de la unidad de proceso) son las únicas explicaciones que argumentan la diferencia entre los flujos de entrada y salida.

Podemos expresar el balance (o inventario) de un material en un sistema (una única unidad de proceso, varias unidades, o un proceso entero) en la siguiente forma general:

$$\text{ENTRADA} + \text{GENERACIÓN} - \text{SALIDA} - \text{CONSUMO} = \text{ACUMULACIÓN}$$

(Entra a                      (Producido                      (Sale a                      (Consumido                      (Acumulación





través de los límites del sistema)	dentro del sistema)	través de los límites del sistema)	dentro del sistema)	dentro del sistema)
--	------------------------	--	------------------------	------------------------

Esta ecuación general de balance se puede formular para cualquier material que entra o abandona cualquier sistema de proceso; puede aplicarse a la masa total del contenido del sistema o a cualquier especie atómica o molecular implicada en el proceso. A continuación se presenta un ejemplo tomando como base a esta ecuación.

**EJEMPLO**

Cada año, llegan 50 000 personas a una ciudad, mientras que la abandonan 75 000; nacen 22 000 y mueren 19 000. Formular un balance de la población de dicha ciudad. SOLUCIÓN:

Tomaremos la letra P como la unidad de personas.

Entrada + Generación - Salida - Consumo = Acumulación

$$50\,000 \frac{P}{\text{año}} + 22\,000 \frac{P}{\text{año}} - 75\,000 \frac{P}{\text{año}} - 19\,000 \frac{P}{\text{año}} = A \frac{P}{\text{año}}$$

$$A = -22\,000 P/\text{año}$$

(La solución nos dice que cada año la población de la ciudad disminuye en 22 000 personas).

Es importante hacer notar que los términos de generación y consumo de una ecuación de balance resultan nulos si la cantidad sobre la cual se efectúa el balance no es un reactivo ni un producto de la reacción. Estos términos siempre son nulos si la cantidad sometida a balance es la masa total, ya que la masa no puede crearse ni destruirse (ignorando las reacciones nucleares).

**BALANCES SOBRE PROCESOS CONTINUOS EN RÉGIMEN PERMANENTE.**

Hagamos la suposición que aparece hidrógeno como componente en las corrientes de entrada y salida de un proceso continuo en régimen permanente. El término de acumulación en un balance sobre el hidrógeno debe ser nulo; de no ser así, la cantidad de hidrógeno en el sistema de proceso cambiaría necesariamente con el tiempo, debido a esto el proceso no se encontraría en régimen permanente. Puede aplicarse el mismo argumento para cada una de las sustancias involucradas en el proceso, de modo que para procesos continuos en régimen permanente, la ecuación general de balance, se simplifica y queda como sigue:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} = \text{Salida} + \text{Consumo}$$

**EJEMPLO.**

Se separan por destilación en dos fracciones, mil kilogramos por hora de una mezcla de benceno y tolueno que contiene 50% de benceno en masa. El flujo másico de benceno en la corriente superior es de 450 kg. de B/hr., y la de tolueno en la corriente

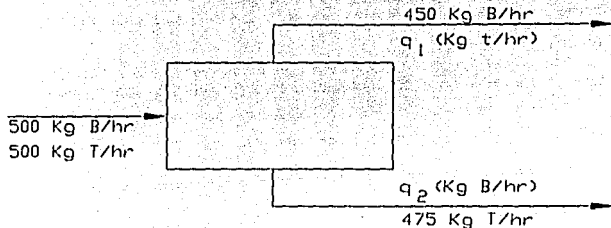




inferior es de 475 kg. de T/hr. La operación se lleva a cabo en régimen permanente. Formular balances para el benceno y el tolueno a fin de calcular los flujos desconocidos de los componentes en las corrientes de salida.

SOLUCIÓN:

El proceso puede representarse esquemáticamente tal como se muestra a continuación:



Debido a que el proceso se encuentra en régimen permanente, no puede haber acumulación de ninguna sustancia dentro del sistema, de manera que el término de acumulación es nulo en todos los balances de masa. Además, en virtud de que no se producen reacciones químicas, no puede haber términos de generación y consumo distintos de cero. Para todos los balances, la ec. general de balance adopta la forma de entrada = salida.

Balance del benceno:

$$500 \text{ kg. B/hr} = q_2 + 450 \text{ Kg B/hr}$$
$$q_2 = 500 \text{ kg. B/hr} - 450 \text{ Kg B/hr}$$

$$q_2 = 50 \text{ kg. B/hr.}$$

Balance del tolueno:

$$500 \text{ kg. T/hr.} = q_1 + 475 \text{ kg. T/hr.}$$
$$q_1 = 500 \text{ kg. T/hr.} - 475 \text{ kg. T/hr.}$$

$$q_1 = 25 \text{ kg. T/hr.}$$

Comprobación del cálculo:

$$\text{Balance total de masa: } 1000 \text{ kg./hr.} = 450 \text{ kg./hr} + q_1 + q_2 + 475 \text{ kg./hr}$$

$$1000 \text{ kg./hr.} \approx 450 \text{ kg./hr} + 25 \text{ kg./hr} + 50 \text{ kg./hr} + 475 \text{ kg./hr}$$





### III.4 CÁLCULOS PARA LOS BALANCES DE MASA.

Todos los problemas de balances de masa son modificaciones a un mismo tema: dados valores de algunas variables de corrientes de entrada y salida, calcular los valores de las demás. La resolución de estos problemas necesita la formalicen y solución de ecuaciones, para variables desconocidas de las corrientes; la resolución de estas ecuaciones suele ser una cuestión de álgebra elemental, pero la formalicen de las mismas a partir de la especificación de un proceso y una serie de datos de proceso puede llegar a presentar serias dificultades. Puede no resultar del todo obvio, a partir del enunciado del problema, que es lo que se conoce y que se requiere conocer.

Explicaremos un procedimiento para disminuir la descripción de un proceso a una serie de ecuaciones que puedan resolverse para variables de proceso desconocidas. Este tipo de enfoque no es la única forma de atacar los problemas de balance de masa, pero resulta muy efectivo y da buen resultado a fin de reducir a un mínimo el tiempo gastado.

#### DIAGRAMAS DE FLUJO.

Cuando se recibe una descripción de un proceso, se debe determinar alguna variable del proceso, resulta fundamental la organización de la información obtenida de una forma conveniente para los cálculos subsiguientes. La mejor manera de hacer esto es mediante la realización de un diagrama de flujo del proceso, en el que se utilizan rectángulos u otros símbolos para la representación de las unidades de proceso (mezcladores, reactores, unidades de separación, etc.), y flechas para simbolizar entradas y salidas.

A continuación se incluyen algunas sugerencias para la rotulación de un diagrama de flujo, a fin de obtener los máximos beneficios del mismo durante los cálculos de balance de materia.

1. Escribir los valores y unidades de todas las variables de las corrientes en los sitios que corresponden a las corrientes del diagrama. Por ejemplo, una corriente que contiene 21 mol % de  $O_2$  y 79% de  $N_2$  a  $320^\circ C$  y 1.4 atm, que fluye con un flujo de 400 g-moles/hr.. Puede rotularse de la siguiente forma:

$$\begin{array}{r}
 400 \text{ moles/h} \\
 \hline
 0.21 \text{ mol } O_2 / \text{mol} \\
 0.79 \text{ mol } N_2 / \text{mol} \\
 T = 320^\circ C, P = 1.4 \text{ atm.}
 \end{array}$$

2. Asignar símbolos algebraicos a las variables desconocidas de las corrientes y escribir los nombres de estas variables y sus unidades asociadas sobre el diagrama. Por ejemplo si no se conoce el flujo de la corriente descrita en la etapa anterior, puede rotularse el problema como:





$$\begin{array}{c} Q \text{ (moles/h)} \\ \hline 0.21 \text{ mol } O_2/\text{mol} \\ 0.79 \text{ mol } N_2/\text{mol} \\ T = 320^\circ\text{C}, P = 1.4 \text{ atm.} \end{array}$$

mientras que si el flujo fuera conocido y las incógnitas fueran las fracciones molares, la corriente se rotularía:

$$\begin{array}{c} 400 \text{ moles/h} \\ \hline X \text{ (mol } O_2/\text{mol)} \\ 1-X \text{ (mol } N_2/\text{mol)} \\ T = 320^\circ\text{C}, P = 1.4 \text{ atm.} \end{array}$$

Finalmente, habrá que formular y resolver una ecuación para cada incógnita que aparece en el diagrama, de allí que resulte favorable mantener en un mínimo el número de incógnitas rotuladas. Al rotular, por ejemplo, la composición másica molar de una corriente, será adecuado asignar nombres de variables a todas las fracciones menos una, ya que la última será igual a 1 menos la suma de las fracciones de las otras variables.

#### EJEMPLO.

**DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE HUMIDIFICACIÓN Y OXIGENACIÓN DE AIRE.**- Un experimento acerca de la velocidad de crecimiento de ciertos organismos requiere del establecimiento de un ambiente de aire húmedo enriquecido en oxígeno. Se alimentan tres corrientes a una cámara de evaporación, a fin de producir una corriente de salida con la composición deseada.

A. Agua líquida, alimentada con un flujo de 20 cm<sup>3</sup>/min.

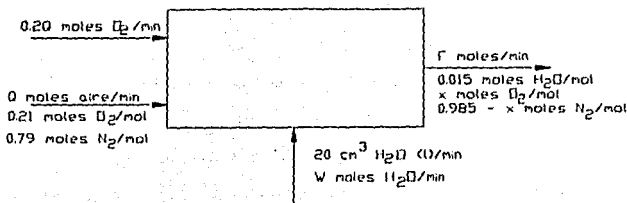
B. Aire (21 mol% de O<sub>2</sub>, el resto de N<sub>2</sub>).

C. Oxígeno puro, con un flujo molar equivalente a una quinta parte del flujo molar de la corriente B.

Se analiza el gas de salida y se encuentra que contiene 1.5 mol % de agua. Trazar y rotular el diagrama de flujo de este proceso, y calcular todas las variables desconocidas de las corrientes.

**SOLUCIÓN:**





Notas acerca de la rotulación:

1. Dado que el único flujo conocido ( $20 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O}/\text{min.}$ ) se tiene en una base de minutos, resulta conveniente rotular a todos los flujos de las corrientes en esta misma base.
2. Una vez elegido el nombre de la variable  $Q$  para el flujo de aire, la información conocida acerca de los flujos de aire y  $\text{O}_2$  puede utilizarse para rotular en flujo de  $\text{O}_2$  como  $0.2Q$ .
3. Las fracciones molares de los componentes de cualquier corriente deben de sumar la unidad. Dado que se conoce la fracción molar de  $\text{H}_2\text{O}$  en la corriente de salida, la cual es igual a  $0.015$ , una vez rotulada la fracción molar de  $\text{O}_2$  como  $x$ , la correspondiente a  $\text{N}_2$  deberá ser  $1 - (x + 0.015) = (0.985 - x) \text{ mol N}_2/\text{mol}$ .

La cantidad  $W$  puede calcularse a partir del flujo volumétrico dado y la densidad del agua líquida:

$$W = \frac{20 \text{ cm}^3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{min.}} \cdot \frac{1 \text{ g H}_2\text{O}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{18.02 \text{ g}} \Rightarrow \boxed{W = 1.111 \text{ moles H}_2\text{O}/\text{min.}}$$

Las tres incógnitas restantes ( $Q$ ,  $F$  y  $x$ ) se pueden determinar a partir de balances, todos los cuales tienen la forma sencilla entrada = salida, para este proceso sin reacción química en régimen permanente. Los balances se formulan fácilmente si se hace referencia al diagrama de flujo.

Balance para el agua:

$$W \text{ (moles H}_2\text{O}/\text{min.)} = F \cdot \frac{\text{moles}}{\text{min.}} \quad \left| \quad \frac{0.015 \text{ mol H}_2\text{O}}{\text{mol}} \right.$$

$$\boxed{F = 74.07 \text{ moles}/\text{min.}}$$

Balance molar total:

$$(0.2Q + Q + W) \text{ moles}/\text{min.} = F \text{ moles}/\text{min.} \quad W = 1.111, \quad F = 74.07$$

$$\boxed{Q = 60.80 \text{ moles}/\text{min.}}$$

Balance para el  $\text{N}_2$ :







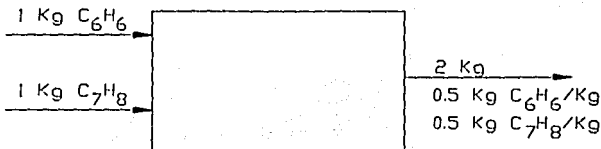
$$\frac{Q \text{ moles}}{\text{min.}} \quad | \quad \frac{0.79 \text{ mol N}_2}{\text{mol}} \quad = \quad \frac{F \text{ moles}}{\text{min.}} \quad | \quad \frac{(0.985 - x) \text{ mol N}_2}{\text{mol}}$$

$$0.79Q = F(0.985 - x) \quad Q = 60.80, \quad F = 74.07$$

$$x = 0.3365 \text{ mol O}_2/\text{mol}$$

#### ESCALAMIENTO DEL DIAGRAMA DE FLUJO Y BASE DE CALCULO.

Si se mezcla un kilogramo de benceno con un kilogramo de tolueno. El producto de este sencillo proceso resulta, ciertamente, igual a dos kilogramos de una mezcla que resulta estar compuesta en un 50% en masa por benceno:

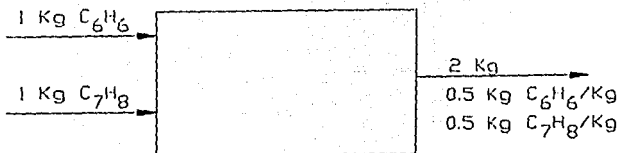


Se dice que el proceso explicado por este diagrama se encuentra balanceado ya que se satisfacen los balances de materia para ambos componentes (1 kg. de entrada = (2 x 0.5) kg. de salida en ambos casos).

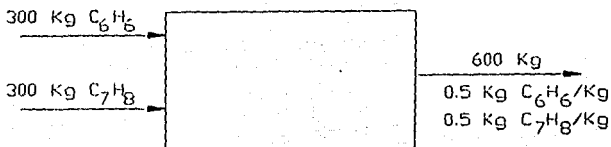
Obsérvese ahora que las masas (pero no las fracciones másicas) de todas las corrientes podrían multiplicarse por un factor común y el proceso seguiría permaneciendo balanceado; más aún, las masas de corrientes podrían transformarse a flujos másicos, y las unidades de masa de todas las variables de las corrientes (incluyendo las fracciones másicas) podrían variar de kg. a gr. o a lbm o a cualquier otra unidad de masa, y el proceso no se alteraría y permanecería balanceado.

El procedimiento para cambiar los valores de todas las cantidades de las corrientes o flujos en una cantidad proporcional, mientras que se dejan los mismos valores de las composiciones de las corrientes, se conoce bajo el nombre de **variación de escala del diagrama de flujo**. El aumento de escala ocurre si las cantidades finales de las corrientes son mayores que las originales, y la disminución de escala si resultan menores que las originales.

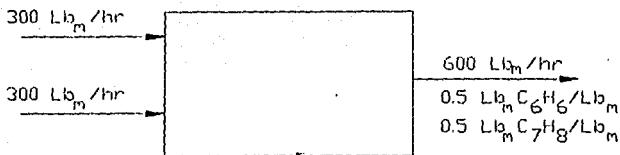




↓ x 300



↓ kg. → kg/hr  
reemplazar kg. por lbm

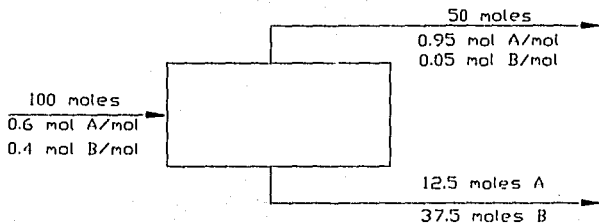


Suponiendo que hemos logrado balancear un proceso, y que la cantidad o flujo de una de las corrientes de proceso es  $n_1$ . Es factible escalar el diagrama de flujo a fin de hacer que la cantidad o flujo de esta corriente sea igual a  $n_2$ , multiplicando todas las cantidades o flujos por el cociente  $n_2/n_1$ . No es posible, sin embargo, escalar masas o flujos máscicos a cantidades o flujos molares o viceversa, mediante una simple multiplicación.

#### EJEMPLO.

AUMENTO DE ESCALA DE UN DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE SEPARACIÓN.- Una mezcla 60-40 (en moles) de A y B se separan en dos fracciones. A continuación se muestra un diagrama de flujo del proceso.





Se desea lograr la misma separación con una alimentación continua de 1250 lb-moles/hr. Aumentar correspondientemente la escala del diagrama de flujo.

SOLUCIÓN:

El factor de escala es:

$$\frac{1250 \text{ lb. moles/hr}}{100 \text{ moles}} = 12.5 \frac{\text{lb-moles/hr}}{\text{mol}}$$

Las masas de todas las corrientes se convierten en flujos de la forma siguiente:

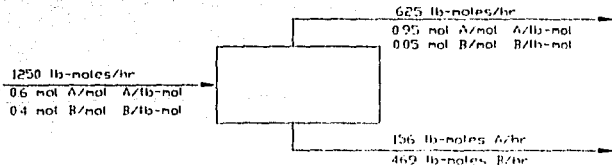
$$\text{Alimentación: } \frac{100 \text{ moles}}{\text{mol}} \times \frac{12.5 \text{ lb-moles/hr}}{\text{mol}} = 1250 \frac{\text{lb-moles}}{\text{hr.}}$$

Corriente superior de producto:  $(50)(12.5) = 625 \text{ lb-moles/h}$

Corriente inferior del producto:  $(12.5)(12.5) = 156 \text{ lb-moles A/h}$

$(37.5)(12.5) = 469 \text{ lb-moles B/h}$

Las unidades de las fracciones molares en la corriente superior de producto se pueden modificar de moles/mol a lb-moles/lb-mol, pero sus valores siguen iguales. El diagrama de flujo para el proceso una vez aumentada su escala adopta la siguiente forma:



Dado que un proceso balanceado siempre puede sufrir un cambio de escala, los cálculos de balance de masa pueden efectuarse sobre la base de cualquier serie conveniente de cantidades de corrientes o de flujos, pudiéndose luego modificar la



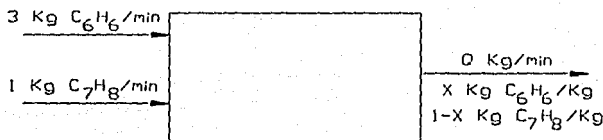


escala de los resultados en la forma que resulte más favorable. El primer paso en el balance de un proceso consiste en la selección de una cantidad (masa o moles) o de un flujo másico o molar de una corriente, o del componente de una corriente, como base de cálculo; todas las variables desconocidas se determinan entonces a fin de que resulten consistentes con esta base.

Si en el enunciado de un problema se da la cantidad de una corriente o un flujo, suele resultar conveniente el empleo de esta cantidad como base para el cálculo; todas las cantidades calculadas subsecuentemente quedan en forma automática ajustadas a la escala de valores correctos para el proceso. Si no son conocidos los flujos o cantidades de las corrientes, deberá suponerse uno. En tal caso, es adecuada la elección de una cantidad de corriente o flujo de una composición conocida; si se conocen fracciones másicas, elegir una masa total como base, y si se conocen fracciones molares, elegir un número total de moles.

#### BALANCE DE UN PROCESO.

Supongamos que se mezclan 3 kg/min. de benceno con 1 kg/min. de tolueno. El diagrama de flujo podría esquematizarse como sigue:



Existen dos cantidades que no se conocen (Q y x) asociadas con el proceso, por lo cual se requerirán dos ecuaciones para su cálculo.

Las ecuaciones de balance de materia para este proceso sin reacción química tienen todas la forma entrada = salida. Pueden formularse tres balances distintos (sobre la masa total, sobre el benceno y sobre el tolueno) cualesquiera dos de las cuales proveen las ecuaciones suficientes para la determinación de Q y x. Por ejemplo,

Balance másico total:  $3 \text{ kg/min.} + 1 \text{ Kg/min.} = Q$

$$Q = 4 \text{ kg/min.}$$

Balance sobre el benceno:  $3 \text{ Kg. C}_6\text{H}_6/\text{min.}$

$$\frac{= Q \text{ kg.}}{\text{min.}} \quad \left| \quad \frac{x \text{ kg. C}_6\text{H}_6}{\text{kg.}} \right. = \boxed{x = 0.75 \text{ kg. C}_6\text{H}_6/\text{kg}}$$

Una pregunta lógica que habría que establecer a esta altura consiste en que tan lejos pueda uno llegar con este procedimiento. Si se hubiera desconocido también uno de





los flujos de alimentación, por ejemplo, ¿Podría haberse formulado otro balance (para el tolueno) a fin de resolver el problema? Otros puntos que merecen atención se refieren a que balances deben elegirse cuando hay posibilidad de elección, así como el orden en que deberían efectuarse estos balances.

Las respuestas a estas preguntas no resultan evidentes cuando se producen reacciones químicas en el seno del proceso. Para procesos sin reacción química se aplican las siguientes reglas:

**1. El número máximo de ecuaciones linealmente independientes que pueden formularse a través de balances en un sistema sin reacción química equivale al número de especies químicas en las corrientes de entrada y salida.**

En el ejemplo anterior, dos sustancias (el benceno y el tolueno) forman las corrientes de entrada y salida del proceso; es posible formular balances de masa o moles para el benceno y tolueno y un balance másico o molar total, pero solo dos de estas tres ecuaciones resultan independientes, la formulación de la tercera no tiene ningún objeto. (Si se formularan las tres ecuaciones, en un esfuerzo para determinar tres variables desconocidas, probablemente se llegaría, luego de un elaborado ejercicio algebraico, a demostrar que  $1 = 1$ , o alguna otra identidad).

**2. Formular primero aquellos balances que involucran el menor número de incógnitas.**

En el ejemplo anterior, para el balance másico total interviene una sola incógnita,  $Q$ , mientras que los balances para el benceno y el tolueno contienen ambos  $Q$  y  $x$ . Al formular en primer término un balance global y luego un balance para el benceno, se permite primero la resolución de una ecuación con una incógnita, y luego una segunda ecuación, también con una incógnita. Si en vez, hubiéramos empezado por los balances de benceno y tolueno, hubiéramos tenido que resolver dos ecuaciones simultáneas, con dos incógnitas; llegando a obtener la misma respuesta, pero con mayor esfuerzo.

#### EJEMPLO.

**BALANCES EN UNA UNIDAD DE MEZCLADO.**- Una solución acuosa de hidróxido de sodio contiene 20% de NaOH en peso. Se desea producir una solución de NaOH a 8%, diluyendo una corriente de la solución a 20% con una corriente de agua pura.

a) Calcular las proporciones (g  $H_2O$ /g de solución de alimentación) y (g de solución de producto/g de solución de alimentación).

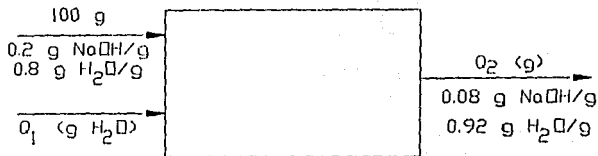
b) Determinar los flujos de alimentación de la solución a 20% y del agua de dilución necesarios para producir 2310 lbm/min. de la solución a 8%.

#### SOLUCIÓN:

Se podría tomar como base de 2310 lbm de producto/min., pero para propósitos ilustrativos y para obtener números más redondos con los cuales trabajar se elegirá una base diferente y se modificará la escala de los resultados finales.

a) Base: 100 g de solución de alimentación; representar y rotular el diagrama de flujo, recordando que ahora la cantidad de la corriente del producto es una incógnita.





(Debido a que la cantidad de la corriente conocida viene dada en gramos, es conveniente rotular a todas las cantidades desconocidas con esta unidad).

Existen dos incógnitas ( $Q_1$  y  $Q_2$ ) y dado que hay dos sustancias (NaOH y  $H_2O$ ) en las corrientes de entrada y salida, deberán formularse dos balances para obtener su resolución. Un balance másico total y un balance para el agua involucran ambos a las dos incógnitas, pero un balance para el NaOH contiene una sola.

Balance para el NaOH:

$$(g \text{ NaOH})_{\text{ent.}} = (g \text{ NaOH})_{\text{sal.}}$$

$$(0.2) (100 \text{ g}) = 0.08 Q_2$$

$$Q_2 = 250 \text{ g}$$

Es una buena práctica el escribir los valores de las variables calculadas en el diagrama de flujo tan pronto se conocen, a fin de que sea más fácil su empleo en cálculos posteriores; en este punto, por lo tanto, debiera escribirse 250 en lugar de  $Q_2$  en el diagrama.

Balance de masa total:

$$100 \text{ g} + Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = 150 \text{ g } H_2O$$

Ahora es posible calcular las proporciones deseadas:

$$Q_1 (g \text{ } H_2O) / 100 \text{ g solución de alimentación} \quad Q_1 = 150$$

$$1.5 \text{ g } H_2O / \text{g soluc. de alim.}$$

$$Q_2 (g \text{ producto}) / 100 \text{ g solución de alimentación} \quad Q_2 = 250$$

$$2.5 \text{ g producto/g soluc. de alim.}$$

b) El factor de escala se obtiene como el verdadero flujo de la corriente de producto dividido por el flujo calculado con la base supuesta.





$$\frac{2310 \text{ lbm producto/min.}}{250 \text{ g producto}} = 9.24 \frac{\text{lbm/min.}}{\text{g}}$$

Flujo de alimentación de la solución:

$$\frac{100 \text{ g}}{\text{g}} \times 9.24 \frac{\text{lbm/min.}}{\text{g}} = \boxed{924 \text{ lbm soluc. de alim./min.}}$$

Flujo del agua de dilución:

$$\frac{150 \text{ g}}{\text{g}} \times 9.24 \frac{\text{lbm/min.}}{\text{g}} = \boxed{1386 \text{ lbm H}_2\text{O/min.}}$$

Comprobación:  $(924 + 1386) \text{ lbm/min.} = 2310 \text{ lbm/min.}$

#### PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE BALANCES DE MASA.

Como ya se dijo anteriormente éste no es el único método posible a emplear para obtener la resolución a problemas de balances de masa. Lo que más interesa es el acostumbrarse a adoptar un procedimiento sistemático. Dada la descripción de un proceso, el valor de varias variables de proceso, y una lista de cantidades a determinar:

1. Hacer la representación de un diagrama de flujo, y rotularlo con todos los valores de las variables conocidas.
2. Escoger como base de cálculo una cantidad o flujo de una de las corrientes de proceso. Si el problema da una de tales cantidades, suele resultar favorable su empleo como base de cálculo; todas las cantidades calculadas en forma subsiguiente se encontrarán entonces dentro de una escala correcta. Si son conocidas varias cantidades o flujos, utilizarlos siempre como base. Si el problema no establece cantidad o flujo alguno, es conveniente suponer una cantidad de corriente con una composición conocida, y escribir esta cantidad supuesta en el diagrama de flujo.
3. Rotular las variables desconocidas en el diagrama, en particular los flujos másicos o molares y fracciones másicas o molares de componentes de las corrientes. Intentar el ingreso de las relaciones dadas entre las cantidades desconocidas durante la rotulación.
4. Transformar volúmenes o flujos volumétricos conocidos a cantidades másicas o molares empleando densidades tabuladas o leyes de los gases (para este capítulo no se utilizará la ley de los gases).
5. Si el problema mezcla unidades másicas y molares en una corriente (por ejemplo, un flujo másico total y las fracciones molares de los componentes o a la inversa) se convertirán todas las cantidades a una base u otra.
6. Si en el enunciado del problema se da alguna información que no haya sido empleada en la rotulación del diagrama de flujo, traducirla a ecuaciones en las variables definidas en la etapa 3.





7. Formular ecuaciones de balance de masa. Si no se producen reacciones químicas y hay  $N$  especies presentes, será posible formular a lo sumo,  $N$  balances, ya sea para cada especie o para la cantidad total de masa o de moles y para todas las especies salvo una. Hacer la formulación de los balances siguiendo un orden tal que aquellos que involucran el menor número de incógnitas aparezcan en primer término. A este nivel uno debiera tener tantas ecuaciones como incógnitas; de no ser así, puede ocurrir que el problema no esté bien definido o que no se haya representado una de las relaciones entre las variables.
8. Resolver las ecuaciones formuladas en las etapas 6 y 7, esto con el fin de determinar las incógnitas. Cuando se ha calculado el valor de una incógnita, colocar el mismo inmediatamente en el diagrama de flujo y luego substituir ese valor en cualquier ecuación en la que aparezca dicha incógnita.
9. Si en el enunciado del problema se daba el valor de una cantidad de corriente o flujo  $Q_p$ , y se empleó otro valor  $Q_c$  como base o se calculó para esta corriente, realizar la corrección de esta escala del proceso balanceado mediante el cociente  $Q_p/Q_c$  a fin de obtener el resultado final.

## EJEMPLO.

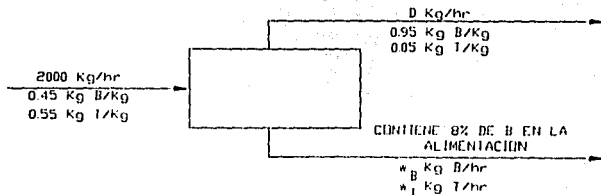
DE BALANCES DE MASA EN UNA TORRE DE DESTILACIÓN.- Una mezcla que contiene 45% de benceno (B) y 55% de tolueno (T) en peso, se alimenta a una torre de destilación. La corriente superior tiene una concentración de 95% de B en peso, mientras que 8% del benceno que se alimenta a la torre sale con la corriente inferior. El flujo de alimentación es de 2000 kg./hr.

Determinese el flujo de la corriente superior y los flujos máxicos del benceno y tolueno en la corriente inferior.

## SOLUCIÓN:

Base: flujo de alimentación dado

El diagrama de flujo rotulado se muestra a continuación.



En el diagrama encontramos tres incógnitas ( $D$ ,  $W_b$ , y  $W_t$ ), por lo que serán requeridas tres ecuaciones. Nos es permitido formular sólo dos balances de masa, dado que el sistema incluye sólo dos especies; la tercera ecuación, por lo tanto, debe provenir de información adicional (específicamente, la cantidad relativa de benceno en la corriente inferior). Esta última relación es:

Cantidad de B en la corriente inferior = 0.08 (cant. de B en la alimentación)







$$W_B \text{ (kg. B/hr.)} = 0.08((0.45) (2000) \text{ kg. B/hr.})$$

$$W_B = 72 \text{ kg. B/hr.}$$

(Escribir 72 en lugar de  $W_B$  en el diagrama de flujo).

El balance global y el de tolueno involucran dos incógnitas, D y  $W_T$ , pero un balance para el benceno involucra una sola, D.

Balance para el benceno:

$$(0.45) (2000) \text{ kg. B/hr.} = (0.95D + W_B) \quad W_B = 72 \text{ kg. B/hr.}$$

$$D = 872 \text{ kg./hr.}$$

(Escribirlo en el diagrama de flujo)

Balance másico total.

$$2000 \text{ kg./hr.} = (D + W_B + W_T) \text{ kg./hr.}$$

$$D = 972 \text{ kg./hr.}, \text{ y } W_B = 72 \text{ kg./hr.}$$

$$W_T = 1058 \text{ kg. T/hr.}$$

Si así se quisiera, sería posible realizar el cálculo del flujo total de la corriente inferior y las fracciones másicas de benceno y tolueno en esta corriente

### III.5 BALANCES DE MASA EN PROCESOS DE UNIDADES MÚLTIPLES.

Anteriormente nos referimos en forma superficial al "sistema". Ahora se hará una consideración del "sistema", exclusivamente cuando se trata de un proceso que consiste de varias unidades.

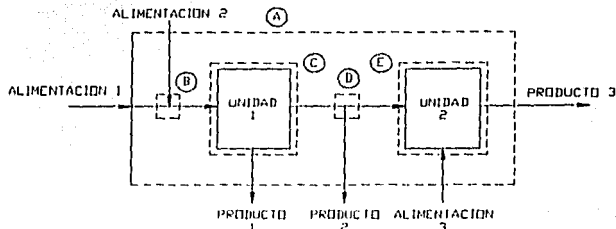
El sistema se define en forma simple como cualquier porción de un proceso que uno decide considerar: puede tratarse del proceso entero, una combinación interconectada de algunas de las unidades del proceso, una única unidad, o un punto en el cual se encuentran dos o más corrientes de proceso o se divide una única corriente. Una forma elemental de definir el sistema sobre el cual se hará la formulación de los balances consiste en trazar un rectángulo en torno a la porción del proceso en el diagrama de flujo, y considerando como entradas y salidas a todas aquellas corrientes que crucen el límite imaginario.

El diagrama de flujo que se presenta a continuación contiene cinco fronteras trazadas alrededor de porciones del proceso mostrado en este diagrama, definen sistemas para los cuales pueden formularse balances. La frontera A contiene a todo el proceso; el sistema definido por esta frontera tiene todas las alimentaciones al proceso como entradas y todas las corrientes de producto como salidas. La frontera B contiene una





mezcla de corrientes de alimentación en un punto, la frontera C contiene a la primera unidad de proceso, la frontera D contiene un punto de división de la corriente y la frontera E contiene a la segunda unidad. Los balances formulados en el sistema A (el proceso entero) son conocidos como balances globales.

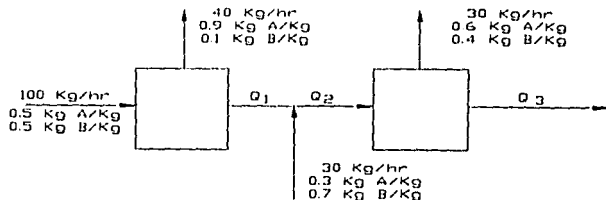


El procedimiento de delineación para la resolución de problemas de balances de materia es aplicable para el caso de unidades múltiples, quizá sea necesario aislar y formular balances para varios subsistemas, con el fin de obtener suficientes ecuaciones como para determinar todas las variables desconocidas en las distintas corrientes. Resulta generalmente conveniente que se tome en cuenta, en primer término, los balances globales, a manera de determinar variables desconocidas en las corrientes de alimentación y producto del proceso; a partir de ahí, podrán emplearse balances en varios subsistemas para determinar variables de corrientes interiores. Cuando se elige a los subsistemas sobre los cuales se habrán de formular los balances, es posible simplificar los cálculos trazando límites que intersecten corrientes que contengan el menor número posible de incógnitas.

#### EJEMPLO.

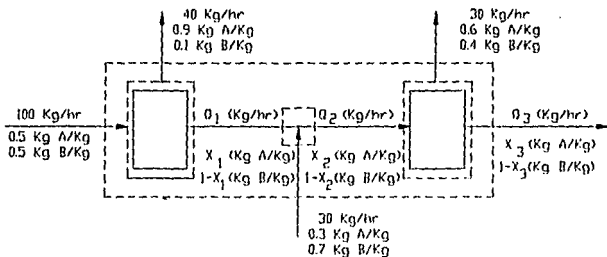
PROCESO DE DESTILACIÓN DE DOS UNIDADES.- A continuación puede apreciarse en la figura el diagrama de flujo rotulado para un proceso continuo, en régimen permanente, de destilación en dos unidades. Cada corriente contiene dos componentes (llamados A y B) en diferentes proporciones.

Calcular los flujos desconocidos y sus composiciones para las corrientes  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$ .



**SOLUCIÓN:**

En la representación del diagrama de flujo que sigue se muestran los sistemas alrededor de los cuales podrían efectuarse balance.



La frontera exterior abarca el proceso entero, y posee corrientes de alimentación y de producto que son las mismas que corresponden al proceso entero. Dos de las fronteras interiores rodean las unidades del proceso individuales, y el tercero engloba un punto de confluencia entre las corrientes.

**Base: flujos dados**

En las corrientes que entran y que abandonan en el proceso global hay dos incógnitas,  $Q_3$  y  $X_3$ , y dado que hay dos componentes independientes en estas corrientes (A y B), podemos formular los dos balances.

**Balance másico global:**

$$(100 + 30) \text{ kg/hr.} = (40 + 30) \text{ kg/hr.} + Q_3$$

$$Q_3 = 60 \text{ kg./hr.}$$

**Balance global para A:**

$$(0.5)(100) \text{ Kg/hr} + (0.3)(30) \text{ Kg/hr} = (0.9)(40) \text{ Kg/hr} + (0.6)(30) \text{ Kg/hr} + (60)(X_3) \text{ Kg/hr}$$

$$X_3 = 0.0833 \text{ kg. A/kg.}$$

Para poder determinar el flujo y composición de una corriente de conexión, se deben formular balances sobre un subsistema cuyos límites corten esta corriente. De las tres fronteras que se muestran en el diagrama de flujo, la central (en torno a la unión de corrientes) no sería buena a esta altura, ya que sus corrientes de entrada y salida contienen cuatro cantidades desconocidas ( $Q_1$ ,  $X_1$ ,  $Q_2$ ,  $X_2$ ), mientras que las fronteras alrededor de cada una de las unidades de proceso intersectan cada una de las corrientes que contienen un total de dos incógnitas.





Se tomara la elección de la frontera alrededor de la unidad 1 para la siguiente serie de balances. Hay dos incógnitas  $Q_1$  y  $X_1$ , en las corrientes que intersectan esta frontera, pudiendo formularse hasta dos balances.

Balance másico total en la unidad 1:

$$100 \text{ kg/hr.} = 40 \text{ kg/hr.} + Q_1$$

$$Q_1 = 60 \text{ kg/hr.}$$

Balance de A en la unidad 1:

$$(0.5)(100) = (0.9)(40) + 60X_1$$

$$X_1 = 0.233 \text{ kg. A/kg.}$$

Para encontrar  $Q_2$  y  $X_2$ , podríamos escribir balances ya sea alrededor del punto de mezcla de corrientes o de la unidad 2. Escojamos la primera de estas alternativas.

Balance másico alrededor del punto de mezcla:

$$Q_1 \text{ Kg/hr} + 30 \text{ Kg/hr} = Q_2 \text{ Kg/hr} \quad \text{si } Q_1 = 60 \text{ kg/hr.}$$

$$Q_2 = 90 \text{ kg/hr.}$$

Balance sobre A alrededor del punto de la mezcla:

$$Q_1 X_1 + (0.3)(30) \text{ Kg/hr} = Q_2 X_2$$

$$\text{Si } Q_1 = 60 \text{ kg/hr., } X_1 = 0.233 \text{ Kg. A/kg., } Q_2 = 90 \text{ Kg/hr.}$$

$$X_2 = 0.2553 \text{ Kg. A/hr.}$$

### III.6 LEY DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

La energía es costosa. Todavía no llegamos a aprender a utilizarla en forma adecuada y por lo mismo no le damos forma eficiente a el infinito suministro de energía "libre" provista por diferentes fuentes tales como el sol, los vientos y las mareas; la generación de energía nuclear es un hecho, pero la necesidad de disponer en forma segura de los desechos radiactivos provenientes de los reactores nucleares constituye un problema serio y no resuelto.

Como ingeniero que diseña un proceso, uno de los puntos más importantes consistiría en considerar cuidadosamente el flujo de energía que entra y sale de cada unidad de proceso, determinando además los requerimientos globales de energía del proceso. Esto se efectuaría mediante la elaboración de un balance de energía del proceso, en una forma similar a la utilizada para el caso de balances de materia en la evaluación de los flujos másicos hacia y desde el proceso y sus diferentes unidades.





El principio que sirve como base a todos los cálculos de balances de energía es la ley de la conservación de la energía la cual tiene un gran parecido a la ley de la conservación de la masa ya que establece que la energía no puede crearse ni destruirse. Esta ley es conocida con el nombre de la primera ley de la termodinámica.

### III.7 FORMAS DE ENERGÍA.

La energía siempre ha sido fundamental en los grandes logros de la humanidad y de su sueño por lograr un mejor mundo. Esta se define generalmente como la habilidad o aptitud para producir trabajo y se manifiesta de muchos modos. Un sistema pueda tener energía como resultado de su posición sobre la tierra, de la posición de sus moléculas, por la posición de sus átomos o por la excitación de los mismos.

Algunos de los tipos de energía que interesan a los ingenieros químicos son los que mencionamos a continuación:

**Energía Potencial.-** Es debida a la posición que guarda un cuerpo sobre el nivel de referencia y su formula es la siguiente:

$$EP = mgz \quad [\text{kg m/s}^2 \text{ m} = \text{Julio}]$$

**Energía Cinética.-** Es la energía que tiene un cuerpo en movimiento y su formula es la siguiente:

$$EC = m u^2/2$$

**Energía Mecánica.-** Es la energía que se introduce a un sistema por medio de una bomba o que se quita de un sistema por medio de una turbina.

**Energía de Fricción.-** Representa la energía pérdida debido a la fricción cuando un fluido pasa a través de las diferentes partes de un sistema.

**Energía Interna.-** Es la suma de las energías cinéticas y potenciales de todos los constituyentes de un sistema. En general no se conoce la energía interna de un sistema, sino su variación cuando cambian las circunstancias del sistema.

**Energía de Presión.-** Es la parte de la energía interna de un cuerpo que puede hacer trabajo su formula es:

$$EPe = PV = [(\text{kg/m}^2) \text{ m}^3 = \text{kgm}]$$

**Energía Química.-** Es la liberada o absorbida durante una reacción química y es medida normalmente en Kcal o BTU.

### TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA.

Mientras la energía permanece almacenada dentro de un sistema, tiene capacidad para producir efectos, pero estos no son evidentes, a menos que la energía pueda cruzar los límites de un sistema y producir cambios en los contenidos del sistema y en





los alrededores o entorno. La energía que se transmite puede adoptar dos formas: trabajo y calor.

El trabajo y el calor son dos formas en que se transmite la energía de un cuerpo a otro. Cesan en cuanto la energía deja de cruzar los límites del sistema. No se puede decir, pues, que un cuerpo tiene trabajo o calor, ya que esta forma de energía solo existe al transmitirse y no dentro del cuerpo.

El calor es una forma de transmisión de la energía y se da cuando hay una diferencia de temperatura. El trabajo es la otra forma de transmitir la energía y se da cuando hay una diferencia de fuerzas, estos conceptos los podemos definir de la manera siguiente.

**CALOR.**- es la energía en tránsito de un cuerpo a otro, debido a la existencia de una diferencia de temperaturas entre dos cuerpos. La adición de calor a un sistema aumenta la energía del sistema generalmente la energía interna. La energía calorífica se suele medir en Kcal o en BTU.

**TRABAJO.**- este concepto entraña la aplicación de fuerza y el concepto científico engloba esta idea de la manera más específica posible. El trabajo es definido como la aplicación de una fuerza a través de una distancia.

$$\tau = Fd = \text{energía}$$

F = fuerza

$$F = ma$$

d = distancia

a = aceleración

Sus unidades son: [julio = (kgm/s<sup>2</sup>)m = N(m)]

Cuando un sistema produce trabajo, este tiene signo positivo y negativo si recibe trabajo.

**POTENCIA.**- El trabajo realizado en un cierto tiempo recibe el nombre de potencia. La unidad de potencia es el Watt o Vatio ó ft-lb/s o HP.

$$P = \tau/t$$

### III.8 BALANCES DE ENERGÍA EN SISTEMAS ABIERTOS.

Un sistema abierto se define como aquel sistema en el que la masa que haya atraviesa sus límites a medida que ocurre el proceso. Debe realizarse trabajo sobre semejante sistema a fin de forzar la entrada de masa, mientras que la masa que sale produce trabajo sobre los alrededores; ambos términos de trabajo deben implicarse en la ecuación de balance de energía.

#### TRABAJO DE FLUJO Y TRABAJO DE EJE.

El trabajo neto W que se efectúa sobre un sistema abierto por el medio exterior puede expresarse como:

$$W = W_s + W_f$$



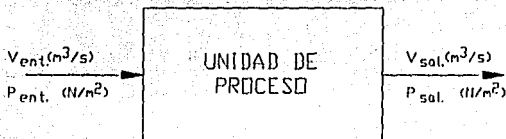


Para el que:

$W_s$  = trabajo de eje, o trabajo que se efectúa sobre el fluido de proceso por una parte móvil del sistema (el rotor de una bomba por mencionar un ejemplo).

$W_f$  = trabajo de flujo, o trabajo efectuado sobre el fluido en la entrada del sistema menos el trabajo efectuado por el fluido a la salida del sistema.

Para obtener una expresión para  $W_f$ , consideramos el sistema que se muestra a continuación:



Un fluido con una presión  $P_{ent}$  ( $N/m^2$ ) entra a una tubería con un flujo volumétrico  $V_{ent}$  ( $m^3/s$ ) y sale con una presión  $P_{sal}$  ( $N/m^2$ ) y un flujo volumétrico  $V_{sal}$  ( $m^3/s$ ). El fluido que entra en el sistema recibe trabajo del fluido que le sigue a un ritmo:

$$W_{ent} (N \cdot m/s) = P_{ent} (N/m^2) V_{ent} (m^3/s)$$

mientras que el fluido que abandona el sistema realiza trabajo sobre los alrededores a un ritmo:

$$W_{sal} = P_{sal} V_{sal}$$

El ritmo neto al cual se efectúa un trabajo sobre el sistema a la entrada y a la salida se expresa, por lo tanto de la manera siguiente:

$$W_f = P_{ent} V_{ent} - P_{sal} V_{sal}$$

Si varias corrientes de entrada y salida entran y salen del sistema, los productos PV para cada caso deben de sumarse para determinar  $W_f$ .

#### PROPIEDADES EXTENSIVAS E INTENSIVAS.

Las propiedades de un material de proceso son ya sea extensivas (proporcional a la cantidad de material) o intensivas (independientes de la cantidad). La masa, el número de moles y el volumen (o flujo másico, flujo molar y flujo volumétrico para una corriente continua), la energía cinética, la energía potencial y la energía interna (o los ritmos de transporte de estas cantidades por una corriente continua) son propiedades extensivas, mientras que la temperatura, la presión y la densidad son intensivas.





Una propiedad específica es una cantidad intensiva que se obtiene al dividir una propiedad extensiva de la corriente por la cantidad total (o flujo) del material que forma la corriente. Así, si el volumen de un fluido es de  $200 \text{ cm}^3$  y la masa del fluido es de  $200 \text{ g}$ , el volumen específico del fluido es de  $1 \text{ cm}^3/\text{g}$ . En forma análoga, si el flujo másico de una corriente es de  $100 \text{ lb}_m/\text{min}$ . y el flujo volumétrico es de  $150 \text{ pies}^3/\text{min}$ ., el volumen específico del material que forma la corriente es  $(150/100) = 1.5 \text{ pies}^3/\text{lb}_m$ ; si el ritmo de transporte de energía cinética por parte de esta corriente es de  $300 \text{ J}/\text{min}$ ., entonces la energía cinética específica del material de la corriente es  $(300 \text{ J}/\text{min}) / (100 \text{ lb}_m/\text{min}) = 3 \text{ J}/\text{lb}_m$ . Se hará la utilización del símbolo (\*) para señalar una propiedad específica.

Si la presión y temperatura de un material de proceso son tales que la energía interna específica del material sea  $U^*(\text{J}/\text{kg})$ , entonces una masa  $m$  (kg.) de este material posee una energía interna total de:

$$U(J) = m(\text{kg.})U^*(\text{J}/\text{kg.})$$

Análogamente, una corriente continua de este material con un flujo másico  $m$  (kg/s) transporta energía interna con un flujo:

$$U(\text{J/s}) = m (\text{kg/s}) U^*(\text{J}/\text{kg.})$$

Una propiedad que ocurre en la ecuación de balance de energía para sistemas abiertos es la entalpía específica que se define como:

$$H^* = U^* + PV^*$$

donde  $P$  es la presión total y  $U^*$  y  $V^*$  son la energía interna específica y el volumen específico

#### BALANCE DE ENERGÍA EN EL SISTEMA ABIERTO EN RÉGIMEN PERMANENTE.

La primera ley de la termodinámica para un sistema abierto en régimen permanente posee la forma:

$$\text{entrada} = \text{salida} \rightarrow (1)$$

La expresión "entrada" significa aquí el ritmo total de transporte de energía cinética, potencial o interna a partir de todas las corrientes de proceso de entrada sumada a los ritmos de transferencia de energía como calor y trabajo, mientras que "salida" es el ritmo total de transporte de energía por parte de las corrientes de salida.

Si  $E_j$  significa el ritmo total de transporte de energía por parte de la corriente  $j$ -ésima de entrada o salida del proceso, y  $Q$  y  $W$  nuevamente se definen como los ritmos de flujo de calor y trabajo que entran al proceso entonces:

$$Q + W + \sum_{\text{ctes. de entrada}} E_j = \sum_{\text{ctes. de salida}} E_j$$







$$\sum_{\text{ctes. de salida}} E_j - \sum_{\text{ctes. de entrada}} E_j = Q + W \rightarrow (2)$$

Si  $m_j$ ,  $E_{kj}$ ,  $E_{pj}$  y  $U_j$  son el flujo másico, la energía cinética, la energía potencial y la energía interna de la corriente de proceso  $j$ -ésima, entonces el ritmo de transporte de energía hacia o desde el sistema por parte de esta corriente es:

$$E_j = U_j + E_{kj} + E_{pj}$$

$$U_j = m_j U_j^*, \quad E_{kj} = m_j v^2 / 2gc, \quad E_{pj} = m_j (g/gc) z_j$$

$$E_j = m_j (U_j^* + v^2 / 2gc + g/gc z_j) \rightarrow (3)$$

donde  $v_j$  es la velocidad de la corriente  $j$ -ésima y  $z_j$  es la altura de esta corriente respecto de un plano de referencia en el cual  $E_p = 0$ .

El trabajo total ( $W$ ) que se efectúa sobre el sistema por sus alrededores nos da como resultado al trabajo de eje  $W_s$  más el trabajo de fluido  $W_f$ . Si  $V_j$  es el flujo volumétrico de la corriente  $j$ -ésima, y  $P_j$  es la presión de esta corriente, entonces:

$$W_f = \sum_{\text{ctes. de entrada}} P_j V_j - \sum_{\text{ctes. de salida}} P_j V_j$$

$$V_j = m_j V_j^*$$

$$W = W_s + \sum_{\text{ctes. de entrada}} m_j P_j V_j^* - \sum_{\text{ctes. de salida}} m_j P_j V_j^* \rightarrow (4)$$

Substituyendo la expresión para  $E_j$  de la ec. (3) y la de  $W$  de la ec. (4) en la ec. (2) y pasando los términos de  $P_j V_j$  a la izquierda de la igualdad, nos da la expresión siguiente:

$$\sum_{\text{ctes. de salida}} m_j (U_j^* + (p_j V_j^*) + (v_j^2 / 2gc) + (g/gc) z_j) - \sum_{\text{ctes. de entrada}} m_j (U_j^* + (p_j V_j^*) + (v_j^2 / 2gc) + (g/gc) z_j) = Q + W_s \rightarrow (5)$$

La ec (5) podría utilizarse para todos los problemas de balance de energía de sistemas abiertos en régimen permanente. Como regla, sin embargo el término  $U_j^* + P_j V_j^*$  se combina y se escribe como  $H_j^*$  la variable previamente definida como la entalpía específica. En términos de esta variable, la ecuación (5) deviene:

$$\sum_{\text{ctes. de salida}} m_j (H_j^* + (v_j^2 / 2gc) + (g/gc) z_j) - \sum_{\text{ctes. de entrada}} m_j (H_j^* + (v_j^2 / 2gc) + (g/gc) z_j) = Q + W_s \rightarrow (6)$$





Finalmente si utilizamos el símbolo  $\Delta$  para señalar salida total menos entrada total resulta:

$$\sum \underset{\text{de salida}}{m_j H_j^*} - \sum \underset{\text{de entrada}}{m_j H_j^*} = \Delta H \rightarrow (7)$$

$$\sum \underset{\text{de salida}}{m_j (v^2/2gc)} - \sum \underset{\text{de entrada}}{m_j (v^2/2gc)} = \Delta E_k \rightarrow (8)$$

$$\sum \underset{\text{de salida}}{m_j z_j (g/gc)} - \sum \underset{\text{de entrada}}{m_j z_j (g/gc)} = \Delta E_p \rightarrow (9)$$

En términos de estas cantidades, la ecuación (6) deviene:

$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W_s \rightarrow (10)$$

Por lo que utilizaremos la ecuación (10) como base para la mayoría de los cálculos de balance de energía en sistemas abiertos en régimen permanente.

Deberá notarse que si una variable específica posee el mismo valor para todas las corrientes de entrada y salida, desaparecerá el término correspondiente en la ec. (10). Por ejemplo, si  $H^*$  es la misma para todas las corrientes, entonces a partir de ec. (7).

$$\Delta H = H^*(\sum \underset{\text{de salida}}{m_j} - \sum \underset{\text{de entrada}}{m_j})$$

Pero a partir de un balance total de materia la cantidad que se encuentra entre paréntesis (que resulta simplemente entrada total de masa menos salida total de masa) resulta igual a cero, por lo que  $\Delta H = 0$ , tal como se afirmaba.

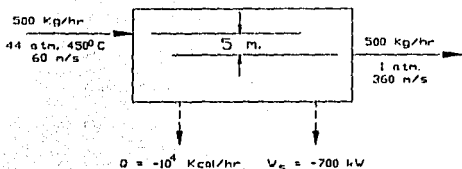
EJEMPLO.

**BALANCE DE ENERGÍA EN UNA TURBINA.** - Una turbina se impulsa mediante 5000 kg./hr. de vapor. El vapor entra a la turbina a 44 atm y 450°C con una velocidad lineal de 60 m/s, y la abandona por un punto situado 5 m. por debajo de la entrada de la turbina a presión atmosférica y una velocidad de 360 m/s. La turbina entrega trabajo de eje a un ritmo de 700 kW, y se estima que la pérdida de calor de la turbina es de 10<sup>4</sup> Kcal/hr. Calcular el cambio de entalpía específica asociado con este proceso.

SOLUCIÓN:

Se presenta el diagrama de flujo a continuación:





A partir de la ecuación (10):

$$\Delta H = Q + W_s - \Delta E_k - \Delta E_p$$

En general, los términos para el calor, el trabajo y la energía cinética y potencial se determinan en diferentes unidades. Para evaluar  $\Delta H$ , convertiremos cada término a KW (kJ/s), utilizando factores de conversión (deberán buscarse en un manual de fórmulas técnicas), notando primero que  $m = (500/3600) = 0.139 \text{ Kg./s}$ .

$$\Delta E_k = (m/2gc)(v_2^2 - v_1^2)$$

$$= \frac{0.139 \text{ Kg/s}}{2} \left| \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg. m/s}^2} \right| \left| \frac{(360^2 - 60^2) \text{ m}^2}{\text{s}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ W}}{1 \text{ N m/s}} \right| \left| \frac{1 \text{ KW}}{10^3 \text{ W}} \right|$$

$$= 8.75 \text{ KW}$$

$$\Delta E_p = (mg/gc)(z_2 - z_1)$$

$$= \frac{0.139 \text{ kg/s}}{1} \left| \frac{9.81 \text{ N}}{\text{kg.}} \right| \left| (-5) \text{ m} \right| \left| \frac{1 \text{ Kw}}{10^3 \text{ N m/s}} \right| = -6.81 \times 10^{-3} \text{ KW}$$

$$Q = \frac{-10^4 \text{ Kcal}}{\text{hr.}} \left| \frac{\text{J}}{0.239 \times 10^3 \text{ Kcal}} \right| \left| \frac{1 \text{ hr.}}{3600 \text{ s}} \right| \left| \frac{1 \text{ KW}}{10^3 \text{ J/s}} \right| = -11.6 \text{ KW}$$

$$W_s = -700 \text{ KW}$$

$$\Delta H = Q + W_s - \Delta E_k - \Delta E_p = -720 \text{ KW}$$

Pero:

$$\Delta H = m (H^*_2 - H^*_1)$$

$$H^*_2 - H^*_1 = \Delta H/m = ((-720 \text{ KJ/s})/(0.139 \text{ kg/s})) = -5180 \text{ KJ/kg.}$$

### III.9 PROCEDIMIENTOS PARA EL BALANCE DE ENERGÍA.

Un diagrama de flujo elaborado y rotulado en forma adecuada (explicado en balances) resulta básico para la resolución eficiente de problemas de balance de energía. Al rotular el diagrama de flujo se debe de asegurar incluir toda la información





necesaria posible para la determinación de entalpía específica de cada componente de la corriente, incluyendo temperaturas y presiones conocidas. Al mismo tiempo, explicitar los estados de agregación de los materiales de proceso cuando estos no resulten obvios; por ejemplo, no es suficiente escribir  $H_2O$ , sino que debe rotularse como  $H_2O(S)$ ,  $H_2O(L)$  o  $H_2O(V)$ , según se encuentre presente el agua como un sólido, líquido o vapor.

#### EJEMPLO.

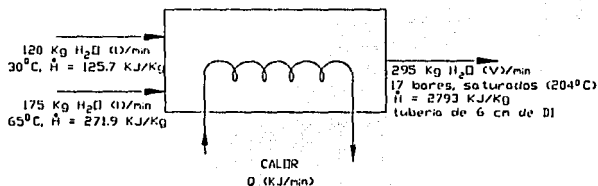
**BALANCE DE ENERGÍA EN UN PROCESO DE UN COMPONENTE.**- Se mezclan dos corrientes de agua a fin de formar la alimentación a una caldera. A continuación figuran datos del proceso.

Corriente de alimentación 1:	120 kg/min. @ 30°C
Corriente de alimentación 2:	175 kg/min. @ 65°C
Presión de la caldera:	17 bares (absoluto)

El vapor de salida emerge de la caldera a través de una tubería de 6 cm. de diámetro interno (DI). Calcular la alimentación de calor requerida en la caldera, en Kilojoules por minuto si el vapor que emerge se encuentra saturado a la presión de la caldera. Despreciar las energías cinéticas de las corrientes de líquido a la entrada.

#### SOLUCIÓN:

El diagrama de flujo se presenta a continuación:



La primera etapa para la resolución de problemas de este tipo consiste en poder determinar (si es posible) los flujos de todos los componentes de las corrientes mediante balances de materia. En este caso, resulta trivial formular y resolver un balance de materia para el agua a fin de determinar que el flujo de la corriente de salida es de 295 kg/min.

A continuación, se determinan las entalpías específicas de cada componente en la corriente. Las tablas de vapor se utilizan para la determinación de la entalpía específica para agua a 30°C y 65°C, y para vapor saturado a una presión de 17 bares. Esta última búsqueda en la tabla también proporciona la temperatura del vapor saturado que corresponde a esta presión (204°C). Se observa que las lecturas para agua líquida corresponden a presiones que pueden o no resultar equivalentes a las presiones de las corrientes de entrada (que no conocemos); suponemos, no obstante, que la entalpía del agua líquida es aproximadamente independiente de la presión, y utilizamos los valores tabulados.





La etapa final consiste en escribir la forma apropiada de la ecuación del balance de energía y resolverlo en función de la cantidad deseada. Para este sistema de proceso abierto,

$$\Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p = Q + W_s$$

$W_s = 0$ : no hay partes móviles,  $\Delta E_p = 0$ : generalmente supuesto así a menos que se produzcan desplazamientos a través de grandes alturas.

Por lo tanto:

$$Q = \Delta H + \Delta E_k$$

Cálculo de  $\Delta H$

a partir de la ecuación (7)

$$\begin{aligned} \Delta H &= \sum n_j H_j^* \Big|_{\text{salida}} - \sum n_j H_j^* \Big|_{\text{entrada}} \\ &= \frac{295 \text{ kg.}}{\text{min.}} \Big| \frac{2793 \text{ kJ}}{\text{kg.}} - \frac{120 \text{ kg.}}{\text{min.}} \Big| \frac{125.7 \text{ kJ}}{\text{kg.}} - \frac{175 \text{ kg.}}{\text{min.}} \Big| \frac{271.9 \text{ kJ}}{\text{kg.}} \\ &= 7.61 \times 10^5 \text{ kJ/min.} \end{aligned}$$

Cálculo de  $\Delta E_k$

A partir de tablas, el volumen específico del vapor saturado a 17 bares es  $0.1168 \text{ m}^3/\text{kg}$ , y la sección transversal de la tubería de 6 cm de DI es:

$$A = \pi R^2 = \frac{3.1416}{4} \Big| \frac{(3.00)^2 \text{ cm}^2}{10^4 \text{ cm}^2} = 2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

La velocidad del vapor es:

$$\begin{aligned} v(\text{m/s}) &= V(\text{m}^3/\text{s})/A(\text{m}^2) \\ &= \frac{295 \text{ kg.}}{\text{min.}} \Big| \frac{1 \text{ min.}}{60 \text{ s}} \Big| \frac{0.1168 \text{ m}^3}{\text{kg.}} \Big| \frac{1}{2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2} \\ &= 202 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Entonces, dado que las energías cinéticas de las corrientes de entrada se suponen despreciables,

$$\Delta E_k = \frac{295 \text{ kg/min.}}{2} \Big| \frac{(202)^2 \text{ m}^2}{\text{s}^2} \Big| \frac{\text{J s}^2}{1 \text{ kg. m}} \Big| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ J}} = 6.02 \times 10^3 \text{ kJ/min.}$$

Finalmente,

$$\begin{aligned} Q &= \Delta H + \Delta E_k \\ &= ((7.61 \times 10^5) + (6.02 \times 10^3)) \text{ kJ/min.} \end{aligned}$$



$$7.67 \times 10^3 \text{ kJ/min.}$$

Notése que el cambio en energía cinética es tan solo una pequeña fracción (alrededor de 0.8%) del requerimiento total del calor para el proceso. Este resultado es típico, y es usual el despreciar los cambios en energía cinética y potencial (al menos como primera aproximación) respecto de los cambios de entalpía para procesos que involucran cambios de fase, reacciones químicas o grandes cambios de temperatura.

Cuando las corrientes del proceso están contenidas por varios componentes, las entalpías específicas de cada componente deben determinarse en forma separada y substituirse en la ecuación de balance de energía cuando se evalúa  $\Delta H$ . Para mezclas de gases o líquidos con estructuras moleculares similares (por ejemplo, mezclas de hidrocarburos de cadena lineal), puede suponerse que el valor de  $H^*$  para un componente de la mezcla es igual al que corresponde a la substancia pura a la misma presión y temperatura.

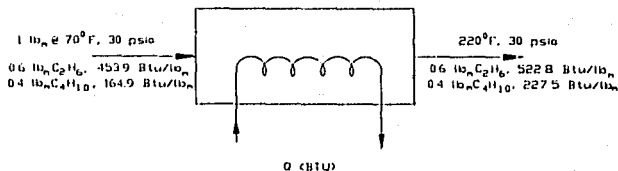
## EJEMPLO.

**BALANCES DE ENERGÍA EN UN PROCESO DE DOS COMPONENTES.**- Debe calentarse una corriente gaseosa que contiene 60% en peso de etano y 40% de butano, desde 70°F hasta 220°F, a una presión de 30 psia. Calcular el suministro de calor requerido por libra de mezcla, despreciando cambios de energía cinética y potencial y empleando datos tabulados de entalpía para  $C_2H_6$  y  $C_4H_{10}$ .

SOLUCIÓN:

Base: 1 lbm de mezcla.

Las entalpías del butano a 70°F y 30 psia y a 220°F y 30 psia se encuentran tabuladas en el manual del ingeniero químico, así como también para el etano. Los valores de entalpía tabulados se incluyen en el diagrama de flujo que se presenta a continuación:



No se requiere la formulación de balances de materia debido a que solo hay una corriente de entrada y una de salida, de manera que es posible proceder directamente al balance de energía.

$$Q + W_s = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p$$

$W_s = 0$  (no hay partes móviles),  $\Delta E_k = 0$ ,  $\Delta E_p = 0$  (por hipótesis)

$$Q = \Delta H$$





Dado que los materiales de proceso son todos gases, podemos establecer que las entalpías de cada corriente sean equivalentes a la suma de las entalpías de los componentes individuales y escribir:

$$Q = \Delta H = \sum_{\text{comp. salida}} n_j H_j^* - \sum_{\text{comp. entrada}} n_j H_j^*$$
$$= \frac{0.6 \text{ lbm } C_2H_6}{\text{lbm}} \left| \frac{522.8 \text{ BTU}}{\text{lbm}} \right. + \frac{0.4 \text{ lbm } C_2H_{10}}{\text{lbm}} \left| \frac{227.5 \text{ BTU}}{\text{lbm}} \right.$$
$$- (0.6)(453.9) - (0.4)(164.9) =$$
$$\boxed{66.4 \text{ BTU}}$$

En los dos ejemplos anteriores, fue posible formular balances de materia completos antes de efectuar el balance de energía. En otra clase de problemas puede determinarse, por simple balance de materia, una corriente o flujo extra. Para resolver problemas de este tipo, se requiere la resolución simultánea de balances de materia y energía.

La mayoría de los ejemplos de balances de masa y energía pudieron resolverse totalmente tomando como base la información que estaba contenida en los enunciados de los problemas. Esto se hizo con la finalidad de hacer más rápida la comprensión de los balances de materia y energía. Pero es muy importante hacer notar que los problemas reales en el análisis de procesos raramente resultan autosuficientes.

Lo que queremos decir es que antes de que se pueda llevar a cabo un balance completo de masa en un proceso habitualmente habrán de determinarse varias propiedades físicas y leyes que gobiernan la conducta de los materiales de proceso y utilizar estas propiedades para la obtención de relaciones adicionales entre las variables del sistema.

Para el caso de los balances de energía todas las entalpías y energías internas podían encontrarse en las tablas y con esto facilitar su obtención, pero hay ocasiones en las que se tiene que calcular por métodos de evaluación cuando no se dispone de tablas para estas propiedades. Efectuados estos cálculos para el proceso, el balance de energía se expresa y resuelve como lo hicimos anteriormente.



**TEMA IV**  
**FENÓMENOS DE TRANSPORTE EN EQUIPOS DE**  
**PROCESO.**

**OBJETIVO:**

**FAMILIARIZAR AL ESTUDIANTE CON LOS ASPECTOS BÁSICOS DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE COMO SON LA TRANSFERENCIA DE MASA, ENERGÍA Y MOMENTO APLICADOS A EQUIPOS DE PROCESO.**





## IV.1 TUBERÍAS.

### DEFINICIÓN Y UTILIDAD EN LOS PROCESOS.

Las tuberías o conductos cerrados se pueden definir como un conducto formado por tubos por donde se lleva el agua, gases, combustibles, etc.

Ciertamente todos los fluidos son conducidos por medio de las tuberías durante su producción, procesamiento o utilización. De acuerdo a los avances en la energía atómica y de los cohetes espaciales se han añadido fluidos tales como los metales líquidos a la gran lista de líquidos más comunes entre los cuales se encuentran el agua, el aceite, ácidos y mezclas de líquido-vapor-gas.

Por lo que existe una gran variedad de tubos de diferentes materiales, diámetros y espesores en el mercado.

### PERFILES DE VELOCIDAD EN TUBERÍAS.

Una de las aplicaciones más importantes del flujo de fluidos es el flujo en conductos circulares, tuberías y caños. Los tamaños de las tuberías se especifican por medio del diámetro exterior y el espesor de pared.

Cuando el fluido fluye en una tubería circular, al medir las velocidades a diferentes distancias de la pared al centro, se demuestra que, tanto en el flujo laminar como en el turbulento, el fluido que está en el centro del tubo se desplaza con mayor rapidez que el que está cercano a las paredes. Estas mediciones se efectúan a una distancia razonable de la entrada a la tubería. La velocidad promedio en la totalidad de la sección transversal de la tubería es precisamente 0.5 veces la velocidad máxima en el centro, como lo expresa el balance de momento de casco.

### CAÍDA DE PRESIÓN Y PÉRDIDA POR FRICCIÓN EN UN FLUJO LAMINAR.

Cuando un fluido fluye por una tubería con flujo laminar de estado estable, la ecuación que se presenta a continuación expresa el esfuerzo cortante para un fluido newtoniano, y esta ecuación puede reescribirse para variaciones del radio  $dr$ , en vez de la distancia  $dy$ , como sigue:

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} \quad (1)$$

Con esta expresión y llevando a cabo un balance de momento de casco del fluido en un casco cilíndrico, se obtiene la ecuación de Hagen-Poiseuille, para el flujo laminar de un líquido en tubos circulares, se incluye también una deducción usando el balance diferencial de momento. Esta expresión es:





$$\Delta p_f = (p_1 - p_2)_f = \frac{32 \mu v (L_2 - L_1)}{D^3} \quad (2)$$

donde  $p_1$  es la presión corriente arriba en el punto 1;  $p_2$  es la presión en el punto 2;  $v$  es la velocidad promedio en el tubo, m/s;  $D$  es el diámetro interno, m; y  $(L_2 - L_1)$ , o  $\Delta L$ , es la longitud de tubo recto, m. Para unidades inglesas, el lado derecho de la ecuación 2 se divide entre  $gc$ .

La cantidad  $(p_1 - p_2)_f$ , o  $\Delta p_f$ , es la pérdida de presión debida a la fricción superficial. Entonces, para  $\rho$  constante, la pérdida por fricción  $F_f$  es

$$F_f = \frac{(p_1 - p_2)_f}{\rho} = \frac{N \cdot m}{kg} \cdot \frac{j}{kg} \cdot \frac{pie \cdot lb_f}{lb_m} \quad (3)$$

Esta es la pérdida de energía mecánica debida a la fricción superficial en la tubería en  $N \cdot m/kg$  de fluido y es parte del término  $\Sigma F$  de pérdidas por fricción del balance de energía mecánica. Este término  $(p_1 - p_2)_f$ , causado por cambios de carga de velocidad o carga potencial, la porción de  $\Sigma F$  se origina en fricciones dentro del propio ducto por flujo laminar o turbulento estudia la porción de las pérdidas por fricción debidas a accesorios (válvulas, codos, etc.), ángulos y otras variaciones, que muchas veces constituyen factores importantes de la fricción.

Con la ecuación (2) puede obtenerse la medición experimental de la viscosidad de un fluido por medio de la determinación de la caída de presión y de la velocidad volumétrica de flujo a través de un tubo de longitud y diámetros conocidos.

En la práctica casi siempre es necesario incluir correcciones por efectos de energía cinética y de entrada además, la ecuación (2) también se emplea para la medición de flujos líquidos bajos.

### PÉRDIDAS EN TUBERÍAS.

Las pérdidas de carga o energía en las tuberías las podemos clasificar en dos clases: primarias y secundarias.

Las pérdidas primarias son las pérdidas de superficie en el contacto del fluido con la tubería (capa límite), frotamiento de unas capas de fluido con otras (régimen laminar) o de las partículas del fluido entre sí (régimen turbulento). Tienen lugar en flujo uniforme, por tanto esencialmente en los tramos de tubería de sección constante.

Las pérdidas secundarias son las pérdidas de forma, y tienen lugar en las transiciones (estrechamientos o expansiones de la corriente), codos, válvulas y en toda clase de accesorios de tubería.





Si la conducción es larga (oleoductos, gasoductos, etc.) las pérdidas secundarias tienen poca trascendencia, pudiendo a veces desprejarse; o bien se tienen en cuenta hasta el final. Si la conducción es corta y complicada (por ejemplo el flujo de gasolina y de aire en un carburador) las pérdidas secundarias pueden jugar un papel muy importante y hasta incluso se pueden desprejarse las pérdidas primarias. De acuerdo con la importancia de estas pérdidas, las tuberías se clasifican de la siguiente manera:

1. Cortas;  $l < 4r$ , donde  $r$  es el radio hidráulico y  $l$  es la longitud de la conducción. En estas tuberías cortas, las pérdidas primarias son desprejiables en comparación con las pérdidas secundarias.
2. Medias;  $400r > l > 4r$ ; tienen igual trascendencia las pérdidas primarias como las secundarias.
3. Largas;  $l > 400r$ ; las pérdidas secundarias son desprejiables si se les compara con las pérdidas primarias.

#### PÉRDIDAS PRIMARIAS.

Si se tiene una tubería horizontal con un diámetro constante  $D$  por la que circula un fluido cualquiera, cuya velocidad media en la tubería es  $v$ . La energía en el punto 2 será igual a la energía en el punto 1 menos la energía perdida entre los puntos 1 y 2, (Ver Fig. IV-1) en otras palabras se cumple la ecuación de Bernoulli con pérdidas y queda de la manera siguiente:

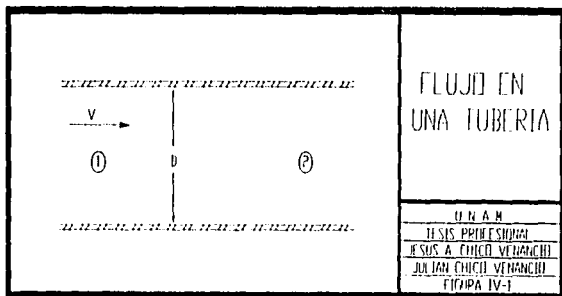
$$P_1/\rho g + Z_1 + (v_1)^2/2g - H_{1-2} = P_2/\rho g + Z_2 + (v_2)^2/2g$$

Para el ejemplo:

$Z_1 = Z_2$  (tubería horizontal) y  $V_1 = V_2$  (sección transversal constante). Quedando:

$$P_1 - P_2/\rho g = H_{1-2} = H_{p1-2}$$

Donde  $H_{p1-2}$  = pérdidas primarias en 1 y 2.





## ECUACIÓN GENERAL DE PÉRDIDAS PRIMARIAS.

Los manuales de hidráulica contienen tablas, ábacos y nomogramas para el cálculo de  $H_{p1-2}$ , pero hay tablas que solo sirven para tuberías de fundición, otras solo se utilizan únicamente para el agua.

A finales del pasado siglo experimentos realizados con tuberías de agua de diámetro constante demostraron que la pérdida de carga era directamente proporcional al cuadrado de la velocidad media en la tubería y a la longitud de la tubería e inversamente proporcional al diámetro de la misma y se expresa en la ecuación siguiente:

$$H_{fp} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Esta es la ecuación de DARCY-WEISBACH, donde:

$H_{fp}$  = pérdida de carga primaria.

$f$  o  $\lambda$  = coeficiente de fricción o coeficiente de pérdida de carga primaria.

$L$  = Longitud de la tubería.

$D$  = Diámetro de la tubería.

$V$  = velocidad media del fluido.

Su uso es universal en libros y manuales de hidráulica, las tablas, curvas, ábacos, etc., a que aludíamos al comienzo de la sección solo sirven para encontrar el coeficiente  $f$  que utilizado en la ecuación anterior nos da las pérdidas primarias.

El factor  $\lambda$  es adimensional y depende de la velocidad ( $v$ ), del diámetro ( $D$ ), de la densidad ( $\rho$ ), de la viscosidad ( $\eta$ ), y de la rugosidad absoluta ( $k$ ), esto dicho de otro modo queda como:

$$\lambda = f(v, D, \rho, \eta, k)$$

Siendo  $\lambda$  adimensional queda de la manera siguiente:

$$\lambda = f(vD\rho/\eta, k/D)$$

Por lo tanto en el caso más general el coeficiente de pérdidas primarias ( $f$  o  $\lambda$ ) esta en función de dos variables adimensionales las cuales son el Número de Reynolds ( $Re$ ) y la Rugosidad Relativa ( $k/D$ ).

Donde:

$k$  = rugosidad absoluta.

$D$  = Diámetro de la tubería.

Si  $Re$  es muy pequeño (régimen laminar)  $f$  depende sólo de  $Re$ , mientras que si  $Re$  es demasiado grande (régimen turbulento)  $f$  únicamente depende de la rugosidad relativa





y para una misma tubería, como la rugosidad relativa es constante,  $f$  también será constante.

La tabla siguiente muestra diversas ecuaciones para el cálculo del coeficiente de pérdidas primarias ( $f$ ).

TABLA IV-1 COEFICIENTE  $f$  PARA TUBERÍAS COMERCIALES.

TUBERÍAS	RÉGIMEN	FORMULA	AUTOR
Lisas y Rugosas	Laminar ( $Re < 2000$ )	$f = 64/Re$	Poiseuille
Lisas	Turbulento (Ø) $2000 < Re < 100,000$	$f = 0.316/(Re)^{1/4}$	Blasius
Lisas	Turbulento (Ø) $Re > 100,000$	$1/(f)^{1/2} = 2 \log_{10} \times (Re(f)^{1/2}) - 0.8$	Karmán-Prandtl (1ª. ecuación).
Rugosas	Turbulento (zona de transición)	$1/(f)^{1/2} = -2 \log_{10} \times ((k/D)/3.7 + 2.51/Re(f)^{1/2})$	Colebrook
Rugosas	Turbulento (zona final)	$1/(f)^{1/2} = 2 \log_{10} D/2k + 1.74$	Karmán-Prandtl (2ª. ecuación)

⊗ La corriente no se convierte rápidamente de laminar a turbulenta. Existe una zona en que el régimen es mixto.

Desde mediados de este siglo se ha venido utilizando un ábaco llamado diagrama de Moody, teniendo una gran difusión por todo el mundo, y entre sus cualidades se encuentran:

- resolver todos los problemas de pérdidas primarias en tuberías con cualquier diámetro, cualquier caudal y material de tubería.
- Es usado para determinar el coeficiente  $f$ , el cual se lleva a la ecuación de Darcy-Weisbach.
- El diagrama de Moody esta construido en papel doblemente logarítmico. En el se encuentran representadas graficamente las ecuaciones presentadas en la tabla anterior.
- Es un diagrama adimensional, por lo que es utilizable con cualquier sistema coherente de unidades.
- Incorpora una curva de trazos, que separa la zona de transición de la zona de completa turbulencia. Esta curva de trazos es convencional.

Para hacer el calculo de las pérdidas primarias por el diagrama de Moody se deben de tener como datos conocidos el caudal ( $Q$ ), la longitud de la tubería ( $L$ ), el diámetro de la tubería ( $D$ ), viscosidad cinemática ( $\nu$ ), y la rugosidad absoluta ( $k$ ).

Cabe aclarar que si la tubería no es circular se debe sustituir el  $D$  por  $4R_h$  ( $R_h$  = radio hidráulico).





1. Según sea el tipo de material de la tubería se toma la rugosidad absoluta de tablas en manuales de tuberías.
2. Se calcula la rugosidad relativa ( $k/D$ ).
3. Se calcula el Número de Reynolds ( $Re$ ).
4. Se lee  $f$  en el diagrama de Moody.
5. Este valor se sustituye en la ecuación de Darcy-Weisbach y se calculan las pérdidas primarias.

La Fig. IV-2 presenta el diagrama de Moody.

### PÉRDIDAS SECUNDARIAS.

Estas pérdidas se calculan por medio de 2 métodos que a continuación mencionamos:

PRIMER METODO: ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE PÉRDIDAS SECUNDARIAS.

$$H_{re} = R \frac{v^2}{2g}$$

donde:

$H_{re}$  = Pérdida de carga secundaria.

$R$  = coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria.

$v$  = velocidad media en la tubería si se trata de codos, válvulas, etc.

En el esquema (Fig. IV-3) presentado a continuación podemos encontrar las posibles pérdidas secundarias de carga que existen en una conducción las cuales son:

a) Pérdida por entrada.

$$H_{re} = Re (V^2/2g)$$

siendo  $Re$  un coeficiente que depende de las condiciones de entrada.

b) Pérdida por ampliación.

$$H_{ra} = Ra (V^2/2g)$$

$Ra$  depende de la relación:

$$\frac{a_1}{a_2} \frac{(\text{área antes de la ampliación})}{(\text{área después de la ampliación})}$$

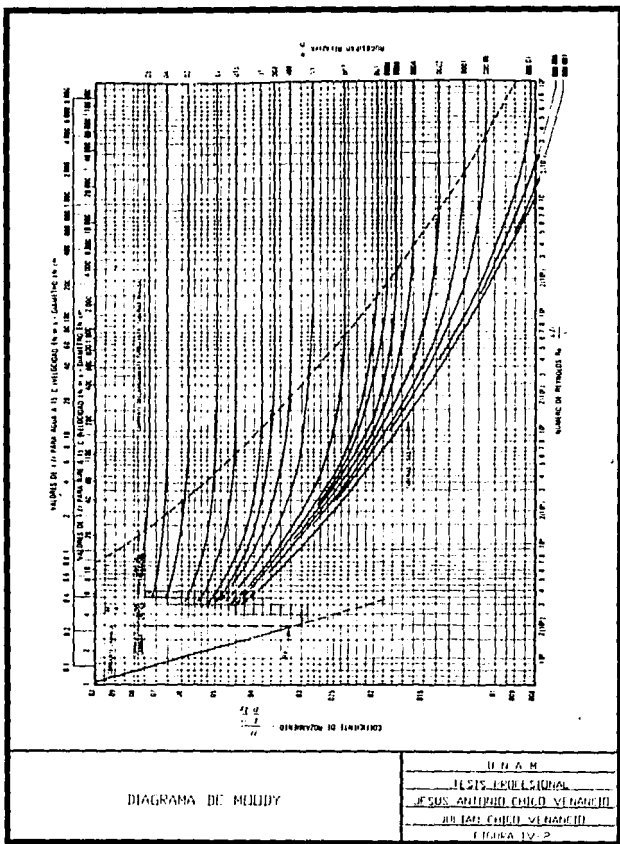
y de la rapidez de la ampliación (ángulo  $\beta$ ).

c) Pérdida por reducción.

$$H_{rr} = Rr (V^2/2g)$$

$Rr$  depende de la relación de diámetros ( $d_1/d_2$ )





FALLA DE UNION



d) Pérdidas por cambio de dirección gradual.

$$H_{ra} = R_d (V^2/2g)$$

$R_d$  depende de la relación

$$\frac{r}{d} \quad \frac{\text{(radio de la curva)}}{\text{(diámetro de la tubería)}}$$

y del ángulo  $\theta$  del cambio de dirección.

e) Pérdida por cambio brusco de dirección.

$$H_{ra} = (V_1 - V_2)^2/2g$$

f) Pérdida por obstrucción.

$$H_{ro} = R_o (V^2/2g)$$

$R_o$  depende del tipo de obstrucción y de la abertura dejada por la misma.

g) Pérdida por bifurcación.

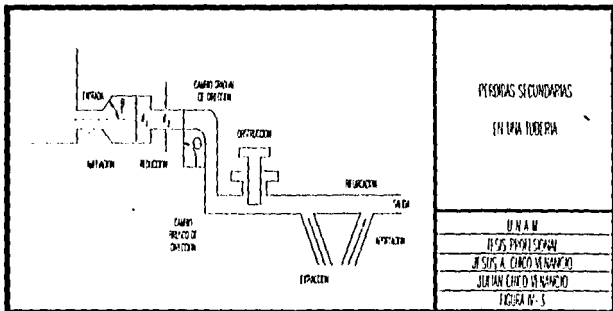
$$H_{rb} = R_b (V^2/2g)$$

$R_b$  depende del ángulo de la bifurcación y varía según se trate de una extracción o aportación a la tubería.

h) Pérdida por salida.

$$H_{rs} = R_s (V^2/2g)$$

$R_s$  depende de las condiciones de salida.







### SEGUNDO MÉTODO: LONGITUD DE TUBERÍA EQUIVALENTE.

Consiste en considerar las pérdidas secundarias como longitudes equivalentes, en otras palabras longitudes en metros de un trozo de tubería del mismo diámetro que produciría las mismas pérdidas de carga que los accesorios en cuestión. Para esto se aplica la ecuación de las pérdidas primarias modificada de la siguiente forma.

$$H_r = f \frac{(L + \sum Leq)}{D} \frac{V^5}{2g}$$

donde:

$H_r$  = Suma total de pérdidas primarias y secundarias.

$f$  = coeficiente de pérdidas del diagrama de Moody.

$L$  = longitud total de los tramos rectos de tuberías.

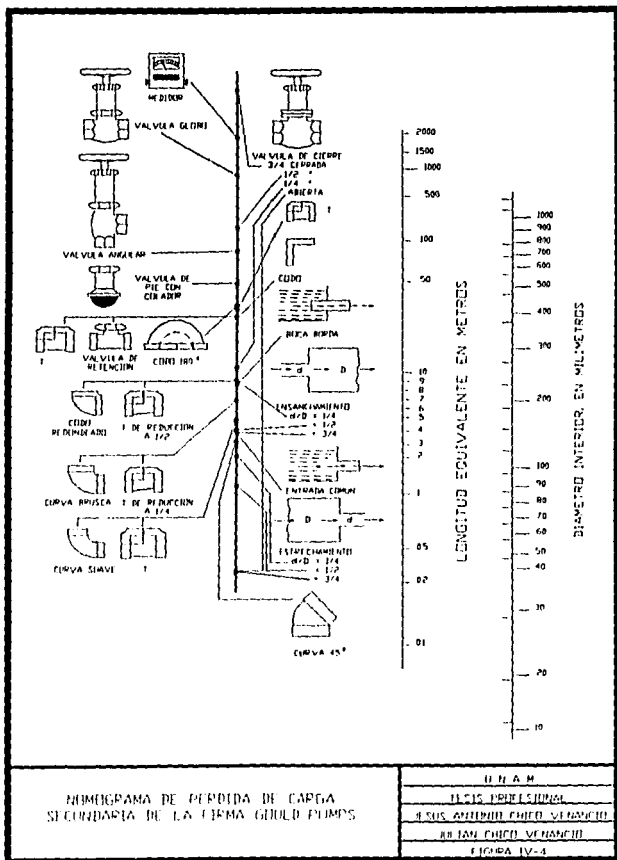
$\sum Leq$  = Sumatoria de las longitudes equivalentes a los accesorios diversos.

$V$  = velocidad media en la tubería.

El Nomograma que se muestra a continuación (Fig. IV-4) consta de tres escalas: en la que uniendo con una recta el punto de la escala izquierda correspondiente al accesorio de que se trata con el punto de la escala de la derecha correspondiente al diámetro interior de la tubería, el punto de intersección de esta recta con la escala central nos da la  $Leq$  del accesorio.

Este valor se sustituye en la ecuación anterior y podemos obtener el valor de las pérdidas. Este nomograma nos sirve como un ejemplo para demostrar la aplicación de este método.







## LÍNEAS DE CARGA TOTAL Y DE PRESIÓN.

Frecuentemente para el estudio del flujo en sistemas de tubos son útiles los conceptos de la línea de carga total y la de la línea de presión. En cualquier punto que se ubique en el tubo se puede representar la cantidad  $(p/\rho g + V^2/2g)$  como una ordenada vertical por encima de la línea central del tubo. La línea que junta las partes superiores de tales ordenadas se le conoce con el nombre de línea de carga total o línea de energía, y su altura sobre el plano horizontal de referencia representa la carga total del fluido con relación al plano de referencia. (Se acostumbra, en un diagrama representar la carga total como ordenada, contra la longitud del tubo tomada como abscisa.) En un depósito abierto que contenga un líquido en reposo, la línea de carga total concuerda con la superficie libre; cuando existe una disposición uniforme de energía la línea total de carga adopta una inclinación uniforme hacia abajo en dirección del flujo; donde hay una disipación concentrada de energía (como en un cambio de sección súbito) existe un escalón que disminuye en forma brusca en la línea de carga total. Si se incorpora energía mecánica al fluido (mediante una bomba como ejemplo) la línea de carga total se manifiesta como un escalón hacia arriba. Por otro lado, una turbina toma energía del fluido y con esto provoca un escalón hacia abajo en la línea de carga total.

Cuando se traza una línea de carga total, se hacen ciertas aproximaciones convencionales. Se ha visto que las pérdidas de cargas resultantes de las curvaturas, cambios de sección, y otros accesorios en un tubo, realmente no se concentran en un punto puesto que su causa en forma primordial es debido a la continuación de la turbulencia corriente abajo. No obstante, se acostumbra representar la pérdida por un escalón abrupto en la línea de carga total. Tampoco se logra la distribución de velocidad a través del tubo, esto es el resultado del Número de Reynolds del flujo y de la rugosidad superficial del tubo, en cuanto el fluido entra al tubo. La "longitud de entrada" en la cual se desarrolla el patrón normal de velocidad es con reiteración cerca de 50 veces el diámetro del tubo, y a través de esta longitud varía un poco el valor de  $f$  apropiado en la ecuación de Darcy-Weisbach. Sin embargo para muchos tubos la longitud de entrada equivale a una proporción pequeña de la longitud total; se encuentra un mínimo error en la suposición acostumbrada de que la pendiente de la línea total de carga es uniforme a través de toda la longitud de un tubo uniforme o constante.

La línea de presión o línea de gradiente hidráulico se obtiene graficando valores de  $p/\rho g$  verticalmente por encima de la línea central del tubo. Por lo que se encuentra a una distancia  $V^2/2g$  abajo de la línea de carga total. Si la línea de presión y el eje del tubo concuerdan en cualquier punto, entonces la presión manométrica dentro del tubo es nula (vale cero), es decir, es atmosférica. Un tubo que se eleva por encima de su línea de presión, tiene una presión negativa en su interior y se conoce como un sifón. La presión manométrica no puede por ningún motivo descender por abajo de 100 KPa (si la presión atmosférica es de ese valor) por que ese límite correspondería a un vacío perfecto y el flujo se detendría. No obstante, el flujo de un líquido en un tubo se detendría casi con certeza antes de que la presión disminuyera a este valor porque el aire y otros gases disueltos en el líquido saldrían de solución y se acumularían en la parte superior del sifón con una suficiente cantidad para formar un cierre de aire. Aún si el líquido no contuviera gases disueltos, al disminuir la presión a la presión del vapor del líquido a esa temperatura, el mismo se vaporizaría. Debido a estas razones,





la presión en una tubería para agua no debe disminuir por abajo de 75 KPa manométricos. Esto sugiere que la línea de presión no debe de estar a más de cerca de 7.64 m. por debajo del tubo, aún cuando es posible tener sifones con líneas de presión mínimamente más bajas, ya que las burbujas de gas que salen desde el líquido disminuyen la densidad media de éste.

Por supuesto, para comenzar el flujo de líquido en un sifón, debe extraerse el aire por algún medio y también deberá eliminarse el aire subsecuentemente acumulado en el punto más alto, si el flujo debe continuar. Se pueden usar válvulas de flotador automáticas para hacer esto. Cada que sea posible, debe eludirse la presión subatmosférica en las líneas de tubería, mediante mejoras en el diseño del sistema.

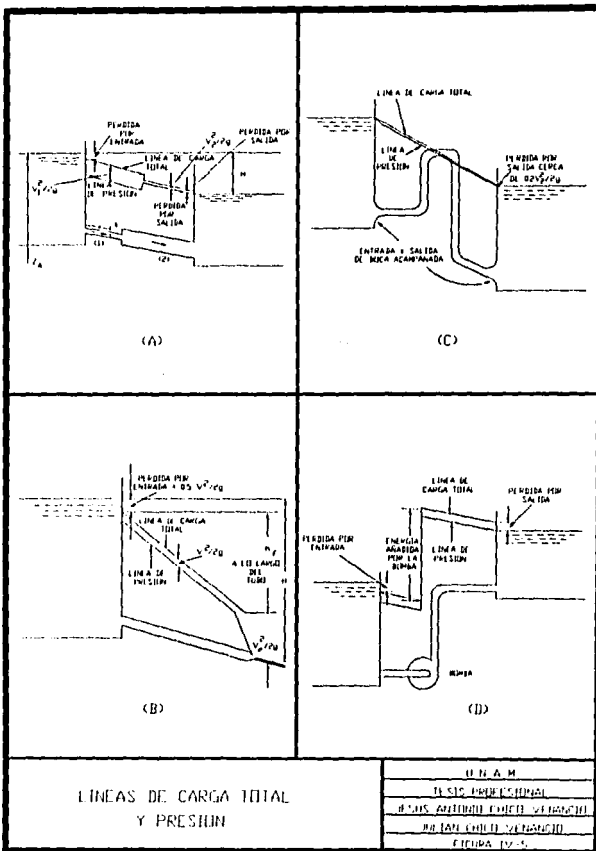
La figura (IV-5a) que se presenta a continuación ilustra las líneas de carga total y de presión para el flujo permanente de un líquido en una tubería que conecta dos depósitos. Se supone que todas las juntas son de cambio súbito. Así si  $V_1$  representa la velocidad promedio en el punto (1), existe una pérdida de carga de aproximadamente  $0.5 V_1^2 / 2g$  en la entrada y ésta se representa por el escalón descendente en la línea de carga total en ese punto. A lo largo del tubo (1), que se supone uniforme, se pierde carga y esto se debe a la fricción, a un régimen uniforme, por lo que, la línea de carga total tiene una pendiente que descende en forma constante. Para el agrandamiento súbito se representa la pérdida  $(V_1 - V_2)^2 / 2g$  por medio de un escalón abrupto descendente en la línea de carga total. La carga que se pierde de forma uniforme en el tubo (2) debido a la fricción, se representa por la pendiente uniforme descendente de la parte correspondiente de la línea de carga total y, finalmente, la pérdida por salida  $V_2^2 / 2g$  se representa por un escalón abrupto hacia abajo, esto al final de la línea.

La línea de presión se localiza en todos los puntos a una distancia  $V_1^2 / 2g$  por debajo de la línea de carga total. En el agrandamiento súbito ocurre un escalón hacia arriba en la línea de presión.

Si el fluido es descargado en forma libre hacia la atmósfera desde el extremo de salida del tubo, la presión que se manifiesta en ese extremo de salida del tubo, debe ser atmosférica y en flujo permanente la suma de las pérdidas de carga (incluyéndose la carga de velocidad de salida  $V_2^2 / 2g$ ) es equivalente a la diferencia vertical entre el nivel de la salida del tubo y la superficie libre en el depósito de entrada. La figura (IV-5b) ilustra lo anteriormente mencionado.

En la misma figura (IV-5c) y (IV-5d) se ilustran otros ejemplos adicionales de líneas de carga total y de presión.



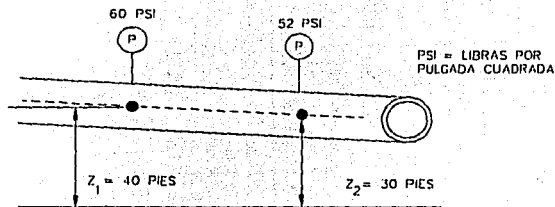


# FALLA DE ORIGEN



## EJEMPLO.

¿Cuales son las pérdidas por fricción en la tubería del punto 1 al punto 2?  
Densidad relativa 1.2



Tomando como base la ecuación general de balance.

$$L_1(EC_1 + EP_1 + EPe_1 + U_1) + Q - \tau = L_2(EC_2 + EP_2 + EPe_2 + U_2) + \frac{d(ME)}{dt}$$

En este caso  $L_1 = L_2$ ;  $\tau = 0$

y como no hay acumulación  $\frac{d(ME)}{dt} = 0$

Si no hay cambio de energía  $U_1 = U_2$

$$L (\Delta EC + \Delta EP + \Delta Pe) = Q$$

Las pérdidas por fricción son iguales al calor perdido. Si el fluido es incompresible  $\Delta EC = 0$

$$\Delta EP + \Delta Pe = -\frac{\sum F}{L}$$

$$g \Delta z + \Delta(PV) = -\frac{\sum F}{L} \quad \text{para fluido incompresible}$$

$$g \Delta z + \frac{\Delta P}{\rho} = -\frac{\sum F}{L}$$

Calculando la Energía potencial





$$\Delta z g = (30 - 40) \text{ ft} \times \frac{0.305 \text{ m}}{1 \text{ ft}} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = -29.92 \text{ J/kg}$$

Energía de presión

$$\frac{\Delta P}{\rho} = (52 - 60) \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \times \frac{1 \text{ atm}}{14.7 \text{ lb/ft}^3} \times \frac{101000 \text{ Pa}}{1 \text{ atm}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1200 \text{ kg}}$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = -45.8 \frac{\text{Pa m}^3}{\text{kg}} \times \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2 \text{ m}^3 \text{ Pa}} = -45.8 \text{ J/kg}$$

Pérdidas de fricción.

$$-\frac{\sum F}{L} = -29.92 \text{ J/kg} - 45.8 \text{ J/kg} = -75.72 \text{ J/kg}$$

Por lo tanto las pérdidas de fricción son de 75.72 J/kg ó 25.3 ft lb/lb





## IV.2 BOMBAS

**DEFINICIÓN.-** Una bomba se puede enunciar como aquella máquina empleada para transportar, o aspirar un fluido, líquido o aerofirme. Por lo que podemos decir a grandes rasgos que las bombas se utilizan para cambiar la posición de un cierto fluido.

En una forma general, la palabra "bomba" describe a una máquina o dispositivo que se usa para mover un líquido incompresible.

Todo cuerpo sólido, líquido o gas es compresible. Sin embargo en las bombas, la densidad del fluido no varía de una manera muy apreciable y se considera constante en su diseño, por lo que se puede suponer que existe un flujo incompresible.

Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Este recibe energía mecánica, que puede proceder de un motor térmico, eléctrico etc., y tiene la capacidad de convertirla en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad.

### CLASIFICACIÓN.

Siendo tan variados los tipos de bombas que existen hoy en día, es conveniente hacer una adecuada clasificación. La clasificación del "HYDRAULIC INSTITUTE" (tabla IV-1) se considera como la más completa, este instituto tiene a más de cincuenta compañías fabricantes de equipo de bombeo en el mundo entero como sus miembros, además se ha preocupado por mantener al día los llamados "standard".

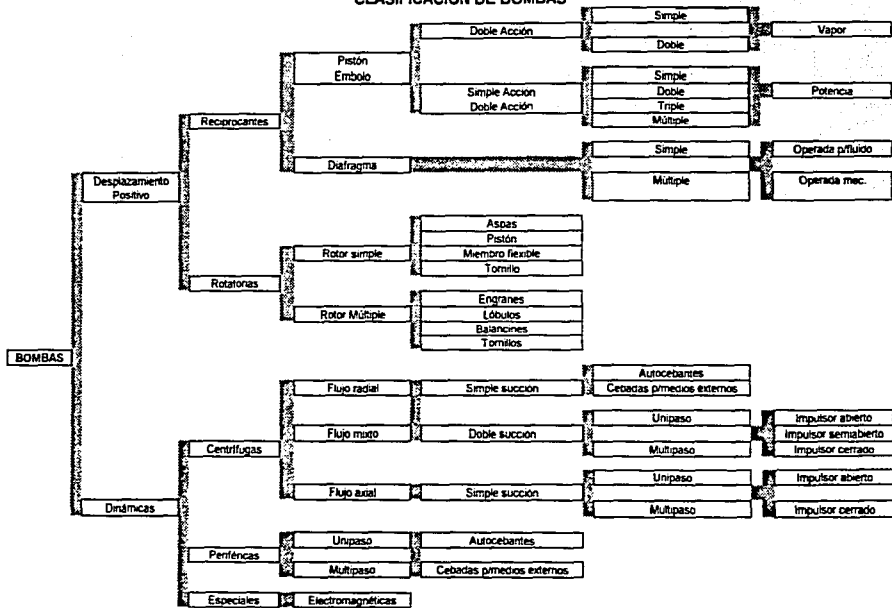
De acuerdo a la clasificación siguiente se permite apreciar toda la diversidad de tipos que existen y si a todo esto agregamos materiales de construcción, tamaños diferentes para manejos de gastos y presiones sumamente variables y los diferentes líquidos a manejar, etc., comprenderemos la gran importancia que tiene este tipo de maquinaria.

A continuación daremos una descripción generalizada de las Bombas de Desplazamiento Positivo y las Bombas Dinámicas.





TABLA IV-2  
CLASIFICACIÓN DE BOMBAS





## BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.

El nombre de desplazamiento positivo tal vez no es el más adecuado, pero sí el más usual. Proviene de una traducción literal de "Positive Displacement Pumps".

En estas bombas, el fluido que se desplaza siempre está contenido entre el elemento impulsor que puede ser un émbolo, un diente de engrane, un aspa, etc., y la carcasa o el cilindro. Las bombas de desplazamiento positivo se dividen en dos grupos principales: el de las bombas reciprocantes para manejo de líquidos y gases, operadas por vapor y mecánicamente; y el de las bombas rotatorias (engranes, espas, levas, tornillos, etc.) que constituye un grupo cada vez más numeroso y variado, ya que no hay industria que no posea algún tipo de ellas. Además cabe mencionar las transmisiones y controles hidráulicos y neumáticos, así como muchos de los mecanismos de control automático.

**BOMBAS RECIPROCANTES.**- Las bombas reciprocantes adicionan energía al sistema fluido por medio de un pistón que actúa contra un líquido confinado. Los principios de la dinámica de fluidos, presentan poca importancia en este tipo de bombas, puesto que el flujo del fluido puede ser determinado por la geometría de la bomba. El pistón puede ser accionado ya sea por una máquina de vapor o por un motor eléctrico. Por cada carrera de pistón, la bomba descarga una cantidad fija de fluido. La cantidad de fluido dependerá solamente del volumen del cilindro y del número de veces que se mueve el pistón a través del cilindro. La descarga real puede ser menor que el volumen de carrera del cilindro, ya sea por fugas a través del pistón o porque éste no se llene completamente. Por consiguiente, la eficiencia volumétrica puede ser definida como la relación entre la descarga real y la descarga basada en desplazamiento del pistón. La eficiencia para bombas con un buen mantenimiento, debe ser cuando menos 95%.

Estas bombas son particularmente útiles para bombear fluidos viscosos, debido a que la alta proporción de esfuerzo cortante que actúa sobre las paredes del cilindro sirve como un empaque adicional. También resulta satisfactoria para obtener altas presiones y, debido a su característica de desplazamiento positivo, algunas veces se usa para medir fluidos. Los líquidos que contiene sólidos abrasivos, no deben ser bombeados con una bomba reciprocante, debido al daño que sufren las superficies maquinadas.

**CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE BOMBAS RECIPROCANTES.**- Las características de descarga de estas bombas son las siguientes: Las válvulas de descarga dejan salir fluido hasta que el pistón llega casi al final de su carrera, esto es cuando el pistón se detiene e invierte su movimiento. Durante parte del ciclo de bombeo el flujo es cero, sin embargo, puede mantenerse el flujo en la línea de descarga aproximadamente constante, dependiendo del diseño de la bomba. Las bombas de doble acción proporcionan un flujo constante a la línea de descarga. Las bombas dúplex presentan la descarga de un cilindro desplazada media carrera con respecto a la descarga del otro. Puede obtenerse un flujo casi libre de pulsaciones, diseñando para su operación una bomba dúplex, triplex o múltiplex.





La capacidad de flujo de una bomba reciprocante varía directamente con la velocidad. Las unidades usuales incluyen diseños entre 20 y 200 carreras del pistón por minuto.

Un maquinado y un mantenimiento cuidadoso pueden proporcionar a esta clase de bombas una buena eficiencia. Algunas de sus desventajas son su tamaño y su alto costo inicial y de mantenimiento. Se encuentran disponibles en varios diseños, en tal forma que puede hacerse una amplia selección.

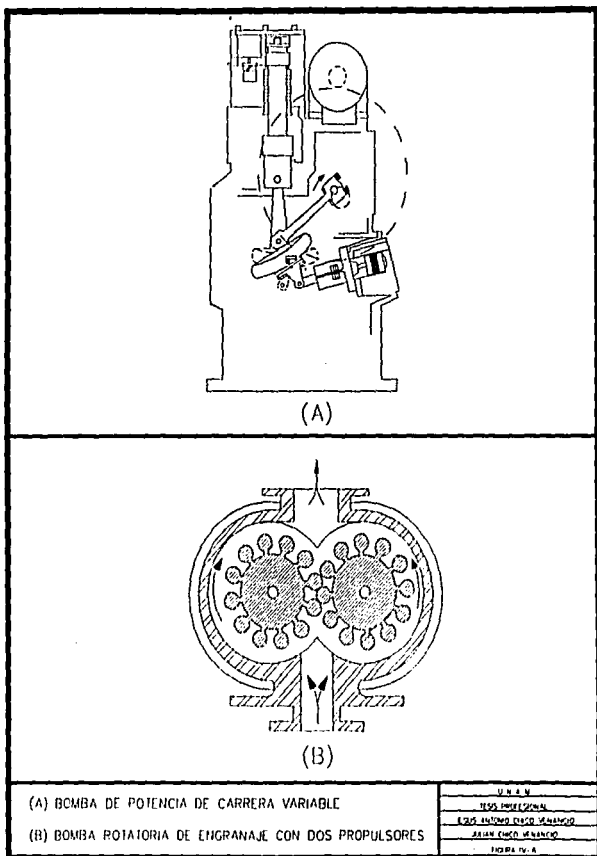
**BOMBAS ROTATORIAS.**- Este tipo de bombas pueden ser caracterizadas por el método de toma y descarga del fluido. Al contrario de las bombas reciprocantes, que dependen de válvulas de retén para controlar la carga y la descarga, una bomba rotatoria atrapa una cantidad de líquido y lo mueve hasta el punto de descarga. Este principio se basa en que la parte no dentada de los engranes, a la entrada de la bomba proporciona un espacio para ser llenado por el líquido. Cuando el engrane gira, el líquido es atrapado entre el diente y el cuerpo de la bomba y posteriormente liberado en la línea de descarga.

Las bombas rotatorias pueden manejar casi cualquier líquido libre de abrasivos y son esencialmente indicadas para fluidos de alta viscosidad. Cierta acción lubricante del fluido disminuye el desgaste.

**CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS ROTATORIAS.**- Son capaces de entregar una capacidad aproximadamente constante, contra cualquier presión dentro de los límites de diseño de la bomba. El flujo de descarga proveniente de una bomba rotatoria varía directamente con la velocidad. La descarga está casi libre de pulsaciones, particularmente para las bombas de engranes. Las bombas rotatorias encuentran una gama muy amplia de aplicación. Son capaces de bombear fluidos de cualquier viscosidad con la única restricción de que los fluidos estén libres de materiales abrasivos, pues esto dañaría el ajuste de las partes maquinadas.

La figura IV-6 presenta una bomba reciprocante y una rotatoria de engranaje.







## BOMBAS DINÁMICAS

Entre las bombas "rotodinámicas" las de mayor importancia son las bombas centrífugas por lo que enfocaremos nuestra atención en este tipo de bombas.

**BOMBAS CENTRÍFUGAS.-** Se usan ampliamente en las industrias de procesos debido a la simplicidad de su diseño, bajo costo inicial, bajo mantenimiento y flexibilidad de aplicación. Se han construido bombas centrífugas para bombear cantidades tan pequeñas como unos cuantos galones por minuto con una pequeña altura de carga y también para bombear cantidades tan considerables como 605 000 gal/min. Contra alturas de carga de 310 ft. En su forma más simple, la bomba centrífuga consiste en un impulsor o rodete que gira dentro de una caja circular. El fluido entra a la bomba cerca del centro del impulsor hasta los extremos de las aletas impulsoras.

Esta carga de velocidad se convierte en una carga de presión cuando el fluido sale de la bomba. El impulsor o rodete es el corazón de la bomba centrífuga. Este consiste de cierto número de aletas curvas u hojas con una forma tal, que proporcionan un flujo suave de fluido entre las hojas.

Las cajas de las bombas centrífugas pueden variar su diseño, pero la principal función de ellas es convertir la energía de velocidad impartida al fluido por el impulsor, en energía de presión útil. Además la caja sirve para contener el fluido y proporcionar una entrada y salida para la bomba. Las cajas pueden ser del tipo voluta o del tipo difusor.

En las cajas del tipo voluta el impulsor descarga dentro de un área del flujo que se expande continuamente. Este aumento en el área del flujo origina que la velocidad del fluido disminuya gradualmente, reduciendo por tanto la formación de remolinos. Por este medio, la mayor parte de la energía de la velocidad se convierte en energía de presión con pérdidas mínimas.

La caja de bomba con difusores tiene guías estacionarias que ofrecen al líquido una trayectoria estrecha del impulsor a la caja. Los difusores sirven para el mismo propósito que la voluta y ambos tipos de bombas tienen aproximadamente la misma eficiencia. Las principales aplicaciones de las cajas de bomba centrífuga con difusores se refieren a las bombas de pasos múltiples y alta presión para usarse con impulsores de flujo mezclados.

Una bomba centrífuga con un impulsor, recibe el nombre de bomba de paso sencillo. Si la combinación carga-capacidad que va desarrollarse, es mayor que la que puede usarse con impulsor sencillo, puede usarse una operación de pasos múltiples. Podemos considerar las bombas de pasos múltiples como formadas por varias bombas de paso sencillo en una misma flecha, con el flujo en serie. En efecto, la descarga proveniente de una bomba de paso sencillo, se alimenta dentro del lado de succión de un segundo paso, donde se conserva la presión de descarga del primer paso. El fluido después de entrar al segundo paso, llevará la energía de presión desarrollada en el interior y así sucesivamente.

En la figura IV-7 se muestran bombas centrífugas de tipo voluta y tipo difusor.



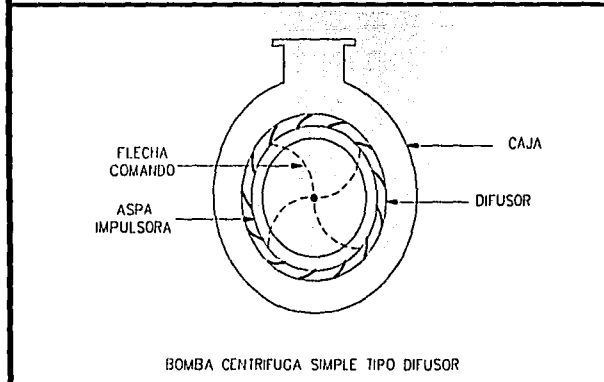
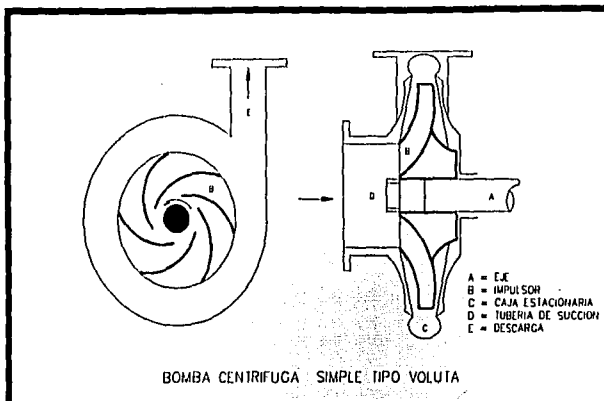


**CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN DE LAS BOMBAS CENTRIFUGAS.**- Una bomba centrífuga generalmente opera a velocidad constante y la capacidad de la bomba depende solamente de la presión total de descarga, el diseño y las condiciones de succión. La mejor manera de describir las características de operación de una bomba centrífuga es usando una curva característica. La figura siguiente muestra una curva típica de una bomba centrífuga. En la que es de gran importancia notar, que para cualquier velocidad constante, la bomba funcionará a lo largo de esta curva y no en otros puntos. Si ponemos por ejemplo que sobre la curva mostrada en la figura, a 200 gal/min, la bomba generará una carga de 87 pies. Si se incrementa la carga a 100 pies, la salida será de 120 gal/min. No es posible disminuir la capacidad a 120 gal/min con una carga de 87 pies, a menos que se acelere la descarga de manera que se genere en realidad al interior de la bomba una carga de 100 pies. En las bombas con impulsores de velocidad variable, como las de turbina de vapor, se puede cambiar la curva característica.

Se debe de recordar que la carga que se produce será la misma en cualquier líquido de la misma velocidad. No obstante, el aumento de presión variará en proporción a la densidad relativa. Las viscosidades menores a los 50 centipoises no afectan materialmente a la carga.

Las bombas centrífugas de etapa simple existen en capacidades de hasta 50 000 gal/min. o más, para cargas (presiones) de hasta 1600 pies. Se pueden hallar una gran diversidad de diseños para usos particulares (Ver Fig IV-8).

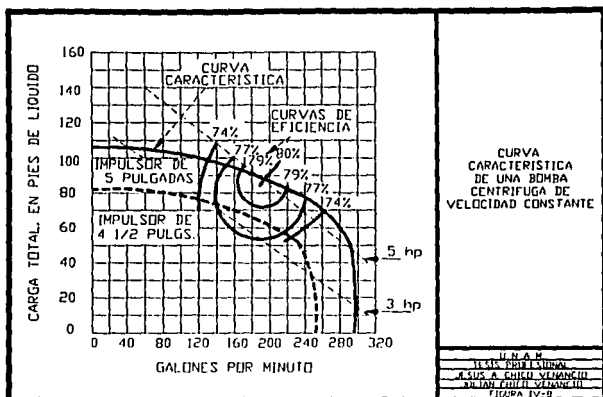




BOMBAS CENTRIFUGAS

U. N. A. M.
TECN. PROFESIONAL
RESIS. ANTIORO. CUSCO. VENEZUELA
ALIAN. CUSCO. VENEZUELA
FIGURA IV-2





### SELECCIÓN DE BOMBAS.

Al hacer la selección de una bomba para una aplicación específica, el ingeniero se interesa en varias características específicas de la bomba: la capacidad, la energía o carga suministrada al fluido, la potencia requerida para accionar la bomba y la eficiencia de la unidad.

Para que se obtengan las mejores características, el ingeniero necesita de cierta información pertinente al problema particular. Como puede ser:

1. La naturaleza del fluido que será transportado, es decir saber si es corrosivo o no, si se encuentra caliente o frío y cuál es su presión de vapor, si es viscoso o no y si contiene sólidos en suspensión.
2. La capacidad necesaria, así como la gama de capacidades que la requerirán en su operación
3. Las condiciones de succión. ¿Existe una carga de succión o una carga de sustentación?
4. Las condiciones de descarga. ¿Que presión se requiere? ¿Cuál es la fricción del fluido que debe ser vencida?
5. El tipo de servicio. ¿Es continuo o intermitente?
6. La naturaleza de la potencia disponible para accionar la bomba.
7. La localización de la bomba. ¿Existe espacio disponible? ¿Que espacio se requiere?

Para escoger una bomba se requieren varias etapas:







- Elaborar un diagrama de la bomba y el sistema de bombeo, de tal forma que pueda calcularse la presión total necesaria.
- Precisar la capacidad de acuerdo con las condiciones locales dejando un margen de seguridad para la variación. Analizar las condiciones del líquido tales como el peso específico, viscosidad, etc.
- Elegir la clase y el tipo de bomba basándose en los factores que a continuación se enuncian:

#### FACTORES DE CONSIDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE BOMBA.

**BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO.-** Para tomar la determinación del uso de una bomba de desplazamiento positivo se consideran tres factores primordiales que son: presión, gasto y las siguientes características de los líquidos.

1. Temperatura.
  2. Condiciones de Viscosidad.
  3. Densidad.
  4. Índice de acidez - alcalinidad (pH).
  5. Presión de vaporización del líquido a la temperatura del bombeo.
  6. Materiales en suspensión, tamaño, naturaleza, etc.
  7. Condiciones de abrasión.
  8. Contenido de impurezas.
- Etcétera.

De acuerdo a las características generales de los diferentes tipos de bombas se llega a la determinación siguiente:

Las bombas de desplazamiento positivo: reciprocantes y rotatorias se aplican para las consideraciones siguientes:

RECIPROCANTE	ROTATORIAS
Gastos pequeños	Gastos pequeños y medianos
Presiones altas	Presiones altas
Líquidos limpios	Líquidos viscosos

**BOMBAS DINÁMICAS.-** En este caso las bombas dinámicas de tipo centrífugo son las más usadas, y son aplicables para:

1. Gastos grandes.
2. Presiones reducidas o medianas.
3. Líquidos de todos tipos, excepto viscosos.

Las bombas reciprocantes tuvieron mucho uso y su sustitución por las bombas centrífugas ha corrido al parejo de la sustitución del vapor por la energía eléctrica, como fuente de energía.

Debido a los progresos en los motores eléctricos, esto ha propiciado el desarrollo de las bombas centrífugas, que son mucho más ligeras y baratas.





Al principio las bombas centrífugas tenían desventaja por su baja eficiencia, sin embargo las mejoras obtenidas a base de investigaciones continuas, las ha puesto siempre a la cabeza en el aspecto competitivo. Tiene a su favor las condiciones de descarga constante, a una presión dada, que no tienen las reciprocantes, además de esto no presentan problemas de válvulas que son tan comunes en las bombas reciprocantes.

En la actualidad las bombas centrífugas cubren el campo de las altas presiones, que se logran mediante las bombas de varios pasos accionadas a altas velocidades.

En el aspecto de capacidades, las bombas centrífugas se han construido para gastos que van desde un galón por minuto a más de un millón de galones por minuto.

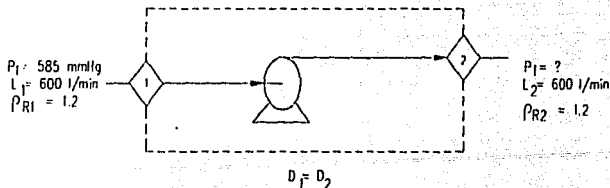
El diseño mecánico de las bombas centrífugas es bastante intrincado y la selección de una bomba apropiada para un uso particular, demanda conocimiento de la importancia de cada factor. Posiblemente la característica más importante, es el diseño apropiado de los anillos que se sellan entre la periferia de alta presión del impulsor y el área del cubo de baja presión.

De acuerdo a una encuesta hoy en día aproximadamente las 2/3 partes de las bombas usadas son centrífugas.

#### EJEMPLO.

Una bomba con una potencia de 5 caballos de vapor aumenta la presión de una corriente líquida que tiene una densidad de 1.2. La presión inicial de la corriente antes de entrar a la bomba es de 585 mm. de Hg. El gasto de líquido es de 600 litros por minuto. Calcúlese la presión a la descarga de la bomba en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  considerando en la bomba una eficiencia del 100%. El diámetro de entrada de la bomba es igual al de salida.

El diagrama de flujo es el siguiente:



Haciendo el planteamiento quedamos como:

Analizando las variables del balance general, la energía interna, la energía potencial y la energía cinética permanecen constantes. Al tener la bomba una eficiencia del 100% las pérdidas por fricción son cero.

El balance de energía queda como sigue:





$$\Delta U + \Delta u^2/2 + \Delta(PV) + \Delta z g = (Q - \tau - \Sigma F)/L$$

$$\Delta(PV) = -\tau/L \quad \text{como } \rho_1 = \rho_2$$

$$P_2/\rho - P_1/\rho = -\tau/L$$

El gasto como:

$$L = C_{ap} \rho_{H_2O} P_R$$

Haciendo cálculos:

$$L = 600 \text{ l/min. (1 kg/l) (1.2) (1 min./60 seg.)} = 12 \text{ kg/s}$$

Trabajo

$$P = (5 \text{ CV}) [75 \text{ kg m/s CV}] = 375 \text{ kg m/s}$$

$$\tau = 375 \text{ kg m/s (1 s/12 kg)} = -31.25 \text{ kg m/kg}$$

El signo negativo es porque se adiciona

La presión de entrada

$$P_1 = (585 \text{ mm Hg}) (1 \text{ atm}/760 \text{ mm Hg}) [10\,333 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ atm})] = 7\,953.7 \text{ kg}/\text{m}^2$$

El balance

$$(P_2/1\,200) - (7\,953.7/1\,200) = -(-31.25)$$

$$P_2 = 45\,453.7 \text{ kg}/\text{m}^2 = 4.54 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

Por lo tanto la presión de descarga de la bomba será de 4.54 Kg/cm<sup>2</sup>.





### IV.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR

**DEFINICIÓN.**- A manera muy general se dice que un intercambiador de calor es aquel dispositivo cuyo propósito fundamental es transferir el calor de un fluido a otro.

En las industrias de proceso, la transferencia de calor entre dos fluidos casi siempre es llevada a cabo en intercambiadores de calor. El tipo más común (de casco y tubo) es uno en el cual el fluido caliente y el frío no entran en contacto directo el uno con el otro, sino que están separados por una pared de tubos o una superficie plana o curvada. La transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la pared o la superficie de los tubos, a través de la pared de tubos o placa por conducción, y luego por convección al fluido frío.

#### CLASIFICACIÓN.

Comunmente se emplean tres categorías para clasificar los intercambiadores de calor:

- Regeneradores.
- Intercambiadores de tipo abierto.
- Intercambiadores de tipo cerrado o recuperadores.

En los regeneradores el fluido caliente fluye a través del mismo espacio seguido de un fluido frío en forma alternada con tan poca mezcla física como sea posible entre las dos corrientes.

Los intercambiadores abiertos son dispositivos en los que las corrientes del fluido de entrada fluyen hacia una cámara abierta y ocurre una mezcla física completa de las dos corrientes.

Los intercambiadores cerrados o recuperadores son dispositivos en los que las corrientes del fluido de entrada fluyen y en los cuales ocurre transferencia de calor entre dos corrientes fluidas que no se mezclan o no tienen contacto entre sí.

Cabe aclarar que este estudio estará dedicado a los intercambiadores de calor de tubo y coraza debido a que es el equipo más comúnmente usado y por su relevancia que estos poseen en el marco de las industrias de proceso.

#### INTERCAMBIADORES DE FLUJO Y CORAZA.

En las industrias de proceso cuando se manejan flujos más grandes se usa un intercambiador de tubos y coraza, que es el tipo más importante. Los flujos de estos intercambiadores son continuos.

Son usados muchos tubos en paralelo con uno de los fluidos que circula en su interior. Los tubos, se distribuyen en forma de manojo y están encerrados en una sola coraza, el otro fluido fluye por el exterior de los tubos, dentro de la coraza. El fluido frío entra y circula por los tubos en paralelo en una sola pasada, mientras el fluido caliente entra por el otro extremo y fluye a contracorriente por el exterior de los tubos.





Son usados deflectores o desviadores de tal manera que el fluido se vea forzado a fluir perpendicularmente por la batería de tubos en lugar de hacerlo en paralelo. Esta turbulencia adicional generada por el flujo cruzado ocasiona que aumente el coeficiente de transferencia de calor de la carcasa.

En la Fig. IV-9 (a) es mostrado el tipo de modelo de intercambiador de calor más simple de tubos y coraza, ya que este corresponde solamente a una pasada del fluido por los tubos y el otro fluido circula o pasa también una sola vez por la coraza por lo que se trata de un intercambiador 1-1 a contracorriente.

En la misma Fig. IV-9 (b) se muestra un intercambiador 1-2 paralelo-contracorriente. El líquido que fluye en los tubos circula dos veces y el líquido de la coraza fluye en una sola pasada. En la primera pasada por los tubos, el fluido frío fluye a contracorriente del fluido caliente de la coraza y en la segunda pasada por los tubos fluye en paralelo con el fluido caliente. Otro tipo de intercambiador opera con 2 pasadas por la coraza y 4 pasadas por el tubo. Algunas ocasiones son manejadas otras combinaciones, siendo lo tipos 1-2 y 2-4 los más comunes.

Otro modelo consiste en un intercambiador de flujo cruzado o transversal con una pasada por el tubo y el fluido de la coraza circulando a ángulos rectos con los tubos. De este tipo pueden haber tres modalidades:

1. Ninguno de los fluidos es mezclado cuando pasa por el intercambiador por lo que las temperaturas de los fluidos salientes de la sección calefactora no son uniformes y estarán más calientes de un lado que del otro.
2. Un fluido circula por un haz de tubos, por lo que no existe mezcla del fluido caliente en otras zonas diferentes a el tubo por el cual circula dicho fluido. Mientras que el otro fluido, que circula alrededor del haz de tubos, se mezclará entre si a lo largo del intercambiador de calor.
3. Ambos fluidos se mezclan conforme fluyen a lo largo del intercambiador, esto es, la temperatura de los dos fluidos será uniforme a través de la sección transversal y solamente variará en la dirección de la corriente, cabe aclarar que este tipo de distribución es menos importante que las otras dos.

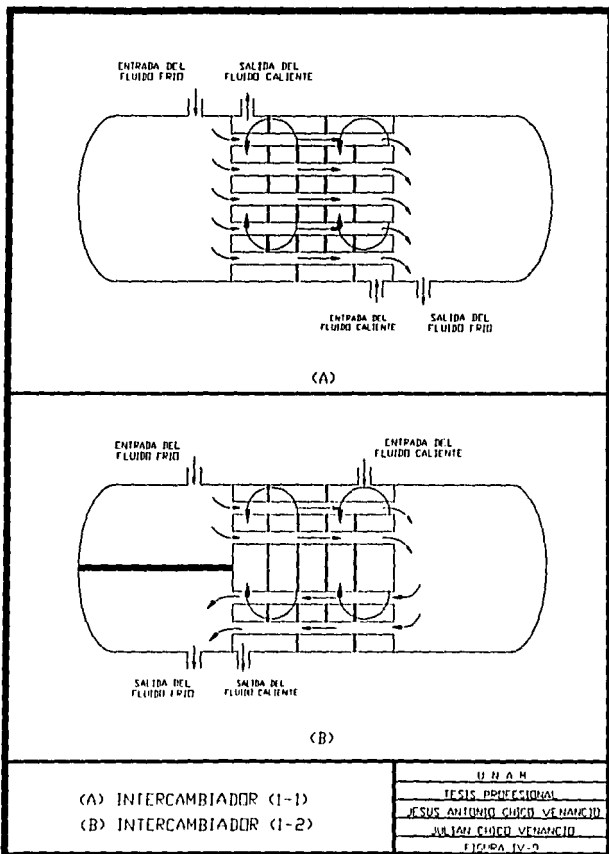
Existen muchas modalidades de estos equipos. Los intercambiadores comunes de coraza y tubo se usan ampliamente, debido a que pueden construirse con grandes superficies de transferencia de calor en un volumen relativamente pequeño, pueden fabricarse de aleaciones resistentes a la corrosión y son idóneos para calentar, enfriar, evaporar o condensar toda clase de fluidos.

#### SELECCIÓN PARA LA TRAYECTORIA DE LOS FLUIDOS CONFINADOS.

Para escoger la trayectoria de flujo de los fluidos confinados a través del intercambiador de calor son usadas varias consideraciones de acuerdo a ciertos criterios que a continuación se presentan:

- Se determina cual es el fluido más corrosivo de los dos y se hace pasar a este por los tubos debido a que es más fácil reparar los tubos que la coraza. Además se necesitan menos aleaciones costosas o componentes con recubrimiento cuando el fluido más corrosivo va por dentro de los tubos.







- Conviene introducir por el lado de la coraza el fluido de menor coeficiente individual de transferencia de calor.
- Es preferible que el fluido más sucio también sea pasado por los tubos, con esto se tiene un mejor control de velocidad del fluido y se mantiene una mejor limpieza química a través de los tubos y con esto es reducida la incrustación.
- Si son utilizados fluidos tóxicos normalmente es pasado por el lado de los tubos, debiendo usarse doble espejo para reducir la posibilidad de alguna fuga.
- Generalmente el fluido de mayor gasto es pasado por el lado de los tubos.
- El fluido que tenga mayor presión será pasado por el lado de los tubos, esto es consecuencia de que es más económico meter tubos gruesos que una coraza más gruesa.
- Generalmente el fluido más caliente va por el lado de la coraza.

De acuerdo a estos criterios cuando las características de los dos fluidos sean muy similares se hace un chequeo cruzado.

#### TIPOS PRINCIPALES DE CONSTRUCCION.

Los tipos de intercambiadores de calor principales de casco y tubo son los siguientes:

1. Intercambiador de calor de lámina de cierre tubular fija.
2. Intercambiador de calor de tubo en U.
3. Intercambiadores de anillo de cierre hidráulico.
4. Intercambiador de cabezal flotante exterior.
5. Intercambiador de cabezal flotante interno.
6. Intercambiador de cabezal flotante extraíble.

**INTERCAMBIADOR DE CALOR DE LÁMINA DE CIERRE TUBULAR FIJA.**- Este intercambiador es utilizado con mucho más frecuencia que cualquiera de los otros tipos. Las láminas tubulares están soldadas al casco. Generalmente, están extendidas más allá del casco y sirven como bridas a las que son sujetadas con pernos los cabezales del lado de los tubos. Esta construcción necesita que los materiales del casco y las láminas tubulares se puedan soldar entre sí.

Cuando esa soldadura no es posible se necesita utilizar una construcción del tipo de empaque "ciego". Este empaque no es accesible, es decir no es alcanzable para el mantenimiento o el reemplazamiento, una vez construida la unidad. Esta construcción se usa para condensadores superficiales de vapor, que funcionan en el vacío. No existen restricciones para el número de pasos del lado de los tubos. Los pasos de la coraza pueden ser uno o más, raramente se utilizan casos que tengan más de dos pasos.

Los tubos pueden llenar completamente el casco del intercambiador. El espacio de franqueo entre los tubos exteriores y el casco es sólo el mínimo necesario para su fabricación. Entre la parte inferior del casco y los desviadores, se debe dejar cierto espacio de franqueo para que los desviadores se puedan deslizar al interior del casco. Además las tolerancias de fabricación requieren un franqueo adicional entre la parte exterior de los desviadores y los tubos más externos. Los tubos pueden reemplazarse.





Los cabezales del lado del tubo, la cubierta del canal, los empaques, etc., permanecen accesibles para el mantenimiento y el reemplazamiento. Se puede acrecentar una dilatación diferencial entre el casco y los tubos, debido a diferencias de longitud que se provocan por la dilatación térmica. Se usan diversos tipos de juntas de expansión para excluir los esfuerzos excesivos que se deben a la dilatación.

**INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO EN U.** El haz de tubos consiste en una lámina tubular estacionaria, tubos en U (o de horquilla), desviadores o placas de soporte y espaciadores y tirantes apropiados. El haz de tubos se puede quitar del casco del intercambiador. Se proporciona un cabezal del lado del tubo (estacionario) y un casco integrado con cubierta que es soldada al casco mismo. Cada tubo tiene libertad para dilatarse o contraerse, sin reservas debidas a la posición de los otros tubos.

La ventaja que tiene el haz de tubos en U es de proporcionar el franqueo mínimo entre el límite exterior del tubo y el interior del casco, para todas las construcciones de haces de tubos desmontables. Los espacios de franqueo son de la misma dimensión que para los intercambiadores de calor de láminas tubulares fijas. El número de orificios tubulares en un casco dado es menor que para el intercambiador de casco y tubo fijo, por las restricciones de acodamiento de los tubos en un radio muy pequeño.

El diseño del tubo en U ofrece la ventaja de disminuir el número de juntas. En la construcción para presiones elevadas, esta característica es muy importante, puesto que disminuye tanto el costo inicial como el de mantenimiento. Para su limpieza existen limpiadores de tubos eléctricos, que pueden limpiar tanto tramos rectos como acodamientos. Además se pueden utilizar chorros hidráulicos con agua a través de toberas de rociamiento a alta presión.

**INTERCAMBIADOR DE ANILLO DE CIERRE HIDRÁULICO.** Su construcción es la menos costosa de los tipos de tubos rectos y haz desmontable. Los fluidos del lado de casco y el lado del tubo se retienen mediante anillos de empaque diferentes, separados por un anillo de cierre hidráulico y se colocan en la lámina tubular flotante. El anillo de cierre hidráulico lleva orificios de purga. Cualquier derrame, a través del empaque, pasa por los orificios de purga y, luego, cae al piso. Las fugas en los empaques no darán como resultado la mezcla de los dos fluidos al interior del intercambiador. La amplitud de la lámina tubular flotante tiene que ser adecuadamente grande para dejar margen para los empaques, el anillo de cierre hidráulico y la dilatación diferencial. A veces, se sujeta un faldón pequeño a una lámina tubular delgada para proporcionar la superficie necesaria de asiento para los empaques y el anillo de cierre hidráulico.

El espacio de franqueo entre el límite del tubo exterior y la parte interior del casco, es imperceptiblemente mayor que para los intercambiadores de tubo en U y de lámina tubular fija. El uso de un faldón de lámina tubular flotante aumenta el espacio de franqueo. Sin el faldón, el franqueo debe dejar un cierto margen para la distorsión de orificio tubular durante el laminado, cerca del borde exterior de la lámina tubular o para la soldadura del extremo del tubo en la lámina tubular flotante. La construcción de anillo de cierre hidráulico se restringe normalmente, al diseño de temperaturas por debajo de 375 °F y a servicios ligeros con agua, vapor, aire, aceite lubricante, etc. La







presión de diseño no sobrepasa 300 lb/plg<sup>2</sup> para intercambiadores de casco de tuberías y se limita a 150 lb/plg<sup>2</sup> para cascos de 24 a 42 plg. de diámetro.

**INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE EXTERIOR.-** El fluido del lado del casco se retiene mediante anillos de empaque que se comprimen dentro de un prensaestopas, mediante un anillo seguidor de junta. Esta construcción de haz desmontable acomoda la expansión diferencial entre el casco y los tubos y se utiliza para servicio de lado del casco, hasta de 600 lb/plg<sup>2</sup>, a 600 °F. No existen limitaciones sobre el número de pasos de lado de los tubos o su presión y su temperatura de diseño. El intercambiador de cabezal flotante exterior empaquetado es la fabricación del tipo de haz desmontable que se utiliza con mucha reiteración en el servicio de plantas químicas.

El faldón del casco y el tubo flotante, cuando está en contacto con los anillos del empaque, tiene un acabado fino de maquinado. Se inserta un anillo dividido de corte en una ranura del faldón de la lámina tubular flotante. Una brida de respaldo, deslizante, que se mantiene en servicio mediante el anillo de corte, se sujeta con pernos en la cubierta exterior del cabezal flotante.

La cubierta del cabezal flotante suele ser un disco circular. Con un número impar de pasos del lado del tubo, se puede colocar una tobera axial en esa cubierta de cabezal flotante. Si se requiere una tobera lateral, se reemplaza el disco circular ya sea con un cabezal en forma de plato o un barril de canal, que se sujeta con pernos entre la cubierta del cabezal flotador y el faldón de la lámina tubular flotante. El límite exterior del tubo se acerca a la parte interior del faldón; pero se retira más del interior del casco que en cualquier otra fabricación de las que se vieron anteriormente.

**INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE INTERNO.-** Este diseño se utiliza mucho en las refinerías petroleras. El haz de tubos es desmontable y la lámina tubular flotante se desliza (o flota) para acomodar diferentes dilataciones entre el casco y los tubos. El límite de tubo exterior se acerca al diámetro interno del empaque en la lámina tubular flotante.

Un anillo dividido de respaldo y un sistema de pernos retienen, normalmente, la cubierta del cabezal flotante en la lámina tubular flotante. Se sitúan más allá del casco y dentro de la cubierta del casco de diámetro mayor. Está última, el anillo dividido de apoyo y la cubierta del cabezal flotador se deben quitar antes de que pueda pasar el haz de tubos por el casco del intercambiador.

Con un número de par de pasos del lado del tubo, la cubierta del cabezal flotante sirve como cubierta de regreso para el fluido del tubo. Con un número impar de pasos, se debe dispersar una tubería con tobera desde la cubierta del cabezal flotante a través de la cubierta del casco. Se deben tomar sugerencias tanto para la dilatación diferencial como para el retiro del haz de tubos.

**INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE EXTRAIBLE.-** Su construcción es semejante a la del intercambiador de cabezal flotante interno con anillo dividido de respaldo, con la concesión de que la cubierta del cabezal flotador es sujeta en forma directa con pernos en la lámina tubular flotante. El haz de tubos se puede quitar del casco sin desmontar la cubierta del casco ni la del cabezal flotador. Esta





característica disminuye el tiempo de mantenimiento durante la inspección y las reparaciones.

El espacio grande de franqueo entre los tubos y el casco debe dejar espacio tanto para el empaque como para la sujeción con pernos a la cubierta del cabezal flotador. Este espacio de franqueo es alrededor de, 2 a 2.5 veces el que requiere el diseño de anillo dividido. Frecuentemente se utilizan bandas selladoras o tubos falsos para disminuir la desviación del haz de tubos.

En las Figs. IV-10, IV-10-1 y IV-10-2 se muestran algunos tipos de estos intercambiadores.

Otros tipos son los Intercambiadores de lámina tubular fija con tubo acodado, Intercambiadores de tubo de bayoneta, Intercambiadores de tubo en espiral, Intercambiadores de membrana descendente, por mencionar algunos.

A continuación se presenta en la tabla siguiente las características en forma resumida de los principales intercambiadores de tipo casco y tubo y después se enuncian sus características en forma general.



TABLA IV-3 CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES INTERCAMBIADORES DE CALOR DEL TIPO DE CASCO Y TUBO<sup>a</sup>.

Tipo de diseño	Lámina tubular fija	Tubo en U	Cabezal flotante de anillo de cierre hidráulico	Cabezal flotador interno (anillo de soporte dividido)	Cabezal flotador exterior	Cabezal flotador exterior
T E M A , de tipo de cabezal posterior	L, M o N	U	W	S	P	T
Aumentos relativos de costos de A (el menos caro) a E (el más caro)	B	A	C	E	D	E
Disposición para la expansión diferencial	Junta de expansión en el casco	Tubos individuales con libertad para dilatarse	Cabezal flotador	Cabezal flotador	Cabezal flotador	Cabezal flotador
Haz renovable	No	Si	Si	Si	Si	Si
Es posible reemplazar el haz	No	Si	Si	Si	Si	Si
Tubos individuales reemplazables	Si	Solo los de la hiera exterior	Si	Si	Si	Si
Limpieza de los tubos mediante productos químicos, por dentro y por fuera	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Limpieza del interior del tubo, en forma mecánica	Si	Se necesitan herramientas especiales	Si	Si	Si	Si
Limpieza del exterior del tubo, en forma mecánica. Paso triangular	No*	No**	No**	No**	No**	No**
Paso cuadrado	No	Si	Si	Si	Si	Si
Limpieza por chorro de agua. Tubo interior	Si	Se necesitan herramientas especiales	Si	Si	Si	Si
Tubo exterior	No	Si	Si	Si	Si	Si
Es factible la laminación doble del tubo	Si	Si	No	No	Si	No
Número de pasos de tubos	Sin limitaciones prácticas	Es posible cualquier número par	Limitado a uno o dos pasos	Sin limitaciones prácticas Ø	Sin limitaciones prácticas	Sin limitaciones prácticas Ø
Empaques internos eliminados	Si	Si	Si	No	Si	No

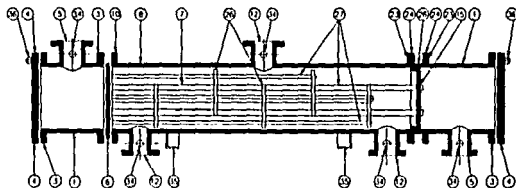
Nota: Costos relativos A y B no son significativamente distintos y tienen intercambio en tramos largos de tubo.

<sup>a</sup> Modificada de la pagina 8-8 del Patterson-Kelley Co. Manual No. 70, Heat Exchangers.

\* Se han construido haces de tubos en U con soportes que permiten que los acomodamientos en U se separen, para reemplazar el tubo al interior del haz.

\*\* La configuración triangular normal no permite la limpieza mecánica. Con una configuración triangular ancha que es igual que 2 (diámetro de tubo más pista de limpieza)  $3^{1/2}$ , es posible la limpieza mecánica de los haces desmontables. Este gran espaciamiento no se utiliza con mucha frecuencia.

Ø Para un número impar de pasos laterales de tubos, el cabezal flotador requiere una junta con empaque o de expansión.



(A)

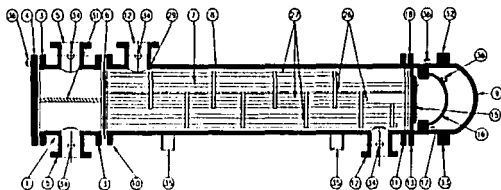
- |   |   |
|---|---|
| 1. CABEZAL ESTACIONARIO. CANAL                        | 21. CUBIERTA DEL CABEZAL FLOTADOR, EXTERIOR         |
| 2. CABEZAL ESTACIONARIO. CASQUETE                     | 22. FALDON DE LAMINA DE CIERRE TUBULAR DEL FLOTADOR |
| 3. PESTAÑA DE CABEZAL ESTACIONARIO. CANAL O CASQUETE  | 23. BRIDA DE PREENSA/ESTOPAS                        |
| 4. CUBIERTA DE CANAL                                  | 24. EMPAQUE   |
| 5. TONERA DE CABEZAL ESTACIONARIO                     | 25. ANILLO SECCIONOR DE EMPAQUE                     |
| 6. LAMINA ESTACIONARIA DE TUBO                        | 26. ANILLO DE CIERRE HIDRAULICO                     |
| 7. TUBOS  | 27. BIELAS Y ESPACIADORES                           |
| 8. CASCO  | 28. DESVIADORES TRANSVERSALES O PLACAS DE APOYO     |
| 9. CUBIERTA DEL CASCO                                 | 29. DESVIADOR DE CHOQUE                             |
| 10. BRIDA DEL CASCO. EXTREMO DEL CABEZAL ESTACIONARIO | 30. DESVIADOR LONGITUDINAL                          |
| 11. BRIDA DEL CASCO. EXTREMO DEL CABEZAL POSTERIOR    | 31. SEPARACION DE PASO                              |
| 12. TORERA DEL CASCO                                  | 32. CONEXION DE VENTILA                             |
| 13. BRIDA DE LA CUBIERTA DEL CASCO                    | 33. CONEXION DE DRENAGE                             |
| 14. JUNTA DE EXPANSION                                | 34. CONEXION DE INSTRUMENTOS                        |
| 15. LAMINA DE CIERRE TUBULAR DEL FLOTADOR             | 35. ALBARDILLA DE SOPORTE                           |
| 16. CUBIERTA DEL CABEZAL FLOTADOR                     | 36. TALON ELEVADOR                                  |
| 17. BRIDA DEL CABEZAL FLOTADOR                        | 37. MENSULA DE SOPORTE                              |
| 18. DISPOSITIVO DE APOYO DEL CABEZAL FLOTADOR         | 38. VERTEDERO                                       |
| 19. ANILLO DE CIZALLA DIVIDIDA                        | 39. CONEXION DE NIVEL DE LIQUIDO                    |
| 20. BRIDA DE APOYO DIVIDIDA                           |   |

INTERCAMBIADOR CON TUBOS FLOTANTES  
Y ANILLOS DE CIERRE HIDRAULICO

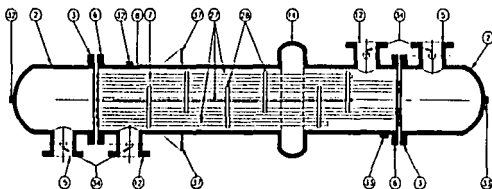
I. N. A. M.

TESIS PROFESIONAL  
JESUS ANTONIO CHICO YENANCO  
ARJAN CHICO YENANCO  
FIGURA IV-10





(B)



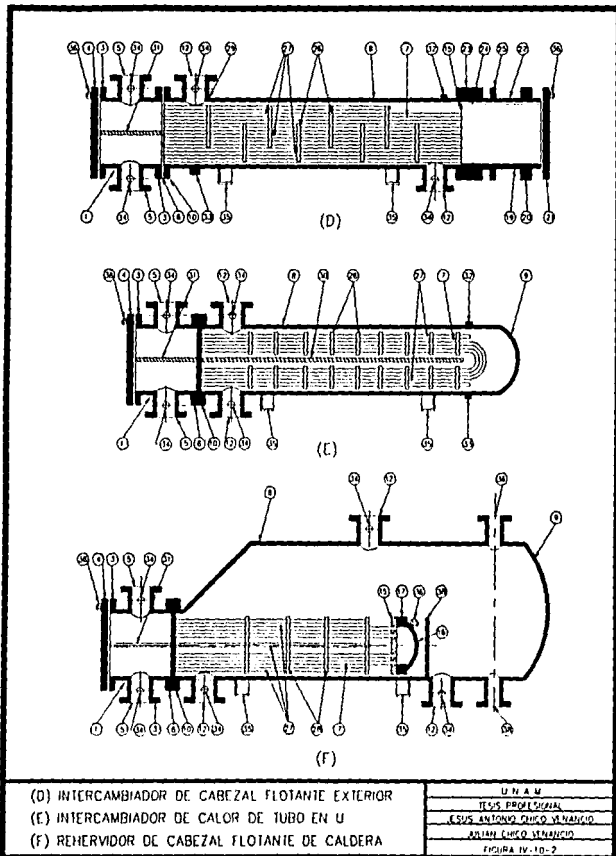
(C)

(B) INTERCAMBIADOR DE CABEZAL FLOTANTE INTERNO

(C) INTERCAMBIADOR DE LAMINA Y TUBO FIJO

U. N. A. M.
INGENIERO PROFESIONAL
A. SUS ANTONIO OLIVERA VILLANCO
ALUMNO EMERITO VILLANCO
FIGURA IV-10-1







### MEDIA LOGARÍTMICA DE LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURAS PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR.

Cuando los fluidos caliente y frío de un intercambiador de calor circulan con un flujo a contracorriente verdadero o con flujo paralelo, debe usarse la media logarítmica de las diferencias de temperaturas,

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \rightarrow (1)$$

donde  $\Delta T_2$  es la diferencia de temperaturas en un extremo del intercambiador y  $\Delta T_1$  en el otro extremo. Esta expresión de  $\Delta T_{lm}$  es válida para un intercambiador de calor de tubo doble, así como para un intercambiador de calor de 1-1 de una pasada por la coraza y una pasada por los tubos con flujo a contracorriente o en paralelo.

Cuando se trata de un intercambiador de calor de pasadas múltiples, es necesario obtener otra igualdad diferente para la media de las diferencias de temperaturas, que depende de la configuración de la coraza y de los tubos y del número de pasadas. Considerando primero una pasada por la coraza y dos por los tubos, el fluido frío en la primera pasada está a contracorriente con el fluido caliente. En la segunda pasada el fluido frío está en paralelo con el fluido caliente. Por tanto la media logarítmica de las diferencias de temperaturas no puede usarse para calcular la caída real de temperatura sin incluir correcciones. Este factor de corrección  $F_T$  se define de tal manera que, al multiplicarlo por el valor de  $\Delta T_{lm}$ , el resultado es la caída de temperaturas correcta,  $\Delta T_m$ . Las relaciones adimensionales son las siguientes:

$$z = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}} \rightarrow (2)$$

$$Y = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} \rightarrow (3)$$

donde  $T_{hi}$  = temperatura de entrada del fluido caliente en K (°F),  $T_{ho}$  = temperatura de salida del fluido caliente,  $T_{ci}$  = temperatura de entrada del fluido frío y  $T_{co}$  = temperatura de salida del fluido frío.

En la gráfica (b) se muestra el factor  $F_T$  para un intercambiador 2-4. En general, no se recomienda un intercambiador de calor en condiciones para las que  $F_T < 0.75$ . En dicho caso conviene usar otro tipo de coraza y tubos. Usando la nomenclatura de las ecuaciones (2) y (3), la expresión para  $\Delta T_m$  de la ecuación (1) puede escribirse como

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln[(T_{hi} - T_{co}) / (T_{ho} - T_{ci})]} \rightarrow (4)$$

Entonces la ecuación para un intercambiador es:





$$q = U_i A_i \Delta T_m + U_o A_o \Delta T_m \rightarrow (5)$$

$$\Delta T_m = F_T \Delta T_m \rightarrow (6)$$

**EJEMPLO.**

**FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA TEMPERATURA PARA UN INTERCAMBIADOR DE CALOR.**- Un intercambiador 1-2 funcionando con una pasada por la coraza y dos pasadas por los tubos, calienta 2.52 kg./s de agua desde 21.1 hasta 54.4 °C. El área superficial externa de los tubos del intercambiador es  $A_o = 9.30 \text{ m}^2$ .

- a) Calcúlese la media de las diferencias de temperaturas  $\Delta T_m$  en el intercambiador y el coeficiente total de transferencia de calor  $U_o$ .  
 b) ¿Cual sería el valor de  $\Delta T_m$  para las mismas temperaturas en un intercambiador 2-4?  
**SOLUCIÓN:** Las temperaturas son las siguientes:

$$T_{hi} = 115.6^\circ\text{C}$$

$$T_{ho} = 48.9^\circ\text{C}$$

$$T_{ci} = 21.1^\circ\text{C}$$

$$T_{co} = 54.4^\circ\text{C}$$

Primero se lleva a cabo un balance de calor con respecto al agua fría, suponiendo un  $c_{pm}$  para el agua de 4187 J/kg. K y  $T_{co} - T_{ci} = (54.4 - 21.1)^\circ\text{C} = 33.3^\circ\text{C} = 33.3 \text{ K}$

$$q = mc_{pm}(T_{co} - T_{ci}) = (2.52)(4187)(54.4 - 21.1) = 348200 \text{ W}$$

La media logarítmica de las diferencias de temperaturas en la ec. (4) es

$$\Delta T_{lm} = \frac{(115.6 - 54.4) - (48.9 - 21.1)}{\ln[(115.6 - 54.4) / (48.9 - 21.1)]} = 42.3^\circ\text{C} = 42.3 \text{ K}$$

Sustituyendo en las ecuaciones (2) y (3),

$$z = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{co} - T_{ci}} = \frac{115.6 - 48.9}{54.4 - 21.1} = 2.00$$

$$Y = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} = \frac{54.4 - 21.1}{115.6 - 21.1} = 0.352$$

En base a la gráfica (a),  $F_T = 0.74$ . Entonces, de acuerdo con la ecuación (6)

$$\Delta T_m = F_T \Delta T_{lm} = 0.74(42.3) = 31.3^\circ\text{C} = 31.3 \text{ K}$$

Reordenando la ecuación (5) para despejar  $U_o$  y sustituyendo los valores conocidos:

$$U_o = \frac{q}{A_o \Delta T_m} = \frac{348200}{(9.30)(31.3)} = 1196 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (211 \text{ btu/hrpie}^2 \cdot ^\circ\text{F})$$

Para la parte (b) en un intercambiador 2-4 y la gráfica (b),  $F_T = 0.94$ . Entonces,

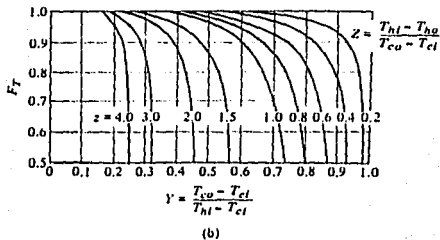
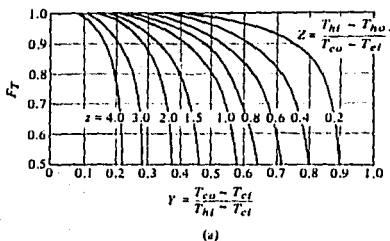






$$\Delta T_m = F_T \Delta T_{m1} = 0.94(42.3) = 39.8^\circ\text{C} = 39.8 \text{ K}$$

Por consiguiente, el intercambiador 2-4 utiliza en mayor grado la fuerza impulsora de temperatura disponible.





#### IV.4 EVAPORADORES.

##### DEFINICIÓN Y UTILIDAD EN LOS PROCESOS.

La evaporación es el proceso de la concentración de una solución por medio de la expulsión del solvente. La concentración termina generalmente, antes de que la solución empiece a precipitarse. Básicamente, una evaporación debe consistir de un recuperador de calor capaz de hervir la solución y de un aparato para separar la fase de vapor del líquido en ebullición. En la evaporación se elimina el vapor formado por la ebullición de una solución líquida obteniéndose una solución más concentrada. En la gran mayoría de los casos, la operación unitaria de evaporación se refiere a la eliminación de agua de una solución acuosa. Entre los ejemplos más típicos de procesos de evaporación se encuentran la concentración de soluciones acuosas de azúcar, cloruro de sodio, hidróxido de sodio, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja. Para estos casos la solución concentrada es el producto que se desea y el agua evaporada suele desecharse. En otros casos, el agua que contiene pequeñas cantidades de minerales se evapora para obtener agua libre de sólidos que se emplea para la alimentación de calderas, para procesos químicos especiales o para otros propósitos. En la actualidad se están desarrollando y usando procesos de evaporación de agua de mar para la obtención de agua potable.

##### FACTORES DE PROCESO.

Las propiedades físicas y químicas de la solución que se está concentrando y del vapor que se separa tienen una trascendencia importante sobre el tipo de evaporador que debe usarse y sobre la presión y la temperatura del proceso. En seguida se presentan algunas propiedades que afectan a los métodos de procesamiento.

1. **Concentración en el líquido.**- Comúnmente la alimentación líquida a un evaporador es bastante diluida, por lo que su viscosidad, bastante baja, es similar a la del agua y es operada con coeficientes de transferencia de calor bastante altos. A medida que se verifica la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse intensamente, causando una notable disminución del coeficiente de transferencia de calor. Debe prevalecer una circulación y/o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente disminuya demasiado.
2. **Solubilidad.**- A medida que se calienta la solución y aumenta la concentración del soluto o sal, puede pasarse el límite de solubilidad del material en solución y se formarán cristales. Esto puede ocasionar una limitación de la concentración máxima que pueda obtenerse por evaporación de la solución. En la mayoría de los casos, la solubilidad de la sal aumenta con la temperatura. Esto es que, al enfriar a temperatura ambiente una solución concentrada caliente proveniente de un evaporador puede presentarse una cristalización.
3. **Sensibilidad Térmica de los Materiales.**- Muchos productos, primordialmente alimentos y otros materiales biológicos, pueden ser sensibles a la temperatura y degradarse cuando ésta sube o el calentamiento es muy prolongado. Entre estos productos están los materiales farmacéuticos; productos alimenticios como jugo de





naranja, leche y extractos vegetales; y materiales químico orgánicos delicados. La cantidad de degradación es una función de la temperatura y del tiempo.

4. **Formación de Espumas.-** Algunas veces los materiales constituidos por soluciones cáusticas, alimentos como leche desnatada y algunas soluciones de ácidos grasos, forman espumas durante la ebullición. Esta espuma formada es arrastrada por el vapor que sale del evaporador y puede haber pérdidas de material.
5. **Presión y Temperatura.-** El punto de ebullición de la solución se relaciona con la presión del sistema. En cuanto más elevada sea la presión de operación del evaporador, será mayor la temperatura de ebullición. Además la temperatura de ebullición se eleva a medida que se aumenta la concentración del material disuelto por la acción de la evaporación. A este fenómeno se llama elevación del punto de ebullición. Para mantener a un nivel bajo la temperatura de los materiales termosensibles se necesita operar a presiones inferiores a 1 atm., es decir, al vacío.
6. **Formación de Incrustaciones y Materiales de Construcción.-** Algunas soluciones depositan materiales sólidos llamados "incrustaciones" sobre las superficies de calentamiento. Estas incrustaciones pueden formarse a causa de los productos de descomposición o por disminución de la solubilidad. El resultado es una aminoración del coeficiente de transferencia de calor, con esto se obliga a limpiar el evaporador. La selección de los materiales de construcción del evaporador tiene trascendencia en la prevención de la corrosión.

#### CLASIFICACIÓN DE LOS EVAPORADORES.

Los evaporadores se pueden clasificar de acuerdo a la forma siguiente:

1. Medio de calentamiento separado del líquido en evaporación, mediante superficies tubulares de calentamiento.
2. Medio de calentamiento confinado por serpentines, placas planas, paredes dobles, camisas, etc.
3. Medio de calentamiento en contacto directo con el líquido en evaporación.
4. Calentamiento mediante la radiación solar.

También los evaporadores químicos son clasificados en dos grupos: Los evaporadores de circulación natural y los evaporadores de circulación forzada.

Los evaporadores de circulación Forzada son utilizados para líquidos viscosos, para los que forman sales, y las soluciones que llegan a incrustarse. Los evaporadores de circulación Natural son empleados unitariamente o en efecto múltiple para los requerimientos más simples de evaporación.

#### TIPOS DE EQUIPOS.

El tipo de equipo a usar depende en la configuración de la superficie para la transferencia de calor así como de los medios que se utilizan para que se logre la circulación del líquido. Enseguida son analizados los tipos generales de equipo.





- 1. MARMITA ABIERTA O ARTESA.-** Es la forma más simple de un evaporador consistente de una marmita abierta o artesa en la que es hervido el líquido. El suministro de calor aplicado proviene de la condensación del vapor de agua en una chaqueta o en serpentines sumergidos en el líquido. Algunas veces se calienta a fuego directo. Este tipo de evaporadores son económicos y de operación simple pero su desperdicio de calor es demasiado. Para ciertos equipos son utilizadas paletas o raspadores para provocar una agitación del líquido.
- 2. EVAPORADOR DE TUBOS HORIZONTALES CON CIRCULACIÓN NATURAL.-** El banco horizontal de tubos de calentamiento se asemeja al de un intercambiador de calor. En este evaporador el vapor de agua entra a los tubos y se condensa, este condensado sale por el otro extremo de los tubos. La solución a ebullición está por fuera de los tubos. El vapor se desprende de la superficie líquida; después, regularmente es pasado por dispositivos de tipo deflector con lo que se impide el arrastre de gotas de líquido y sale por la parte superior. Relativamente este equipo es económico y puede usarse para líquidos no viscosos con coeficientes de transferencia de calor altos, además para líquidos no formadores de incrustaciones. Debido a que la circulación del líquido no es muy buena, son poco adecuados para materiales viscosos. Este evaporador en casi todos los casos opera con un régimen continuo, con la alimentación entrando a velocidad constante y con el concentrado saliendo a la misma velocidad.
- 3. EVAPORADOR VERTICAL CON CIRCULACIÓN NATURAL.-** Para este tipo son usados tubos verticales, en los que el líquido se encuentra dentro de los tubos, por lo que el vapor es condensado en el exterior. Debido a la ebullición y a la disminución de densidad, el líquido se eleva en los tubos por circulación natural y fluye hacia abajo a través de un espacio central abierto grande o bajada. La circulación natural aumenta el coeficiente de transferencia de calor. Para el uso de líquidos viscosos no es recomendable. También es conocido frecuentemente como evaporador de tubos cortos. Una variación de este modelo es el evaporador de canasta en el que el elemento de calentamiento es colgado en el cuerpo del evaporador, por lo que existe un espacio anular que sirve de bajada.
- 4. EVAPORADOR VERTICAL DE TUBOS LARGOS.-** Es conveniente contar con velocidades altas para el líquido ya que el coeficiente de transferencia de calor del lado del vapor es demasiado alto en comparación con el lado del líquido que se evapora. En este evaporador el líquido se encuentra en el interior de los tubos. Estos tubos tienen una longitud de 3 a 10 m. y la formación de burbujas de vapor en su interior produce una acción de bombeo que colabora a obtener velocidades de líquido muy altas. Normalmente el líquido pasa una sola vez por los tubos y no se recircula. Los tiempos de contacto suelen ser bastante bajos para este modelo. Algunas ocasiones como cuando la relación de velocidad de alimentación a velocidad de evaporación es baja puede emplearse una recirculación natural del producto a través del evaporador. Esto se logra añadiendo una conexión de tubería entre la salida del concentrado y la línea de alimentación. En la producción de leche condensada este es un método muy común.
- 5. EVAPORADOR DE CAÍDA DE PELÍCULA.-** Este tipo de evaporador es una variación del modelo de tubos largos, el líquido se alimenta por la parte superior de los tubos y fluye a través de las paredes de estos en forma de una fina película. Generalmente la separación vapor-líquido es efectuada en el fondo. Este tipo de modelo es demasiado usado en la concentración de materiales sensibles al calor como el jugo de naranja, debido a que su tiempo de retención es demasiado bajo. (Entre 5 y 10 seg.) y alto el coeficiente de transferencia de calor.





6. **EVAPORADOR DE CIRCULACIÓN FORZADA.**- En este evaporador el coeficiente de transferencia de calor de la película líquida puede aumentarse por medio de bombeo, esto causa una circulación forzada del líquido en el interior de los tubos. El modelo de tubos verticales largos puede lograr esto añadiéndole una tubería conectada a una bomba entre las líneas de salida del concentrado y de alimentación. Sin embargo los tubos del evaporador de circulación forzada suelen ser más cortos. Además en otros casos es utilizado un intercambiador de calor horizontal externo e independiente. Es utilizado para líquidos viscosos.
7. **EVAPORADOR DE PELÍCULA AGITADA.**- La principal resistencia a la transferencia de calor en un evaporador corresponde al líquido. Para aumentar la turbulencia de la película líquida y, con esto, el coeficiente de transferencia de calor se utiliza un método que consiste en la agitación mecánica de dicha película. Esto es llevado a cabo en un evaporador de caída de película modificado, en que se utiliza un solo tubo grande encaquetado que contiene un agitador interno. El líquido penetra por la parte superior de dicho tubo, conforme va fluyendo hacia abajo se dispersa en forma de una película turbulenta por la acción de espas de agitación verticales. La solución concentrada sale por la parte del fondo y el vapor es pasado por un separador para que tenga salida por la parte superior. Este evaporador es práctico para materiales demasiado viscosos, debido a que el coeficiente de transferencia de calor es mayor que en los evaporadores de circulación forzada. Es utilizado para materiales viscosos sensibles al calor como el látex de caucho, jugo de frutas, etc. Su inconveniente es que tiene un alto costo y posee baja capacidad.
8. **EVAPORADOR SOLAR DE ARTESA ABIERTA.**- En este evaporador el agua salina es introducida en artesas abiertas con poca profundidad y después es dejado a que se evapore lentamente al sol hasta que cristalice. Este proceso antiguo todavía es usado.

La figura IV-11 muestra a continuación algunos tipos de evaporadores.

## MÉTODOS DE OPERACIÓN.

### EVAPORADORES DE EFECTO SIMPLE.

Son utilizados donde la capacidad requerida es pequeña, el vapor sea barato, el material sea demasiado corrosivo que sean requeridos materiales de construcción costosos o donde el vapor este demasiado contaminado por lo que no se pueda volver a usar. Funcionan en lotes, en semilotes, con lotes continuos o en forma continua. Los evaporadores de lotes son los que tienen el llenado, la evaporación y el vaciado en etapas consecutivas. Este método es escasamente usado debido a que requiere que el cuerpo sea suficientemente grande para que retenga la carga completa de material de alimentación que el elemento calentador este situado suficientemente abajo para no permanecer descubierto al reducirse el volumen del producto. El método de funcionamiento más tradicional es el de semilotes, en el que el material de alimentación es agregado continuamente, esto con el fin de mantener un nivel constante, hasta que toda la carga llegue a la densidad final.





Los evaporadores de lotes continuos tienen un material de alimentación continuo, y al menos sobre parte del ciclo, una descarga continua. Si se efectúa la circulación a partir de un tanque de almacenamiento al evaporador y el regreso, hasta que todo el tanque se encuentre a la concentración deseada, para realizar a continuación el acabado por lotes es un buen método de funcionamiento. Los evaporadores continuos tienen una alimentación y una descarga fundamentalmente continuas y las concentraciones tanto del material de alimentación como del producto permanecen principalmente constantes.

#### EVAPORACIÓN DE EFECTOS MÚLTIPLES.

Es el medio principal utilizado en la economización del consumo de energía. En su mayoría estos evaporadores funcionan sobre bases continuas, aunque para algunos materiales difíciles, se puede utilizar un ciclo de lotes continuos. Este método de evaporadores interconectados en serie es llamado evaporación a múltiple efecto y a cada paso se le llama efecto. Existen diversas maneras de interconectar estos evaporadores las cuales se mencionan a continuación.

**1. EVAPORADORES DE EFECTO MÚLTIPLE CON ALIMENTACIÓN HACIA ADELANTE.-** En la figura IV-12(a) la alimentación del primer efecto se encuentra a una temperatura cercana al punto de ebullición y a la presión de operación de dicho efecto, 1 Kg. de vapor de agua evaporará casi 1 Kg. de agua. El primer efecto opera a una temperatura alta como para que el agua que se evapora en el mismo sirva como medio de calentamiento del segundo efecto. De nuevo en el segundo efecto es evaporado casi 1 Kg. de agua, que es usado como un medio de calentamiento del tercer efecto. Aproximadamente, en un evaporador de triple efecto se evaporarán 3 Kg. de agua por cada Kg. de vapor de agua usado. Consecuentemente el resultado es un aumento de la economía de vapor de agua, que es Kg. de vapor evaporado/Kg. de vapor de agua usado. Esto también resulta cierto en forma aproximada para más de tres efectos. Sin embargo, este aumento de la economía del vapor de agua en un evaporador de efecto múltiple se logra a expensas de un mayor costo en la inversión del equipo. En la figura IV-12(a) la alimentación se introduce en el primer efecto y fluye hacia el siguiente en la misma dirección del flujo de vapor. Este método de operación es el que se emplea cuando la alimentación está caliente o cuando el producto concentrado final puede llegar a dañarse a temperaturas elevadas. Las temperaturas de ebullición van decreciendo de efecto a efecto. Con esto se quiere decir que, si el primer efecto está a  $P_1 = 1 \text{ atm. abs.}$  De presión, el último efecto se encontrará al vacío, a una presión  $P_3$ .

**2. EVAPORADOR DE EFECTO MÚLTIPLE CON ALIMENTACIÓN HACIA ATRÁS.-** La figura IV-12(b) muestra este método en el que la alimentación entra al último efecto, que es el que está más frío, y continúa hacia atrás hasta que el producto concentrado sale por el primer efecto. Las ventajas que posee este elemento son cuando la alimentación está fría, pues la cantidad de líquido que debe calentarse a temperaturas más altas del segundo y primer efectos es más pequeña. Sin embargo es indispensable hacer uso de bombas en cada efecto, pues el flujo va de baja a alta presión. Es útil este método cuando el producto concentrado es demasiado viscoso. Las temperaturas altas de los primeros efectos tienden a disminuir la viscosidad y permiten coeficientes de transferencia de calor de valores razonables.





**3. EVAPORADORES DE EFECTO MÚLTIPLE CON ALIMENTACIÓN EN PARALELO.-** La alimentación en paralelo implica una introducción de alimentación nueva o en bruto y el retiro de producto concentrado en cada uno de los efectos. El vapor de cada efecto continúa usándose para calentar el siguiente. Este método de operación es utilizado primordialmente cuando la alimentación esta substancialmente saturada y el producto son cristales sólidos, tal como sucede en la evaporación de salmueras para la producción de sal común.

#### BALANCES DE CALOR Y DE MATERIALES PARA EVAPORADORES.

La expresión básica para determinar la capacidad de un evaporador de efecto simple se puede escribir de la siguiente manera.

$$q = UA\Delta T \quad \rightarrow(1)$$

donde  $\Delta T$  K ( $^{\circ}\text{F}$ ) es la diferencia de temperatura entre el vapor de agua que se condensa y el líquido a ebullición en el vapor. Para llegar a la resolución de la ecuación (1) es necesario determinar el valor de  $q$  en W (btu/hr) llevando a cabo un balance de calor y de materiales en el evaporador. La alimentación al evaporador es F kg./hr (lb<sub>m</sub>/hr) con un contenido de sólidos de  $x_F$  fracción de masa, una temperatura  $T_F$  y una entalpía  $h_F$  J/kg. (btu/lb<sub>m</sub>). La salida consiste de un líquido concentrado L kg./hr (lb<sub>m</sub>/hr) con un contenido de sólidos  $x_L$ , una temperatura  $T_L$  y una entalpía  $h_L$ . EL vapor V kg./hr (lb<sub>m</sub>/hr) se desprende como un disolvente puro con un contenido de sólidos  $y_v = 0$ , una temperatura  $T_1$  y una entalpía  $h_v$ . La entrada de vapor de agua saturado S kg./hr (lb<sub>m</sub>/hr) tiene una temperatura de  $T_s$  y una entalpía  $H_s$ . Se supone que el vapor de agua condensado S kg/hr sale a  $T_s$ , esto es a la temperatura de saturación, y con una entalpía de  $h_s$ . Esto significa que el vapor de agua solo transfiere su calor latente  $\lambda$ , que es

$$\lambda = H_s - h_s \quad \rightarrow(2)$$

Puesto que el vapor V esta en equilibrio con el líquido L, las temperaturas de ambos son iguales. Además la presión  $P_1$  es la de vapor de saturación del líquido de composición  $x_L$  a su punto de ebullición  $T_1$  (esto supone que no hay elevación del punto de ebullición).

Para el balance de materiales, y puesto que se trata de estado estable, la velocidad de entrada de masa = velocidad de salida de masa. Entonces, para un balance total,

$$F = L + V \quad \rightarrow(3)$$

Para un balance con respecto al soluto (sólidos) solamente,

$$Fx_F = Lx_L \quad \rightarrow(4)$$

Para el balance de calor, y puesto que el calor total de entrada = calor total de salida ,





calor en la alimentación + calor en el vapor de agua = calor en líquido concentrado + calor en el vapor + calor en el vapor de agua condensado (5)

Esto supone que no hay pérdidas de calor por radiación o convección. Sustituyendo en la ecuación. (5)

$$Fh_F + SH_s = Lh_L + Vh_V + Sh_s \quad \rightarrow(6)$$

Sustituyendo la ecuación. (2) en la (6)

$$Fh_F + S\lambda = Lh_L + VH_V \quad \rightarrow(7)$$

Entonces el calor  $q$  transferido en el evaporador es

$$q = S(H_s - h_s) = S\lambda \quad \rightarrow(8)$$

En la ecuación (7) el calor latente  $\lambda$  del vapor de agua a la temperatura de saturación  $T_s$  puede obtenerse de tablas de vapor. Sin embargo generalmente no se dispone de las entalpías de la alimentación y de los productos. Estos datos de entalpía-concentración sólo existen para unas cuantas sustancias en solución. Por tanto, se establecen algunas aproximaciones para determinar el balance de calor, como las siguientes:

1. Puede demostrarse en una forma aproximada que el calor latente de evaporación de 1 kg. de masa de agua de una solución acuosa se calcula con las tablas de vapor mediante la temperatura de la solución a ebullición (temperatura de la superficie expuesta) en lugar de la temperatura de equilibrio del agua pura a  $P_1$ .
2. Si se conocen las capacidades caloríficas  $C_{PF}$  de la alimentación líquida y  $C_{PL}$  del producto estos valores son útiles para calcular las entalpías (Esto desprecia los calores de dilución, que en la mayor parte de los casos se desconocen.)

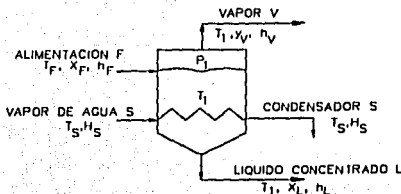
#### EJEMPLO.

ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN EVAPORADOR DE EFECTO SIMPLE.- Un evaporador continuo de efecto simple concentra 9072 kg./hr (20000 lb<sub>m</sub>/hr) de una solución de sal al 1.0 % en peso que entra a 311.0 K (378 °C), hasta una concentración final de 1.5 % en peso. El espacio del vapor en el evaporador está a 101.325 KPa (1.0 atm abs.) y el vapor de agua que se introduce está saturado a 143.3 KPa (20.78 lb/plg<sup>2</sup> abs). El coeficiente total  $U = 1704 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  (300 btu/hr pie<sup>2</sup> °F). Calcúlese las cantidades de vapor y de líquido como productos así como el área de las cantidades de vapor y de líquido como productos, así como el área de transferencia de calor que se requiere. Puesto que se trata de una solución diluida, supóngase que su punto de ebullición es igual al del agua.

SOLUCIÓN: el diagrama de flujo es el que se presenta a continuación.







Para el balance de materiales, sustituyendo en la ecuación. (3)

$$F = L + V$$

$$9072 = L + V$$

Sustituyendo en la ecuación. (4) y resolviendo

$$F x_F = L x_L$$

$$9072(0.01) = L(0.015)$$

$$L = 6048 \text{ kg/hr de líquido (13333 Lb}_m\text{/hr)}$$

Sustituyendo en la ecuación (3) y resolviendo,

$$V = 3024 \text{ kg/hr de vapor (6666 lb}_m\text{/hr)}$$

Se supone que la capacidad calorífica de la alimentación es  $C_{PF} = 4.14 \text{ KJ/kg K}$  (0.99  $\text{btu/lb}_m \text{ } ^\circ\text{F}$ ). Con frecuencia para alimentaciones de sales inorgánicas en agua, puede suponerse que el valor de  $C_P$  es aproximadamente igual al del agua pura.) Para llevar a cabo un balance de calor con la ecuación (7) es conveniente seleccionar el punto de ebullición de la solución diluida en el evaporador, que se supone equivale al del agua a 101.32 KPa,  $T_1 = 373.2 \text{ K}$  ( $100^\circ\text{C}$ ), como temperatura base. Entonces,  $H_v$  es el calor latente del agua a 373.2 K que, de acuerdo con tablas de vapor es de 2257  $\text{KJ/kg}$  (970.3  $\text{btu/lb}_m$ ). El calor latente  $\lambda$  del vapor de agua a 143.3 KPa (temperatura de saturación)  $T_s = 383.2 \text{ K}$  ( $230^\circ\text{F}$ ) es 2230  $\text{KJ/kg}$  (958.8  $\text{btu/lb}_m$ ). La entalpía de la alimentación puede calcularse con

$$h_F = C_{PF}(T_F - T_1) \quad \rightarrow (9)$$

Sustituyendo en la ecuación. (7) con  $h_L = 0$ , puesto que esta a la temperatura base de 373.2 K,

$$9072(4.14)(311.0 - 373.2) + S(2230) = 6048(0) + 3024(2257)$$





$$S = 4108 \text{ kg vapor de agua/hr (9050 lb}_w\text{/hr)}$$

El calor  $q$  transferido a través del área superficial de calentamiento  $A$  es, en base a la ecuación (8),

$$q = S(\lambda)$$

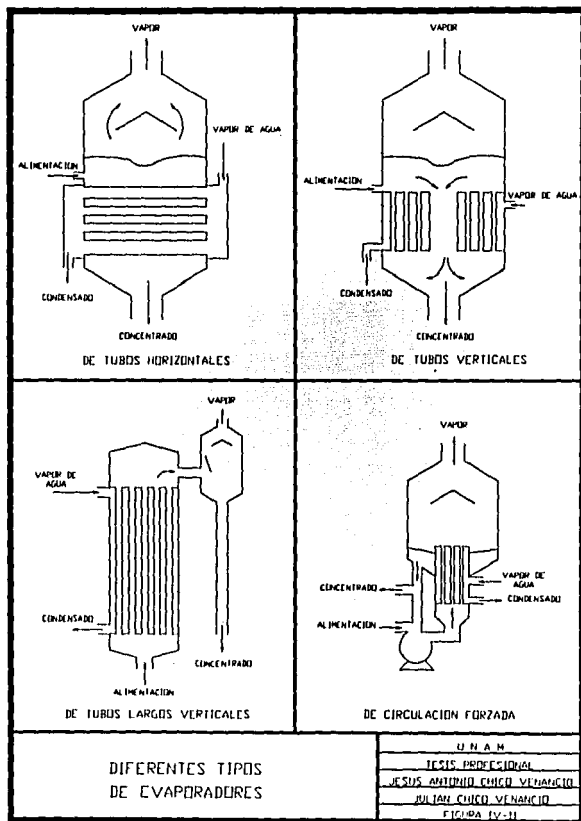
$$q = 4108(2230)(1000/3600) = 2544000 \text{ W (8683000 btu/hr)}$$

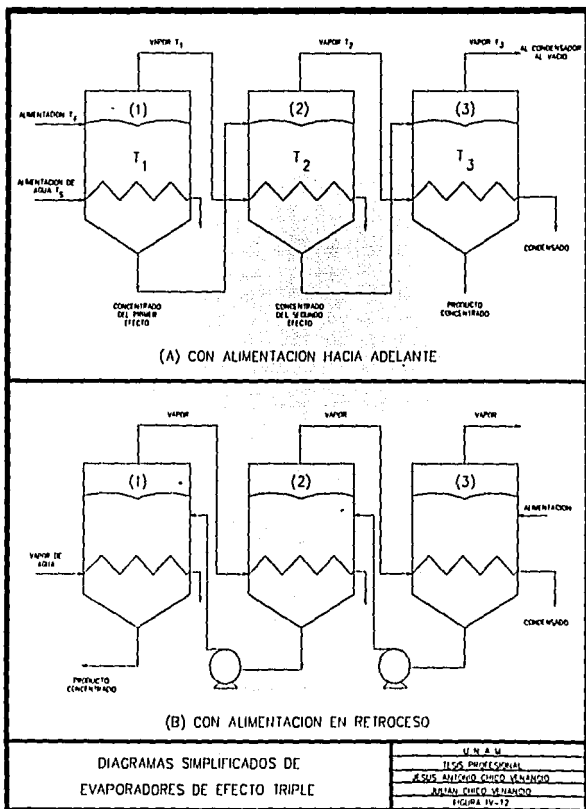
Sustituyendo en la ecuación (1), donde  $\Delta T = T_s - T_i$ ,

$$q = 2544000 = UA\Delta T = (1704)(A)(383.2 - 373.2)$$

Despejando,  $A = 149.3 \text{ m}^2$  (1607 pies<sup>2</sup>).









## IV.5 TORRES DE DESTILACIÓN.

### DEFINICIÓN Y UTILIDAD EN LOS PROCESOS.

La operación unitaria de destilación es un método que se usa para separar los componentes de una solución líquida, que depende de la distribución de estos componentes entre una fase vapor y una fase líquida. Ambos componentes están presentes en ambas fases. La fase vapor se origina de la fase líquida por vaporización al punto de ebullición.

El requerimiento básico para la separación de los componentes por destilación, consiste en que la composición del vapor sea diferente de la composición del líquido con el cual está en equilibrio al punto de ebullición de este último. La destilación se basa en soluciones en la que todos los componentes son bastante volátiles, como soluciones amoníaco-agua o etanol-agua, donde ambos componentes estarán también en la fase vapor.

Las torres de destilación son el equipo diseñado y provisto de un acomodamiento de platos en una forma vertical, cuya finalidad es la de llevar a cabo el proceso de destilación.

La destilación es la operación de separar un disolvente de una solución vaporizándola y condensando el vapor. Esta definición general incluye la destilación por simple evaporación y la destilación fraccionada.

En un principio, la destilación fraccionada se desarrollo casi como un arte, que fue acumulando una serie de conocimientos empíricos; posteriormente, y por aplicación de principios bien conocidos de la Química-Física, se convirtió en materia científica. Al adquirir una gran importancia en la industria, se estudio como una operación primordial de la Ingeniería Química.

La destilación es el método más usado para separar y purificar mezclas líquidas, su utilización tiene fines muy variados como para purificar un componente separándolo de otra sustancia que se introdujo en el curso de su elaboración, para separar dos componentes vendibles, o dos disolventes que luego se recuperan y recirculan devolviéndolos al proceso original. Es difícil hacer una afirmación de cual de las aplicaciones es la más importante. Un ejemplo es en la industria petrolera en la que son empleados aparatos de mayor tamaño y a la postre casi todo el material tratado es convertido en alguno o algunos de sus derivados.

La destilación es lo primero en que se piensa cuando se tienen que separar dos líquidos y son raros los procesos orgánicos en lo cuales no se necesita. Todas las mezclas líquidas se pueden clasificar en dos grupos:

- Mezclas cuyos componentes pueden ser separados por la destilación ordinaria.
- Mezclas en las que la separación no puede efectuarse por este método (llamadas azeotropos), y son empleados métodos especiales para la separación de sus componentes.





El proceso de destilación más utilizado en la práctica para la separación entre sí de líquidos volátiles es el de rectificación: en el que se hace circular el vapor en contracorriente con el líquido en un aparato llamado columna de rectificación, que permite el contacto entre ambos. Los elementos de una columna de rectificación son: la columna propiamente dicha, que es donde se verifica el contacto íntimo entre el líquido y el vapor; la caldera o reboilidor situado en la base de la columna en donde se hace hervir la mezcla a separar; y el condensador de reflujo situado en la parte superior de la columna y es el encargado de suministrar el líquido descendente para su contacto con el vapor. A este líquido se le llama reflujo, y resulta imprescindible para el funcionamiento de la columna.

Para lograr el íntimo contacto entre las fases líquida y vapor al objeto de establecer el intercambio de materia entre ambas fases interesa que las superficies y el tiempo de contacto sea suficiente. En la práctica este contacto es logrado con dos dispositivos diversos que son: el de los platos de borboteo que retienen el líquido a través del cual se ve obligado a pasar el vapor, y el de los cuerpos de relleno que llenan el interior de la columna verificándose el contacto entre fases sobre la superficie de estos cuerpos de relleno.

#### INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE DESTILACIÓN.

La destilación puede llevarse a cabo en la práctica por medio de dos métodos principales. El primer método consiste en la producción de un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se va a separar en una sola etapa, recuperando y condensando los vapores. El segundo método implica el retomo de una porción del condensado al destilador. Los vapores se desprenden a través de una serie de etapas o platos, y parte del condensado fluye hacia abajo a través de la serie de etapas o platos a contracorriente con respecto a los vapores. A este método se le conoce como destilación fraccionada, destilación con reflujo o rectificación.

Existen tres tipos importantes de destilación que se verifican en una sola etapa o en un solo destilador y en los que no es incluida la rectificación. El primero es la destilación de equilibrio o repentina, el segundo es la rectificación por lotes o diferencial y el tercero es la destilación simple con arrastre de vapor.

**DESTILACIÓN DE EQUILIBRIO O REPENTINA.**- En este proceso que se verifica en una sola etapa, la mezcla líquida es vaporizada parcialmente. Se permite que el vapor establezca un equilibrio con el líquido, y entonces se separan las fases vapor y líquido, que pueden obtenerse por medio de lotes o con régimen continuo.

**DESTILACIÓN SIMPLE POR LOTES O DIFERENCIAL.**- En este tipo de destilación primero es introducido líquido en un recipiente de calentamiento. La carga líquida es hervida en forma lenta y los vapores se extraen con la misma rapidez que se forman enviándolos a un condensador en donde es recolectado el vapor condensado (destilado). La primera porción de vapor condensado será más rica en el componente más volátil A. A medida que se proceda con la vaporización, el producto será más pobre en A.





Si se tiene un destilador simple. La operación es iniciada introduciendo en el destilador una carga de  $L_1$  moles de componentes A y B con una composición de  $x_1$  fracción mol de A. En un momento dado, habrá  $L$  moles de líquido remanente en el destilador con una composición  $x$  y la composición del vapor que se desprende en equilibrio en  $y$ . Se ha vaporizado entonces una cantidad diferencial  $dL$ .

La composición del recipiente destilador varía con el tiempo. Para determinar la ecuación de este proceso, se supone que se vaporiza una cantidad pequeña  $dL$ . La composición del líquido varía de  $x$  a  $x-dx$  y la cantidad de líquido de  $L$  a  $L-dL$ . Establézcase un balance de materiales con respecto a A, donde cantidad original = cantidad remanente en el líquido + cantidad de vapor.

$$xL = (x - dx)(L - dL) + ydL \rightarrow (1)$$

Efectuando la multiplicación del lado derecho.

$$xL = xL - xdL - Ldx + dx dL + ydL \rightarrow (2)$$

Despreciando el término  $dx dL$  y reordenando,

$$\frac{dL}{L} = \frac{dx}{y-x} \rightarrow (3)$$

Integrando

$$\int_{L_2}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_2} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{y-x} \rightarrow (4)$$

donde  $L_1$  son las moles originales cargadas,  $L_2$  son las moles remanentes en el destilador,  $x_1$  es la composición original y  $x_2$  es la composición final del líquido. A la ec. (3) se le llama ecuación de Rayleigh. La composición promedio del total de material destilado,  $y_{prom}$ , puede obtenerse por medio de un balance de materiales:

$$L_1 x_1 = L_2 x_2 + (L_1 - L_2) y_{prom} \rightarrow (5)$$

**DESTILACIÓN SIMPLE CON ARRASTRE DE VAPOR.** Con frecuencia las sustancias de alto punto de ebullición son casi insolubles en agua; entonces se logra una separación a temperatura más baja por medio de una destilación simple con arrastre de vapor, método que se usa con bastante frecuencia para separar un componente de alto punto de ebullición de cantidades pequeñas de impurezas no volátiles.

Si se hierve una capa de agua líquida (A) y un componente inmiscible de alto punto de ebullición (B) tal como un hidrocarburo, si la presión total es fija, también el sistema también lo es. Cuando la suma de las dos presiones de vapor individuales igual a la presión total, la mezcla hierve y.

$$P_A + P_B = P \rightarrow (6)$$





donde  $P_A$  es la presión de vapor del agua pura A y  $P_B$  es la presión de vapor de B puro. Entonces la composición del vapor es

$$y_A = \frac{P_A}{P} \quad y_B = \frac{P_B}{P} \quad \rightarrow(7)$$

Mientras estén presentes las dos fases líquidas, la mezcla hervirá a la misma temperatura produciendo un vapor de composición constante  $y_A$ . La temperatura se determina mediante las curvas de presión de vapor de A y B. En la destilación con arrastre de vapor, mientras haya agua líquida presente, el componente B de alto punto de ebullición se vaporizará a temperatura muy inferior a su punto de ebullición normal sin usar vacío. Los vapores de agua (A) y del componente (B) de alto punto de ebullición suelen recolectarse en un condensador y las dos fases líquidas resultantes se separan. Este método tiene la desventaja de que requiere grandes cantidades de calor para evaporar simultáneamente el agua y el compuesto de alto punto de ebullición. La relación de moles de B destilado a moles de A destilado es

$$\frac{n_B}{n_A} = \frac{P_B}{P_A} \quad \rightarrow(8)$$

La destilación con arrastre de vapor se emplea algunas veces en la industria alimenticia para eliminar manchas contaminantes y sabores de grasas y aceites comestibles.

**FUNCIONAMIENTO DE LAS COLUMNAS DE DESTILACIÓN.**- Para que pueda ser eficiente el contacto entre el líquido y el vapor en la destilación, muchas veces son usadas torres de artesas o platos. El tipo de dispositivo de contacto más comúnmente usado es el de artesas con casquete de burbujeo del que a continuación hablaremos de su funcionamiento. Cabe aclarar que este estudio estará limitado a mezclas binarias.

En la figura (IV-13a) es mostrada una torre de platos para llevar a cabo una destilación. El líquido es introducido a la torre y desciende bajo la acción de la gravedad, mientras tanto el vapor asciende debido a la fuerza de una ligera diferencia de presiones entre plato y plato. La presión más elevada es producto de la ebullición en el calentador de vapor de agua inferior que se denomina rehervidor o caldera.

El vapor pasa a través de los orificios en cada plato o artesa y en cada contacto con el líquido que circula a lo largo del plato. Si el mezclado de vapor y el de líquido fuese suficiente en los platos para que se alcanzase el equilibrio entre las corrientes de líquido y vapor que abandona el plato, entonces cada plato proporcionaría la acción de unos de los recipientes separadores.

La sección de la torre por encima del alimento se denomina sección de rectificación o enriquecimiento. Evidentemente esta sección superior tiene la función principal de eliminar el componente más pesado del vapor excedente y enriquece a el producto ligero.

La sección de la torre que se encuentra por debajo de la alimentación es denominada "sección de agotamiento" en la que se elimina o agota el componente ligero del







líquido descendente. Por lo que la sección inferior sirve primordialmente para purificar el producto de fondo.

En la figura (IV-13b) se muestra en forma amplia un tipo de plato individual. Con el objeto de que se llegue a tener un buen mezclado entre las fases y se proporcione el necesario desprendimiento de vapor y líquido entre las etapas, el líquido es retenido en cada plato mediante una presa, sobre la que el efluente líquido pasa.

Para que el efluente líquido alcance la etapa siguiente debe descender a través de un compartimiento separado, al que se le denomina **conducto de bajada o de desagüe**. El conducto de bajada proporciona un volumen suficiente y un tiempo de residencia bastante grande, por lo que el líquido es liberado del vapor arrastrado antes de que alcance el fondo y entre al plato siguiente.

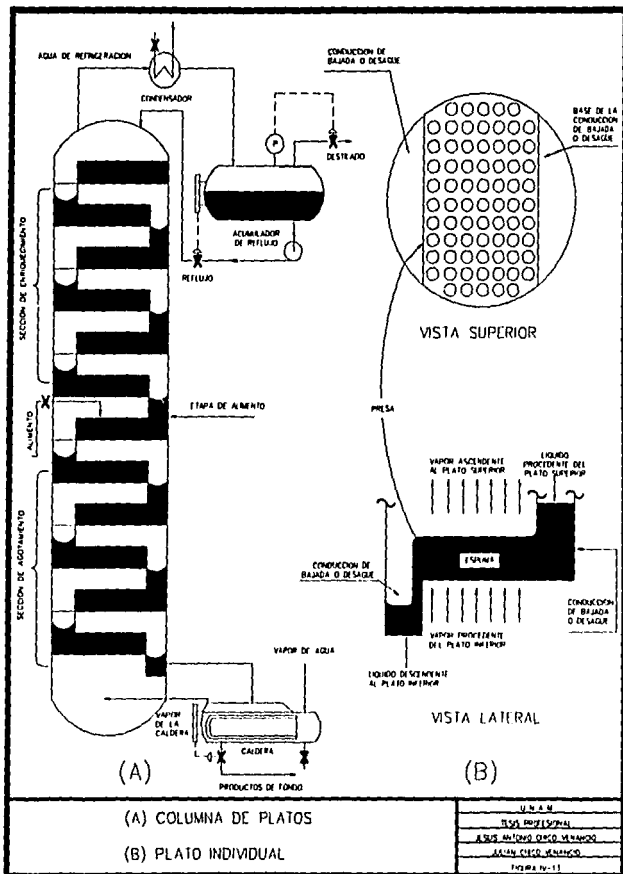
El condensador toma el vapor de cabeza de la columna y licúa una fracción del mismo devolviéndolo a la torre como reflujo. Por lo que el condensador y el acumulador de reflujo son iguales conceptualmente a la etapa superior. La figura muestra una caldera de tipo de tubo y camisa; esta hace una combinación de las funciones de calefacción y separación de las fases de la etapa inferior.

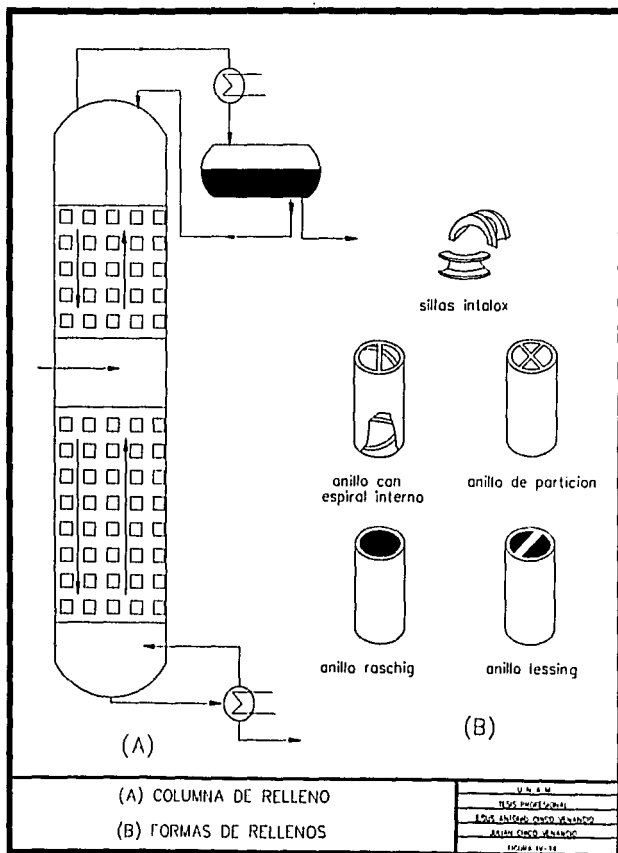
El condensador mostrado es un condensador parcial, ya que solo condensa una fracción de vapor de cabeza. Además son utilizados con regularidad condensadores totales, en los que el vapor de cabeza es totalmente licuado y dividido en dos porciones, una como producto de cabeza y otra para su devolución al plato superior como reflujo. Los líquidos son almacenados más fácilmente que los vapores; por lo que, una caldera total, que de el producto del fondo como un vapor, es empleada en ocasiones raras.

**TORRE O COLUMNA DE RELLENO.**- Se pueden utilizar dispositivos diferentes de las torres de platos para conseguir el flujo en contracorriente que se requiere para productos de alta pureza en sistemas vapor-líquido. Como ejemplo esta la torre de relleno o empacada. La torre de la figura (IV-14a) consiste de una columna cilíndrica que contiene una entrada de gas y un espacio de distribución en el fondo, una entrada de líquido y un dispositivo de distribución en la parte superior, una salida de gas en la parte superior, una salida de líquido en el fondo y el empaque o relleno de la torre. El gas entra en el espacio de distribución que esta debajo de la sección empacada y se eleva a través de las aberturas o intersticios del relleno, poniéndose en contacto con el líquido descendente que a su vez fluye a través de las mismas aberturas. El contacto íntimo de una extensa área entre el gas y el líquido es proporcionado por el empaque.

Se han desarrollado diferentes tipos de empaques o rellenos por lo que hoy en día existen varias clases comunes que se muestran en la figura (IV-14b). Estos son introducidos en la torre sin ningún orden. La mayoría de estos empaques están contruidos con materiales inertes y económicos tales como arcilla o grafito. El relleno permite que volúmenes relativamente grandes de líquido sean pasados a contracorriente con respecto al gas que fluye a través de las aberturas, con caídas de presión del gas relativamente bajas.





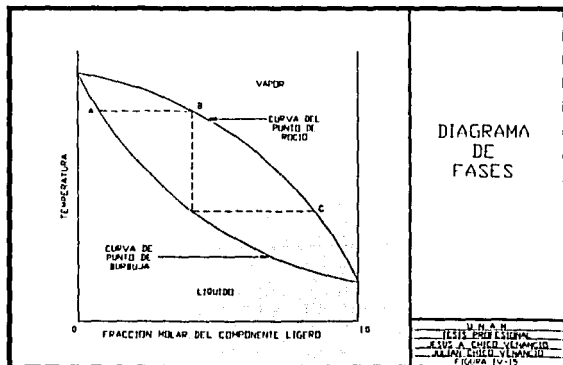




En una torre de empaques con un cierto tipo y tamaño de relleno y con un flujo conocido de líquido, existe un límite máximo de velocidad del flujo de gas al cual se le llama velocidad de inundación\* por lo que la torre no puede operar a una velocidad de gas mayor a esta. A velocidades gaseosas bajas, el líquido fluye hacia abajo a través del empaque casi sin influencia por el flujo ascendente de gas. A medida que es aumentada la velocidad del flujo del gas, la caída de presión es proporcional a la velocidad del flujo a la potencia 1.8. Al llegar a la velocidad de flujo de gas llamada punto de carga, este comienza a impedir el flujo descendente de el líquido y al mismo tiempo aparecen acumulaciones o piscinas que se localizan en el empaque. La caída de presión del gas comienza a incrementarse a velocidades cada vez mayores, a medida que la velocidad de flujo del gas aumenta, la retención o acumulación de líquido también aumenta. En el punto de inundación, el líquido ya no puede seguir fluyendo a través del empaque y sale expulsado con el gas.

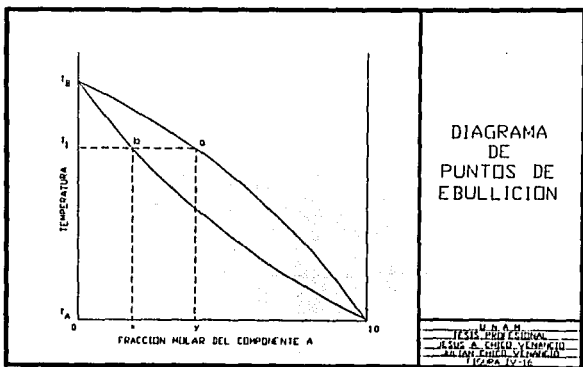
#### DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO DE PUNTO DE EBULLICIÓN Y GRÁFICAS xy.

Los primeros cálculos sobre operaciones de destilación fueron hechos mediante el diagrama de fases, en este diagrama la curva superior representa los puntos de rocío del vapor y la curva inferior los puntos de burbuja del líquido. Si se toma un punto de rocío y uno de punto de burbuja a la misma temperatura, se dice que están en equilibrio las respectivas composiciones del vapor y el líquido. Por consecuencia. Las composiciones en equilibrio son representadas con líneas horizontales dibujadas entre las dos curvas. La figura IV-15 sirve para mostrar que un líquido de composición "A" produce vapor de composición "B", que al condensarse y convertirse en líquido produce vapor de composición "C" en equilibrio con el. Suele ser común que las relaciones de equilibrio vapor-líquido de una mezcla binaria de A y B se expresen en





forma de un diagrama de puntos de ebullición en la que su aplicación puede describirse de la siguiente manera en la que los puntos de ebullición de "A" puro (es el componente más volátil) y "B" puro representan mediante temperaturas " $T_A$ " y " $T_B$ " respectivamente en la que cualquier punto de la curva superior a posee una composición de vapor  $y$ , y a la temperatura  $T$ , comenzará a condensarse para dar un líquido de composición  $x$ . Así, dos puntos cualesquiera (por ejemplo  $a$  y  $b$ ) a la misma temperatura representan las composiciones de líquido y vapor en equilibrio. Todo punto que se encuentre por encima de la curva superior representa una mezcla en estado de vapor, y a su vez todo punto que se ubique por debajo de la curva inferior es representante a una condición en estado líquido; los puntos que se ubiquen entre las dos curvas corresponden a una mezcla líquido-vapor, la figura IV-16 muestra la explicación anterior.

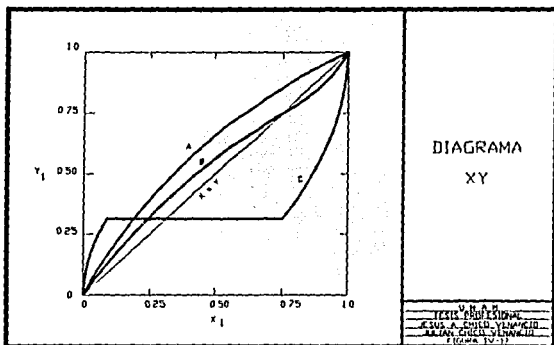


El diagrama xy Figura IV-17 nos presenta los tres tipos de curvas de equilibrio binario, estas curvas cuando es posible se traza siempre para el componente más volátil. La curva A nos muestra el caso más habitual en el que el componente 1 permanece más volátil en toda la gama de composiciones. La curva B es típica de muchos sistemas (como ejemplo, etanol-agua) en los que el componente que es más volátil en valores bajos de  $x_1$ , se hace menos volátil que el otro en valores altos de  $x_1$ . Las composiciones de vapor y líquido son similares en el punto en que la curva B hace el cruce con la diagonal de 45°C. Es utilizado el término azeotropo para describir esta condición. Si es encontrada presente solo una fase líquida (caso de la curva B) a la composición azeotrópica se le denomina como azeotropo homogéneo. Si aparece otra fase líquida (dos fases líquidas en equilibrio con la fase de vapor), el azeotropo es heterogéneo y la curva de equilibrio se representa como la curva C (un ejemplo es el sistema de butanol normal agua).





Sin tomar en consideración que un azeotropo sea homogéneo o heterogéneo, su presencia en un sistema hace que se limite la separación que se puede obtener entre los componentes por destilación simple.



### DIAGRAMAS ENTALPIA-CONCENTRACION.

Un diagrama entalpía-concentración para una mezcla binaria vapor-líquido de A y B toma en cuenta calores latentes, de disolución o de mezclado y calores sensibles de los componentes de la mezcla. Para la construcción del diagrama a presión constante son necesarios los siguientes datos:

1. Capacidad calorífica del líquido en función de la temperatura, la composición y la presión.
2. Calor de disolución en función de la temperatura y la composición.
3. Calores latentes de vaporización en función de la composición y la presión o la temperatura.
4. Punto de ebullición en función de la presión; composición y temperatura.

El diagrama a una presión constante se fundamenta en los estados de referencia del líquido y en la temperatura, ( $273^{\circ}\text{K}$  o  $32^{\circ}\text{F}$ ). La línea de entalpía de líquido saturado  $h$   $\text{KJ/kg}$ , o  $\text{KJ/mol kg}$ , y se calcula por la siguiente expresión:

$$h = X_A C_{PA} (T - T_0) + (1 - X_A) C_{PB} (T - T_0) + \Delta H_{\text{sol}}$$

donde  $X_A$  es la fracción mol o de peso de A,  $T$  es el punto de ebullición de la mezcla en  $^{\circ}\text{K}$ ,  $T_0$  es la temperatura de referencia  $\text{K}$ ,  $C_{PA}$  es la capacidad calorífica del





componente en A en KJ/Kg. K o KJ/mol Kg. K,  $C_{PB}$  es la capacidad calorífica en B, y  $\Delta H_{dis}$  es el calor de disolución a  $T_0$  en KJ/Kg. o KJ/mol Kg. Si ocurre un desprendimiento de calor durante el mezclado, el valor de  $\Delta H_{dis}$  en la ecuación anterior será negativo.

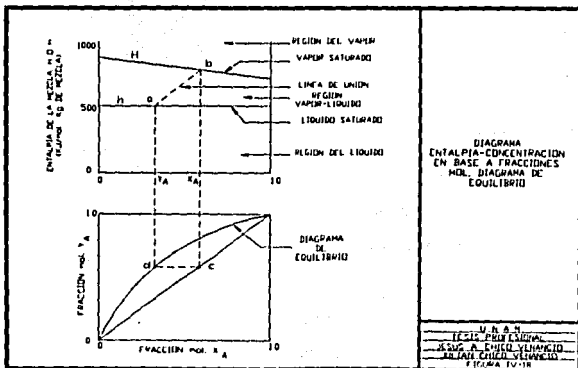
La línea de entalpía del vapor saturado H KJ/Kg. o KJ/mol Kg. se calcula añadiéndole el calor latente de vaporización  $\lambda_{max}$  a la entalpía del líquido saturado para propósitos prácticos, esto equivale a:

$$\lambda_{max} = X_A \lambda_A + (1 - X_A) \lambda_B$$

donde  $\lambda_A$  es el calor latente de vaporización de A en KJ/Kg. o KJ/mol Kg. y B es el calor latente de  $\lambda_B$ .

Frecuentemente, no se dispone de calores de disolución o estos son bastante pequeños, por lo que las líneas de entalpía de vapor saturado y la de entalpía del líquido saturado son trazadas como rectas entre las entalpías del líquido saturado de los componentes puros y las entalpías del vapor saturado de los componentes puros.

La figura IV-18 muestra la gráfica típica de entalpía-concentración. La línea superior representa a la entalpía del vapor saturado, es decir H, (KJ/mol Kg. de vapor) en función de  $y_A$ , la línea inferior es la entalpía del líquido saturado, es decir h, (KJ/mol Kg. de líquido) en función de la fracción mol de líquido  $x_A$ . La zona ubicada entre ambas líneas pertenece a la región de dos fases líquido-vapor. La línea de unión ab es la representativa de las entalpías y las composiciones de las fases líquida y vapor en equilibrio. La línea de unión ab es obtenida trazando las líneas dc, da y cb.





## PROPIEDADES Y USO DE LA GRÁFICA ENTALPIA-CONCENTRACION.

1. Regla del brazo de palanca en el uso de la gráfica de entalpía-concentración.- El uso de esta gráfica depende de la adición y sustracción gráfica de propiedades de dos corrientes usando el principio del brazo de palanca. El proceso mostrado en la figura siguiente, en la que un fluido constituido por una mezcla de vapor-líquido que tiene una entalpía total de  $H_f$  KJ/mol Kg. y una composición  $x_f$  entra a velocidad de  $F$  mol Kg./hr. Las corrientes de salida de  $V$  mol Kg. de vapor/hr y  $L$  mol Kg. de líquido/hr, cuyas componentes son  $y_D$  y  $x_L$ , respectivamente están en equilibrio.

Escribiendo un balance general y otro con respecto al componente más volátil A,

$$F = V + L \quad \rightarrow (1)$$

$$F x_f = V y_D + L x_L \quad \rightarrow (2)$$

Haciendo una sustitución y reordenando (1) y (2)

$$V/L = (x_f - x_L)/(y_D - x_f) \quad \rightarrow (3)$$

Escribiendo un balance de entalpía.

$$H_f F = H_v V + h_L L \quad \rightarrow (4)$$

sustituyendo y haciendo un reordenamiento de (1) y (4)

$$V/L = (H_f - h_L)/(H_v - H_f) \quad \rightarrow (5)$$

Igualando (3) y (5).

$$V/L = (x_f - x_L)/(y_D - x_f) = (H_f - h_L)/(H_v - H_f) \quad \rightarrow (6)$$

Reordenando.

$$(y_D - x_f)/(H_v - H_f) = (x_f - x_L)/(H_f - h_L) \quad \rightarrow (7)$$

Con esto es mostrado que en un diagrama entalpía-concentración. Los puntos a, b y f que representan a las corrientes L, V y F, deben estar en una línea recta. Además puesto que las corrientes V y L están en equilibrio, estarán situadas en una línea de unión y es localizada por medio de un método de aproximaciones sucesivas cuando son conocidas F,  $x_f$  y  $H_f$  (punto f del diagrama).

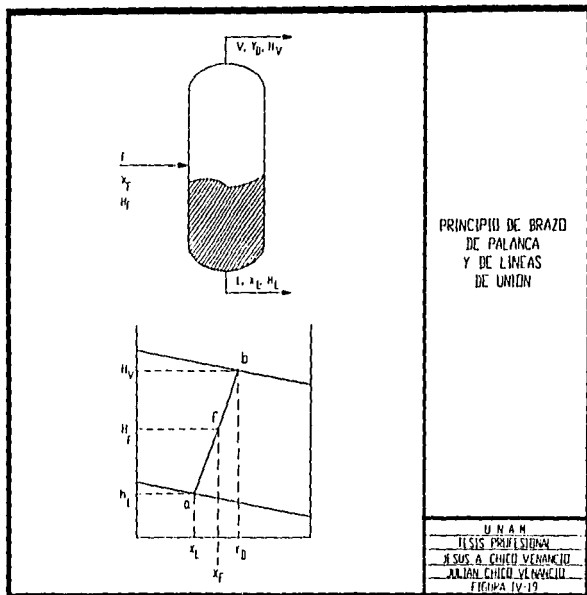
Si se toma como consideración que la línea af es la hipotenusa de un triángulo rectángulo, usando las propiedades de triángulos rectángulos, se establece que:

$$V/L = af/fb \quad \rightarrow (8)$$

Esta es la regla del brazo de palanca invertido, la cual establece que las mol Kg. de V/mol Kg. de L es igual a la longitud de la línea af/ longitud de la línea fb (Fig. IV-19).







PRINCIPIO DE BRAZO  
DE PALANCA  
Y DE LINEAS  
DE UNION

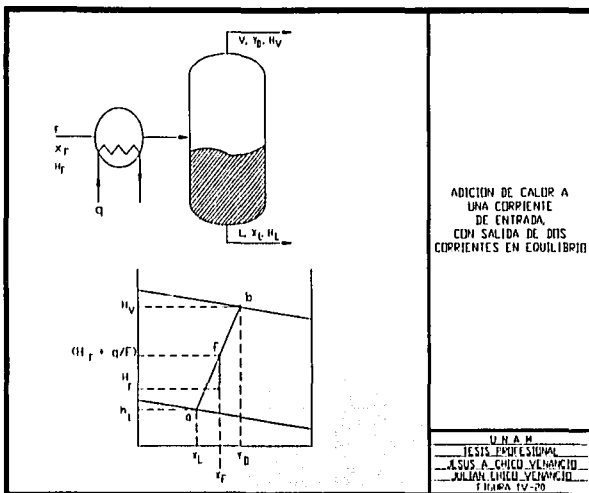
U N A M  
I N S T I T U T O  
N O R M A L I Z A D O R  
D E E S T A D O S  
V E N E Z U E L A S  
C O M I S I O N N A C I O N A L  
D E I N T E R M E D I A C I O N E S  
E D I C I O N I V - 1 9

2. Adición de calor a las corrientes.- En la figura IV-20 se cuenta con un sistema al cual le es añadido calor  $q$  (KJ/hr o KW) a la corriente de alimentación. Es muy similar a la situación de la figura anterior exceptuando la adición de calor. Los balances de materiales (1) y (3) son idénticos en este caso. Para el balance del calor se escribe la expresión siguiente:

$$H_f F + q = (H_f + q/F) F = H_v V + h_L L \rightarrow (9)$$

En el resultado final la entalpía de la alimentación está representada por  $(H_f + q/F) F$  en la gráfica de entalpía-concentración. Similarmente si es extraído un calor  $q$  (KJ/hr o KW) de cierta corriente por ejemplo de la corriente L, su entalpía se representará en la gráfica como  $(h_L - q/L)$ .



**EJEMPLO**

**DESTILACIÓN DIFERENCIAL SIMPLE.**- Una mezcla de 100 moles que contiene 50 mol % de n-pentano y 50 mol % de n-heptano se destila en condiciones diferenciales a 101.3 KPa hasta obtener 40 moles. ¿Cuales son las composiciones promedio del total del vapor destilado y la composición del líquido remanente? Los datos de equilibrio son los siguientes, donde  $x$  y  $y$  son fracciones mol de n-pentano:

$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1.000	1.000	0.398	0.836	0.059	0.271
0.867	0.984	0.254	0.701	0	0
0.594	0.925	0.145	0.521		

**SOLUCIÓN:** Los valores que se usarán en la ecuación (4) son  $L_1 = 100$  mol,  $x_1 = 0.50$ ,  $L_2 = 60$  mol,  $V$  (moles destiladas) = 40 mol. Sustituyendo en la ec (4).





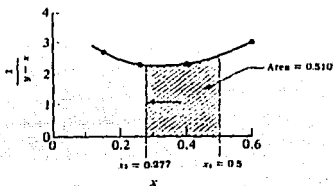
$$\ln \frac{100}{60} = 0.510 = \int_{x_2}^{x_1=0.5} \frac{dx}{y-x}$$

La incógnita es  $x_2$ , esto es, la composición del líquido  $L_2$  al final de la destilación diferencial. Para llevar a cabo la integración gráfica se traza la curva de  $1/(y-x)$  en función de  $x$ . Para  $x = 0.594$ , el valor de equilibrio de  $y$  es  $0.925$ . Entonces  $1/(y-x) = 1/(0.925 - 0.594) = 3.02$ . Entonces se incluye en la gráfica el punto  $1/(y-x) = 3.02$  y  $x = 0.594$ , y tres puntos más en la gráfica de idéntica manera.

Para determinar el valor de  $x_2$ , se obtiene el área de la ec. (4) bajo la curva desde  $x_1 = 0.5$  hasta un valor de  $x_2$  que nos de un área  $0.510$ . Por consiguiente,  $x_2 = 0.277$ . Sustituyendo en la ec. (5) y despejando la composición promedio de las 40 moles destiladas.

$$100(0.50) = 60(0.277) + 40(y_{\text{prom}})$$

$$y_{\text{prom}} = 0.835$$





#### IV.6 TORRES DE ENFRIAMIENTO.

**DEFINICIÓN.-** La torre de enfriamiento es una construcción de fábrica, metálica o de cualquier índole y uso, mucho más alta que ancha.

De una forma más general las torres de enfriamiento se pueden definir como dispositivos de enfriamiento artificial de agua. Son clasificadas como cambiadores de calor entre un volumen en circuito de agua y aire atmosférico.

Fundamentalmente las torres de enfriamiento son cambiadores de calor de mezcla, en los que es efectuada la transmisión de calor por un cambio de sustancia y convección entre los medios. La temperatura de agua reduce su calor cediéndolo a el aire sobre todo por evaporación, lo hace también por convección, esto en una forma secundaria. La convección interviene más cuando el ambiente es frío y la diferencia de temperaturas entre el agua y el aire es marcada.

La efectividad de la torre de enfriamiento depende en gran parte de la temperatura del bulbo húmedo del aire que llega a la torre.

#### TEORÍA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento que ha tenido mayor aceptación en forma más generalizada es la que desarrolló Merkel. Este análisis está basado en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora.

Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante provee la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento. La ecuación de Merkel se expresa en forma integrada de la forma siguiente:

$$\frac{KaV}{L} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dT}{h' - h}$$

en donde:

K = coeficiente de transferencia de masa (lb de agua / (hr.) (pie<sup>2</sup>).

a = área de contacto (pie<sup>2</sup>/pie<sup>3</sup> de volumen de torre).

V = volumen de enfriamiento activo (pie<sup>3</sup>/pie<sup>2</sup> de área plana).

L = velocidad del agua (lb/(h)) (pie<sup>2</sup>).

h' = entalpía del aire saturado a la temperatura del agua (Btu/lb).

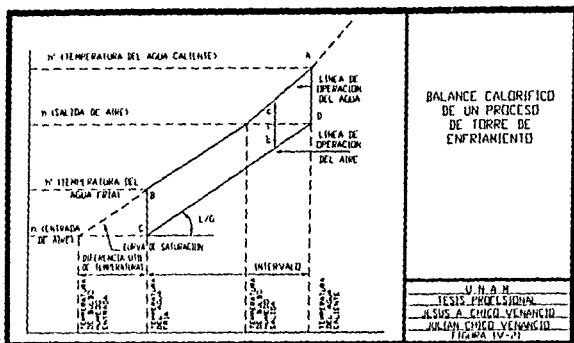
h = entalpía de la corriente del aire (Btu/lb).

T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> = temperaturas del agua en la entrada y salida (°F).

La parte derecha de la ecuación se expresa en términos de las propiedades del aire y el agua y es independiente de las dimensiones de la torre.

La figura IV-21 da a conocer las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor existente en una torre de contraflujo, en la que el aire fluye en sentido paralelo pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua. La perspicacia en la comprensión





de este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de una torre de enfriamiento.

La línea de operación del agua se representa por la línea AB y es especificada de acuerdo a las temperaturas del agua de la torre en la entrada y la salida. La línea de operación del aire comienza en C, está colocada verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la del bulbo húmedo de entrada. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). Para enfriar el agua fría  $1^\circ\text{F}$ , la entalpía por libra de aire aumenta 1 Btu multiplicada por la razón de libras de agua por libra de aire. La razón líquido/gas (L/G) es la pendiente de la línea de operación. El aire que sale de la torre se representa mediante el punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento es ilustrada como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la de bulbo húmedo.

Las coordenadas están referidas en forma directa a la temperatura y la entalpía de cualquier punto en la línea de operación del agua; pero, en la línea de operación del aire, la referencia sólo se hace a la entalpía de un punto. La temperatura del bulbo húmedo adecuada a cualquier punto de CD se encuentra proyectando dicho punto en sentido horizontal a la curva de saturación y luego en sentido vertical a la coordenada de temperaturas. La ecuación de Merkel está representada por medio del área ABCD de la figura este valor es conocido como característica de la torre y sólo varía con la razón L/G.

Si por ejemplo un aumento en la temperatura de bulbo húmedo de entrada mueve el origen C en sentido ascendente, y la línea CD se desliza a la derecha para





mantener un valor constante de  $KaV/L$ . Si la gama de enfriamiento aumenta, la línea CD se alarga. A una temperatura de bulbo húmedo constante, la estabilización se establece recorriendo la línea a la derecha a fin de mantener constante el valor de  $KaV/L$ . De otro modo, cualquier cambio en la razón  $L/G$  hace que varíe la pendiente de CD, y la torre alcanza el equilibrio con un nuevo valor de  $KaV/L$ .

Para valicinar el rendimiento de la torre, se necesitan conocer las características de torre requeridas para condiciones específicas, tanto del ambiente como del agua.

La característica de torre  $KaV/L$  se puede determinar por los métodos de Tchebycheff y el preparado por Woods y Betts, el primero esta basado en evaluar numéricamente una integración (ecuación anterior) y el segundo es menos exacto y consiste en la utilización de un nomograma (para mayor referencia de estos métodos consultar bibliografía).

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Anteriormente se menciona que la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura mínima posible a la que pudiera enfriarse el agua en una torre de enfriamiento. En la práctica esto es imposible ya que la temperatura del agua fría se aproxima pero no llega a igualar a la del bulbo húmedo si no que solo se enfriará el agua abajo de la temperatura de bulbo seco ambiente, esto es debido a que resulta ilusorio que se ponga en contacto toda el agua con el aire fresco en su recorrido a través de la torre.

Con el fin de poder estimar el funcionamiento de una torre de enfriamiento, se usan en la práctica dos conceptos que son el de aproximación y el de rango de enfriamiento.

Como "aproximación de bulbo húmedo" se le denomina a la diferencia de temperaturas entre la real del agua fría a la salida de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada. El "rango de enfriamiento" es el número real de grados de enfriamiento del agua en la torre, estos se expresan de la siguiente forma:

$$\text{APROXIMACIÓN} = (T_{\text{Temperatura del agua a la salida de la torre}} - T_{\text{Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada}})$$

$$\text{RANGO} = (T_{\text{Temperatura del agua a la entrada de la torre}} - T_{\text{Temperatura del agua a la salida de la torre}})$$

Otro concepto que es empleado para estimar y equiparar el comportamiento de una torre de enfriamiento es el de eficiencia y se expresa como sigue:

$$\text{EFICIENCIA} = \frac{\text{RANGO}}{(T_{\text{Temperatura del agua a la entrada}} - T_{\text{Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada}})}$$





La transferencia de energía en una torre de enfriamiento se manifiesta como una transferencia de calor sensible y es debida a la diferencia de temperaturas del agua y la temperatura del bulbo seco del aire. La otra es la transferencia de masa debido a la diferencia de las presiones del vapor en la superficie del agua y del aire. Por esta causa se evapora una pequeña cantidad de agua y el resto se enfría. El agua fría se regresa al medio de transferencia de calor para completar un ciclo continuo de ganancia y pérdida de energía.

Se facilita la evaporación del agua, fraccionandola en pequeñas gotas aumentando así la superficie de transferencia de calor. Esto se logra utilizando el agua a presión y llevándola a una espesa. Para aumentar la eficiencia, el agua fraccionada se hace caer sobre una superficie plana (superficie relleno) transformando las gotas en láminas que estarán en contacto directo con el aire que pasa a través de ellas.

La máxima transferencia de energía en una torre de enfriamiento se obtiene utilizando el sistema de corrientes opuestas, en otras palabras, mientras que el aire se suministra por los costados o por la parte inferior el agua desciende por gravedad.

En conclusión, la transferencia de energía del agua al aire no saturado en una torre de enfriamiento involucra una transferencia de calor y una transferencia de masa.

#### CLASIFICACIÓN.

Básicamente las torres de enfriamiento se clasifican de acuerdo a las siguientes características:

a)	Por la forma de producir el tiro en el aire	Torres de Tiro Natural Torres de Tiro Inducido
b)	Por la forma de producir el tiro dentro de la torre.	Torres de Tiro Forzado Torres de Tiro Inducido
c)	Por la forma en que actúan los flujos relativos del agua y del aire.	Torres de Contraflujo Torres de flujo Cruzado Torres de flujo Mixto
d)	Por el tipo de relleno empleado en la torre.	Torres con Relleno Tipo Película Torres con Relleno Tipo Salpiqueo

#### TIPOS DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

##### TORRES DE TIRO NATURAL.

En estas torres, la sección transversal de la chimenea se va reduciendo en el sentido del tiro (por lo que también es llamada torre hiperbólica), esto crea las condiciones suficientes para que la corriente del aire sea saturada adiabáticamente. El aire es





introducido por la parte inferior de la chimenea, la cual es soportada por una estructura de concreto. El tiro para poder enfriar el agua, es el resultado de una combinación de varios efectos en los que el efecto principal es la diferencia de densidades entre el aire saturado de humedad que sale de la torre y el aire que entra, mientras más húmedo sea el aire menor será su densidad.

Dependiendo de las condiciones de servicio la altura de estas torres variará entre los 60 y 100 metros y el diámetro de la base de 30 a 70 metros aproximadamente. Las principales características de este tipo de torre son enfriar el agua sin la necesidad de ventiladores, ya que no posee partes mecánicas en movimiento el costo para su mantenimiento es bajo, pero su inversión inicial es costosa, necesitan una gran superficie de terreno, no presentan problemas de recirculación de aire (esto debido a la altura de la chimenea) y el control de la temperatura del agua fría es difícil.

#### **TORRES DE TIRO MECÁNICO.**

Son aquellas que necesitan de ventiladores para que pueda fluir el aire a través de la torre, empleando estos se obtiene el completo control de flujo y velocidad del aire en la torre. Estas torres se dividen a su vez en torre de tiro forzado y torres de tiro inducido.

Entre sus características primordiales podemos encontrar la de requerir un menor espacio en comparación de las torres de tiro natural, existe un control de la temperatura del agua fría, los costos iniciales son bajos, se tiene un consumo de energía mayor, y además están expuestas a fallas mecánicas.

En seguida se explicara brevemente a estos tipos de torres.

**TORRES DE TIRO FORZADO.-** En estas torres el ventilador es montado en la base y se hace entrar aire en la base de la misma y se descarga con baja velocidad por la parte superior. Esta prescripción da la ventaja de ubicar a el ventilador y a el motor propulsor fuera de la torre, lugar muy conveniente para su inspección y mantenimiento en la reparación de estos equipos. Debido a que el equipo queda fuera de la parte superior caliente y húmeda de la torre, el ventilador no está expuesto a condiciones corrosivas, pero debido a la escasa velocidad de salida del aire, está torre esta sujeta a una recirculación excesiva de los vapores húmedos de salida que retornan a las entradas de aire. Puesto que la temperatura de bulbo húmedo del aire de salida es demasiado alta en comparación a la del aire circundante, existe una reducción en el buen desempeño, lo cual se pone de manifiesto mediante un incremento en la temperatura de agua fría (saliente).

**TORRES DE TIRO INDUCIDO.-** En la práctica estas torres en nuestro país son las de mayor empleo. Los ventiladores de estas torres se encuentran instalados en la parte superior (descarga), con esto se logra una importante mejoría en el reparto de aire dentro de la torre; los eliminadores de arrastre disminuyen los requerimientos de agua de repuesto, los tubos de descenso, los platos y las barras difusoras y las toberas de rocío aseguran una gran superficie para la evaporación del agua, con máximas velocidades volumétricas de transferencia de calor. Se dividen en torres de contraflujo y flujo cruzado.







En las torres de Contraflujo el flujo del aire es vertical, y su primordial ventaja se basa en que el agua más fría esta en contacto con el aire más seco y viceversa, esto garantiza una eficiencia máxima para el proceso de enfriamiento. Sin embargo, como el aire viaja en sentido contrario a las gotas del agua, esto provoca una pérdida de presión mayor y ocasiona que se consuma más potencia en los ventiladores.

En las torres de flujo Cruzado, el aire fluye ahora en forma horizontal y el agua cae por gravedad. Estas torres necesitan menor potencia de bombeo y son más robustas en comparación con las de contraflujo.

En las figuras IV-22 y IV-23 se muestran los tipos de torres de enfriamiento mencionadas.

**TORRES DE ENFRIAMIENTO SECAS, CON CONDENSADORES DE CONTACTO DIRECTO.-** En la eliminación del calor, los requerimientos termodinámicos pueden mejorarse empleando fuentes naturales de agua, como ríos, lagos y océanos. Para los lugares en los que el suministro del agua es limitado, se utilizan torres de enfriamiento húmedas, con lo que se logra la conservación de ésta (con pérdidas menores de agua que el 2 o 3%). En las torres de enfriamiento "secas" se disminuyen todavía más estas pérdidas. Mencionaremos una aplicación con un condensador de contacto directo. Las aletas superficiales de las torres de enfriamiento secas son sustituidas en los condensadores de superficie por los tubos. La rapidez de transferencia de calor es demasiado baja pero, a cambio de eso las superficies extendidas de costo comparativamente más bajo, se pueden equipar en torres de circulación inducida o en torres hiperbólicas.

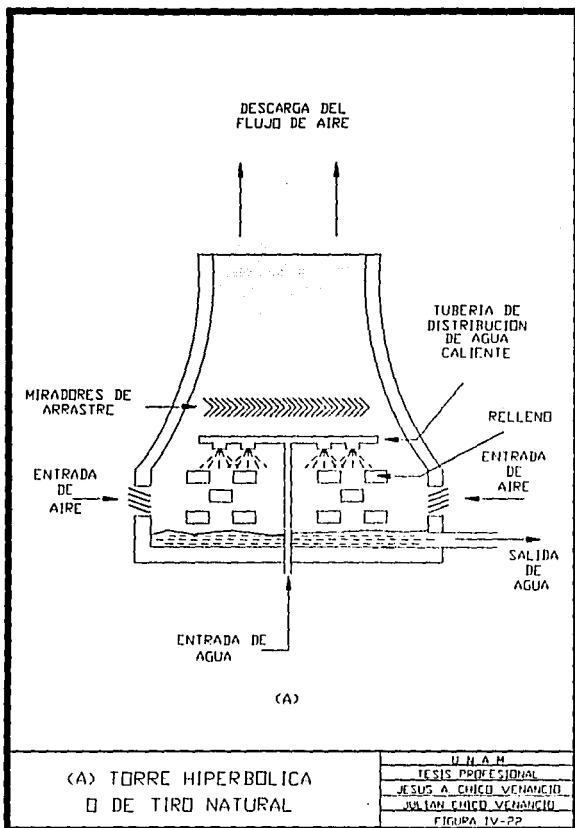
#### TIPOS DE RELLENO.

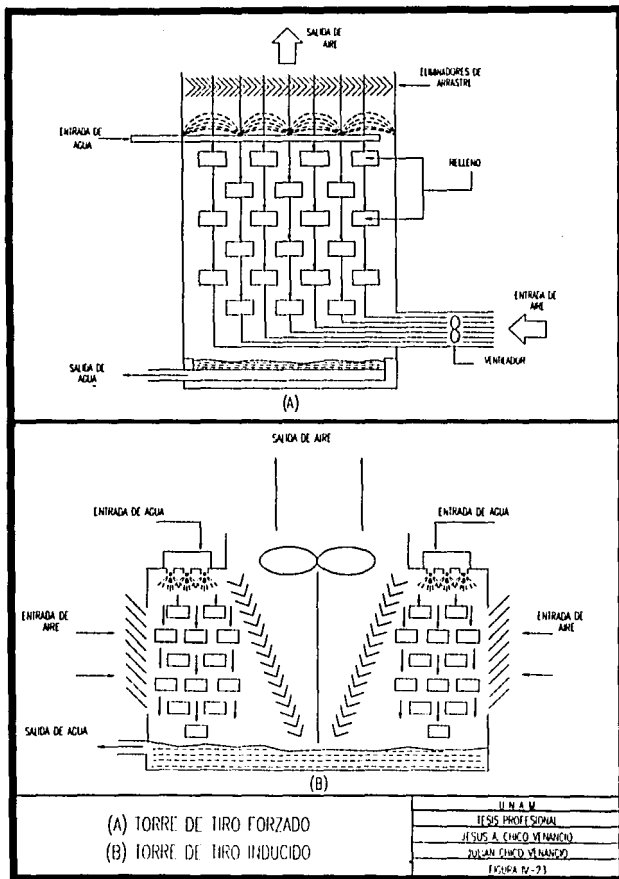
**CON RELLENO DE TIPO SALPIQUEO.-** En estas torres, el agua cae en forma de lluvia golpeándose las gotas alternativamente contra los elementos de relleno que se encuentran colocados en diversos niveles, con lo cual se provoca que las mismas se fraccionen formándose así, nuevas superficies de intercambio de calor.

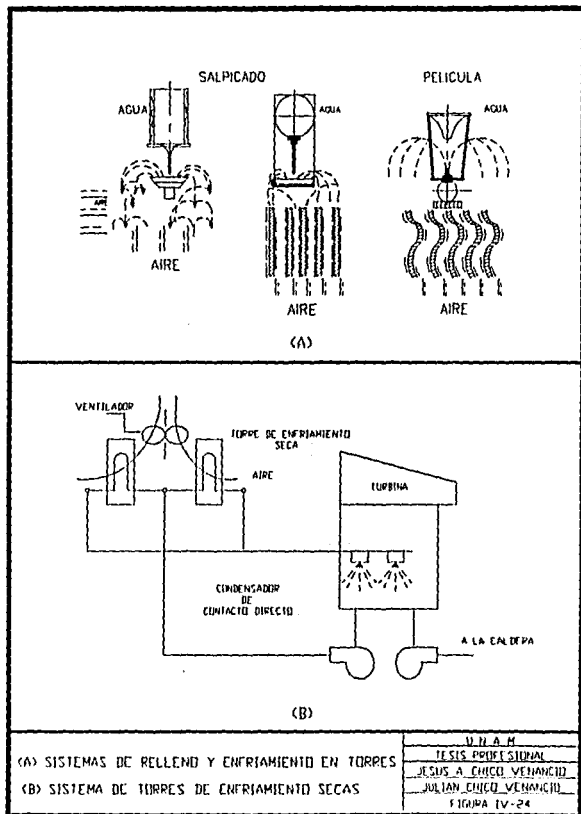
**TORRES CON RELLENO DE TIPO PELÍCULA.-** El agua fluye en forma de una película adherida a los elementos que forman el relleno, los cuales exponen una gran superficie de la misma al aire, evitando de esta manera la posible formación de gotas. Con la ausencia de gotas, se disminuye la caída de presión a través de la torre, esto permite un aumento en el volumen y velocidad del aire que se maneja.

La figura IV-24 muestra los sistemas de relleno de las torres y el sistema de torres de enfriamiento secas.











## LA PSICROMETRIA Y SU IMPORTANCIA EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.

La psicrometría, es la parte de la física que estudia las condiciones atmosféricas, y en particular lo relacionado con la humedad del aire.

En las torres de enfriamiento (húmedas), la transferencia de calor se transmite del agua hacia el aire atmosférico, por este motivo se requiere tener un conocimiento adecuado del proceder y características del aire atmosférico.

La Carta Psicrométrica o Carta de Humedad (Fig. IV-25) representa un medio gráfico para representar las relaciones para, y entre los balances de materia y energía de las mezclas de aire y vapor de agua. Su distribución consiste de coordenadas para humedad y la temperatura de bulbo seco  $T_{bs}$ , además de los parámetros (líneas) correspondientes que se enuncian a continuación:

- a) Humedad relativa 10 a 90%.
- b) Volumen de humedad constante (Volumen húmedo).
- c) Líneas de enfriamiento adiabático que son equivalentes (solamente para el vapor de agua) a las líneas de bulbo húmedo o psicrométricas.
- d) La curva 100% de humedad o curva de aire saturado.

Quando se necesitan hacer cálculos frecuentes es más fácil usar estos diagramas, en donde, teniéndose el conocimiento de dos variables se pueden establecer las demás características del aire. El inconveniente que se tiene de su uso es que se construyen para una determinada presión, es decir, que solo se pueden utilizar para un lugar prescrito.

Los primordiales datos climatológicos que se requieren para el diseño de torres de enfriamiento húmedo son los siguientes:

- a) Temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ).
- b) Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ).
- c) Presión barométrica ( $P_b$ ).

Estos datos, deberán ser del lugar específico donde se construirá la torre de enfriamiento. La temperatura de bulbo húmedo de diseño, generalmente es establecida en base a un nivel de frecuencia del 5%, es decir aquella temperatura cuyo tiempo de duración es igual o excede el 5% de las horas totales de Verano (Junio, Julio, Agosto y Septiembre). Se usa el mismo discernimiento de diseño para elegir la temperatura de bulbo seco de diseño. La presión barométrica de diseño, se determina en base a una media aritmética, esto es, debido a que generalmente varía muy poco.

Los parámetros básicos que determinan las condiciones del aire atmosférico al realizar un balance de materia y energía en una torre de enfriamiento (húmeda), desde el punto de vista técnico son los siguientes:

1. Temperatura.
2. Presión.
3. Humedad.





4. Volumen.
5. Densidad.
6. Calor específico a presión constante.
7. Entalpia.

### SELECCIÓN DE TORRES DE ENFRIAMIENTO.

La elección de una torre de enfriamiento es un problema de optimización técnico-económico (se necesitan conocer los costos e información de variables proporcionados por los fabricantes, además se debe tomar en cuenta la relación existente con las demás partes del sistema de enfriamiento), que depende en gran parte de las condiciones climatológicas. Hoy en día debido a la escasez del agua, ha sido necesario utilizar torres secas. Sin embargo, estas no son competitivas en lugares donde no hay agua, debido a que su costo es mucho mayor comparado con el de una torre húmeda, sus presiones de escape de la turbina son altas ocasionando pérdidas de potencia y elevando el consumo de combustible.

En nuestro país, las torres de tiro natural están en desventaja económicamente habiendo debido a sus características de operación mencionadas anteriormente. Las plantas termoeléctricas convencionales utilizan torres de enfriamiento de tiro mecánico y las Centrales Nucleoeléctricas las de tiro natural.

#### EJEMPLO.

Se requiere volver a diseñar una torre de enfriamiento cuyo ventilador tiene una capacidad de  $8.30 \times 10^6$  pies<sup>3</sup> de aire húmedo por hora (a 80°F y 65°F de temperatura de bulbo húmedo).

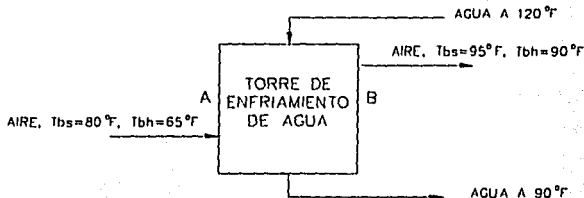
El aire de descarga sale a 95°F y a la temperatura de bulbo húmedo de 90°F.

Mediante un balance de materia y energía determinar:

¿Que cantidad de agua puede enfriarse en lb/hr (m) si dicha agua no se recircula, entrando a la torre a 120°F y de la cual sale a 90°F.

SOLUCION:

1. Diagrama del proceso:





2. De la carta psicrométrica se obtienen los valores de los parámetros que determinarán las condiciones atmosféricas del aire de entrada (A) y de salida (B) de la torre de enfriamiento:

-Parámetros o propiedades atmosféricas del aire a condiciones de presión y temperatura.

		Entrada A	Salida B
Peso de vapor de H <sub>2</sub> O	(lb de H <sub>2</sub> O/lb aire seco)	0.0098	0.0297
humedad específica (ha)	(granos de humedad (H <sub>2</sub> O)/lb de aire seco)	69	208
Entalpía del aire (Ha)	(BTU/lb de aire seco)	30.05 - 0.12 = 29.93	55.93 - 0.10 = 55.83
Volumen específico del aire (Va)	pies <sup>3</sup> /lb de aire seco	13.82	14.65

Formulando el balance combinado de materia y energía:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

Aire y agua en el aire de entrada + Corriente de agua que entra = Aire y agua en salida de aire + Corriente de agua que sale

$$H_{a(e)} M_{a(e)} + H_{H_2O(e)} W_{H_2O(e)} M_{a(e)} = H_{a(s)} M_{a(s)} + H_{H_2O(s)} W_{H_2O(s)} M_{a(s)} - H_{H_2O(s)} W'_{H_2O(s)} M_{a(s)}$$

$$H_{a(e)} M_{a(e)} + H_{H_2O(e)} W_{H_2O(e)} M_{a(e)} = H_{a(s)} M_{a(s)} + H_{H_2O(s)} M_{a(s)} (W_{H_2O(s)} - W'_{H_2O(s)})$$

Reordenando:

$$H_{a(e)} M_{a(e)} + H_{H_2O(e)} W_{H_2O(e)} M_{a(e)} = H_{a(s)} M_{a(s)} + H_{H_2O(s)} (W_{H_2O(s)} - W'_{H_2O(s)}) M_{a(s)} \rightarrow (*)$$

donde:  $W'_{H_2O(s)}$  = Pérdida de agua hacia el aire

$W'_{H_2O(s)}$  = Peso de vapor de agua a la salida - Peso de vapor de agua a la entrada

$W'_{H_2O(s)}$  = 0.0297 lb de agua/lb de aire seco - 0.0098 lb de agua/lb de aire seco

$$W'_{H_2O(s)} = 0.0199 \text{ lb de agua/lb de aire seco}$$

Sustituyendo en ecuación (\*)

$$H_{a(e)} M_{a(e)} + H_{H_2O(e)} W_{H_2O(e)} M_{a(e)} = H_{a(s)} M_{a(s)} + H_{H_2O(s)} (W_{H_2O(s)} - (0.0199)) M_{a(s)}$$

Calculo de propiedades (valores de entalpía de aire, de agua y flujo masico del aire), en entrada:





$H_{a(e)}$  = de carta psicrométrica = 29.93 BTU/lb de aire seco

$Ma_{(e)}$  = Capacidad del ventilador/Volumen de aire a la entrada =  $(8.30 \times 10^6 \text{ pies}^3 \text{ de aire húmedo/hr}) / (13.82 \text{ pies}^3/\text{lb de aire seco})$

$$Ma_{(e)} = 6.00 \times 10^5 \text{ lb de aire seco/hr.}$$

$$H_{H_2O(e)} = C_{pH_2O} \Delta T = C_{pH_2O} (T_{H_2O(e)} - T_{\text{referencia}})$$

donde: la temperatura de referencia es 32°F y la presión es de 1 atm.

$$C_{pH_2O} = 1 \text{ BTU/lb}_{H_2O} \text{ } ^\circ\text{F}$$

Por lo tanto  $H_{H_2O(e)} = 1 \text{ BTU/lb}_{H_2O} \text{ } ^\circ\text{F} (120 - 32) \text{ } ^\circ\text{F} = 88 \text{ BTU/lb}_{H_2O}$

$$H_{H_2O(e)} = 88 \text{ BTU/lb}_{H_2O}$$

$W_{H_2O(e)}$  = Peso del vapor de agua a la entrada = ? (lb de H<sub>2</sub>O que entran a la torre con la corriente de agua por lb aire seco)

En salida:

$H_{a(s)} = 55.83 \text{ BTU/lb de aire seco}$  (de la Carta Psicrométrica)

$Ma_{(s)} = 6.00 \times 10^5 \text{ lb de aire seco/hr.}$  (ya calculado)

$H_{H_2O(s)}$  a condición de temperatura de salida del agua

$T_{H_2O(s)} = 90^\circ\text{F}$  (de tablas de vapor saturado)

$H_{H_2O(s)} = h_g = 58 \text{ BTU/lb}_{H_2O}$  (entalpía de líquido saturado)

$(W_{H_2O(s)} - 0.0199) = \text{lb de H}_2\text{O que salen de la torre en la corriente de agua por lb de aire seco}$

Balace de materia y energía en el proceso total:

$$H_{a(e)} Ma_{(e)} + H_{H_2O(e)} W_{H_2O(e)} Ma_{(e)} = H_{a(s)} Ma_{(s)} + H_{H_2O(s)} (W_{H_2O(s)} - (0.0199)) Ma_{(s)}$$

Haciendo sustitución de valores:

$$\begin{array}{l}
 \frac{29.93 \text{ BTU}}{\text{lb aire seco}} \left| \frac{6.00 \times 10^5 \text{ lb aire seco}}{\text{hr.}} \right. + \frac{88 \text{ BTU}}{\text{lb}_{H_2O}} \left| \frac{W_{H_2O(e)} \text{ lb}_{H_2O}}{\text{lb aire seco}} \right| \left. \frac{6.00 \times 10^5 \text{ lb aire seco}}{\text{hr.}} \right. \\
 = \frac{55.83 \text{ BTU}}{\text{lb aire seco}} \left| \frac{6.00 \times 10^5 \text{ lb aire seco}}{\text{hr.}} \right. + \frac{58 \text{ BTU}}{\text{lb}_{H_2O}} \left| \frac{(W_{H_2O(s)} - 0.0199) \text{ lb}_{H_2O}}{\text{lb aire seco}} \right| \left. \frac{6.00 \times 10^5 \text{ lb aire seco}}{\text{hr.}} \right.
 \end{array}$$

Por partes:

$$29.93 \text{ BTU/lb aire seco} + 88 \text{ BTU/lb}_{H_2O} (W_{H_2O(e)} \text{ lb}_{H_2O}/\text{lb de aire seco}) =$$

$$55.83 \text{ BTU/lb aire seco} + 58 \text{ BTU/lb}_{H_2O} (W_{H_2O(s)} - 0.0199) \text{ lb}_{H_2O}/\text{lb aire seco}$$

$$29.93 \text{ BTU/lb aire seco} + 88 W_{H_2O(e)} \text{ BTU/lb}_{H_2O} = 55.83 \text{ BTU/lb aire seco} + 58 W_{H_2O(s)}$$

$$\text{BTU/lb H}_2\text{O} - 58(0.0199) \text{ BTU/lb}_{H_2O} \text{ lb}_{H_2O}/\text{lb aire seco}$$







$$29.93 \text{ BTU/lb aire seco} + 88 W_{\text{H}_2\text{O}(a)} \text{ BTU/lbH}_2\text{O} = 55.83 \text{ BTU/lb aire seco} + 58 W_{\text{H}_2\text{O}(a)} \text{ BTU/lbH}_2\text{O} - 1.1542 \text{ BTU/lb aire seco}$$

Despejando:

$$88 W_{\text{H}_2\text{O}(a)} \text{ BTU/lbH}_2\text{O} - 58 W_{\text{H}_2\text{O}(a)} \text{ BTU/lbH}_2\text{O} = 55.83 \text{ BTU/lb aire seco} - 1.1542 \text{ BTU/lb aire seco} - 29.93 \text{ BTU/lb aire seco}$$

Restando queda:

$$30 W_{\text{H}_2\text{O}(a)} \text{ BTU/lb H}_2\text{O} = 24.7458 \text{ BTU/lb aire seco}$$

Despejando queda:

$$W_{\text{H}_2\text{O}(a)} = ((24.7458 \text{ btu/lb aire seco}) / (30 \text{ BTU/lbH}_2\text{O})) = 0.82486 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco}$$

$$W_{\text{H}_2\text{O}(a)} = 0.825 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco}$$

Calculo de lb de agua que salen de la torre en la corriente de agua por lb de aire seco.

$$(W_{\text{H}_2\text{O}(a)} - \text{Pérdida de agua hacia el aire } (W'_{\text{H}_2\text{O}(a)})) = (W_{\text{H}_2\text{O}(a)} - 0.0199) = 0.825 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco} - 0.0199 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco}$$

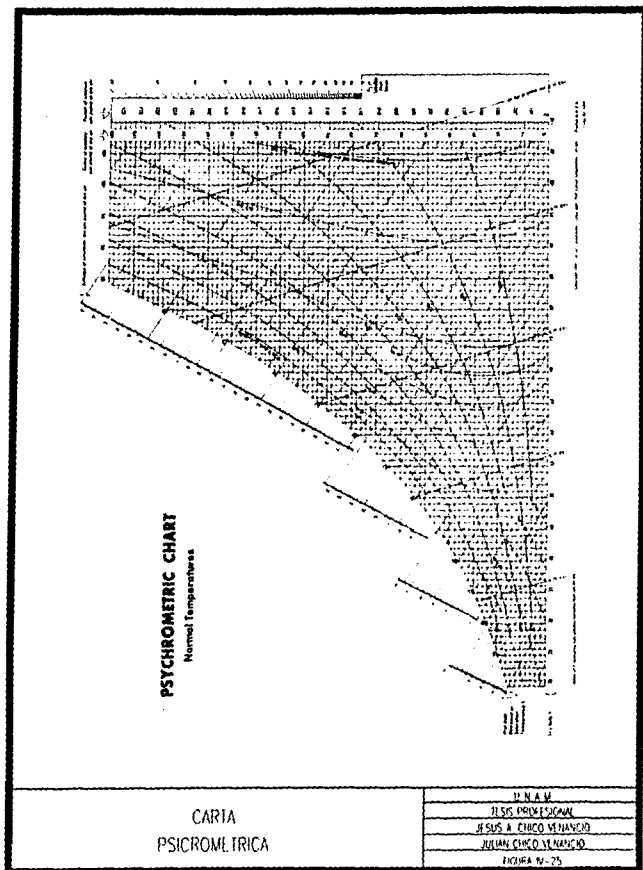
$$W_{\text{H}_2\text{O}(a)} = 0.8051 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco}$$

Cantidad total de agua que sale de la torre  $M_{(a)}$ :

$$M_{(a)} = W_{\text{H}_2\text{O}(a)} M_{(a)} = (0.805 \text{ lbH}_2\text{O/lb aire seco}) \times (6.00 \times 10^5 \text{ lb aire seco/hr.}) = 483000 \text{ lbH}_2\text{O/hr.}$$

$$M_{(a)} = 4.83 \times 10^5 \text{ lbH}_2\text{O/hr.}$$







## IV.7 REACTORES.

### DEFINICIÓN Y UTILIDAD EN PROCESOS.

Un reactor químico se puede definir de la forma más simple como un sistema de reacción. El punto final al que intenta llegar un ingeniero químico que trabaja con reacciones químicas incluye en forma general, la selección del tipo de reactor entre muchas alternativas de diseño, la determinación del tamaño necesario del reactor y la especificación de las condiciones de funcionamiento. Para llegar a este objetivo debe de conocer la velocidad de la reacción química, la máxima conversión que puede obtenerse, la naturaleza de los procesos físicos que interactúan con la reacción química y los parámetros que influyen en los aspectos anteriores.

Los reactores químicos son usados para todo tipo de reacciones, por ejemplo los reactores de craqueo catalítico de la industria de refino de petróleo, los estanques de lodos activados para el tratamiento de agua de alcantarillado, los tanques de polimerización para plásticos, pinturas y fibras. Las tinajas farmacéuticas para aspirinas, penicilina y droga para el control de la natalidad, por mencionar algunos.

### CLASIFICACIÓN.

Los reactores químicos se han clasificado generalmente en dos formas, la primera relacionada con el tipo de operación y la segunda por sus características de diseño.

La primera clasificación es asociada principalmente con reacciones homogéneas y la segunda por las características mencionadas anteriormente.

La tabla siguiente muestra la clasificación de los reactores.

TIPO DE OPERACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO
Reactor Discontinuo	Reactor Tanque
Reactor Continuo	Reactor Tubular
Reactor Semicontinuo	Reactor en Torre
	Reactor de Lecho Fluidificado
	Reactor para Fases Dispersadas

### TIPOS DE REACTOR

Los reactores químicos que se utilizan en los diversos procesos industriales existen en una gran variedad de diseños y no siempre tienen alguna relación específica con la clase de reacción o el tipo de operación. Regularmente se emplean equipos de diversos diseños para una misma reacción.

**REACTOR CONTINUO.**- Los reactivos se introducen y los productos son extraídos al mismo tiempo y en forma continua en los reactores de esta índole. El reactor puede tener forma de tanque, una estructura tubular o una torre, tiene muchas aplicaciones





en plantas a gran escala con el propósito de disminuir los costos de operación y facilitar el control de calidad del producto.

**REACTOR DISCONTINUO.-** Admite todos los reactivos al inicio y estos son procesados según un curso predeterminado de reacción durante el cual no se alimenta o se extrae ningún material. Comúnmente la forma del reactor es la de un tanque con o sin agitación. Su uso principal es en la producción a pequeña escala. Para el diseño del reactor la mayoría de los datos cinéticos básicos se obtienen en esta clase de equipo.

**REACTOR SEMICONTINUO.-** Los reactores que no satisfacen en su totalidad las dos clases anteriores pertenecen a este grupo. En uno de los casos, algunos de los reactivos son cargados al inicio, en tanto que los restantes se dosifican constantemente conforme es desarrollada la reacción.

De acuerdo con sus características de diseño los reactores químicos se clasifican de la siguiente manera:

**REACTOR TANQUE.-** Quizá es el tipo de uso más común. Está equipado con algún medio de agitación (centrifugación, oscilación o sacudidas) así como de elementos para la transferencia del calor (intercambiadores de calor de cubierta, externos e internos). Admite la operación continua y la discontinua en amplias gamas de temperaturas y presiones. Exceptuando los líquidos muy viscosos, el tanque con agitación produce un mezclado casi perfecto (por retromezclado). Para una operación continua se pueden conectar en serie varios reactores. También existen depósitos de reacción unitarios de funcionamiento continuo, divididos en cierta cantidad de compartimientos en la que cada uno de los cuales equivale a un tanque con agitación.

**REACTOR TUBULAR.-** Su fabricación es de un solo tubo continuo o varios tubos en paralelo. Los reactivos entran por un extremo del reactor y el producto sale por el otro, con una variación continua en la composición de la mezcla de reacción entre estos dos puntos. La transferencia de calor hacia el reactor o desde este es lograda por medio de una camisa o de un diseño de tubos y carcasa. Los tubos del reactor pueden estar empacados con granulos de catalizador o sólidos inertes. Su utilización es en casos donde es indeseable el retromezclado en la dirección del flujo, la disociación catalítica de hidrocarburos es un ejemplo de la aplicación de este género.

**REACTOR EN TORRE.-** Se caracteriza por su estructura cilíndrica vertical con una relación grande entre la altura y el diámetro. Puede tener desviadores o rellenos sólidos (reactivos, catalizadores o inertes), o bien, se restringe a una torre vacía, su uso es para procesos continuos de reacciones heterogéneas, las unidades de absorción de gases para reacciones gas-líquido, incluyendo las torres empacadas, las de platos y las de rociamiento son un ejemplo.

**REACTOR DE LECHO FLUIDIFICADO.-** Es un depósito cilíndrico vertical que contiene partículas sólidas finas que son catalizadores o reactivos. La corriente del reactivo fluido e introducida en la base del reactor a una velocidad en la que los sólidos flotan en la corriente del fluido sin que se salgan del sistema. Para estas





condiciones, el lecho de partículas se comporta como un líquido en ebullición y tiene una tendencia a equilibrar la composición de la mezcla de reacción y la temperatura a lo largo del lecho. Normalmente se considera que esta es una de las ventajas específicas del reactor del lecho fluidizado, entre sus desventajas encontramos la trituración del catalizador con el arrastre del material fino resultante

**REACTOR PARA FASES DISPERSADAS.**- Caracterizado por una columna vertical que esta contenida por partículas de catalizador muy finas suspendidas en un medio líquido (ja aceite es un ejemplo) que puede ser uno de sus reactivos. El reactivo gaseoso es burbujeado por la suspensión y se disuelve en el medio líquido en donde se producen las reacciones catalizadas. Este procedimiento facilita el control de la temperatura debido a la gran capacidad calorífica y las características favorables de transferencia de calor del líquido.

En la Figura IV-26 se presentan los esquemas de los reactores de tanque agitado y tubulares.

#### ECUACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE UN REACTOR.

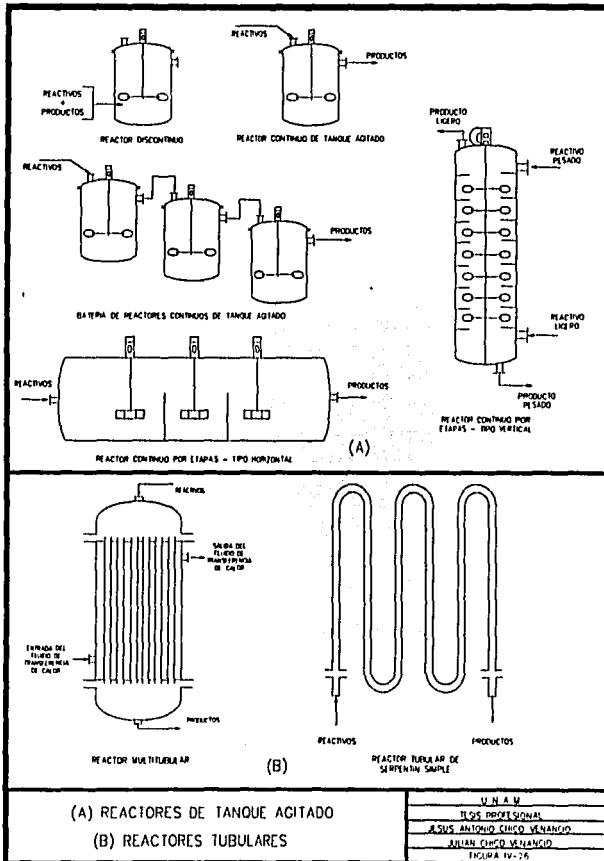
Entre las principales consideraciones que deben hacerse en el diseño de un reactor, desde el punto de vista de la economía del proceso, hay que incluir la capacidad de la producción del mismo y su capacidad para dar la composición de producto deseada. Este último aspecto adquiere una importancia especial en procesos relacionados con reacciones múltiples. Para poder estar en las condiciones apropiadas para la selección y fijar el tamaño de un reactor, se necesitan algunos parámetros comunes que permitan una equiparación sistemática de varios tipos de reactores.

Las ecuaciones de diseño se basan comúnmente en tres clases de reactores ideales. El primero de ellos es el reactor discontinuo. Todos los reactivos se inyectan en este aparato y el producto no se descarga hasta que termina el proceso, lo que representa un procedimiento de estado inestable en lo que respecta a la composición de la mezcla de reacción. La suposición de un mezclado perfecto implica una composición homogénea en el reactor en cualquier momento dado.

El reactor de flujo tipo tapón es la segunda clase, y supone un mezclado completo en la dirección radial; pero no permite ninguna difusión en dirección del flujo (es decir, no hay retomezclado). Esto da como resultado que los perfiles de velocidad, temperatura y composición sean planos en cualquier área transversal perpendicular al flujo, pero la composición varía a lo largo de la trayectoria de flujo.

El tercer tipo de reactor ideal es el de retomezclado (o tanque agitado) con corrientes continuas a régimen estacionario en los flujos de alimentación y de producto. La alimentación adopta rápidamente una composición final uniforme a lo largo del reactor, debido a la perfección del mezclado. Además la corriente de salida tendrá la misma composición que la que prevalece en el interior del mismo. Para la **CAPACIDAD DEL REACTOR**, el parámetro que se ha utilizado frecuentemente como una medida de la capacidad del reactor es el tiempo medio de residencia,  $\theta$ , o el espacio de tiempo  $\Theta$ .







El tiempo medio de residencia se define como el promedio de los períodos durante los cuales las porciones individuales de la mezcla de reacción se mantienen dentro del reactor. Por otra parte, el tiempo espacial  $\Theta$  está definido como el lapso que se transcurre para procesar un volumen de alimentación al reactor en condiciones específicas. En otras palabras, si un tiempo espacial de 1.5 horas implica que se necesitaran 1.5 horas para procesar un volumen de alimentación de reactor en condiciones conocidas. La recíproca del espacio de tiempo se denomina velocidad espacial  $S$ .

De acuerdo a lo anteriormente expuesto es evidente que  $\theta$  y  $\Theta$  son diferentes en general, a menos que la densidad del fluido se mantenga constante en todo el reactor. El tiempo medio de residencia,  $\theta$ , se usa sobre todo en el señalamiento de la capacidad de un reactor discontinuo, mientras que la capacidad volumétrica de la alimentación de un reactor de flujo continuo es representada por medio de el tiempo espacial  $\Theta$  o la velocidad espacial  $S$ . El cálculo de  $\theta$  requiere el conocimiento de la expresión de velocidad tanto como de la modificación de  $V$  durante el desarrollo de la reacción. Por disparidad  $\Theta$ , se determina mediante los datos de alimentación o dosificación en las condiciones especificadas.

La tabla IV-4 contiene la lista de varias expresiones matemáticas para el tiempo medio de residencia y el tiempo espacial como magnitudes de capacidad de varios reactores ideales. Estas ecuaciones se derivaron tomando como base balances de materiales y expresiones de velocidad que cubren tanto casos generales como especiales.

La determinación del tamaño de un reactor utilizando las ecs. de la tabla 1 se ilustra con el ejemplo general de un reactor de flujo tapón. El tiempo espacial se calcula basándose en datos cinéticos de laboratorio.

Por lo que la capacidad del reactor que sea requerida estriba en la velocidad de alimentación especificada y la concentración del componente en la alimentación, así como en el espacio de tiempo.





TABLA IV-4  
Ecuaciones básicas de diseño-capacidad de reactores ideales simples\*

TIPO DE REACTOR	Ecuación general de diseño	Ecuación de diseño $V = V_0(1+\gamma_A X_A)$	Ecuación de diseño para una reacción isotérmica de n-ésimo orden con $V = V_0(1+\gamma_A X_A)$
DISCONTINUO: $V = \text{CONST.}$	$\theta = C_{A0} \int dx_A / -r_A$	$= C_{A0} \int dx_A / -r_A$	$= 1/kC_{A0}^{n-1} \int dx_A / (1-X_A)^n$
DISCONTINUO: $\kappa = \text{CONST.}$	$\theta = x_{A0} \int dx_A / V(-r_A)$	$= C_{A0} \int dx_A / ((1+\gamma_A X_A) (-r_A))$	$= 1/kC_{A0}^{n-1} \int ((1+\gamma_A X_A)^{n-1} / (1-X_A)^n) dx_A$
FLUJO TAPON	$\theta = 1/S = C_{A0} \int dx_A / -\dot{r}_A$	$= C_{A0} \int dx_A / -r_A$	$= 1/kC_{A0}^{n-1} \int ((1+\gamma_A X_A)^n / (1-X_A)^n) dx_A$
REACTOR DE RETOMEZC.	$\theta = 1/S = C_{A0} X_A / -r_A$	$= C_{A0} X_A / -r_A$	$= 1/kC_{A0}^{n-1} X_A (X_A(1+\gamma_A X_A))^n / (1-X_A)^n$

$x_A = (C_{A0} - C_A)/C_{A0}$  y  $dx_A = -dC_A/C_{A0}$  sólo cuando  $\gamma = 0$

$\kappa =$  presión total.

\* Adaptada de Levenspiel, Chemical Reactor Engineering, Wiley, Nueva York, 1962.

$V =$  volumen del reactor.

$-r_A =$  velocidad de desaparición del componente A.

$x_A =$  conversión fraccionaria.





TABLA IV-5.  
ECUACIONES BASICAS DE DISEÑO.

A + B = E = r<sub>1</sub>  
B + E = S = r<sub>2</sub>

REACTOR	TIPO DE OPERACION	BALANCE DE MATERIAL	BALANCE DE ENERGIA *	APLICACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.
Discontinuo	A y B se cargan inicialmente; no se extrae ningún producto durante la reacción.	$\frac{dN_E}{d\theta} = (r_1 - r_2)V$ $\frac{dN_S}{d\theta} = r_2V$ $N_A = C_{A0}V - N_E - N_S$ $N_B = C_{B0}V - N_E - 2N_S$	$\frac{dQ}{d\theta} = UA_w(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 + r_2\Delta H_2)V$	<p>Apl.: pequeña escala o proceso complicado para producto costoso.</p> <p>Vent.: versatil rendimiento elevado del producto.</p> <p>Desav.: Costos de operación elevados</p>
Semi-continuo	Solo A se carga inicialmente; B se introduce en forma continua y no se extrae ningún producto durante la reacción V = V <sub>0</sub> + FB/ρ <sub>F</sub>	$\frac{dN_E}{d\theta} = (r_1 - r_2)V$ $\frac{dN_B}{d\theta} = C_{B0} \frac{F}{\rho_F} - (r_1 + r_2)V$ $\frac{dN_S}{d\theta} = r_2V$ $N_A = C_{A0}V_0 - N_E - N_S$	$\frac{dQ}{d\theta} = FC_{B0}H_{B0}/\rho_F + UA_w(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 + r_2\Delta H_2)V$ <p>A<sub>w</sub> = 4V/D para área de transferencia de calor en camisa</p>	<p>Apl.: regular la distribución del producto en reacciones homogéneas.</p> <p>Vent.: la distribución de producto deseada se obtiene regulando la concentración de un reactivo. Buen control de temperatura.</p> <p>Desav.: Costos de operación elevados.</p>
Semi-continuo	Solo A se carga inicialmente; B se introduce en forma continua con un sobreflujo constante de producto. Reacción homogénea con fase líquida. V = const.	$\frac{dN_A}{d\theta} = -\frac{F}{\rho_F} N_A - r_1V$ $\frac{dN_B}{d\theta} = -\frac{F}{\rho_F} (N_B - C_{B0}V) - (r_1 + r_2)V$ $\frac{dN_E}{d\theta} = \frac{FN_E}{\rho_F V} + (r_1 - r_2)V$ $\frac{dN_S}{d\theta} = \frac{FN_S}{\rho_F V} + r_2V$	$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{F}{\rho_F} (\Sigma C_{p0}H_{i0} - \frac{1}{V} \Sigma N_i H_i) + UA_w(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 + r_2\Delta H_2)V$	igual que arriba
semicontinuo	Solo A (líquido) se carga inicialmente; B (gas) se introduce de manera	$\frac{dN_B}{d\theta} = C_{B0} \frac{F}{\rho_F} - (r_1 + r_2)V$	$\frac{dQ}{d\theta} = (FC_{B0}H_{B0}/\rho_F) + UA_w$	igual que arriba

241

CONTINUA EN PAGINA SIGUIENTE



	continua; no hay extracción de producto; $V = \text{const.}$	$\frac{dN_E}{d\theta} = (r_1 - r_2)V$ $\frac{dN_S}{d\theta} = r_2V$ $N_A = C_{A0}V - N_E - N_S$	$(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 + r_2\Delta H_2)V$ $A_w = 4V/D$ Para área de transferencia de calor en camisa	
Continuo de flujo, con mezclado inverso	Flujo continuo de estado estacionario de las corrientes de alimentación y producto; $V = \text{constante.}$ Retromezclado total en reactor de tanque agitado	$\frac{dN_A}{d\theta} = 0 = (C_{A0}V - N_A) \frac{F}{\rho_F V} - r_1V$ $\frac{dN_B}{d\theta} = 0 = (C_{B0}V - N_B) \frac{F}{\rho_F V} - (r_1 + r_2)V$	$(\Sigma C_{w,i}H_{w,i} - \frac{1}{V} \Sigma N_i H_i) \frac{F}{\rho_F} + UA_w(T_w - T) - (r_1\Delta H_1 + r_2\Delta H_2)V = 0$	Apl.: producción a gran escala. Normalmente se utilizan varios reactores en serie. Vent.: grado limitado de retromezclado. Desv.: costos del capital elevado
Flujo continuo en forma de tapón	Flujo continuo de estado estacionario en las corrientes de alimentación y producto; mezclado radial completo, sin retromezclado, es decir, no hay mezclado longitudinal. Reactor tubular de lecho empacado con catalizador.	$\frac{d(\rho v x_c)}{dl} = (r_1' - r_2')\rho_c$ $\frac{d(\rho v x_s)}{dl} = r_2'\rho_c$	$\frac{dQ^*}{dl} = 4U(T_w - T)D - (r_1'\Delta H_1 + r_2'\Delta H_2)\rho_c$ para área de transferencia de calor en camisa	Apl.: reacción fluida a gran escala en la que el retromezclado no es deseable. Vent.: grado limitado de retromezclado. Desv.: costos de capital y operación elevados, sobre todo en el caso de reacciones lentas. La sustitución del catalizador es difícil.

Para operaciones isotérmicas,  $dQ/d\theta = dQ'/dl = 0$ ; para operaciones adiabáticas,  $T_w - T = 0$ .

\*  $Q = \Sigma N_i C_{p,i}(T - T_s)$ ;  $Q' = \rho v \Sigma x_i C_{p,i}(T - T_s)$



**BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA.**- En el diseño de un reactor químico es necesario contar también con ecuaciones que constituyan los balances de materia y energía. El balance de materia hace la descripción de las velocidades de la transformación química de varios de los componentes en lo que respecta a una expresión de la velocidad específica, de la velocidad de flujo de la alimentación y el volumen del reactor. En consecuencia, la composición de la mezcla de reacción se calcula partiendo del balance de materia. La velocidad de generación o absorción de calor expresada como función de la velocidad de reacción y varias propiedades térmicas del sistema de reacción, se originan del balance de energía. Luego, esta información sirve para diseñar el equipo de transferencia de calor para el reactor.

En la tabla IV-5 se da un resumen de ecuaciones de balance de materia y energía para diferentes clases de reactores y varios tipos de operaciones, fundamentándose en un sistema de reacción complejo que esta basado en la siguiente estequiometría (teoría de las proporciones en las que se combinan entre sí las especies químicas):



Las velocidades directas netas son respectivamente  $r_1$  y  $r_2$  para la primera y segunda reacciones; pero no se asignan expresiones especificadas de velocidad (es decir, el mecanismo de reacción). Estas ecuaciones presuponen que los productos E y S no están presentes en la alimentación. Además en la tabla IV-5 se incluyen aplicaciones, ventajas y desventajas de varias clases de reactor.

**ECUACIONES DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE VARIOS REACTORES.**- Cuando el sistema consta de varios reactores, las ecs. De las tablas 4 y 5 se aplican a cualquier reactor individual del sistema. La eficiencia general del mismo depende no solo del tipo de reactor, sino también de la manera en que están conectados (esto es, en serie, en paralelo o en una combinación de ambas modalidades).

#### NOMENCLATURA DE LA TABLA IV-5

- $A_w$  = área de transferencia de calor. ( $\text{Pie}^2$ )
- $C_{A_0}, C_{B_0}$  = concentración de los componentes A y B en la alimentación (moles/ $\text{pie}^3$ ).
- $C_{p_i}$  = capacidad calórica molar del i-ésimo componente, (BTU/(mol) ( $^{\circ}\text{F}$ )).
- $C_{p_0}$  = concentración del componente y en la alimentación (moles/ $\text{pie}^3$ ).
- D = diámetro del reactor, (pies.)
- F = velocidad en la alimentación, (moles/seg.)
- $H_{i_0}$  = entalpía del i-ésimo componente en la corriente de alimentación, (BTU/mol.)
- $H_i$  = entalpía del i-ésimo componente, (BTU/mol.)
- $\Delta H_1, \Delta H_2$  = calor de reacción para las reacciones 1 y 2, respectivamente, (BTU/mol.)
- L = longitud del reactor tubular, (pies.)
- $N_i$  = cantidad de moles del componente i.
- r = velocidad de reacción; [moles/(s) ( $\text{pie}^3$ )].
- $r'$  = velocidad de reacción, [moles/(s) (lb de catalizador)]
- T = temperatura de la mezcla reaccionante ( $^{\circ}\text{F}$ )
- $T_0$  = temperatura de referencia, ( $^{\circ}\text{F}$ ).





$T_w$  = temperatura de la fuente o del drenaje del calor de donde se toma o hacia donde de la mezcla de la reacción transfiere dicho calor, ( $^{\circ}F$ ).

$U$  = coeficiente global de transferencia de calor,  $[BTU/(s)(pie^2)(F)]$ .

$V_0$  = volumen inicial de la mezcla de reacción, ( $pie^3$ ).

$V$  = volumen del reactor, ( $pie^3$ ).

$v$  = velocidad de la mezcla de reacción, ( $pie/seg$ ).

$X_{A...S}$  = fracción mol de componentes  $A...S$

$\rho$  = densidad molar de mezcla de reacción en cualquier punto del tubo, ( $moles/pie^3$ ).

$\rho_c$  = densidad del catalizador (según relleno), ( $lb/pie^3$ ).

$\rho_F$  = densidad molar de la alimentación, ( $moles/pie^3$ ).

$\theta$  = tiempo, ( $seg$ ).

### CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR QUE SE DEBEN TOMAR EN CONSIDERACIÓN.

Las ecuaciones de diseño anteriormente mencionadas corresponden a los tres tipos esenciales de reactores, están basados en la intuición de que la mezcla de reacción se comporta obedeciendo a los patrones característicos de flujo ideal de este género de reactores. Es decir, se supone, por un lado, un retromezclado completo en reactores discontinuos o de agitación continua y, por el otro un flujo tipo tapón en el reactor tubular de flujo. Los modelos matemáticos que se derivan de este modo para reactores ideales nos sirven como un estándar de referencia en el diseño de reactores prácticos.

Debido a que los reactores prácticos no satisfacen por completo las suposiciones anteriores, en muchos casos se logran acercamientos por medio de modelos del reactor ideal, sin que se introduzca un error grave. Por otra parte, existen varios casos en los que las desviaciones del comportamiento ideal son tan notorias que se generaría un error exageradamente grande si el diseño se basara por completo en los modelos ideales. Como ejemplos citaremos el reactor catalítico tubular de lecho fijo con enfriamiento de paredes y el reactor de tanque agitado que se usa para una mezcla viscosa de reacción. Estas desviaciones se resuelven en ocasiones introduciendo factores de corrección a los modelos del reactor ideal; pero a menudo se utilizan métodos de diseño enteramente empíricos.

Además del comportamiento no ideal, es importante tomar en consideración las características del reactor que gobiernan el grado de conversión y la composición del producto. Estas incluyen el tipo y tamaño del reactor, la temperatura y la presión de la reacción. El influjo de los últimos dos parámetros es particularmente compleja en procesos que comprenden reacciones homogéneas múltiples al igual que en casi todas las reacciones heterogéneas.

### FACTORES DE CONSIDERACIÓN PARA LA SELECCIÓN DEL TIPO DE REACTOR.

Para la selección preliminar del tipo de reactor, es necesario que ya se hayan establecido la cinética de la reacción y la forma en que se ve afectada por los





parámetros clave del proceso, además deben haberse determinado ya las condiciones óptimas de operación. En el diseño de un reactor industrial, las consideraciones más trascendentales para la elección de un tipo de reactor dado son, por lo común, el costo y el beneficio. Así pues, los criterios que se siguen para dicha selección deben ser tales que disminuyan los costos a un mínimo e incrementen el beneficio al máximo. Estos criterios se establecen a través de factores que se clasifican en tres grupos diferentes, estos son técnicos, económicos y sociales. Los aspectos técnicos se vinculan con los factores químicos y físicos del proceso que intervienen en el rendimiento y la calidad del producto, en tanto que los factores económicos implican la inversión de capital y los costos de operación. Los factores sociales son aquellos que no tienen un valor monetario directo, por ejemplo, la seguridad y la satisfacción de los operadores y los efectos dañinos que pueda producir el reactor en el medio ambiente.

Los factores químicos y físicos del proceso están íntimamente ligados entre sí a causa de las interacciones inherentes a lo procesos de velocidad de ambos géneros. Los factores químicos del proceso incluyen el tipo de reacción que puede ser simple o compleja, la velocidad de reacción, la capacidad de producción y la necesidad de un catalizador. Los factores físicos del proceso incluyen la modalidad de la transferencia de calor (isotérmica, adiabática o de otra índole), el grado de retromezclado y la cantidad de las clases de fases comprendidas. Estos factores están casi siempre tan íntimamente vinculados con los factores químicos del proceso, que no siempre es posible separarlos.

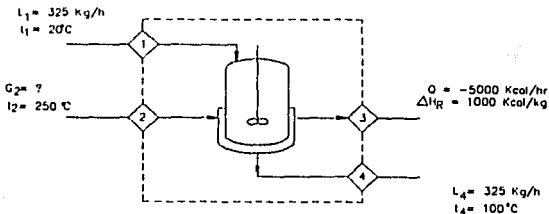
#### EJEMPLO.

Para calentar un reactor se usa vapor saturado a 250°C, el cual entra a la chaqueta que rodea al reactor y sale condensado.

La reacción absorbe 1000 Kcal/kg de material en el reactor. Las pérdidas de calor son de 5000 kcal/hr. Los reactivos se colocan en el reactor a 20°C y salen a 100°C. Si la carga está constituida por 325 Kg del material y tantos productos como reactivos tienen una capacidad calorífica media de 0.78 Kcal/kg °C, ¿Cuántos kg de vapor de agua se requieren por kg de carga?

Supóngase que la carga permanece en el reactor durante una hora.

SOLUCIÓN: El diagrama de flujo es el siguiente:





El balance de materiales es el siguiente:

$$Q_p = Q_g$$

$Q_p$  = calor perdido por el vapor

$$Q_p = G_3 (H_3 - H_4)$$

$$Q_g = L_1(\Delta H) = L_1 C_{p1} \Delta t + H_R L_1 + Q \text{ pérdidas}$$

Haciendo cálculos

entalpías de vapor

$$H_3 \frac{T=250^\circ\text{C}}{40\text{-kg/cm}^2} = 668.8 \text{ Kcal/kg}$$

$$H_4 \text{ vapor condensado} = 258 \text{ Kcal/kg}$$

Calor ganado

$$Q_g = 325(0.78)(100-20) + 325(1000) + 5000 = 350200 \text{ Kcal/hr}$$

Vapor necesario

$$350200 = G_3(668.8 - 258)$$

$$G_3 = 852.5 \text{ kg/hr}$$

Por lo tanto se requieren 852.5 kg/hr de vapor, o sea, 2.62 kg de vapor/kg de carga.





#### IV.8 SECADORES.

**DEFINICIÓN.-** El secador es un aparato que sirve para desecar artificialmente por medio de calor. El secamiento es la operación de expulsar la humedad de una sustancia por medio del calor. El término humedad es usado de una manera genérica, es decir, incluye a todo líquido volátil que es eliminado en la operación de secamiento.

Fue necesario hacer la inclusión de la expresión "por medio del calor" para distinguir el secamiento de los métodos de deshidratación mecánica, tales como la filtración, la separación centrífuga y la decantación, en la que estos métodos no requieren transferencia de calor y son empleados normalmente para la extracción de grandes volúmenes de líquido libre.

#### CLASIFICACIÓN DE SECADORES.

Existen dos maneras en que se pueden clasificar los secadores: la primera es fundada en los caracteres físicos de los materiales que han de ser secados, esta sirve como una guía para elegir secadero para un determinado problema. La segunda clasificación se fundamenta en el método de transferencia de calor al material mojado que contiene el secadero, y depende de diferencias de diseño y operación de los aparatos, este método indica que existe cierta correlación entre la gran variedad de tipos de secadores.

A continuación se presenta la clasificación de los secadores a base de la transferencia de calor. Esta clasificación además diferencia también la operación intermitente de la continua. Los secadores directos son aquellos en los cuales el líquido evaporado se elimina por el medio calentador, y los secadores indirectos son aquellos en los que la extracción del vapor es efectuada independientemente del medio citado.

Cabe hacer la aclaración que existen otro tipo de secadores diversos entre los que se encuentran los secadores infrarrojos para los cuales su funcionamiento depende de la transmisión de energía de radiación para evaporar la humedad. Esta energía es suministrada eléctricamente por medio de lámparas infrarrojas, refractarios incandescentes calentados por gas o resistencias eléctricas.

En la industria química el calentamiento infrarrojo no se usa frecuentemente para la eliminación de la humedad, pero contrariamente, en el homeado o la desecación de capas de pintura y en el calentamiento de capas delgadas de materiales encuentra su aplicación principal.

Los secadores dieléctricos todavía no encuentran un campo amplio de aplicación, estos operan sobre el principio de la generación de calor dentro de los sólidos colocándolos dentro de un campo eléctrico de alta frecuencia, deseca madera, objetos de cerámica etc.





DIRECTOS	INDIRECTOS
<b>INTERMITENTES</b>	<b>INTERMITENTES</b>
Secadores de circulación penetrante	Secadores de paila o artesas agitadas
Secadores de bandejas y compartimientos	Secadores de congelación
<b>CONTINUOS</b>	Secadores rotatorios al vacío
Secadores de bandejas	Secadores de bandeja al vacío
Secadores de lámina continua	<b>CONTINUOS</b>
Secadores de transmisión neumática	Secadores de cilindro
Secadores rotatorios	Secadores de tambor
Secadores de aspersión	Secadores con transportador helicoidal
Secadores de circulación penetrante	Secadores rotatorios
Secadores de túnel	Secadores de bandejas vibratorias
	Secadores tipos especiales

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DE OPERACIÓN.

#### SECADORES DIRECTOS.

1. El secado es efectuado por transferencia de calor por la convección entre el sólido mojado y un gas caliente, el cual extrae el líquido vaporizado y a su vez suministra el calor que se necesita para la evaporación.
2. El medio calentador puede ser aire calentado por vapor, gases de combustión, vapor o un gas inerte calentado (nitrógeno).
3. Las temperaturas del secamiento tienen una variación que va desde la temperatura atmosférica hasta los 750°C.
4. A las temperaturas de secamiento que sean menores a las de ebullición del líquido, el contenido de vapor de este líquido en el gas es muy importante para la determinación de la velocidad del secamiento y el contenido definitivo del líquido que hay en el sólido.
5. Cuando en todo el proceso las temperaturas de secamiento son más elevadas que la de ebullición, normalmente el aumento de vapor en el gas o el aire no retarda la velocidad de secamiento ni produce algún efecto en el contenido final de humedad.
6. Para que se efectúe el secamiento a baja temperatura es necesario a menudo deshumidificar el gas secador cuando hay mucha humedad en la atmósfera.
7. La eficiencia de los secadores directos se aumenta como consecuencia de aumentar la temperatura en la boca de entrada del gas secador para una temperatura fija de escape.

#### SECADORES INDIRECTOS.

1. El secamiento se efectúa mediante la transferencia de calor por conducción a el material mojado, habitualmente por una pared metálica de retención. Ordinariamente el calor es producido por vapor condensante, pero además se







puede producir también por sales fundidas, aceite caliente, agua caliente, electricidad, etc.

2. Variación de la temperatura de secamiento de la superficie de contacto que va desde menos el punto de congelación hasta los 531°C.
3. Particularmente este tipo de secadores son muy apropiados para secar a una presión muy reducida y con atmósfera inerte, por lo que son adaptables a la recuperación de disolventes.
4. Si funcionan con vapor condensante son muy eficientes, debido a que el calor se suministra de acuerdo a las necesidades. Sin embargo, igualmente que en todos los secadores, es reducida notablemente su eficiencia cuando es requerido un bajo contenido de humedad final.
5. En este tipo de secadores la recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados es más satisfactorio el modo de manejo que en los secadores directos.

#### TIPOS DE EQUIPOS.

1. **SECADOR DE BANDEJAS.**- También llamado secador de anaqueles, de gabinete o compartimento, el material que puede ser un sólido en forma de terrones o pasta es colocado en bandejas que pueden o no ser montadas en carretillas removibles. El aire se sopla sobre el material que esta contenido en las bandejas por medio de un ventilador que recircula aire calentado con vapor sobre la superficie de las bandejas, paralelamente a las mismas. También es usado calor por medio de electricidad, cuando el calentamiento es bajo.
2. **SECADORES INDIRECTOS DE VACÍO CON ANAQUELES.**- Son calentados indirectamente y de tipo lotes. Estos consisten de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, para que pueda operarse al vacío. Los anaqueles huecos se montan dentro de la cámara y son conectados en paralelo con los colectores de vapor de entrada y salida. Los sólidos mojados se encuentran en las bandejas que se colocan sobre los anaqueles huecos. A través de las paredes metálicas es conducido por radiación el calor entre los anaqueles. La circulación de agua caliente se usa para operaciones de temperaturas más bajas. Estos secadores son usados para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura o que se oxidan fácilmente.
3. **SECADORES CONTINUOS DE TÚNEL.**- Suelen ser compartimientos de bandejas o carretillas que operan en serie, los sólidos son colocados sobre bandejas o en carretillas que continuamente se mueven por un túnel con gases calientes pasando sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire puede ser a contracorriente, paralelo o una combinación de ambos. Demasiados alimentos son secados por este procedimiento. Son utilizados transportadores perforados o de fondo de tamiz cuando se desea secar partículas sólidas granulares.
4. **SECADORES ROTATIVOS.**- Consiste de un cilindro hueco que rota sobre su eje, normalmente con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos son alimentados por la parte superior y se mueven por el cilindro a medida que este gira. El calentamiento se lleva a cabo por medio de contacto directo a base de gases calientes con flujo a contracorriente. Algunas veces el calentamiento es indirecto a través de la pared calentada del cilindro. Las





- partículas granulares se mueven despacio hacia adelante y a contracorriente con los gases calientes. Se pueden encontrar diversas variaciones de este modelo.
5. **SECADORES DE TAMBOR.**- Tiene un tambor de metal calentado, en su exterior es evaporada la capa delgada de una suspensión o líquido hasta que se seca. Este sólido seco se raspa del tambor que gira lentamente. Este modelo es adecuado para el proceso de suspensiones o pastas de sólidos finos, así como para soluciones verdaderas. El funcionamiento del tambor parte es como evaporador y otra como secador. Tiene otras variaciones, una de ellas es el de tambores dobles rotatorios con alimentación por inmersión.
  6. **SECADORES POR PULVERIZACION.**- Para este modelo, un líquido o suspensión es pulverizada o rociada con una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua de las gotas se vaporiza con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido que son separadas de la corriente de gas. En la cámara de pulverización el flujo de gas y de líquido puede ser a contracorriente, paralelo o mixto. Las gotas finas son formadas al introducir el líquido en toberas de pulverización o en discos giratorios de rociado de alta velocidad en el interior de una cámara cilíndrica. Es conveniente tomar precauciones para que las gotas o partículas húmedas del sólido no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que hayan secado. Para esto son empleadas cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por la parte del fondo de la cámara por medio de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas finas. La obtención de la leche en polvo se realiza por este proceso.

Las figuras IV- 27 y IV-27-1 muestran algunos tipos de secadores.

#### APLICACIÓN DE LA PSICOMETRÍA AL SECADO.

En cualquier proceso de secado, para el que se supone un suministro de calor adecuado, de temperatura y la velocidad a las cuales es producida la vaporización del líquido dependen de la concentración del vapor en la atmósfera circundante. En el secado al vacío u otros procesos que implican atmósferas con 100% de vapor, la temperatura de vaporización del líquido será igual o mayor que la temperatura de saturación del mismo, a la presión del sistema. (Cuando esta presente líquido libre o una superficie mojada, el secado ocurre a la temperatura de saturación, al igual que el agua libre a 14.7 lb/pulg<sup>2</sup> de presión absoluta se vaporiza en una atmósfera de vapor al 100%, a 212°F.)

Por otro lado cuando el vapor que se desprende, se purga del medio secador utilizando un segundo gas (inerte), la temperatura en la que se produce la vaporización estará en función de la concentración del vapor en el gas que la rodea. En efecto el líquido se debe calentar a una temperatura a la que su presión de vapor sea idéntica o exceda a la presión parcial de vapor en el gas de purga. En la situación opuesta se producirá una condensación.

Para casi todas las operaciones de secado el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Debido a que se utilizará la carta de humedad o psicrométrica se dará un repaso a sus componentes.





**TEMPERATURA DE BULBO SECO (Tbs).**- Es la temperatura del aire tomada con el termómetro normal y que se representa por las líneas verticales en la carta de humedad. Además se le puede definir como la temperatura de la mezcla vapor-gas determinada por la inmersión del bulbo en la mezcla.

**TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO (Tbh).**- Es la temperatura en estado estacionario que se logra por una cantidad pequeña de líquido evaporado en presencia de una gran cantidad de mezcla insaturada vapor-gas. Para la determinación de esta temperatura se utiliza un termómetro cuyo bulbo se cubre con una camisa humedecida con líquido y se sumerge a la corriente de la mezcla gaseosa mediante un movimiento rápido y su temperatura debe ser menor a la de la temperatura del bulbo seco. La escala de esta temperatura húmeda se encuentra sobre la línea de saturación, que es la curva del lado izquierdo del diagrama.

**HUMEDAD ESPECIFICA.**- Es la relación existente entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco y se representa por líneas rectas horizontales perpendiculares a la temperatura de bulbo seco, esta se encuentra en la línea recta vertical del lado derecho su fórmula es la siguiente:

$$H = 0.622(P_A/P - P_A)$$

Donde:

$P_A$  = presión parcial del vapor de agua.

$P$  = presión total.

El aire saturado es aquel en el cual el vapor de agua se encuentra en equilibrio con el agua líquida en las condiciones prevaletientes de presión y temperatura. En esta mezcla, la presión parcial del vapor del agua en la mezcla aire-agua, es igual a la presión de vapor  $P_{AS}$  del agua pura a la temperatura establecida. Por lo que la humedad de saturación se expresa de la forma siguiente:

$$H_S = 0.622(P_{AS}/P - P_{AS})$$

**PORCENTAJE DE HUMEDAD.**- Se define como 100 multiplicado por la humedad real  $H$  del aire, dividida entre la humedad  $H_S$  que tendría el aire si estuviera saturado a esas mismas temperatura y presión, se expresa como:

$$H_p = 100(H/H_S)$$

**PORCENTAJE DE HUMEDAD RELATIVA.**- Es la cantidad de saturación de una mezcla aire vapor de agua, también puede expresarse como porcentaje de humedad relativa  $H_R$  usando presiones parciales:

$$H_R = 100(P_A/P_{AS})$$

**PUNTO DE ROCÍO.**- Es aquella temperatura en la cual se inicia la condensación del vapor de agua del aire esta se puede encontrar una vez determinando un punto en la





carta psicrométrica se prolonga una línea horizontal del lado izquierdo hasta la línea de saturación.

**CALOR HÚMEDO.**- Es el calor necesario expresado en Joules o KJ que se requiere para elevar la temperatura de un Kg. de aire seco más el vapor de agua presente en un °K o 1°C a presión constante. Las capacidades caloríficas del aire y del vapor de agua se pueden suponer que son constantes en un intervalo normal de temperaturas e iguales a 1.005 KJ/Kg. Aire seco °K y 1.88 KJ/Kg. de vapor de agua °K, se expresa de las formas siguientes:

$$C_s \text{ (KJ/Kg. Aire seco } ^\circ\text{K)} = 1.005 + 1.88H \quad (\text{SI})$$
$$C_s \text{ (btu/lb}_m \text{ aire seco } ^\circ\text{F)} = 0.24 + 0.45H \quad (\text{inglesas})$$

**VOLUMEN HÚMEDO.**- Es el volumen total en  $\text{m}^3$  de 1 Kg. de aire seco más el vapor que contiene a 1.0 atm. Abs. de presión y a la temperatura del gas considerada. Haciendo uso de la ley de los gases ideales,

$$v_H \text{ (m}^3\text{/Kg. Aire seco)} = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} H) T^\circ\text{K}$$
$$v_H \text{ (pie}^3\text{/lb}_m \text{ aire seco)} = (0.0252 + 0.0405H) T^\circ\text{R}$$

Cuando existe una mezcla saturada de aire-vapor de agua  $H = H_s$  y  $v_H$  es el volumen saturado.

**ENTALPÍA TOTAL.**- La entalpía total de 1 Kg. de aire más su vapor de agua es  $H_T$  (J/Kg. o KJ/Kg. de aire seco). Si  $T_o$  es la temperatura base seleccionada para ambos componentes (habitualmente se toma como referencia 0°C), la entalpía total es el calor sensible de la mezcla aire-vapor más el calor latente  $\lambda_o$  en (J/Kg o KJ/Kg. de vapor de agua).

$$H_T \text{ (KJ/Kg. Aire seco)} = C_s(T - T_o) + H\lambda_o = (1.005 + 1.88H) (T - T_o \text{ } ^\circ\text{C}) + H\lambda_o$$
$$H_T \text{ (btu/lb}_m \text{ aire seco)} = (0.24 + 0.45H) (T - T_o \text{ } ^\circ\text{F}) + H\lambda_o$$

Habiendo dado un repaso a la carta psicrométrica, se explicara la importancia de esta en las aplicaciones de secado mediante el ejemplo siguiente.

#### EJEMPLO.

El aire de entrada a un secador tiene una temperatura de bulbo seco de 60°C (140°F) y un punto de rocío de 26.7°C (80°F). Usando la carta de humedad (Fig. IV-28) determinese:

- la humedad real  $H$ .
- el porcentaje de humedad  $H_p$ .
- el calor húmedo  $C_s$ .
- el volumen húmedo  $v_H$ .

#### SOLUCION:

El punto de rocío de 26.7°C es la temperatura a la que se considera que la mezcla tiene un 100% de saturación. Empezando en 26.7°C y trazando una vertical que corte





a la línea de 100% de humedad, puede leerse una humedad  $H = 0.0225$  Kg.  $H_2O/Kg.$  de aire seco. Esta es la humedad real del aire a  $60^\circ C$ . Expresado de otra forma, si se enfría aire de  $60^\circ C$  con una humedad  $H = 0.0225$ , su punto de rocío será  $26.7^\circ C$ . En unidades inglesas,  $H = 0.0225$  lb  $H_2O/lb$  de aire seco.

Localizado en la carta este punto de  $H = 0.0225$  y  $t = 60^\circ C$ , el porcentaje de humedad  $H_p$  resulta ser 14%, procediendo con una interpolación vertical entre las líneas de 10 y 20%. El calor húmedo para  $H = 0.0225$ , calculando con la ecuación del calor húmedo.

$$C_s = 1.005 + 1.88(0.0225) = 1.047 \text{ KJ/Kg. de aire seco } ^\circ K \text{ o } 1.047 \times 10^3 \text{ J/Kg. } ^\circ K$$

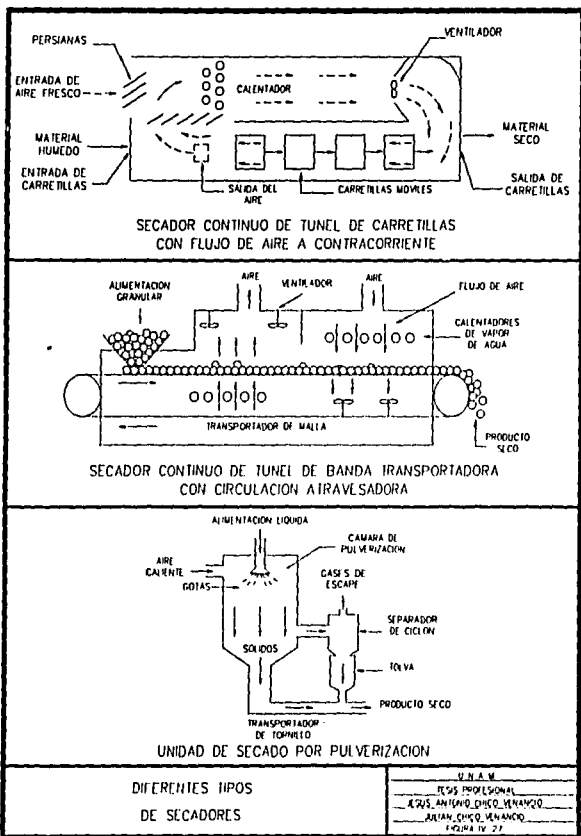
$$C_s = 0.24 + 0.45(0.0225) = 0.250 \text{ btu/lbm aire seco } ^\circ F$$

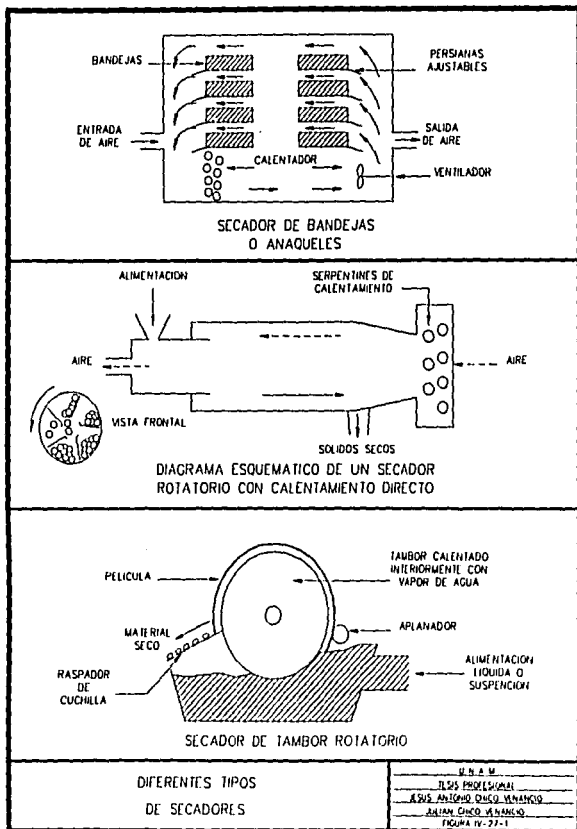
El volumen húmedo a  $60^\circ C$  es:

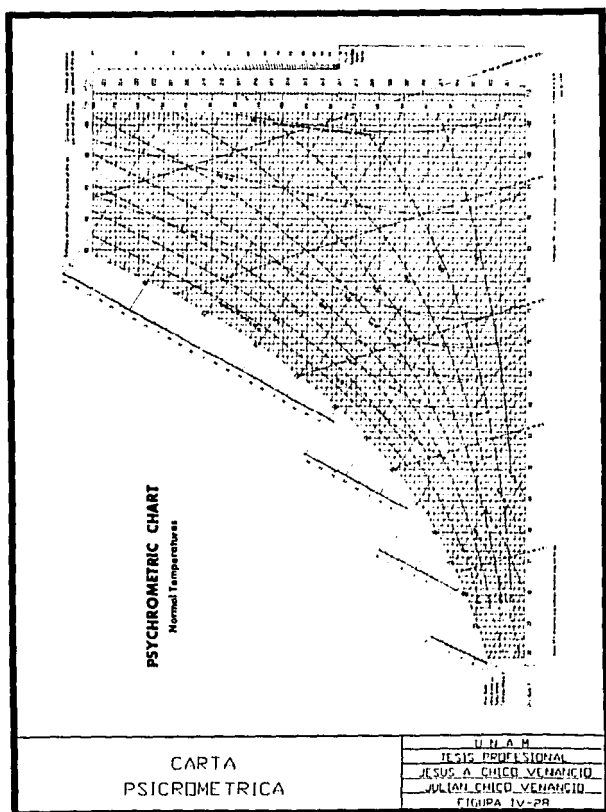
$$v_H = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} \times 0.0225) (60 + 273) = 0.977 \text{ m}^3/\text{Kg. Aire seco}$$

$$v_H = (0.0252 + 0.0405 \times 0.0225) (460 + 140) = 15.67 \text{ pie}^3/\text{lb}_m \text{ aire seco}$$











## TEMA V

### MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE EQUIPOS.

**OBJETIVO:**

FAMILIARIZAR AL ESTUDIANTE CON LOS PRINCIPALES MATERIALES DE FABRICACIÓN DE EQUIPOS Y SU SELECCIÓN DE ACUERDO A LAS PROPIEDADES DE LOS MISMOS.



## V.1 CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DE LOS METALES.

Los principales materiales que se emplean en ingeniería, están basados en los metales, estos se dividen en la siguiente forma: metales ferrosos, no-ferrosos y aleaciones.

Los metales ferrosos se pueden dividir en aceros al carbono, aceros aleados y hierros fundidos.

El nombre de acero al carbono indica que en cualquier fase ferrosa se tiene un gran exceso de hierro, más carbono y pequeñas cantidades de diversos elementos tales como el silicio, manganeso, níquel, fósforo y azufre. Estos aceros al carbono, de acuerdo a sus estructuras se pueden dividir en tres clases:

- 1.- **ACEROS HIPOEUTECTOIDES.**- Tienen de contenido de carbono de 0.008 a 0.83% y está formado por granos de ferrita y de perlita, si aumenta la concentración de carbono, aumenta la proporción de perlita, y con esto la resistencia del acero, pero su ductilidad decrece.
- 2.- **ACEROS AUTECTOIDES.**- Son esencialmente perlita, con cantidades mínimas de otros elementos tales como el manganeso (Mn).
- 3.- **ACEROS HIPEREUTECTOIDES.**- Consiste de perlita y de cementita y tienen un contenido mayor de 0.8% de carbono.

De acuerdo a sus diversas aplicaciones son divididos de la forma siguiente:

- 1.- **ACEROS EXTRASUAVES.**- Son aquellos que pueden soportar fuertes deformaciones en frío y tienen un contenido de 0.07% a 0.15% de carbono y se emplean para carrocerías de automóviles y en tubos estirados sin costuras.
- 2.- **ACEROS SUAVES.**- Son los más empleados y tienen un contenido de 0.15 a 0.25% de carbono.
- 3.- **ACEROS CON CONTENIDO MEDIO DE CARBONO.**- Tienen un contenido de 0.25 a 0.55% de carbono; este tipo de aceros suele someterse a tratamientos térmicos e incluyen a los aceros maleables, y a los empleados para árboles de transmisión, ejes, alambres, rieles y rodillos.
- 4.- **ACEROS CON CONTENIDO ALTO DE CARBONO.**- Son empleados cuando es necesaria demasiada solidez y resistencia al desgaste, (martillos, taladros, llaves de tuerca y cinceles), tienen de 0.55 a 0.9% de carbono.
- 5.- **ACEROS AL CARBÓN PARA HERRAMIENTA.**- Estos son mucho más sólidos y resistentes al desgaste que los anteriores, ejemplos de estos son herramientas para taladrar y dar acabado, partes móviles de maquinaria, cojinetes de bolas por mencionar algunos, su contenido de carbono es de 0.9 a 1.6%.

El contenido de elementos que tienen los aceros aleados es según sus características que a continuación se presentan:

El manganeso (Mn) es el constituyente más importante de los materiales ferrosos empleados en ingeniería después del carbono; el manganeso refuerza al acero y le produce un incremento en su dureza, otra característica es que forma una solución





sólida con la ferrita, pero si se une al azufre daña forma  $MnS$ , o esta presente como el carburo  $Mn_3C$ .

El cromo (Cr) y el níquel (Ni) aumentan la rigidez y la resistencia a la corrosión, esto debido a que forman óxidos complejos impermeables en la superficie un ejemplo de esto lo es el acero inoxidable.

El Molibdeno (Mo) a temperaturas elevadas ayuda a mantener la solidez del acero.

El Tungsteno (W) es utilizado primordialmente en los aceros para fabricar herramientas y matrices, además forma carburos estables e inhibe el crecimiento del grano en aceros que se someten a procesos térmicos.

El Silicio (Si) refuerza la ferrita y provoca la grafitización de la cementita en aceros con alto contenido de carbono, produciendo los aceros "autolubricados". Cabe aclarar que en muchos casos la grafitización es un fenómeno inconveniente.

Azufra (S) esté elemento generalmente es un componente nocivo ya que los aceros tienden a agrietarse durante las operaciones de trabajado a altas temperaturas.

El fósforo (P), existe en la solución sólida en la ferrita en forma de fósforo de hierro ( $Fe_3P$ ), provoca que la ferrita se segregue durante el trabajado a temperaturas elevadas por lo tanto es perjudicial.

Los aceros aleados pueden dividirse en aceros estructurales y aceros inoxidables. Estos últimos suelen contener Ni y Cr, y se clasifican en 3 clases; sus estructuras vienen indicadas por sus nombres:

- 1.- ACEROS AUSTENITICOS.- Son empleados en la decoración y para utensilios domésticos (cubiertos, sartenes, etc.), y construcción de plantas químicas. Aproximadamente contienen de 0.1% a 8% de Ni y 18% de Cr, aproximadamente.
- 2.- ACEROS MARTENSITICOS.- Se emplean para la fabricación de cuchillas de turbina, pasadores de aleta, remaches y también para cubiertos, contienen de 0.07% a 0.10% de carbono y 13% de Cr. Hay aceros que contienen de 0.2 a 0.4% de C y 13% de Cr y se emplean para manufacturar resortes, cojinetes de bola e instrumentos quirúrgicos. Además existen aceros martensíticos que contienen de 0.1% de C, 2% de Ni y 18% de Cr y se fabrica con ellos válvulas reguladoras, ejes de transmisión de bombas, y accesorios de aeronaves.
- 3.- ACEROS FERRITICOS.- Cuando es necesario que los aceros posean buena maleabilidad son empleados, por ejemplo en el revenido y resistencia especial a la corrosión; contienen de 0.05% a 0.15% de C y de 16 a 30% de Cr.

Los hierros vaciados son materiales que no contienen menos de 2% de C, por lo regular su contenido es de 2.5 a 3.8%, las clases existentes son las siguientes:

- 1.- HIERROS VACIADOS GRISES.- Su contenido es de grafito en perlita y ferrita, su color es debido al grafito. Son los más populares por sus excelentes propiedades de fundición, sus características es que son bastantes suaves y frágiles. Son





empleados para manufacturar pistones, cilindros de automóviles, moldes para maquinaria y lingotes.

- 2.- **HIERROS VACIADOS BLANDOS.**- Se forman de cementita y perlitita. Las concentraciones del silicio deben ser demasiado bajas, porque el Si es un agente grafificante poderoso. Tiene bastante dureza que es imposible maquinarse. Se usan como capas delgadas para dar recubrimientos a hierros grises; con esto se logra obtener un material con superficie dura y fuerte, pero con un interior dúctil y que resiste a los golpes. Como ejemplo de sus aplicaciones están el troquelado de zapatos, bolsas y rejas de arado.
- 3.- **HIERROS MALEABLES.**- Estos son hierros vaciados blancos recocidos. Combinan las propiedades buenas del vaciado características de los hierros grises y una resistencia característica de los hierros blancos. Su empleo es para la fabricación de cuerpos de válvulas, bisagras y moldes para maquinaria.
- 4.- **HIERROS NODULARES.**- o además denominados como grafitos esferoidales o hierros S.G. Son producidos inoculando hierro blanco, fundido antes de vaciarlo con cantidades mínimas de Mg, Si, Ni y Silicio de calcio. Depende de lo que se le deba añadir y su concentración, es como se tendrán diversas estructuras específicas (ferrítica, perlítica); el común denominador de estos hierros es la presencia de carbono libre que adopta la forma de esferas o nódulos. Los hierros nodulares poseen una gran resistencia a los choques y son empleados primordialmente para la manufactura de piezas vaciadas de maquinaria que es sometida a vibraciones y doblamientos.

Los materiales metálicos no ferrosos se producen en cantidades bastante menores en comparación con los aceros y los hierros, pero eso no significa que su importancia en la tecnología moderna sea menor al contrario comparativamente es mayor. Entre estos metales y aleaciones no ferrosos se tienen materiales con alta conductividad eléctrica, alta conductividad térmica, buena resistencia a la corrosión, buena maleabilidad y en algunos casos con colores atractivos. Obviamente, que los aceros inoxidables también tienen una buena resistencia a la corrosión; pero, en ciertos casos es posible producir a un costo menor, determinado artículo a partir de, por ejemplo, latón, que de acero inoxidable. Los materiales no ferrosos se clasifican de acuerdo a su componente principal; los tipos más importantes de materiales que se consideran son los que se enuncian a continuación:

El aluminio (Al) es demasiado ligero, presenta una resistencia a la corrosión buena ya que sufre una formación de una capa de óxido en la superficie. Esta capa sólida es llamada por los metalúrgicos "óxido coherente", es demasiado estable impidiendo la penetración de más oxígeno. Cabe resaltar una paradoja que se expresa a continuación "el aluminio se protege contra la oxidación debido a que fácilmente se oxida". En base a su porcentaje en peso, el aluminio mejora su conductividad eléctrica que el Cu, y por lo consiguiente se emplean en los cables eléctricos (es necesario recubrirlo con acero, debido a la poca resistencia de aluminio). El aluminio es empleado en cantidades elevadas en la Industria de la construcción, aviación y enlatado. Las aleaciones que tienen contenido de aluminio se pueden dividir en materiales vaciados y forjados.

Para los materiales forjados citaremos:





- 1.- **DURALUMINIO.**- Con un contenido de 4,5% de Cu, 0,5% de Mg, 0,5% de Mn, y 0,5% de Si, posee una maleabilidad muy buena antes de sufrir tratamiento térmico.
- 2.- **ALEACIÓN DE Mg + Si,** contiene 1,0% de Si, 0,5% de Mg, 0,5% de Fe; de todas las aleaciones forjadas, es la que tiene una mayor resistencia a la corrosión.
- 3.- **ALEACIÓN DE Cu + Mg + Zn,** contienen 2% de Cu, 3% de Mg y un 5% de Zn. Después de un tratamiento térmico posee una gran resistencia.

Las aleaciones vaciadas de aluminio suelen dividirse también en 3 tipos:

- 1.- **ALEACIÓN CON CONTENIDO BAJO DE Si.**- posee un contenido de 5% de Si y menos de 0,5% Cu. El punto de fusión es relativamente baja esa es su principal ventaja. Es necesario observar que el Al y el Si forman un eutéctico con 13% de Si aproximadamente y se funde a los 930°K (657°C) aproximadamente.
- 2.- **ALEACIÓN CON ALTO CONTENIDO DE Si,** tiene un contenido de 12 a 13% de Si y 0,5% de Na. Posee la característica de tener excelente resistencia a la corrosión.
- 3.- **ALEACIÓN CON COBRE,** con un contenido de 7 a 12% de Cu. El factor que genera ventaja a esta aleación en comparación con las anteriores es que tiene un precio más bajo; pero su defecto es que resiste menos la corrosión.

El Cobre (Cu) tiene una alta conductividad eléctrica, térmica, una gran resistencia al fenómeno de corrosión, además es muy maleable. Se usa para fabricar alambres, cables, tuberías, placas y cañerías. Las aleaciones de cobre se pueden clasificar de la siguiente manera:

- 1.- **LATONES.**- contienen de 10 a 50% de Zn. La aleación con un porcentaje de 10% de Zn se le llama bronce rojo u oro francés y es empleada en la joyería. El latón de cartucho, que se emplea para placas laminadas en frío, estirado de alambres, moldes y tuberías, contiene 30% de Zn. El metal Muntz, contiene 40% de Zn y se emplea en productos que son laminados en caliente.
- 2.- **BRONCES ESTAÑADOS,** contienen hasta 20% de Sn, se les puede emplear en la fabricación de montajes y cojinetes, especialmente en recipientes y reactores en procesos en que son empleados el agua y el vapor. El más conocido de esta categoría es probablemente el "cobre de acuñación", que se emplea en las casas de moneda de varios países; en realidad es un bronce estañado, con un contenido aproximadamente de 95% de Cu, 4% de Sn y 1% de Zn.
- 3.- **BRONCES FOSFORADOS,** formados de Cu y Sn y pequeñas cantidades de P, son empleados para manufacturar alambres fuertemente estirados, resortes de hojalata y cojinetes.
- 4.- **BRONCES DE ALUMINIO,** contiene hasta un 10% de Al. Al igual que las aleaciones cuyo componente principal es Al, éstas pueden dividirse en aleaciones forjadas y éstas son empleadas en las operaciones de moldeado en frío y en caliente, y aleaciones vaciadas.
- 5.- **ALEACIONES DE Cu + Ni;** son conocidas de este grupo especialmente dos tipos la planta niquelada (plata alemana, cuproniquel), con contenido de 20 a 30% de Ni; se emplea en fabricación de monedas y cuando se es necesaria la resistencia al agua de mar; y el metal monel, que contiene 30% de Cu, aproximadamente 70% de Ni y cantidades mínimas de Fe y otros elementos, tiene un lustre plateado característico, es empleado en la fabricación de reactores químicos, válvulas,





cuchillas de turbinas, tornillos resistentes a la corrosión, remaches, y distintas partes de maquinaria de plantas alimenticias y químicas.

El Zinc (Zn) tiene una gran resistencia a la corrosión y es muy bueno para galvanizar hierro y acero. Las aleaciones del zinc son empleadas para el vaciado a presión, un ejemplo es para obtener troqueles de acero. Su punto de fusión es de  $693^{\circ}\text{K}$  ( $420^{\circ}\text{C}$ ), es relativamente bajo por lo que hace que dicho metal sea conveniente emplearlo, la importancia actual de vaciado a presión en metalurgia es debido primordialmente a las aleaciones de Zn. Una aleación característica de este vaciado a presión contiene 4% de Al, 1.25% de Cu, 0.1% de Fe, 0.08% de Mg, 0.007% de Pb, Cd y Sn y lo que resta es Zn.

El Plomo (Pb) tiene un punto de fusión que es aún más bajo que el del zinc y es de  $600^{\circ}\text{K}$  ( $327^{\circ}\text{C}$ ) y su empleo es en la fabricación de pinturas, tuberías, productos químicos y recipientes para productos químicos. Es muy importante para los técnicos nucleares y también para los médicos la capacidad que tiene para absorber radiaciones como lo son los rayos X y los rayos Gamma, aunque sean de elevada intensidad. Las aleaciones de plomo tienen un contenido de 9% de Sb y son empleadas para la fabricación de placas de acumuladores.

El Estaño (Sn) es un componente de varias aleaciones. El estaño casi puro es usado para fabricar recipientes de pastas dentífricas y alimentos.

Otro tipo de aleaciones que va en aumento su importancia es el que se emplea en altas temperaturas, que se usa en la construcción de plantas nucleares, aviones de propulsión a chorro y cohetes. Debido a que en estas aleaciones también puede emplearse el hierro existen aleaciones ferrosas y no ferrosas. Por mencionar un ejemplo de las últimas es el Nimonic 80A, que contiene 21% de Cr, 2.5% de Ti, 1.2% de Al, 0.04% de C y lo que resta es Ni. El ejemplo de las ferrosas es la aleación Ta7Cr y su contenido es de 1% de Ta y 7% de Cr y lo que resta es hierro.

Habiendo mencionado a grandes rasgos la composición de los principales materiales empleados en ingeniería, es importante hacer hincapié en un fenómeno que se presenta en estos materiales, al que se le conoce con el nombre de corrosión. Este fenómeno determina la vida útil (a corto o largo plazo) de los materiales, por lo que analizaremos las formas en las que se presenta y algunos métodos para prevenirla.

## V.2 METALES PARA ALTAS Y BAJAS TEMPERATURAS.

### METALES PARA BAJAS TEMPERATURAS.

Las propiedades de los metales a bajas temperaturas han planteado algunos problemas desacostumbrados en la fabricación de equipos criogénicos. La mayoría de los metales pierden su ductilidad y su resistencia a los impactos a las bajas temperaturas; aunque en muchos casos aumentan la resistencia a la tracción y la tracción conforme bajan las temperaturas.





Es importante escoger materiales resistentes al impacto. Por lo común se especifica a la temperatura operacional un valor mínimo de Charpy y de 15 lb-pie (muesca de caja). Para cargas importantes, se recomienda un valor de 20 lb-pie. Se realizan pruebas de ductilidad en especímenes con muescas, puesto que los lisos suelen tener una ductilidad sorprendente.

En seguida se explican brevemente algunas características de diversos metales a bajas temperaturas:

**ACEROS.-** La ASME y la ASTM, establecieron una clasificación A 300 que cubre los aceros al carbón y de aleación adecuados a  $-150^{\circ}\text{F}$ , además, el código de la ASME agrega ciertas características de fabricación (como es el alivio de esfuerzos), para asegurar lo adecuado de esas aleaciones en servicios a bajas temperaturas. Se hacen muchos aceros en la clasificación A 300. Los aceros A 201 y A 212 son aceros al carbono con tratamiento especial para servicios a  $-50^{\circ}\text{F}$ . Entre los aceros de aleaciones se encuentran el A 203 de grado A o B, para  $-75^{\circ}\text{F}$ , el A 203 de grado D o E, para servicio a  $-150^{\circ}\text{F}$ .

**ACEROS INOXIDABLES.-** Los aceros de cromo y níquel son inherentemente adecuados para servicios desde  $-300$  a  $-425^{\circ}\text{F}$ . El tipo 304 es el más popular. El costo original de acero inoxidable puede ser más alto que el de otro metal; pero la facilidad de fabricación (sin tratamiento térmico) y la soldadura combinadas con la alta resistencia, contrarrestan el costo inicial más alto. La sensibilización o la formación de carburos de cromo se pueden producir en varios aceros inoxidables durante la soldadura y esto afecta la resistencia a los impactos; sin embargo, las pruebas han demostrado que las propiedades de impacto de los tipos 304 y 304L no son afectadas considerablemente por la sensibilización, mientras que las propiedades del acero 302 son dañadas a  $-300^{\circ}\text{F}$ .

**ACERO AL NÍQUEL.-** El acero de bajo contenido de carbono y 9% de níquel es una aleación ferrítica desarrollada para utilizarse en equipos criogénicos que funcionan hasta a  $-320^{\circ}\text{F}$ . Las especificaciones ASTM A 300 y A 353 cubren el acero de bajo contenido de carbono y 9% de níquel (A 300 es la especificación básica para los aceros ferríticos de bajas temperaturas). Los refinamientos en la soldadura y la eliminación (aprobada en el código de la ASME) de los tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, hacen que el acero al 9% sea competitivo con muchos materiales de bajo costo que se usan a bajas temperaturas.

**ALUMINIO.-** Las aleaciones de aluminio tienen una capacidad desacomunada para mantener la fuerza y la resistencia a los choques a temperaturas de hasta  $-425^{\circ}\text{F}$ . La buena resistencia a la corrosión y el costo relativamente bajo hacen que estas aleaciones sean muy populares para equipos de bajas temperaturas. Para la mayoría de las construcciones soldadas, se usan mucho las aleaciones de aluminio de la serie 5000. Son los materiales de aluminio-magnesio y aluminio-magnesio-manganeso.

**COBRE Y ALEACIONES.-** Con pocas excepciones, la resistencia a la tracción del cobre y sus aleaciones aumenta considerablemente al disminuir la temperatura; sin embargo, la fuerza estructural del cobre resulta un problema cuando se construyen equipos en gran escala. Por tanto, se tienen que utilizar aleaciones. Una de las más





apropiadas para bajas temperaturas es el bronce de silicio. La aleación se puede utilizar con seguridad hasta  $-320^{\circ}\text{F}$

## MATERIALES PARA ALTAS TEMPERATURAS.

### METALES.

Las aplicaciones adecuadas de los metales en procesos a altas temperaturas dependen de la apreciación de ciertos factores de ingeniería. Entre las propiedades más importantes están la resistencia al escurrimiento, la ruptura y la corta duración.

El escurrimiento relaciona el esfuerzo aplicado inicialmente al índice de flujo plástico. La ruptura por esfuerzo es otra consideración importante a las temperaturas elevadas, puesto que relaciona el esfuerzo y el tiempo para producir roturas, las aleaciones ferríticas son más débiles que las composiciones austeníticas y, en los dos grupos, el molibdeno incrementa la resistencia. Las piezas vaciadas austeníticas son mucho más fuertes que sus equivalentes forjadas. Se pueden obtener resistencias altas en el Inconel, el Stellite 25 con base de cobalto y el A 286 con base de hierro. Otras propiedades que resultan importantes a las temperaturas elevadas incluyen la conductividad térmica, la dilatación térmica, la ductilidad, la composición de la aleación y la estabilidad.

En realidad, en muchos casos, las propiedades mecánicas y la resistencia llegan a tener una importancia secundaria en las aplicaciones de procesamiento, en comparación con la resistencia a los ambientes corrosivos. Todas las aleaciones comunes resistentes al calor forman óxidos cuando se exponen a ambientes oxidantes calientes. El hecho de que una aleación sea o no resistente depende de que el óxido sea estable y forme una película protectora. Así, el acero dulce se utiliza raramente por encima de  $950^{\circ}\text{F}$ , debido a los índices excesivos de escamado. Las temperaturas más altas requieren cromo. Así el acero de tipo 502, con 4 a 8% de Cr, es aceptable a  $1150^{\circ}\text{F}$ . Un acero de 9 al 12% de cromo manejará temperaturas de  $1300$  a  $1400^{\circ}\text{F}$ , el de 14 a 18% de cromo extiende el límite a  $1500^{\circ}\text{F}$  y el de 27% de cromo hasta  $2000^{\circ}\text{F}$ .

Los aceros inoxidables austeníticos, muy conocidos, tienen una excelente resistencia a la oxidación: hasta  $1650^{\circ}\text{F}$  para el 18-8 y hasta  $2000^{\circ}\text{F}$  para el 25-12 (el Inconel y el incoloy). Las aleaciones con base de cobalto, de las cuales el Stellite 25 es un buen ejemplo, tienen excelentes resistencias hasta los  $2000^{\circ}\text{F}$ .

Otro elemento útil para proporcionar resistencia a la oxidación al acero es el silicio (que complementa los efectos del cromo). En las gamas de bajo contenido de cromo, el silicio en cantidades de 0.75 a 2% es más fuerte que el cromo sobre la base de porcentaje de peso.

El aluminio mejora también la resistencia del hierro a la oxidación, así como también a la sulfuración; pero el uso como agente de aleación está limitado, porque la cantidad que se requiere interfiere la capacidad de trabajo y las propiedades de resistencia a altas temperaturas del acero. Sin embargo, el desarrollo de capas superficiales con alto contenido de aluminio mediante la aspersión, la inmersión y el







cementado, es un medio factible para mejorar la resistencia térmica de los aceros de baja aleación.

**Atmósferas de hidrógeno.-** Los aceros inoxidables austeníticos, en virtud de su contenido elevado de cromo, suelen ser resistentes a las atmósferas de hidrógeno. Se prefieren los grados estabilizados.

**Ataque del nitrógeno.-** Las aleaciones con alto contenido de níquel, debido a su renuencia a formar nitruros, son los materiales que se prefieren para manejar amoníaco y sus productos de disociación.

**Corrosión por azufre.-** El cromo es el material más importante para impartir resistencia contra la sulfuración (formación de escamas sulfúricas similares a las de óxido). Por esta razón, se recomiendan aceros inoxidables de cromo puro en atmósferas altas de  $H_2S$ .

**Halógenos ( $Cl_2$  caliente y seco,  $HCl$ )-** las aleaciones de níquel y el níquel puro son útiles con gases halógenos secos. Sin embargo, incluso con los mejores materiales, los índices de corrosión son relativamente altos a temperaturas elevadas. Hay casos en que los equipos para la halogenación a altas temperaturas utilizan aleaciones con base de níquel y revestimiento de platino. Esos materiales tienen un costo inicial elevado; pero una vida prolongada. El platino y el oro poseen una resistencia excelente al  $HCl$  seco, incluso a  $2000^\circ F$ .

Para temperaturas muy por encima de  $2000^\circ F$  solo son apropiados los metales refractarios. Se han hecho muchos trabajos con esos metales en relación con los programas atómicos y de cohetes. Todos los materiales refractarios tienen puntos de fusión de más de  $3000^\circ F$ ; pero cada uno de ellos posee ventajas y desventajas diferentes.

#### **MATERIALES REFRACTARIOS.**

Los materiales refractarios no metálicos se utilizan mucho en aplicaciones a altas temperaturas, donde el servicio permite el tipo apropiado de construcción. Las clases más importantes son: los ladrillos refractarios, los ladrillos de alto contenido de alúmina, los ladrillos de sílice, los ladrillos de magnesita, los ladrillos de cromo, los ladrillos refractarios aisladores entre otros.

### **V.3 PREÁMBULO A LA CORROSIÓN.**

La materia existe en la naturaleza bajo la forma en que el medio ambiente favorece la mayor perdurabilidad de su masa y su energía, pero el ser humano transforma constantemente la constitución de dichos materiales mediante procesos que implican el consumo de enormes cantidades de energía.

Esta energía que se almacena en la estructura de los materiales transformados, es indispensable para preservar las características que se requiere de ellos pero al mismo tiempo les da un carácter metaestable, es decir los hace susceptibles de





volverse a transformar espontáneamente en otros estados que para persistir requieren de un menor contenido de energía.

El medio ambiente progresivamente y a través de una acción lenta y acelerada de la naturaleza, química, electroquímica, mecánico-química, o aún biológica, deteriora, degrada y destruye los materiales transformados por el hombre para restituirlos a su forma original.

Este fenómeno, al que se le da el nombre de corrosión, se manifiesta más evidentemente en los cuerpos sólidos como son los metales, las cerámicas, los polímeros artificiales, los agregados, y los minerales fibrosos de origen natural.

El fenómeno de la corrosión de la materia sólida consiste básicamente en la pérdida de equilibrio de las fuerzas cohesivas. Estas fuerzas son de naturaleza eléctrica y la cohesión es el resultado del equilibrio de las fuerzas de atracción entre los núcleos atómicos positivos y los electrones con cargas negativa, con las fuerzas de repulsión de los electrones entre sí y de los núcleos atómicos entre sí.

Aunque las fuerzas cohesivas resultan ser sumamente grandes, su equilibrio es inestable como se pone de manifiesto al comparar experimentalmente la energía correspondiente al calor de sublimación de cualquier metal y la energía necesaria para fracturar dicho metal.

La diferencia entre estas 2 energías que es de el orden de  $10^4$ , explica el carácter metaestable y heterogéneo de los metales en los cuales basta con aplicar un pequeño incremento de energía para provocar una inestabilidad en su estructura cristalina.

Una forma mucho más sencilla de definir la corrosión es: "aquel proceso de desintegración que se lleva a cabo en una pieza o una superficie metálica formando el conocido óxido, hollín o herrumbre, de color amarillo rojizo.

Normalmente este proceso se llama "OXIDACIÓN". La razón por la cual los metales, especialmente el hierro en el acero se corroe, es de que el hierro en el acero tiende a volver a su estado natural, así como existen en la naturaleza.

La CORROSIÓN, es en sí misma el cáncer de los metales ferrosos y no ferrosos. La corrosión es un problema muy serio que debe de ser considerado con toda atención, amplitud, y dedicación debido a que ocasiona: DESTRUCCIÓN DE EQUIPO, ALTO COSTO DE MANTENIMIENTO Y REPOSICIÓN, CONTAMINACIÓN DE PRODUCTOS, PÉRDIDAS DE PROPIEDADES MECÁNICAS, CONDICIONES INSEGURAS DE PERSONAL Y APARIENCIA INDESEABLES, ETC.

Para comprender mejor la importancia que tiene este fenómeno enunciaremos algunos casos reales ocurridos a nivel mundial.

**ANTECEDENTES SOBRE LA CORROSIÓN.**- En la vida diaria con frecuencia consideramos la corrosión de los metales como algo molesto que debemos prevenir y evitar so pena de tener que desechar nuestros utensilios o bien de tener que





limpiarlos y pintarlos frecuentemente para que puedan darnos servicio durante un poco más de tiempo.

Nos preocupamos sobre todo por los objetos expuestos al medio ambiente, principalmente cuando esté medio ambiente corresponde a un clima húmedo y cálido.

Sin embargo, hay que aclarar que, la corrosión no es un hecho trivial sino que, a nivel mundial, viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de la sociedad humana ya que las pérdidas monetarias que ocasiona anualmente son verdaderamente asombrosas como puede apreciarse en los reportes que se reseñan a continuación:

En 1971, en Inglaterra, el comité sobre corrosión y protección dependiente del departamento de la industria y comercio, publicó un reporte conocido como el "reporte hoar" en el que se menciona que las pérdidas anuales, registradas en ese año, por causa de la corrosión habían alcanzado el valor de 1,400 millones de libras esterlinas, de las cuales pudieron haberse ahorrado 310 millones si se hubiera hecho una mejor aplicación de los métodos y los conocimientos que sobre el fenómeno de la corrosión existían sobre esa fecha.

En 1977, al actualizar el reporte hoar, el departamento de industria de Inglaterra, llegó a la conclusión de que las pérdidas anuales por corrosión, a nivel nacional, habían ya alcanzado el valor de 3,000 millones de libras esterlinas y que de esa cantidad se podrían haber ahorrado 1,000 millones si se hubiera empleado correctamente la tecnología disponible en esa fecha.

Por su parte la oficina Nacional de normas de los Estados Unidos reporta, en 1976, una pérdida anual en la Unión Americana de 70 billones de dólares por causa atribuibles a la corrosión que corresponden al 4.2% del producto Nacional Bruto de este país y que corresponden a 1 3/4 veces al valor de sus importaciones anuales de petróleo crudo, se hace notar, también, que si se hubiera aplicado la tecnología adecuada se habría logrado un ahorro de 10 billones de dólares.

En términos generales de acuerdo con la secretaría general de la Organización de los Estados Americanos (Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico) los perjuicios causados por la corrosión equivalen del 1.5 al 3.5% del Producto Nacional Bruto en muchos países.

Por lo que se refiere a los perjuicios que el fenómeno de la corrosión ocasiona en la industria de la construcción, cabe mencionar que hoy en día se tiene plena conciencia de que el factor más determinante para la reducción del concreto estructural es la falta de control de la corrosión en los aceros de refuerzo.

Al efecto, en el artículo titulado "La corrosión del refuerzo problema No. 1 en la durabilidad del concreto" el Dr. John Fig. de Inglaterra señala que las pérdidas anuales debidas a la corrosión en la industria de la construcción de ese país son del orden de 700 millones de libras esterlinas de las cuales una proporción significativa corresponde a la corrosión de los aceros de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado.





Es interesante hacer la observación de que generalmente se da preferencia, en el diseño, a la construcción de obras de concreto reforzado o preesforzado sobre las de acero estructural, pensando que estas últimas requieren de una conservación periódica y costosa, mientras que con los primeros basta con llevar, durante la construcción, un estricto control de calidad para que ya no sea necesaria ninguna vigilancia ni conservación durante la etapa de servicio de dichas obras.

A este respecto el profesor M. Duriez de Francia comenta que el presupuesto anual de la Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses para la conservación de las obras de concreto reforzado es comparable y en ocasiones sobrepasa al que se asigna a las obras metálicas.

La realidad es que el inicio de la corrosión en las estructuras metálicas es observable con toda claridad y permite tomar medidas oportunas mientras que en las estructuras de concreto el fenómeno permanece encubierto y cuando se descubre el daño, muchas veces, ya es irreparable.

Por otro lado se sabe también, que la corrosión bajo tensión en los aceros de preesfuerzo puede provocar el colapso súbito de las estructuras preesforzadas.

En el reporte No. 49 del Comité holandés para la investigación del concreto (CUR) titulado: "Casos de daño debido a la corrosión del acero de preesfuerzo", publicado en 1971, se hace una evaluación de 63 casos de falla por corrosión reportados en las estructuras de concreto preesforzado. Estos casos no incluyen la totalidad de las fallas ocurridas si no aquellas de las que se pudo conocer a través de la pesquisa llevada a cabo en la literatura técnica disponible en Instituto TNO de Holanda, en que se incluyen reportes comprendidos entre los años de 1949 a 1968.

Dentro de estos 63 casos evaluados no está incluido el colapso por corrosión bajo tensión de algunos tramos de construcción del puente Cihuatlán ocurrido en México, en Octubre de 1960.

En 1961 ocurrió también la falla de un tanque de concreto preesforzado de sedimentación de aguas negras de 30 m. de diámetro por corrosión del acero de preesfuerzo después de 10 años de construido, en la Cd. de Nueva York, E.U.A.

Un caso similar ocurrió en Holanda con un tanque de las mismas dimensiones y también a los 10 años de haberse terminado su construcción.

Cabe también mencionar las fallas por corrosión bajo tensión en los aceros de preesfuerzo de las siguientes obras:

En 1967 en Estados Unidos, colapso del puente Silver sobre el río Ohio, que costó la vida de 46 personas.

En Enero de 1980 en México, colapso de la techumbre del auditorio Benito Juárez de la Cd. de Guadalajara, Jalisco, que pudo costar la vida a más de 10,000 personas.





En Mayo de 1980 en Berlín Alemania, falla de las estructuras de la cubierta de la sala de Congresos, costó la vida a una persona y cinco más resultaron gravemente lesionadas.

En Enero de 1981 en Maracaibo, Venezuela, sustitución de más de 1,300 toneladas de acero de los cables del puente alirantado que se encuentra en este lugar, debido al deterioro por corrosión bajo tensión.

En Abril de 1985 en México, colapso del puente papagayo, en la carretera costera del pacífico, tramo Acapulco-Pinotepa Nacional, por corrosión del acero de preesfuerzo.

Es por lo tanto evidente, que la corrosión tiene una influencia definitiva tanto en la durabilidad del concreto reforzado como en la seguridad de las obras de concreto preesforzado y que es urgente aprender cuales son las características de este fenómeno y sus mecanismos de deterioro.

#### V.4 TEORÍA DE LA CORROSIÓN.

La corrosión del acero es de principal importancia debido a que este material es empleado profusamente en la construcción de equipos, de tanques, piezas estructurales, etc. Por esta razón nos basaremos en la corrosión del hierro para una mayor generalización.

La corrosión consiste esencialmente en las reacciones que pueden producirse debido, tanto a las propiedades físicas y químicas del metal como las existentes en el medio ambiente, así también como las propiedades físicas y químicas del producto de las reacciones entre el metal y el medio ambiente.

La corrosión de un metal implica su oxidación; es decir, que el hierro metálico se desintegra o se convierte en polvo (óxido) amarillo-rojizo; su forma más estable; debido a la acción del oxígeno del aire en forma directa a través de la humedad existente en el medio ambiente. La oxidación puede producirse por dos caminos posibles: QUÍMICO Y ELECTROQUÍMICO. Químico cuando un producto químico cualquiera ataca y produce la desintegración del metal y Electroquímico cuando la presencia de otro metal o las imperfecciones del mismo metal produce corrientes eléctricas internas y externas que corroe ciertas áreas del mismo metal; tales imperfecciones como fuerzas localizadas o escamas de laminación siendo esta última la más generalizada y común.

El proceso de la transformación del hierro metálico en un óxido es de carácter Electroquímico.

En el proceso Electroquímico de la corrosión intervienen varios elementos, a saber: el metal, el oxígeno, la humedad o agua del ambiente y los iones de un medio ambiente determinado.

La corrosión no se lleva a cabo en el metal si algunos de los anteriores factores está ausente en el medio ambiente en donde está situado el metal.





Por otro lado para llevarse a cabo el proceso Electroquímico se necesita que haya un ánodo, un cátodo y un electrolito o solución acuosa. Los ánodos y los cátodos existen en todas las piezas del metal, siendo causadas por las imperfecciones de la superficie orientación de las partículas, falta de homogeneidad del metal, fuerzas localizadas o escamas de laminación. Así pues la corrosión se desarrolla entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito o solución acuosa en donde el oxígeno del aire se disuelve y además con la contaminación que pudiera traer la humedad ambiental se forma así un puente o flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo.

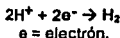
### V.5 MECANISMO GENERAL DE LA CORROSIÓN.

La electroquímica puede explicar satisfactoriamente el fenómeno de la corrosión. En soluciones electrolíticas la corrosión se localiza en ciertas áreas (ánodos) produciéndose un flujo de electrones hacia las áreas no corroídas o protegidas (cátodos). Dicho de otra manera, en la oxidación de metales ferrosos, el ánodo es la zona en donde el metal sufre una reacción de oxidación, produciéndose así iones metálicos y una corriente de electrones la cual se dirige al cátodo; en la región catódica se lleva a cabo la reacción de reducción; dicha reacción es generalmente la reducción de iones hidrógeno y oxígeno disueltos presentes en la solución electrolítica para formar hidrógeno atómico. Esta formación de hidrógeno atómico forma una película muy delgada e invisible y la presencia de esta película impide el progreso de la reacción en 2 formas: a) aislando o separando el metal de la solución, b) aumentando la tendencia del hidrógeno a formar parte de la solución a medida que se va depositando y oponiéndose así a la tendencia del metal a entrar en solución.

Si esta película permaneciera adherida, la corrosión se detendría inmediatamente; por otro lado si el producto de la disolución del metal fuera insoluble se formaría una capa protectora y el ánodo se obstruiría impidiendo el progreso de la reacción. Sin embargo sabemos que en realidad no ocurre debido a que los productos de la disolución del metal en el acero y hierro son solubles, permitiendo así que la reacción se lleve a cabo si la película de hidrógeno atómico antes mencionada es removida.

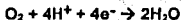
Existen varias formas de remover esta película de hidrógeno. Si se analizan las reacciones que pueden llevarse a cabo en la región catódica:

#### 1) GENERACIÓN DE HIDRÓGENO MOLECULAR.



La formación de hidrógeno molecular es una reacción catódica muy común, ya que frecuentemente la corrosión se lleva a cabo en medios ácidos.

#### 2) REDUCCIÓN DE OXÍGENO (SOLUCIONES ÁCIDAS):



**3) REDUCCIÓN DE OXÍGENO (SOLUCIONES BÁSICAS O NEUTRAS):**

La reducción de oxígeno, ya sea en medio de alcalino o ácido, también es bastante frecuente, ya que esta reacción puede llevarse a cabo en cualquier solución acuosa que este en contacto con aire

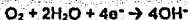
**4) REDUCCIÓN DE UN IÓN METÁLICO.****5) DEPOSITO DE UN METAL :**

La reducción de un ion metálico y el depósito de un metal son reacciones menos comunes y se llevan a cabo en otro tipo de procesos electroquímicos.

Si se analiza un caso típico de corrosión, como podría ser el contacto de una parte metálica (acero o hierro) con una solución electrolítica (agua común y corriente) vemos que la reacción que se lleve a cabo en la región anódica es:



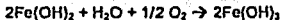
El agua y el agua de mar son casi neutras, por lo tanto la reacción catódica es: (3)



Si se suman las reacciones 3) y 6) se obtiene:



El hidróxido ferroso precipita en la solución, sin embargo, este compuesto es inestable en soluciones oxigenadas y se oxida para formar una sal ferrítica.



El producto final de la reacción es el óxido férrico.

Durante el proceso de corrosión puede existir más de una reacción de reducción y oxidación. Cuando se corroe una aleación, sus componentes metálicos pueden convertirse en los correspondientes iones metálicos. Si consideramos la disolución del zinc en ácido clorhídrico con oxígeno disuelto vemos que pueden ocurrir dos reacciones catódicas: 1) formación de hidrógeno atómico (reacción 1); y reducción de oxígeno en medio ácido (reacción 2). En un proceso electroquímico, la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la de la reacción anódica. En este caso se tienen





dos reacciones de reducción las cuales ocasionan que el flujo de electrones de la región anódica hacia la región catódica sea mayor que cuando ocurre una sola reacción de reducción; esto tiene como consecuencia que la reacción de oxidación (disolución del metal) proceda más rápidamente. Dicho de otra manera, las soluciones ácidas que contengan oxígeno disuelto serán más corrosivas que las que no lo contengan y se observará el mismo efecto si cualquier agente oxidante está presente en la solución.

Como las reacciones de oxidación y reducción que ocurren durante la corrosión son mutuamente dependientes, es posible reducir los efectos causados por la corrosión si se trata de reducir el flujo de electrones del ánodo al cátodo (reacción de impurezas que pudieran reducirse). Como se mencionó antes, el hierro no sufrirá daños debido a la corrosión si está en contacto con agua a la que se le ha extraído el oxígeno disuelto, ya que no hay reacción catódica posible.

La velocidad de una reacción electroquímica puede verse afectada por factores químicos y físicos; se dice entonces que esa reacción está polarizada (o retardada). Los tipos de polarización más importante son:

- A) POLARIZACIÓN POR ACTIVACIÓN.
- B) POLARIZACIÓN POR CONCENTRACIÓN.

La polarización por activación está referida a un proceso electroquímico en el cual el paso determinante de la secuencia de reacciones es la transferencia de electrones, la cual se lleva a cabo en la interfase metal-electrolito.

Si se analiza detalladamente la disolución del zinc en ácido clorhídrico y estudiando por etapas la reducción del hidrógeno se puede notar lo siguiente:

- 1) Antes de que ocurra la reacción de reducción las especies deben absorberse en el cátodo.
- 2) Una vez que es absorbida, se lleva a cabo la transferencia de electrones dando como resultado la reducción de las especies.
- 3) Dos átomos de hidrógeno se combinan para formar una molécula de hidrógeno.

Las moléculas de hidrógeno se combinan para formar una burbuja de hidrógeno gaseoso. La velocidad de reducción de los iones de hidrógeno estará controlada por el paso más lento de los descritos anteriormente.

Se dice que una reacción electroquímica está polarizada por concentración cuando las reacciones están controladas por la difusión de las especies de electrolito. Analizando el ejemplo anterior, si el número de iones hidrógeno en solución es relativamente pequeño, la velocidad de reducción estará controlada por la difusión de iones de hidrógeno a la superficie metálica. En este caso, la velocidad de reducción estará controlada por un proceso que se lleva a cabo en el seno de la solución.

Generalmente una reacción está polarizada por activación cuando la concentración de especies activas es alta (ácidos concentrados); y una reacción está polarizada por







concentración de especies reducibles es baja (ácidos diluidos). En muchos casos la polarización por concentración durante la disolución del metal es muy pequeña y puede despreciarse; solo es importante la reacción de reducción, las variables del medio producirán efectos distintos (no tendría sentido agitar una solución para promover la migración de especies activas hacia el cátodo si la reacción está polarizada por activación se ha observado un cambio si el proceso electroquímico estuviera polarizado por concentración).

En la Figura V-1 se presentan los esquemas de polarización por activación y por concentración.

### V.6 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN.

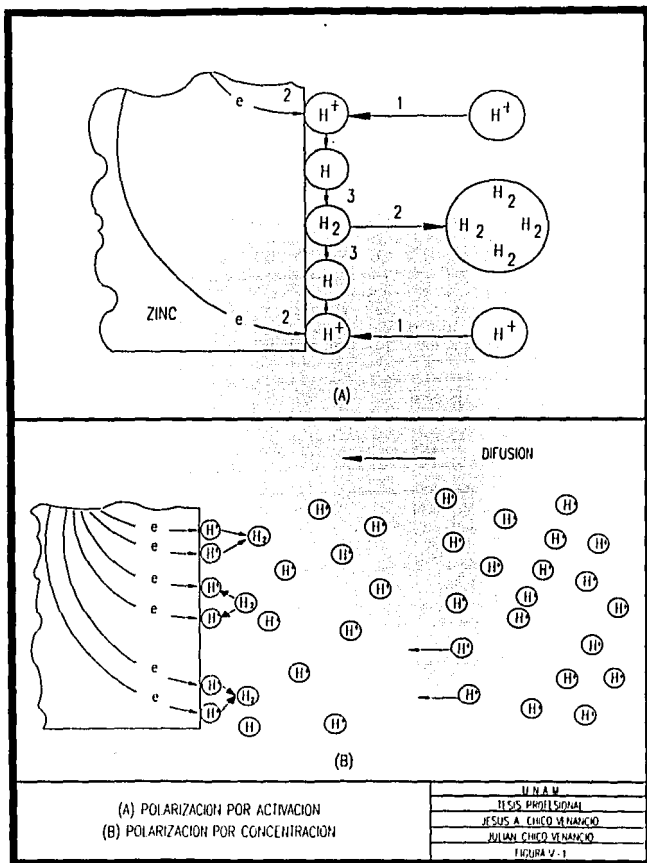
La velocidad y extensión de la corriente depende de las propiedades del metal y de la naturaleza del medio ambiente.

Es necesario que antes que se quiera resolver el problema de la corrosión se tenga que tener alguna información básica sobre la naturaleza de está y del mecanismo por el que se lleva a cabo la corrosión.

Las propiedades del medio ambiente que influyen fundamentalmente en la corrosión son las siguientes:

- 1.- HUMEDAD RELATIVA del medio ambiente; es la cantidad de agua que está dispersa en el medio ambiente, como vapor, humedad, o rocío etc.
- 2.- EL pH, es decir la cantidad de acidez o alcalinidad que el medio ambiente presenta.
- 3.- LA CONCENTRACIÓN DEL OXÍGENO disuelto en el agua.
- 4.- LA CONDUCTIVIDAD; que en conjunto con las sales de la contaminación, oxígeno disuelto y otros productos generan a través del agua ambiental.
- 5.- LOS IONES ya sean cationes (cloruros, sulfatos, fosfatos, etc.) o aniones (hierro, aluminio, cobre, etc.) que están presentes en el proceso electroquímico.
- 6.- LA TEMPERATURA del medio ambiente. A mayor temperatura mayor concentración de oxígeno y mayor conductividad del electrolito aumentando así la velocidad de corrosión.
- 7.- AL AUMENTAR LA VELOCIDAD DE FLUJO se provoca una mayor concentración de oxígeno y una mayor concentración de sólidos totales en contacto con el ánodo.







Por otro lado, los factores más importantes del metal que intervienen en la corrosión son los siguientes:

- 1.- POTENCIAL DE OXIDACIÓN. La diferencia de corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo.
- 2.- PRESENCIA DE DIFERENTES METALES. en relación con el hierro tales como aluminio, cobre, magnesio, etc.
- 3.- SOBRETENSIÓN es decir la velocidad de desplazamiento del hidrógeno que se produce en la reacción de oxidación.
- 4.- PUREZA DEL METAL, los metales puros deben considerarse casi no corroibles, sin embargo los metales en el mercado son aleaciones fácilmente corroibles.
- 5.- El ESTADO FÍSICO de un metal influye en la velocidad de corrosión; básicamente el tamaño de los granos y la orientación de los cristales del metal.
- 6.- ÁREAS RELATIVAS ENTRE EL ÁNODO Y EL CATÓDO, con esto se quiere decir que la corrosión se hace presente cuando el ánodo en área es menor que el cátodo (ejemplo: remaches de acero en placas de cobre).
- 7.- SOLUBILIDAD de los productos de corrosión. Si los productos son insolubles en el agua, se formará una película protectora disminuyendo así el efecto de la corrosión. De lo contrario la velocidad de corrosión se verá afectada por el grado de solubilidad.

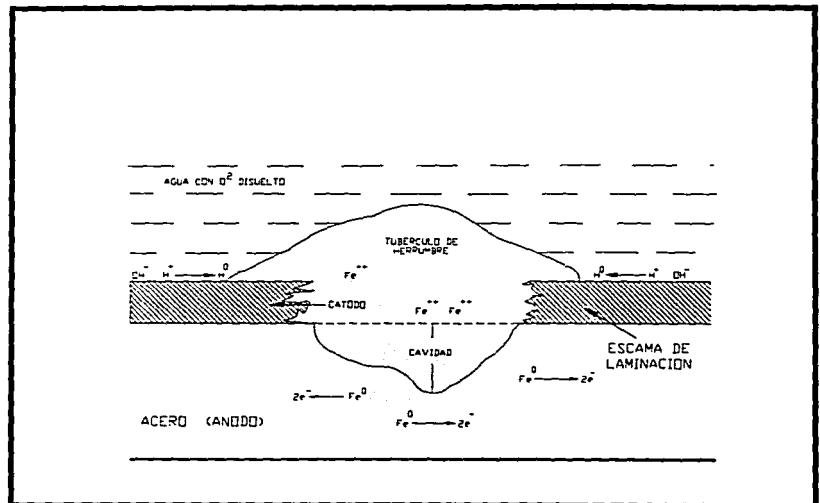
En la Figura V-2 se presenta el mecanismo de la corrosión.

#### V.7 FORMAS DE CORROSIÓN.

El fenómeno de la corrosión lo podemos clasificar de acuerdo a los tipos de formas en los que se manifiesta y a la apariencia del metal que es atacado. Diversas formas se identifican por mera observación visual y algunas pueden ser únicas, pero bastantes otras pueden estar interrelacionadas. Las formas de corrosión que son más comunes a temperatura ambiente son las siguientes:

- CORROSIÓN UNIFORME.
- CORROSIÓN GALVÁNICA.
- CORROSIÓN CAVERNOSA O EN HENDIDURA.
- CORROSIÓN BAJO PELÍCULA.
- CORROSIÓN POR PICADURA.
- CORROSIÓN SELECTIVA.
- CORROSIÓN INTERGRANULAR.
- CORROSIÓN - EROSIÓN.
- CORROSIÓN POR BAJO TENSIÓN (SCO).
- CORROSIÓN POR HIDRÓGENO.
- CORROSIÓN BIOLÓGICA.





MECANISMO DE LA CORROSION

U N A M
TESIS PROFESIONAL
JESUS A CHICO VENANCIO
JULIAN CHICO VENANCIO
FIGURA V-2





**CORROSIÓN UNIFORME.**- Este tipo de ataque es el más común y normalmente es caracterizado por una reacción electroquímica que procede uniformemente sobre la superficie expuesta; el metal se desgasta uniformemente y eventualmente falla. Cabe aclarar que este ataque desde el punto de vista técnico causa menos problemas que algunos de los otros tipos que se describen más adelante y que son imposibles de predecir.

**CORROSIÓN GALVÁNICA.**- Cuando dos metales distintos se encuentran inmersos en una solución electrolítica, generalmente se establece una diferencia de potencial entre ellos; está produce un flujo de electrones entre ambos metales, uno de ellos se vuelve anódico ya que es el metal menos resistente al ataque en ese medio y el otro se vuelve catódico.

Esta forma se reconoce por la localización del ataque cerca de la unión de ambos metales o aleaciones.

La corrosión galvánica es una reacción electroquímica, y para poder predecir y solucionar problemas debidos a este tipo de ataque se utiliza la serie galvánica (TABLA 2) en lugar de la serie FEM (TABLA 1) ya que la segunda es referida a metales puros y sus respectivos iones en solución, y regularmente en la práctica son empleadas aleaciones de 2 o más componentes reactivos. Generalmente las posiciones de los metales en la serie galvánica concuerdan con la serie FEM, Así como las aleaciones lo hacen con sus respectivos elementos constitutivos.

Una característica de la serie galvánica es que los grupos de aleaciones marcados con paréntesis indican que en la mayoría de las aplicaciones prácticas el riesgo de corrosión galvánica es el mínimo si 2 o más metales o aleaciones del mismo grupo entran en contacto electroquímico (ya que la diferencia de potencial que se genera es pequeña).

Otra característica importante es la relación de existente entre las áreas catódica y anódica; sería desfavorable una relación de ánodo pequeño y cátodo grande ya que para un flujo de corriente determinado en la celda formada, la densidad de corriente es mayor para un electrodo pequeño que para uno grande; y entre mayor sea la densidad de corriente en el ánodo, mayor será el grado de corrosión.

Los efectos causados por este tipo de ataque son menores a medida que aumenta la distancia del punto en estudio a la unión metálica.

El área afectada puede variar, según sea la conductividad del electrolito; en soluciones con muy baja conductividad (agua pura); el ataque puede manifestarse como una ranura angosta.





TABLA V-1  
SERIE FEM STANDARD

	METAL-ION METÁLICO EN EQUILIBRIO	POTENCIAL DE ELECTRODO VS. ELECTRODO NORMAL DE HIDRÓGENO
	Au-Au <sup>+2</sup>	+1.498
	Pt-Pt <sup>+3</sup>	+1.2
Noble o Catódico	Pd-Pd <sup>+2</sup>	+0.987
	Ag-Ag <sup>+</sup>	+0.799
	Hg-Hg <sub>2</sub> <sup>+2</sup>	+0.788
	Cu-Cu <sup>+2</sup>	+0.377
	H <sub>2</sub> -H <sup>+</sup>	0.0000
	Pb-Pb <sup>+2</sup>	-0.126
	Sn-Sn <sup>+2</sup>	-0.136
	Ni-Ni <sup>+2</sup>	-0.250
	Co-Co <sup>+2</sup>	-0.277
	Cd-Cd <sup>+2</sup>	-0.403
Activo o Anódico	Fe-Fe <sup>+2</sup>	-0.440
	Cr-Cr <sup>+3</sup>	-0.744
	Zn-Zn <sup>+2</sup>	-0.763
	Al-Al <sup>+3</sup>	-1.662
	Mg-Mg <sup>+2</sup>	-2.363
	Na-Na <sup>+</sup>	-2.714
	K-K <sup>+</sup>	-2.925





**TABLA V-2**  
**SERIE GALVÁNICA DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES COMERCIALES EN**  
**AGUA DE MAR.**

Noble o Catódico	PLATINO
	ORO
	GRAFITO
	TITANIO
	PLATA
	CHLORIMET 3 (62% Ni, 18% Cr, 18% Mo)
	HASTELLOY C (62% Ni, 17% Cr, 15% Mo)
	ACERO INOXIDABLE 18-S Mo (PASIVO)
	ACERO INOXIDABLE CROMICO 11-30% Cr (PASIVO)
	INCONEL (80% Ni, 13% Cr, 7% Fe) (PASIVO)
	NÍQUEL (PASIVO)
	SOLDADURA DE PLATA
	MONEL (70% Ni, 30% Cu)
	CUPRONIQUELES (60-90% Cu, 40-10% Ni)
	BRONCES (Cu-Sn)
Activo o Anódico	COBRE
	LATÓN (Cu-Zn)
	CHLORIMET 2 (66% Ni, 32% Mo, 1% Fe)
	HASTELLOY B (60% Ni, 30% Mo, 6% Fe, 1% Mn)
	INCONEL (ACTIVO)
	NÍQUEL (ACTIVO)
	ESTAÑO
	PLOMO
	SOLDADURA PLOMO-ESTAÑO
	ACERO INOXIDABLE 18-S Mo (ACTIVO)
	ACERO INOXIDABLE 18-S (ACTIVO)
	HIERRO FUNDIDO AL NÍQUEL
	ACERO INOXIDABLE CROMICO (13% Cr) (ACTIVO)
	HIERRO FUNDIDO
	ACERO O HIERRO
ALUMINIO 2024 (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)	
CADMIO	
ALUMINIO COMERCIAL (1100)	
ZINC	
MAGNESIO Y ALEACIONES DE MAGNESIO	





**CORROSIÓN CAVERNOSA O EN HENDIDURA.**- Este tipo de ataque principalmente es debido a estancamientos de electrolito en zonas determinadas (juntas, agujeros, hendiduras, etc.). Dichas zonas deben ser lo suficientemente anchas como para permitir la entrada del electrolito y lo suficientemente estrechas como para permitir el estancamiento de la solución.

Anteriormente, se creía que la causa posible de esta forma de corrosión era debida a diferencias de concentración de oxígeno y iones metálicos entre la hendidura y sus alrededores; estudios más recientes han demostrado que efectivamente existen estas diferencias de concentración, pero esto no es la causa principal.

Durante este tipo de corrosión el ataque se localiza en las zonas estancadas, mientras que las demás zonas casi no sufren daño alguno. Por lo regular este proceso de corrosión requiere un periodo de incubación de varios meses, pero una vez iniciado, se lleva a cabo a una velocidad que es cada vez mayor.

**CORROSIÓN BAJO PELÍCULA (CORROSIÓN FILIFORME).**- Esta forma de corrosión es un tipo de corrosión cavernosa; en muchos casos, este tipo de ataque puede ocurrir bajo películas protectoras y se trata de un ataque muy especial, ya que no daña o destruye los componentes metálicos, solo afecta el área superficial.

Bajo películas transparentes, los efectos de este ataque parecen una red de productos de corrosión. Los filamentos consisten en una cabeza activa y un rastro de productos de corrosión.

La variable más importante para que dicho fenómeno se lleve a cabo es la humedad atmosférica. Este tipo de ataque ocurre cuando la humedad está entre 65 y 90% de humedad relativa; cuando está es menor, el metal no se ve afectado, y cuando es mayor, la corrosión es manifestada por medio de ampollamientos.

El mecanismo de esta forma de corrosión no se ha podido explicar correctamente; se piensa que este ataque es una forma de corrosión cavernosa. Durante el crecimiento, la cabeza del filamento está siendo abastecida de agua por la atmósfera circundante y por la acción osmótica debido a la alta concentración de iones metálicos disueltos. El fenómeno osmótico tiende a remover el agua del rastro inactivo debido a la baja concentración de sales solubles (los iones metálicos han precipitado en forma de hidróxidos), entonces continuamente se está difundiendo agua, hacia la parte activa de este filamento. Aunque se difunde oxígeno a través de la película en todos los puntos, la concentración de oxígeno en la interfase cabeza-cola es alta debido a la difusión lateral. El proceso de corrosión se lleva a cabo sólo en la cabeza de este filamento porque los productos de corrosión causan que el medio se acidifique; por estas razones la corrosión bajo película puede entenderse como una hendidura que se propaga por sí misma.

**CORROSIÓN POR PICADURA.**- Este tipo de ataque se caracteriza por ser sumamente localizado e intenso, teniéndose como resultado perforaciones en la superficie afectada. Esta forma de corrosión es la más destructiva ya que aunque la pérdida global de material causada por el ataque sea mínima, puede causar la falla de un equipo o estructura debido a alguna perforación con extrema rapidez.







Esta forma de corrosión generalmente requiere de un período de iniciación, pero una vez que se inició este proceso de corrosión, éste procede a una velocidad cada vez mayor.

En la figura que se muestra el mecanismo que sigue una picadura durante este proceso de corrosión; si consideramos una pieza de metal inmersa en agua de mar, esta pieza reaccionaría y se disolvería; y si por alguna razón la disolución del metal en algún determinado momento fuera mayor en un punto particular, los iones cloruro migrarían a ese punto para conservar la electroneutralidad (como se ha mencionado, los iones hidróxido también migran, pero su movilidad es menor).

Durante las etapas iniciales de este proceso, las condiciones para que se desarrolle la picadura son muy inestables. Se ha observado que picaduras recién formadas son inestables y muchas se vuelven inactivas después de poco tiempo de haberse formado. La concentración local particularmente alta en determinado punto, puede variar o anularse debido a varios factores como corrientes de convección; cambiándose así las condiciones y pudiendo así, impedir la formación de la picadura.

Las superficies más propensas a este tipo de ataque son aquellas hechas de aleaciones de acero inoxidable. Los resultados de muchos estudios hechos para conocer esta propensión se muestran en la tabla siguiente.

TABLA V-3  
EFECTOS CAUSADOS POR LA CORROSIÓN EN FORMA DE PICADURA EN  
DISTINTAS ALEACIONES DE ACERO INOXIDABLE SEGÚN SEA EL ELEMENTO  
QUE SE INCORPORA A LA ALEACIÓN

ELEMENTO	EFEECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA AL ATAQUE
CROMO	AUMENTA
NÍQUEL	AUMENTA
MOLIBDENO	AUMENTA
SILICIO	DISMINUYE Y AUMENTA CON LA PRESENCIA DE MOLIBDENO
AZUFRE	DISMINUYE
SELENIO	DISMINUYE
CARBÓN	DISMINUYE
NITRÓGENO	AUMENTA

La adición de 2% de molibdeno al acero inoxidable 18-8s (tipo 304) para producir el 18-8sMo (tipo 316) tiene como resultado un aumento en la resistencia a este tipo de ataque.

Acero inoxidable tipo 304

Acero inoxidable tipo 316

Hastelloy F, Nionel, o Durimet 20

Hastelloy C, o Chlorimet

Titanio





**CORROSIÓN SELECTIVA.**- Está tipo de ataque se caracteriza por ser uno de los constituyentes de determinada aleación el que se ve afectado. La selectividad y el grado de ataque estarán determinados por el medio ambiente, debiéndose tomar en cuenta la susceptibilidad de cada uno de los constituyentes de la aleación a determinado medio. El latón es un caso típico. Dicha aleación consiste en un 30% de zinc y 70% de cobre; cuando está aleación es atacada (por ejemplo por agua caliente), es el zinc el constituyente que se ve afectado. Se ha aceptado un mecanismo que explica este fenómeno: 1) disolución del metal. 2) se forma iones de zinc en solución, los cuales son más reactivos que los iones cobre. La aleación se debilita hasta que falla.

**CORROSIÓN INTERGRANULAR.**- Está forma de ataque de corrosión es causada cuando los límites granulares de un metal son corroídos selectivamente. La causa puede ser la acción galvánica, está resulta de las diferencias de composición existente entre los límites granulares y los granos mismos. Pueden observarse ataques en algunos aceros inoxidable de cromo y níquel que han sido soldados o tratados térmicamente de manera inadecuada. Las zonas con menor contenido de cromo adyacentes a las zonas de mal acoplamiento son atacadas (generalmente se necesita más de un 10% de cromo en una aleación para considerar aún acero como inoxidable; si la proporción de cromo disminuye, también lo hará su resistencia a la corrosión) debido a que la resistencia a la corrosión ha disminuido en esa zona. Se tienen entonces 2 metales con diferentes composiciones en contacto con una relación de áreas desfavorable (ánodo pequeño y cátodo grande) y el resultado es un ataque rápido en el área desprotegida. También reciben ataques intergranulares las aleaciones con base de cobre, tales como los latones.

**CORROSIÓN-EROSIÓN.**- Está tipo de ataque es causado por el movimiento relativo de un fluido corrosivo y la superficie metálica. Por lo general, este movimiento es rápido y el fenómeno de abrasión también está involucrado en este tipo de ataque.

La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición de bordes, agujeros, zonas desgastadas, etc. y por lo general muestra un patrón direccional. En muchos casos las fallas en equipos debidas a este tipo de ataque ocurren en un período de tiempo relativamente corto; siendo muy difíciles de predecir ya que no se pueden correr pruebas experimentales muy exactas.

Muchos metales y aleaciones son susceptibles a daños por este tipo de ataque; la magnitud de los daños depende de la superficie y de la resistencia que este tenga contra algún corrosivo específico.

Muchos tipos de medios corrosivos pueden causar corrosión por erosión: gases, soluciones acuosas, sistemas orgánicos, metales líquidos y sólidos en suspensión, los cuales son particularmente destructivos desde este punto de vista.

Todo tipo de equipos expuestos al movimiento de fluidos están sujetos a la corrosión por erosión: tuberías, bridas, codos, válvulas, bombas, etc.

La velocidad del medio tiene un papel determinante en este tipo de ataque; normalmente, a mayor velocidad del medio, mayor será el daño causado a la





superficie metálica. En la tabla sig. se muestra el efecto que tiene el agua de mar a distintas velocidades sobre distintos metales y aleaciones.

**TABLA V-4**  
**CORROSIÓN DE DISTINTOS METALES Y ALEACIONES CAUSADA POR AGUA DE MAR A DISTINTAS VELOCIDADES**

MATERIAL	1 FT/SEG.	4 FT/SEG.	27 FT/SEG.
ACERO AL CARBÓN	34	72	254
HIERRO FUNDIDO	45	72	270
BRONCE SILICON	1	2	343
BRONCE HIDRÁULICO	4	1	339
BRONCE G	7	2	180
ALUMINIO BRONCE (10% Al)	5	2	236
ALUMINIO LATÓN	2	2	105
MONEL	<1	<4	4
ACERO INOXIDABLE 316	1	0	<1
HASTELLOY C	0	0	0
90-10 Cu Ni (0.5% Fe)	5	2	99
70-30 Cu Ni (0.05% Fe)	2	2	199
70-30 Cu Ni (0.5% Fe)	<1	<1	39

El incremento en la velocidad puede incrementar o reducir los efectos causados por este ataque según sea el mecanismo de corrosión involucrado. En el acero, causará un incremento debido a que el suministro de oxígeno, sales y otros compuestos aumenta, además la velocidad puede incrementar la velocidad de difusión de los iones involucrados. En el caso de que el sustrato metálico se encuentre protegido por algún recubrimiento; entre mayor sea la velocidad del fluido corrosivo, mayor será el desgaste de la película protectora.

En algunos casos, un incremento en la velocidad podrá disminuir o prevenir los daños debidos a este tipo de ataque, ya que es más difícil que se deposite lama o suciedad lo cual podría causar corrosión caverosa o en forma de hendidura. Generalmente un incremento en la velocidad del fluido ocasiona un ataque más severo, aunque puede haber ocasiones en que los daños sean mínimos a ciertas velocidades, pero una vez que se ha alcanzado la velocidad crítica, los daños causados por este tipo de ataque aumentan considerablemente (en muchos de los casos citados en la tabla anterior, esta velocidad crítica es de 27 ft/seg; en las aleaciones citadas en la parte inferior de la tabla, esta velocidad crítica es mayor de 27 ft/seg).

Muchas fallas debidas a este tipo de ataque ocurren en equipos debido a las condiciones de flujo que se presentan, por ejemplo, cuando existe flujo turbulento en tuberías, cambiadores de calor, impulsores, propelas, etc.





**CORROSIÓN BAJO TENSIÓN (SCO).**- Los esfuerzos mecánicos a los que son sometidos algunos equipos se manifiestan de alguna manera característica (fatiga, fallas de tensión, etc.); y la corrosión por su parte se puede manifestar en una de las formas antes descritas. La combinación de estos dos fenómenos produce resultados desastrosos.

Esté ataque se manifiesta mediante agrietamientos causados simultáneamente por la presencia de un medio corrosivo específico y un esfuerzo de tensión. Durante la corrosión por esfuerzos la superficie metálica permanece virtualmente intacta, mientras que el ataque se presenta en las grietas formadas. Esté agrietamiento tiene serias consecuencias, ya que puede debilitar seriamente al equipo afectado en relativamente poco tiempo, pudiendose presentar esté tipo de ataque dentro de rasgos típicos de diseño de equipo (presiones normales de operación). Las variables más importantes que pueden causar esté tipo de ataque son:

Temperatura, composición del electrolito, composición del metal, magnitud del esfuerzo y estructura metálica.

Entre mayor sea el esfuerzo aplicado, menor tiempo tardará en aparecer el agrietamiento; se han hecho estudios para poder determinar el esfuerzo mínimo con el cual se presenta esté ataque. En algunos casos se observan agrietamientos con solo el 10% del esfuerzo máximo permisible, siendo cada caso muy particular.

Los esfuerzos que pueden ocasionar esté tipo de ataque pueden ser debidos a cualquier causa: temperatura, soldaduras o esfuerzos aplicados. Es por eso, que se ha observado esté tipo de corrosión en equipos que no han sido sometidos a esfuerzos mecánicos externos muy grandes.

No todos los sistemas metal-medio ambiente son propensos a sufrir esté tipo de ataque; por ejemplo, se ha observado que el acero inoxidable se agrieta en presencia de cloruros y cáusticos, pero no sufre ataque alguno en medios con amoníaco, ácido nítrico, sulfúrico, acético o agua pura.

Hasta el momento no se han podido determinar las variables que normalmente causarían esté ataque en varias aleaciones. La corrosión por esfuerzos se sabe que se presenta en algunos medios acuosos, en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos inorgánicos no acuosos. La presencia de oxidantes normalmente puede tener una marcada influencia en la tendencia al agrietamiento; se ha observado que la presencia de oxígeno u otras especies oxidantes promueve el agrietamiento de aceros inoxidables austeníticos en soluciones de cloruros, y si estas especies oxidantes son eliminadas, no ocurre esté agrietamiento.

Como en el caso de muchas reacciones químicas, el agrietamiento causado por esté tipo de ataque se incrementa al aumentar la temperatura. En algunos sistemas como las aleaciones de magnesio, el agrietamiento puede ocurrir a temperatura ambiente (en otros sistemas se requieren temperaturas de ebullición).

La fase en la cual se encuentre el medio agresor también resulte importante; en algunos casos aleaciones expuestas a un medio acuoso en una sola fase son atacadas en mucho menor grado que sistemas expuestos a las mismas condiciones





de temperatura y esfuerzos aplicados pero expuestos a inmersión y vapores del medio en forma intermitente.

En la tabla que se mostrará se presentan algunos sistemas en los cuales se presenta este tipo de ataque.

El mecanismo de acción de este ataque no está del todo esclarecido y la información más útil y confiable se ha obtenido de los experimentos empíricos.

La corrosión juega un papel muy importante en la formación de las grietas; una picadura, cuarteadura o cualquier discontinuidad en la superficie metálica puede actuar como un elevador de esfuerzos. La concentración de esfuerzos en la punta de la ranura es enorme y normalmente se observa que los agrietamientos causados por este tipo de ataque empiezan en la base de la picadura (se pueden encontrar deformaciones plásticas en regiones inmediatas a esta picadura debido a la concentración tan alta de esfuerzos, entonces la aleación puede volverse menos resistente al esfuerzo y a la corrosión); el agrietamiento sigue avanzando y debilita gradualmente al equipo hasta que este falla.

TABLA V-5

**AMBIENTES QUE PUEDEN CAUSAR CORROSIÓN POR ESFUERZOS A CIERTOS METALES Y ALEACIONES.**

<b>ALEACIONES DE ALUMINIO:</b>	soluciones de $\text{NaCl}\cdot\text{H}_2\text{O}_2$ , soluciones de $\text{NaCl}$ , agua de mar, aire y vapor de agua.
<b>ALEACIONES DE COBRE:</b>	soluciones y vapores de amoníaco, aminas, agua y vapor de agua.
<b>ALEACIONES DE ORO:</b>	soluciones de $\text{FeCl}_3$ , soluciones de ácido acético.
<b>INCONEL:</b>	soluciones de sosa cáustica.
<b>PLOMO:</b>	soluciones de acetato de plomo.
<b>ALEACIONES DE MAGNESIO:</b>	soluciones de $\text{NaCl}$ , $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , atmósferas rurales y marinas, agua destilada.
<b>MONEL:</b>	sosa cáustica fundida, ácido fluorhídrico, ácido hidrofúosilícico.
<b>NÍQUEL:</b>	sosa cáustica fundida.
<b>ACEROS ORDINARIOS:</b>	soluciones de $\text{NaOH}$ , soluciones de $\text{NaOSi}_2$ , soluciones de nitrato de calcio, amonio y sodio, mezclas de ácidos (nitríco y sulfúrico), soluciones de ácido cianhídrico, agua de mar, soluciones ácidas de $\text{H}_2\text{S}$ , agua de mar, aleaciones fundidas de $\text{Na-Pb}$ .
<b>ACEROS INOXIDABLES:</b>	soluciones ácidas de cloruros ( $\text{MgCl}_2$ , $\text{BaCl}_2$ ), soluciones de $\text{NaCl}\cdot\text{H}_2\text{O}_2$ , condensados de aguas cloradas.
<b>ALEACIONES DE TITANIO:</b>	Ácido nítrico fumante, agua de mar, $\text{N}_2\text{O}_4$ , $\text{CH}_3\text{OH}\cdot\text{HCl}$ .

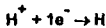




**CORROSIÓN POR HIDRÓGENO.**- Este tipo de corrosión está relacionado con el daño mecánico que sufre algún metal causado por la presencia o interacción de éste con el hidrógeno. Esta forma de ataque puede clasificarse en tres tipos diferentes:

- 1) AMPOLLAMIENTO POR HIDRÓGENO
- 2) FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO
- 3) DESCARBURIZACIÓN.

**1) AMPOLLAMIENTO POR HIDRÓGENO.**-La presencia de este fenómeno es debida a la penetración del hidrógeno en el metal, teniendo como resultado deformaciones locales y en casos extremos, la completa destrucción de la pared del recipiente. Si se analiza una sección de la pared de un tanque protegido mediante protección catódica caso (muy común) expuesto a la atmósfera, y este tanque contiene un electrolito ácido, en la parte interior del tanque se empieza a generar hidrógeno como resultado de la protección catódica.



En cualquier momento, existe una concentración fija de átomos de hidrógeno en la superficie metálica y algunos de estos se difunden en el metal en lugar de combinarse para formar la molécula de hidrógeno. Si estos átomos de hidrógeno que se difunden a través del metal encuentran una cavidad en la estructura metálica, los átomos de hidrógeno se combinarían para formar la molécula; esta molécula ya no se puede difundir, provocando que la concentración y la presión en la cavidad aumenten, causando graves daños así a la pared del recipiente (la presión del equilibrio entre el hidrógeno molecular y el atómico es tan grande que se puede ocasionar la ruptura de un gran número de materiales).

**2) FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO.**- Este fenómeno es causado por la difusión del hidrógeno a través del metal, teniendo como resultado una pérdida en la ductilidad y resistencia a la tensión del material. El mecanismo de acción de este tipo de ataque no se conoce a fondo, pero se sabe que la causa inicial de este tipo de ataque es la misma que en el ampollamiento por hidrógeno: penetración del hidrógeno atómico en la estructura metálica. La gran mayoría de la teorías que tratan de explicar este fenómeno asocian la acumulación de hidrógeno en micro-cavidades.

Muchos investigadores han asociado los daños causados por corrosión por esfuerzos a la fragilización por hidrógeno, sin embargo estos dos tipos de ataques reaccionan de manera muy distinta ante diversas variables. La fragilización por hidrógeno se distingue de la corrosión por esfuerzos por el tipo de proceso electroquímico que se lleva a cabo.

Cuando se aplican corrientes anódicas y se observa que el crecimiento del agrietamiento se acelera, se considera que es un fenómeno de corrosión por esfuerzos en el que el proceso de disolución anódica contribuye a la formación de la grieta.



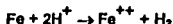


Por otro lado, cuando el agrietamiento es acentuado por corrientes catódicas son atribuidos a la fragilización por nitrógeno. En la figura que corresponde a este tipo de corrosión se presenta una comparación gráfica de ambos fenómenos.

**3) DESCARBURIZACIÓN.-** Este fenómeno se caracteriza por la remoción de carbón del acero, causada normalmente por hidrógeno a altas temperaturas y teniendo como efecto una disminución en la resistencia a la tensión del acero.

**CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA.-** Existen varias clases de microorganismos que pueden causar la corrosión de tuberías y otras estructuras de acero cuando están enterradas. Para que dicho ataque se lleve a cabo, se necesita que el suelo reúna ciertas características tales como alto contenido de materia orgánica, presencia de sulfatos, tiosulfatos, sulfuros, carbonato ferroso y nitratos.

Los microorganismos anaeróbicos contienen la energía necesaria para existir de la reducción de sulfatos a sulfuro de hidrógeno (se necesita materia orgánica para que actúe como donador de hidrógeno). Entonces el fierro tiende a disolverse:



Los iones ferrosos formados reaccionan con el sulfuro de hidrógeno para producir sulfuro ferroso; también se tiene como producto final de la reacción hidróxido ferroso según la reacción:

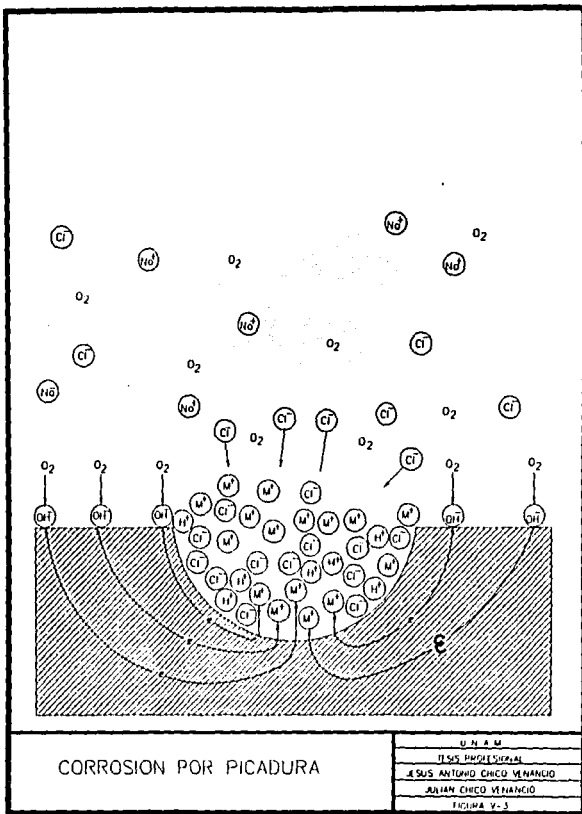


Para existir, otros microorganismos utilizan nitratos o tiosulfatos, sustancias que directa o indirectamente causan la corrosión en el acero.

Existen también microorganismos aeróbicos que oxidan el sulfuro a sulfato produciéndose ácido sulfúrico, el cual además de atacar el acero acelera el proceso de corrosión. El color de los productos de corrosión normalmente es oscuro, condición que distingue a estos de los productos normales de cualquier tipo de ataque corrosivo antes mencionado.

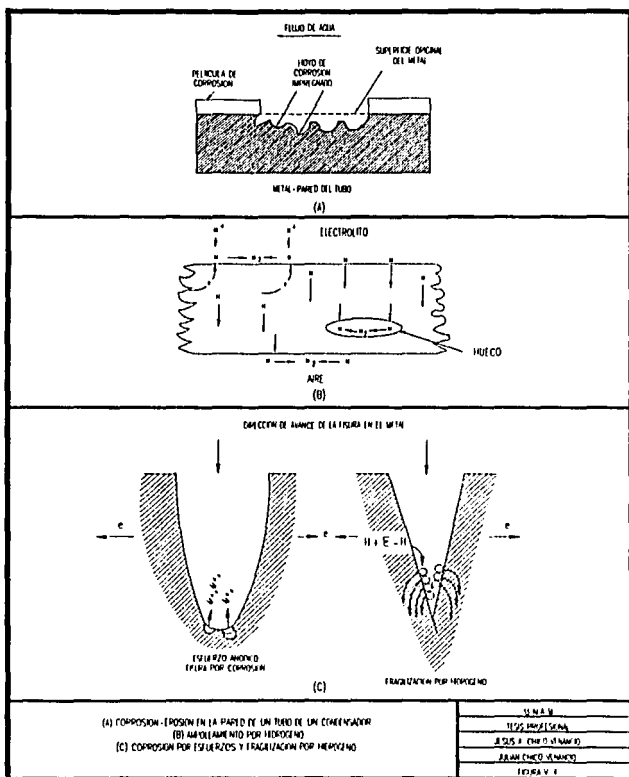
A continuación se presentan esquemas V-3, V-4, V-5 y V-6 de algunas de las diversas formas de corrosión que se enunciaron anteriormente.

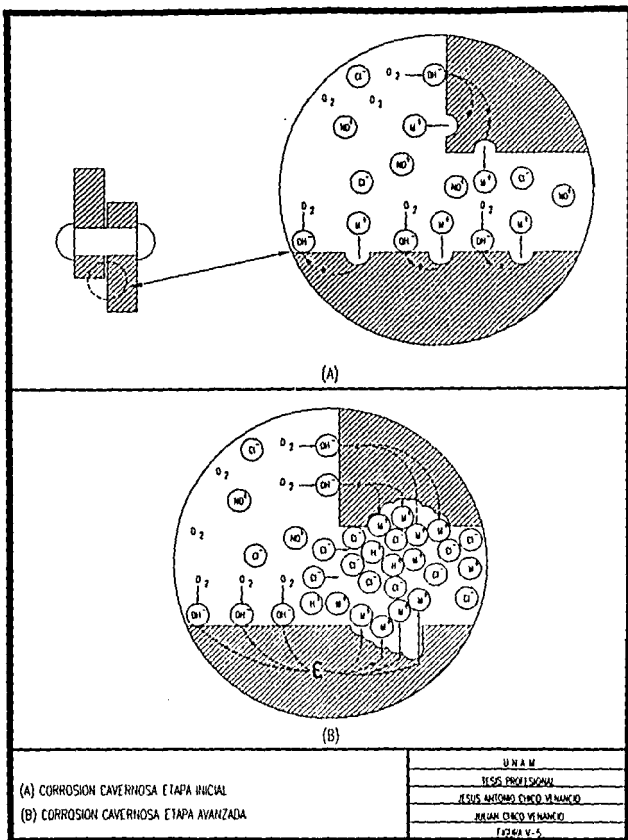




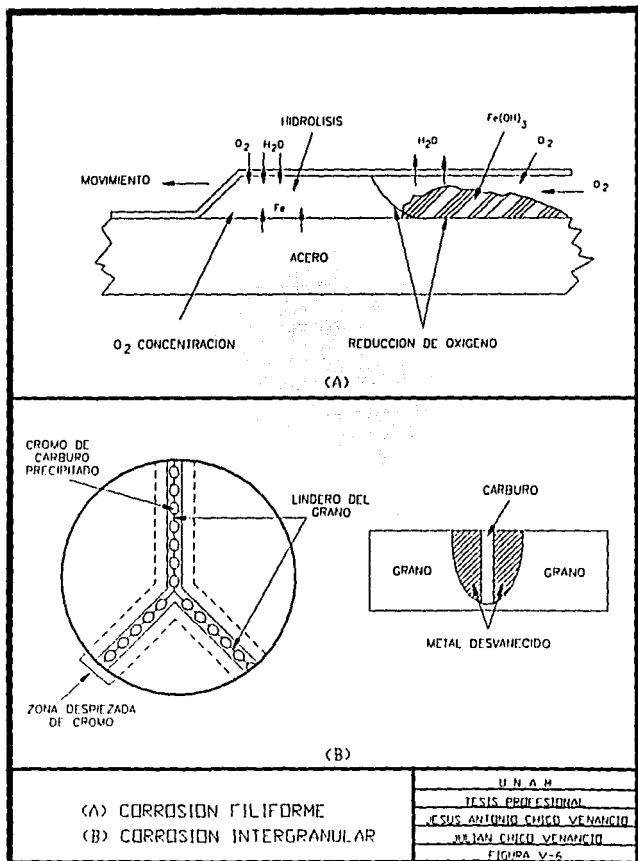
FALLA DE DISEÑO







# FALLA DE OMBRA





## V.8 MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN.

La natural tendencia de los metales a oxidarse o a corroerse es un proceso natural que debe reconocerse como inevitable. La tarea básica de PRO-METAL es la de controlar sus efectos destructores con un mínimo de costo necesario.

Cada uno de los métodos que se presentaran tiene sus ventajas y sus desventajas específicas y su aplicación adecuada, en donde cada uno de ellos resulta ser el más económico y el más eficiente.

NO EXISTE UN MÉTODO QUE PUEDA CONSIDERARSE COMO UNIVERSAL. Cada caso de corrosión es diferente. Cada situación debe considerarse y estudiarse en forma individual e independiente; y la metodología a aplicarse deberá basarse en diferentes factores tales como los que se darán a conocer y que son los siguientes:

CALIDAD AMBIENTAL, USO TÍPICO, GRADO DE SEVERIDAD EN LA CORROSIÓN, COSTOS FACILIDAD DE APLICACIÓN, ETC.

Los métodos más generalizados para efectuar un control sobre la corrosión, según sean las necesidades de la situación específica; son las que siguen:

- 1.- **DISEÑO ADECUADO DEL EQUIPO.**- Realmente la eficacia de un sistema de recubrimientos para protegerlo está íntimamente ligado con el diseño de la estructura. No es muy difícil proteger una superficie plana o lisa a la cual se le puede aplicar una capa continua de espesor apropiado. Sin embargo, el problema se complica cuando la estructura presenta diversos ángulos, esquinas, soldaduras, remaches o bordes etc.
- 2.- **USO DE MATERIALES CON ALTA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN.**- Sabemos que en la mayoría de los casos, cualquier material puede ser sustituido por otro de mejor calidad y mayor resistencia a la corrosión. Esta alternativa está supeditada a los factores económicos normales y a la condición de tolerar la más de las veces el sacrificio de las propiedades físicas, tales como dureza de fatiga de trabajo, resistencia química, etc.
- 3.- **MODIFICACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE** .- Este método consiste en controlar las emisiones de humo, vapores o gases corrosivos así como también las descargas, salpicaduras, exposiciones de ácidos, álcalis o productos químicos. El uso de controles de contaminación, como el uso de inhibidores de corrosión en sistemas de abastecimiento de agua, torres de enfriamiento, etc. son los más comunes que se suelen utilizar.
- 4.- **PROTECCIÓN CATÓDICA.**- La protección catódica es un procedimiento mediante el cual, se alteran con dispositivos externos las características eléctricas de la estructura que se pretende proteger; la aplicación de los sistemas de protección catódica está supeditada a ciertas características de la estructura por proteger y del medio que la rodea.
- 5.- **PROTECCIÓN POR AISLAMIENTO O POR RECUBRIMIENTO.**- En esta clasificación se entra al terreno de las pinturas y recubrimientos tradicionalmente conocidos, tales como los alquidáticos, vinílicos, epóxicos, uretánicos, etc.





El procedimiento de control de corrosión a base de recubrimientos es el más conocido, empleado y el más experimentado. Pero, sin embargo, la selección correcta de un recubrimiento es una cuestión que requiere un especial cuidado y atención.

Debe entenderse por principio: "que no existe un recubrimiento bueno para todo" Un recubrimiento excelente para proteger contra cierto medio puede ser pésimo en otro. Para poder hacer una buena selección de un recubrimiento se debe hacer por principio de cuentas una identificación correcta del medio o agente corrosivo que pueda actuar. Con base en lo anterior, se pueden determinar las características deseables del material de recubrimiento. Si varios metales satisfacen los requerimientos establecidos, se deberá tener en consideración los factores que influyan en el costo.

Cuando se procede ordenada y racionalmente, y se cuenta además con el apoyo de personal técnico de criterio experimentado y con un laboratorio especializado se reducen a un mínimo las posibilidades de falla.

### V.9 GUÍA DE PREPARACIÓN PARA RECUBRIMIENTOS.

El proceso de recubrir una superficie metálica con el fin de protegerla no se inicia propiamente en la aplicación del recubrimiento sino mediante una serie de operaciones destinadas a acondicionar y preparar dicha superficie, con el fin de recibir las capas sucesivas de primarios y acabados.

El sistema completo de los recubrimientos y la superficie debe formar una sola unidad y cualquier factor que afecte la habilidad del sustrato para recibir y retener el acabado afectara decisivamente la eficiencia y duración del sistema. Según se ha demostrado en un estudio económico de los sistemas de protección a superficies metálicas por medio de recubrimientos; que el tratamiento previo de las mismas absorbe más del 50% del costo total del proceso contrastando con el 15% solamente del costo de los recubrimientos. Haciéndose notar que una mala y deficiente preparación de la superficie no puede ser compensada por el uso de acabados de máxima calidad. Este costo aparentemente alto del tratamiento o preparación de la superficie es necesariamente aceptado; ya que se ha demostrado que con esto se obtiene una mayor duración del acabado y una mayor protección de la superficie, la cual se traduce necesariamente en una reducción de los costos de mantenimiento; en el caso de tanques, estructuras, equipo industrial, etc.

De lo anterior se concluye que es esfuerzo que constantemente se está desarrollando para producir nuevos tipos de recubrimientos de más fácil aplicación y con mayor resistencia a los agentes corrosivos y que ofrezcan una mayor protección al sustrato, SERÁ: COMPLETAMENTE INÚTIL SI NO SE TOMA EN CONSIDERACIÓN LA ADECUADA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE SOBRE LA CUAL SE VA A RECUBRIR.

**PREPARACIÓN DE SUPERFICIES.-** De las impurezas más comunes con las que hay que trabajar para eliminarlas de las superficies son: el óxido o herrumbre, escamas de laminación, polvos, grasas, aceites y contaminación de sales y líquidos, así como también residuos de viejos recubrimientos. La elección del método más adecuado de





preparación de superficies a adoptar en el pintado de una estructura de acero o concreto viene influenciado por los principales factores que condicionan su importancia.

- 1.- La calidad ambiental en que vaya estar situada la superficie metálica.
- 2.- El uso y servicio a que se vaya a destinar.
- 3.- El tipo de diseño de la estructura.
- 4.- La calidad de la superficie que presente.
- 5.- La facilidad de acceso para el futuro mantenimiento.
- 6.- El grado mínimo necesario de la preparación de la superficie, de acuerdo al sistema a utilizar.
- 7.- El costo del equipo o estructura que se protege.

Los métodos de preparación de superficies están diseñados y ampliamente especificados por la STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL (SSPC) y la NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS (NACE). Los métodos son los siguientes:

**SSPC-SP1 - LIMPIEZA CON PRODUCTOS QUÍMICOS.**-En este método se utilizan los productos que de acuerdo a las necesidades sean los más eficientes y adecuados. Los productos pueden ser, desde solventes hasta desoxidantes y desengrasantes así como también algunos tipos de ácidos o soluciones ácidas, etc. La finalidad de este proceso es la de eliminar por completo todos aquellos contaminantes que eviten una buena adherencia al sustrato, tales como aceites, grasas, polvos, gases, humos, etc. La superficie tratada deberá ser perfectamente lavada con agua dulce para eliminar cualquier residuo. Se puede aplicar con brocha o aspersión siguiendo las instrucciones necesarias para obtener la máxima eficiencia.

**SSPC-SP2- LIMPIEZA MANUAL.**-En este método se contempla el uso de herramientas manuales, tales como cepillos de alambre, lijas, cinceles, martillos, espátulas, etc. Este tipo de limpieza se destina para áreas pequeñas de poca accesibilidad ya que es muy lenta. Su gama de limpieza se reduce a costras de pintura, de óxido, de soldadura, de escama de laminación poco adherida, etc.

Estos procedimientos deben registrarse a casos en que las áreas a pintarse vayan a estar expuestas a calidades ambientales muy suaves.

El principal inconveniente de limpiar con medios manuales es que no es posible por completo eliminar la escama de laminación.

La superficie siempre quedará contaminada. Los recubrimientos aplicados sobre una superficie limpiada manualmente protegerá por cortos períodos de tiempo; ninguna protección a largo plazo puede esperarse. En casos de severa corrosión o de servicio en inmersión no deberá usarse.

**SSPC-SP3- LIMPIEZA MECÁNICA.**-Aunque este método de preparación de superficies presenta algunas ventajas, está restringido para casos muy especiales. Los principales equipos usados son: cepillos, lijas, y esmeriles eléctricos.





Con este método parte de la escama de laminación se logra quitar y un gran % de la superficie se logra limpiar realmente. Este sistema se debe de acompañar algunas veces con el de limpieza química. Ofrece buenas posibilidades como sustituto en los casos de severa corrosión o de servicio en inmersión continua no se recomienda.

**SSPC-SP4- LIMPIEZA CON FLAMA.**-Esté método de preparación de las estructuras de acero se basa en el paso de una flama del tipo oxiacetilénica. El calentamiento brusco de la superficie causa el desprendimiento de la escama de laminación, como consecuencia de las diferentes tensiones provocadas por la temperatura entre el metal y la escama de laminación.

Además se ocasiona el quemado de los aceites o grasas y la deshidratación de los óxidos que pueda haber presentes. Inmediatamente después del flameado se cepilla el área y se limpia la superficie. La limpieza con flama no da la protección a largo plazo que se obtiene con tratamiento químico en inmersión o con chorro de arena.

**SSPC-SP5-(NACE 10) LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA, GRADO: METAL BLANCO.**-Este método consiste en tratar la superficie metálica con un abrasivo a presión (normalmente arena sílice) hasta dejarla completamente uniforme, de un color blanco grisáceo, libre completamente de cualquier contaminación (óxido, residuos de pintura escama de laminación, polvo, grasa, aceite, etc.) y con una rugosidad o perfil de la superficie de acuerdo con el tipo de arena sopleteada. Está rugosidad está calculada y definida con el objeto de asegurar un excelente anclaje de los recubrimientos. Este tipo de grado de limpieza es el recomendado para recubrimientos que van a estar expuestos en calidades ambientales muy corrosivas o para exposición al exterior e interior en servicio de inmersión continua y prolongada.

**SSPC-SP6-(NACE 30) LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA GRADO: COMERCIAL.**-Este método se define como aquel que elimina completamente de la superficie el aceite, la grasa, suciedad, escama de óxido y laminación, residuos de pintura, etc. Sin embargo no queda la superficie completamente blanco grisáceo, sino que se aprecian pequeñas manchas oscuras rojizas. La rugosidad o perfil de la superficie dependerá del tipo y grado de la arena que se utilice. Este tipo de limpieza es el más usado dado que es 3 ó 4 veces más rápido que el anterior, además de que es más económico.

Este grado de limpieza no está recomendado para servicio de inmersión, pero sí para exposición en calidades ambientales corrosivos severos ya sean industriales o marinas.

**SSPC-SP7-(NACE 40) LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA GRADO: RÁFAGA.**-En este caso la limpieza no es tan a fondo como las anteriores ya que lo que aquí se pretende es eliminar las rebabas, escamas de laminación poco adheridas, trazas de óxido y residuos de pintura que se encuentren sueltas. Este tipo de limpieza es muy económico y rápido y se emplea en la limpieza de estructuras pesadas ya instaladas, tales como puentes, edificios, etc.

Este grado de limpieza no está recomendado para servicio de inmersión, sino para exposiciones ambientales poco severas, como las rurales y urbanas.





**SSPC-SP8- LIMPIEZA EN INMERSIÓN (BAÑO ÁCIDO).**-en este método de limpieza se considera el baño en ácido de ciertas piezas de acero que no sean muy grandes o pesadas y en las cuales se requiera el máximo de limpieza de la superficie (estructuras, tanques, maquinaria, plataformas sin ensamblar). Normalmente se utilizan los ácidos sulfúrico, fosfórico o clorhídrico diluido, con el objeto de eliminar todo tipo de contaminación, costra o residuo.

Por el tipo que normalmente se limpian es un método lento en comparación con las anteriores. Sin embargo este grado de limpieza está recomendado para la exposición al exterior e interior en servicio de inmersión en calidades ambientales muy severas, como las marinas e industriales.

**SSPC-SP10 (NACE 20) LIMPIEZA CON CHORRO DE ARENA GRADO: CASI METAL BLANCO.**-Este tipo de limpieza es una versión más económica y más rápida que la especificada en el SSPC-SP5(NACE 10), ya que se considera aceptable el 95% de la superficie completamente blanca grisácea pero con todos los elementos contaminantes completamente eliminados.

Este grado de limpieza está recomendado para el servicio de inmersión en medios ambientales muy severos ya sean marinos e industriales.

TABLA V-6

## EFICIENCIA DE LIMPIEZA.

	MÉTODO	EFICIENCIA	
1	SSPC-SP8	93-100%	
2	SSPC-SP5	83-100%	NACE 10
3	SSPC-SP10	83-100%	NACE 20
4	SSPC-SP6	83-100%	NACE 30
5	SSPC-SP7	83-100%	NACE 40
6	SSPC-SP4	47-83%	
7	SSPC-SP3	30-40%	
8	SSPC-SP2	30-40%	
9	SSPC-SP1	30-40%	

La eficiencia considerada en los métodos anteriores de limpieza están referidos en su gama a los distintos tipos de recubrimientos aplicados, así pues es distinta la eficiencia que pueda proporcionar un sistema alquidálico en relación con la eficiencia que un sistema epóxico pudiera tener.

También se puede considerar como factores determinantes en la eficiencia los siguientes: tipo de superficie, tipo de sustrato, diseño de la superficie, uso típico etc.

**PERFIL DE LA SUPERFICIE.**- Se entiende como perfil de la superficie la RUGOSIDAD que presenta el metal cuando es limpiada en medios manuales, mecánicos y principalmente por el efecto de los abrasivos, tales como la arena y la granalla de acero.







Una superficie demasiado tersa y pulida no tendrá el debido anclaje para que el recubrimiento se adhiera adecuadamente.

Por otro lado, si la superficie es demasiado áspera, pueden resaltar puntos agudos del metal sobre el recubrimiento y quedan sin protección.

TABLA V-7.

ABRASIVO	CALIDAD DE ABRASIVO	PERFIL MÁXIMO
arena muy fina	80 mallas	1.5 mils
arena fina	40 mallas	1.9 mils
arena media	18 mallas	2.5 mils
arena gruesa	12 mallas	2.8 mils
granalla de acero G-50	25 mallas	3.3 mils
granalla de acero G-40	18 mallas	3.6 mils
granalla de acero G-25	16 mallas	4.0 mils

La selección del abrasivo dependerá de los siguientes factores:

- 1.- Tipo de metal a limpiar.
- 2.- Recuperabilidad del abrasivo.
- 3.- Perfil de rugosidad de la superficie deseada.
- 4.- Lo quebradizo del abrasivo.
- 5.- Costo del abrasivo.
- 6.- Tipo de riesgos y enfermedades que pueda provocar.

Generalmente se usa granalla de acero G-25 o G-50 para limpiar el interior de los tanques donde el material es recuperable o donde la limpieza es muy dura, también en talleres especializados donde se utilizan aparatos de VACUOBLAST.

En trabajos al exterior en donde el abrasivo no es recuperable se emplea arena cuarzosa o sílica de los tipos de 12-80 mallas (de fina a arenosa) dependiendo de la condición de la superficie a limpiar, lugar de aplicación, del sistema de recubrimientos por aplicar y del servicio de la superficie que fuera a tener.

**ADHESIÓN DE LAS PELÍCULAS.**- La razón secundaria más importante acerca de la adecuada preparación de la superficie es la de lograr un anclaje mecánico que logre satisfacer sobradamente las necesidades de adherencia entre el metal y el recubrimiento.

La RUGOSIDAD o PERFIL DE LA SUPERFICIE que se logra con la limpieza de chorro de arena dará básicamente una mayor área de contacto, área que deberá ser cubierta totalmente por el recubrimiento. LA RUGOSIDAD O PERFIL NO DEBERÁ SER MAYOR DEL 50% DEL TOTAL DE LA PELÍCULA QUE SE TENGA QUE APLICAR.





## V.10 TEORÍA DE LOS RECUBRIMIENTOS.

El objeto de aplicar recubrimientos o pinturas es el de prevenir el inicio del ataque de la corrosión, ya que una vez que la CORROSIÓN ha empezado en una superficie metálica no hay ninguna posibilidad de que se detenga por medio del recubrimiento.

Esto significa que para prevenir la corrosión bajo la superficie preparada, el recubrimiento deberá de tener ciertas características, tales como:

- 1.- ADHERENCIA.
- 2.- DUREZA.
- 3.- FLEXIBILIDAD.
- 4.- IMPERMEABILIDAD.
- 5.- PIGMENTACIÓN INHIBIDORA.
- 6.- CONTINUIDAD DE LA PELÍCULA.
- 7.- CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.
- 8.- RESISTENCIA QUÍMICA.
- 9.- RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.
- 10.- RESISTENCIA DIELECTRICA.

Ninguno de los vehículos empleados en las pinturas o recubrimientos son completamente impermeables al oxígeno y a la humedad. Solamente los derivados de la hulla y los productos bituminosos se puede decir que sean realmente impermeables sin embargo tienen sus limitaciones; como el color y su bajo punto de fusión. En cambio si hay muchos tipos de pinturas que aún cuando no son completamente impermeables a la humedad y al oxígeno; si sirven como barreras o agentes aislantes, que al aumentar su espesor de la película la tendencia a la corrosión disminuye. Es importante que la película del recubrimiento cubra perfectamente toda la superficie y tenga un espesor lo suficientemente grueso para evitar el paso del oxígeno y la humedad.

De la naturaleza del ataque corrosivo dependerá del tipo de recubrimiento que se deba utilizar. En los últimos años han surgido muchas industrias químicas en donde se producen ambientes corrosivos muy fuertes, motivo por lo que se han desarrollado películas inorgánicas y orgánicas más resistentes.

Los nuevos sistemas de recubrimientos presentan nuevas características de aplicación al metal. En muchos casos la eficacia de una pintura o recubrimiento depende más de saber aplicarla debidamente al metal que de las tolerancias en la formulación de la misma.

## V.11 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS.

Para la protección adecuada y satisfactoria de la acción de la corrosión en los metales estos se clasifican en tres grupos de productos:

- 1.- PRIMARIOS (PRI-METALES).- Son aquellos recubrimientos que se elaboran bajo especificaciones estrictas; con resinas y pigmentos de la mejor calidad para cumplir con su objetivo primordial:





## LA PROTECCIÓN ANTICORROSIVA DEL METAL PREVIAMENTE PREPARADO.

- 2.- **ENLACES (PRE-METALES).**- Son aquellos recubrimientos que se elaboran bajo especificaciones estrictas sus resinas y pigmentos son de la mejor calidad; su objetivo principal es la de **PROTEGER CONTRA LA CORROSIÓN OFRECIENDO UN EXCELENTE MEDIO DE ENLACE ENTRE EL PRIMARIO Y EL ACABADO O RECURRIMIENTO.**
- 3.- **ACABADOS (PRO-METALES).**- Estos productos además de ofrecer excelentes propiedades de protección ofrecen alta calidad decorativa, formando así excelentes sistemas para la protección anticorrosiva de los metales.

En los tres grupos de recubrimientos podemos contar con distintos grupos de vehículos.

La diferencia básica entre los vehículos son: el tipo de película que forman, la capacidad o resistencia a los agentes químicos corrosivos y a su grado de impermeabilidad.

**ALQUIDÁLICOS.**- Son los vehículos para los recubrimientos de mayor consumo y aplicación, sin embargo limitados a los ambientes secos y semi-húmedos. Su durabilidad es buena en condiciones de intemperismo normales. Tiene buena resistencia a las sales neutras o ligeramente ácidas, pero poca a las alcalinas. Los ácidos diluidos tienen menos efecto sobre la película que los álcalis diluidos. Su resistencia a los solventes derivados del petróleo y a los aceites es regular. No soportan el contacto con los alcoholes y los hidrocarburos aromáticos, ni con las acetonas, ésteres y solventes clorados.

**VINÍLICOS.**- Este tipo de productos están elaborados a base de resinas que son copolímeros de cloruro de vinilo y acetato de vinilo. Estos recubrimientos tienen una excelente capacidad de duración. Superan a las alquidálicas en la retención del brillo. Secan rápidamente. Este tipo de resinas son termoplásticas por lo que no soportan altas temperaturas (no mayor de 65°C).

Su resistencia al agua es excelente, se recomiendan para la exposición en servicio de inmersión. Soporta perfectamente los ácidos y álcalis. No soportan el contacto con las acetonas, alcoholes, ésteres e hidrocarburos aromáticos.

**ACRÍLICOS.**- Este tipo de productos se utilizan solo como polímeros acrílicos o en combinación con los vinílicos. Poseen excelente resistencia al intemperismo y retención de brillo, buena flexibilidad y resistencia a la temperatura. Su resistencia a los solventes es poca; a los álcalis, ácidos y sales es buena. Se emplean principalmente donde se requiere resistencia al intemperismo prolongado y alta resistencia al brillo.

**EPÓXICOS.**- Este tipo de vehículos pueden ser catalizados o curados por una amplia variedad de agentes curantes y las propiedades finales dependerán del agente mismo. Los epóxicos catalizados con aminas son duros, con una excelente resistencia a los productos químicos. Presentan excelente adherencia a las superficies metálicas. Sin embargo tienden a calentarse; al exponerse a la intemperie. Los epóxicos





catalizados con poliamidas tienen una excelente resistencia al intemperismo prolongado, buena flexibilidad, adherencia, brillo y dureza. Buena resistencia al agua y a las sales, sin embargo limitado en cuanto a los ácidos, álcalis y solventes.

**URETÁNICOS.-** Las propiedades físicas y químicas del recubrimiento dependen básicamente de la formulación hecha; la principal ventaja de su uso es su amplio rango de dureza a flexibilidad que se puede obtener. En general tiene excelente resistencia a los solventes, ácidos, álcalis y agua. Poseen alto grado de resistencia a la abrasión, intemperismo prolongado; retención de brillo; acabado no igualado por ningún otro recubrimiento.

**HULE CLORADO.-** Este tipo de vehículo se prepara por cloración del hule natural. Son similares a los vinílicos en apariencia comportamiento y aplicación. Debido a su tolerancia a superficies mal preparadas y a su excelente adherencia se emplean mucho en embarcaciones, plantas químicas y cámaras, etc. Resisten salpicaduras derrames, y exposiciones de gran variedad de productos químicos.

Tienen tendencia a calearse especialmente en climas tropicales. Secan rápidamente; no soportan el contacto con hidrocarburos aromáticos, ésteres y cetonas; se ablanda con aceites y grasas vegetales.

**INORGÁNICOS.-** Los ricos en Zinc más conocidos son los derivados del Silicio en forma de silicato, tal como el silicato de etilo. Este tipo de vehículo se complementa con polvo de zinc puro, para formar una barrera sobre la superficie actuando como protector catódico. Tiene excelente resistencia al agua de mar y a los solventes. Tienen una resistencia excelente al intemperismo prolongado a la inmersión en diferentes medios líquidos.

**ELASTOMEROS.-** En este tipo de vehículos podemos contar con el de BUTILO, NEOPRENO, POLIETILENO MODIFICADO, etc. En general presentan buenas resistencias al intemperismo, al agua, a los productos químicos, tales como ácidos, álcalis y agentes oxidantes.

Una vez explicado el fenómeno de la corrosión y algunos métodos para su control, las tablas que se muestran en el apéndice nos sirven para determinar la selección de los materiales a diferentes temperaturas (°F) y además en que forma puede afectar a estos materiales la corrosión.



**CONCLUSIÓN.**



## CONCLUSIÓN.

La Ingeniería de procesos estudia el desarrollo, evaluación y diseño de procesos químicos. Tal vez en ninguna otra fase de la ingeniería química puede el ingeniero aplicar de mejor manera los conocimientos técnicos y habilidad adquiridos en su educación superior. A menudo muchas compañías de operación pueden subdividir la ingeniería de procesos en departamentos de desarrollo de análisis económico y de diseño, no es raro que un solo ingeniero de proceso origine un nuevo proceso y lo continúe. Indudablemente, muchos ingenieros de proceso bastante experimentados, con base en sus conocimientos personales del proceso son solicitados para dirigir como ingenieros de proyecto el diseño de una nueva planta.

Es por esto que debido a la importancia que tiene la ingeniería de procesos en la industria la Escuela Nacional de Estudios Profesionales "Aragón" en el plan de estudios que lleva para la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica en el área Mecánica contempla la asignatura denominada con el nombre de Ingeniería de Procesos Industriales, la cual tiene por objetivo principal el de dar al estudiante que estudia esta carrera una perspectiva general de las industrias de procesos de mayor relevancia en nuestro país.

Anteriormente esta asignatura estaba conformada con un temario diferente, pero debido al cambio de plan de estudios hubo una modificación en la estructura de dicho temario por lo que fue necesario contar con unos apuntes que ayudarán al estudiante a tener una fuente de información que cumplirá con los temas aprobados por el Consejo Universitario, de ahí parte la necesidad para la elaboración de esta tesis. Este trabajo de tesis abarca temas importantes en los que en forma condensada pero tratando de no perder la idea se busca que sirvan como un curso introductorio a la ingeniería de procesos.

Dándole la importancia que merecen estos temas que comprende esta tesis se hizo a la tarea de la investigación tomando como fuentes de información: libros, revistas, folletos e información de las Cámaras de las industrias de los procesos en estudio. Teniendo esta información no fue fácil hacer la compaginación de ella ya que con frecuencia se caía en la tendencia de querer profundizar en ciertos aspectos que nos parecían importantes y que de hecho lo son ya que sin temor a equivocarnos bien se podría elaborar una tesis para cada uno de los temas que contiene este trabajo de tesis.

Una vez teniendo la información condensada en forma clara y concisa pudimos apreciar en su forma real la importancia que tiene cada uno de los temas para la comprensión del objetivo final de la asignatura y la relación que tienen cada uno entre sí.

Resumiendo de esta forma en este trabajo de tesis podemos comprender que para el diseño de una planta debemos contar con un plano de proceso y conociendo los procesos que se utilizarán en la planta se procede a esquematizarlos por medio de Diagramas de flujo que son ilustrados mediante una simbología, claves o códigos a equipo, tuberías, accesorios, etc. Estos diagramas ayudan en la comprensión de como se lleva a cabo el flujo de materiales o energía en un proceso o en un equipo. Cabe aclarar que la nomenclatura no es estándar, pero se usan símbolos, que son





escogidos desde el punto de vista de la claridad y simplicidad y generalmente son parecidos al equipo empleado. Un diagrama de flujo es casi indispensable para hacer los balances de masa y energía en un proceso o en una planta.

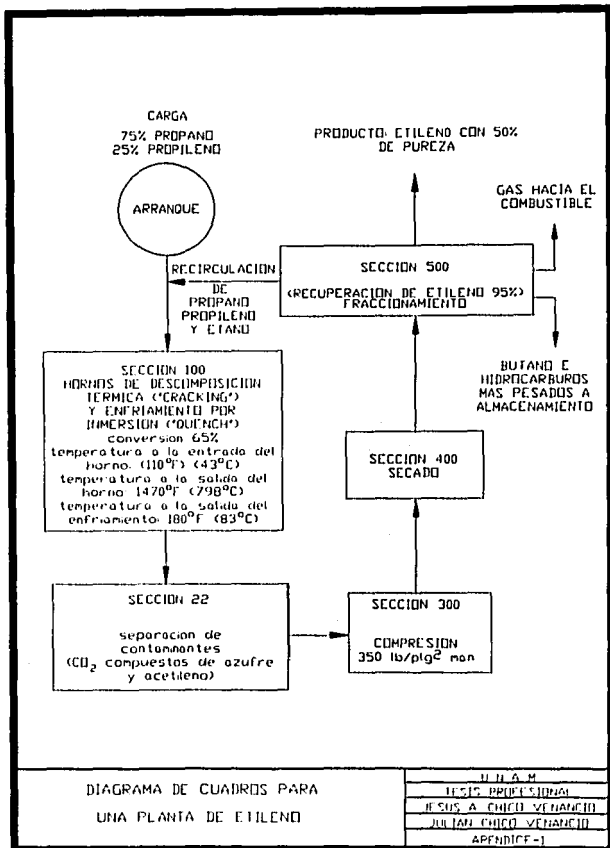
A partir de las leyes de Conservación de masa y energía están basados los balances de materia y energía. Un balance de materia o de energía es un procedimiento que lleva la contabilidad exacta de la materia que entra y sale de un proceso.

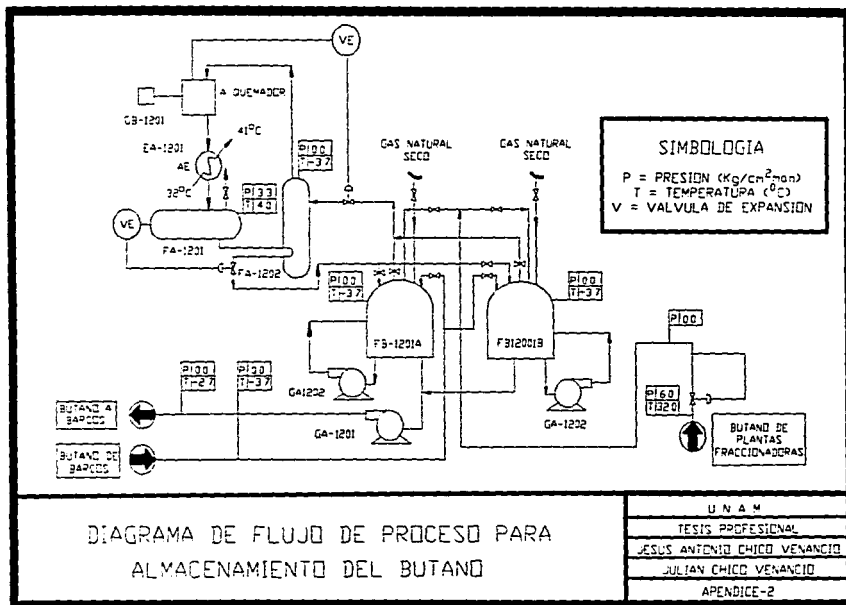
Para los fenómenos de transporte de equipo de proceso se utilizan estos balances para poder conocer la transferencia de momento, masa y calor en equipos utilizados para operaciones unitarias como son la evaporación y el secado por mencionar algunas. Y por último el tema de Materiales de Construcción de Equipo nos da el panorama de los principales materiales existentes en ingeniería y cual de ellos es el que se pueda seleccionar de acuerdo a sus características para la fabricación de equipo de proceso. Además se menciona como actúa el fenómeno de la corrosión en los materiales y de que forma puede ser prevenido para no provocar daños a estos equipos.

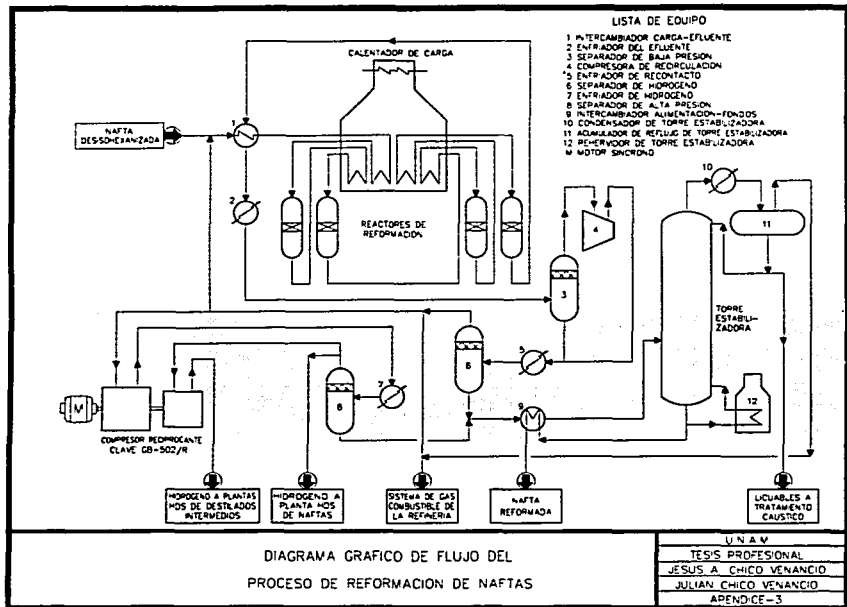


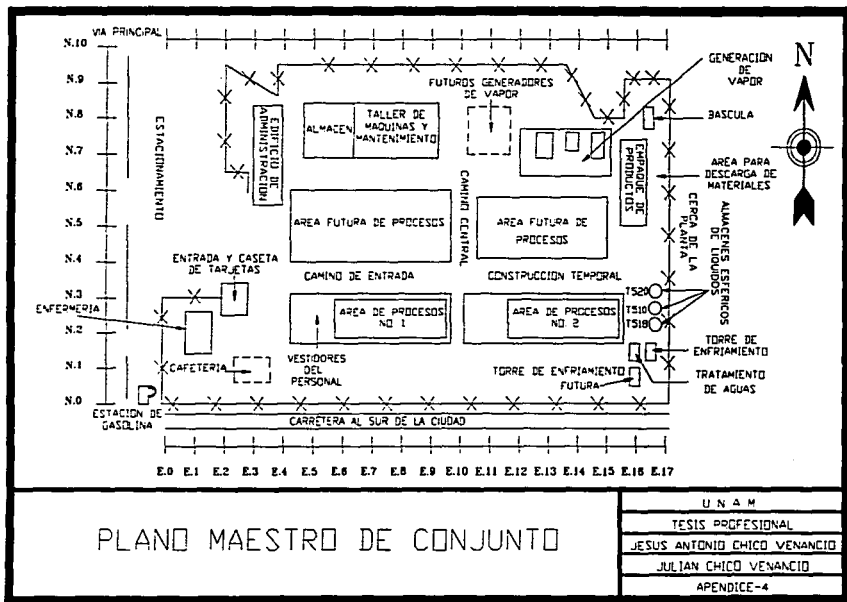
## APÉNDICE



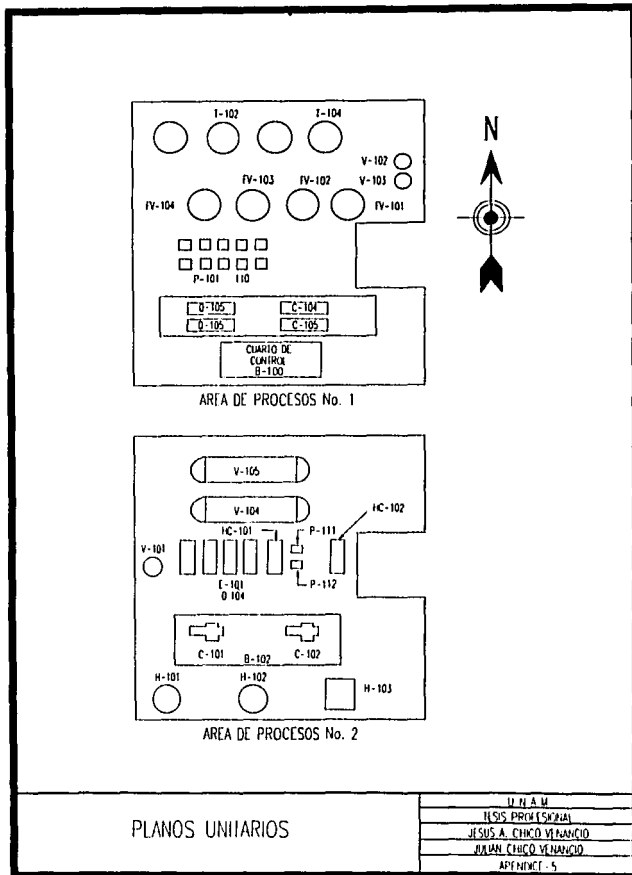


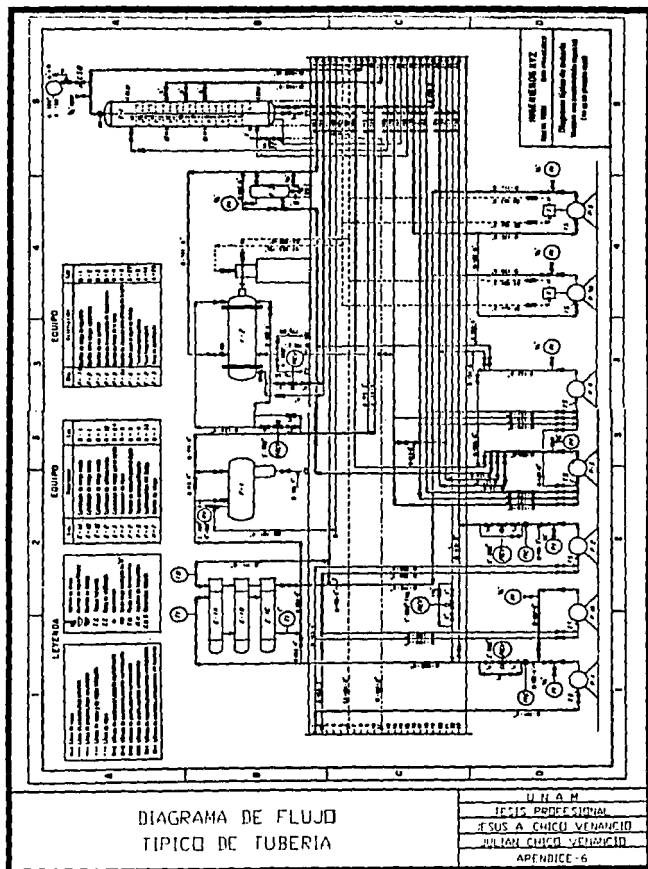






FALLA DE COPIA



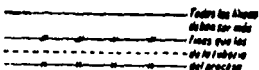






## SIMBOLOS PARA LA INSTRUMENTACION BASICA

Tubería de los instrumentos, (presión, temperatura, etc., líneas de conexión, tuberías)  
 Líneas de aire de los instrumentos  
 Conexiones eléctricas de los instrumentos  
 Tubería capilar de los instrumentos



Moneda en el lugar



Simbolos básicos para instrumentos con un solo servicio y función

Moneda en el tambora



Moneda en el lugar



Simbolos básicos para instrumentos o dispositivos combinados con dos servicios o funciones

Moneda en el tambora



Moneda en el lugar



Simbolos básicos para transmisores

Moneda en el tambora



Simbolo básico para una válvula operada de diafragma



Simbolo básico para una válvula operada eléctricamente (solenoide o motor)



Simbolo básico para una válvula operada por pistón (hidráulico o neumático)



Cuerpo de 3 pasos para cualquier válvula



Simbolo básico para una válvula de seguridad (de alivio)



Simbolo básico para mostrar una conexión neumática del instrumento a la válvula matriz de diafragma



Simbolo básico para una válvula de regulación operada manualmente



Simbolo básico para una válvula reguladora (integrar) auto-accionada



Simbolo básico para mostrar un instrumento de transmisión neumática (igual para la transmisión eléctrica excepto por el tipo de conexión)

SIMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO (CONTINUACION)

U. I. A. M.  
 IECIS, PUNTO SIENA  
 JESUS A. CHICO VELANZIO  
 DANIEL CHICO VELANZIO  
 APÉNDICE - 8



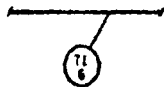




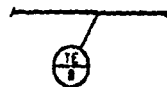
## SIMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION PARA TEMPERATURA



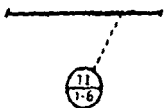
Pozo o funda para  
medir temperatura



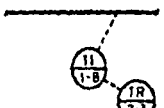
Indicador de temperatura  
o termómetro (local)



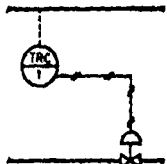
Elemento de temperatura  
sin conexión al instrumento



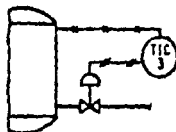
Punto indicador de tem-  
peratura conectado a un  
indicador de varios puntos  
en el tablero



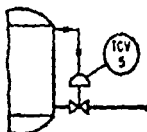
Punto indicador y regis-  
trador de temperatura  
conectado a un instru-  
mento de varios puntos  
en el tablero



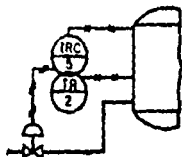
Regulador y registrador de  
temperatura montado en  
el tablero (medición mé-  
trica)



Regulador e indicador de  
temperatura, sistema tipo  
comp, montado en el lugar



Regulador de temperatura  
de tipo auto-accionado



Regulador con registro de  
temperatura y registrador de  
temperatura, instrumento com-  
binado montado en el tablero

SIMBOLOS DE EQUIPO DE  
PROCESO (CONTINUACION)

U. N. A. M.
ING. PROFESIONAL
JESUS A. CHICIL VENANCIO
JULIAN CHICIL VENANCIO
APENDICE - 9

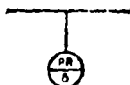




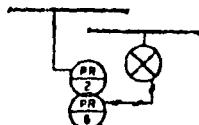
## SIMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION PARA PRESIÓN



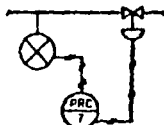
Indicador de presión,  
montado en el lugar



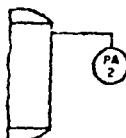
Registrador de presión,  
montado en el tablero



Pluma registradora (2) de  
presión, montada en el  
tablero, pluma (6) de trans-  
misión neumática



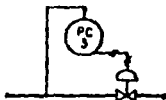
Regulador y registrador  
de presión, transmisión  
neumática con receptor  
montado en el tablero



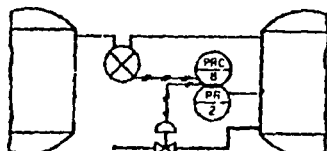
Alarma de  
presión,  
montada en  
el lugar



Válvula reguladora de presión  
integral auto-accionada



Regulador de presión  
tipo ciego  
(Montarse el regulador  
directamente sobre el dia-  
fragma si está montado así)



Regulador y registrador de presión (diferencial),  
transmisión neumática con registrador de presión; el  
instrumento combinado va montado en el tablero

SÍMBOLOS DE EQUIPO DE  
PROCESO (CONTINUACIÓN)

U. N. A. M.
INSTITUTO NACIONAL
DE ESTADÍSTICA Y CENSO
DE MÉXICO
APÉNDICE-10

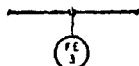




**SÍMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION PARA FLUJO**



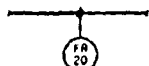
Medidor de flujo por desplazamiento



Elemento de flujo (primario)  
*(cuando no se tiene instrumento medidor)*



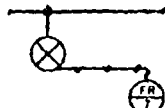
Indicador de flujo de tipo diferencial montado en el lugar



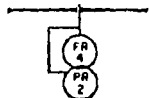
Registrador de flujo de tipo diferencial con transmisión mecánica montado en su lugar



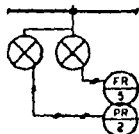
Registrador de flujo de tipo rotámetro u otro tipo similar (en la línea)



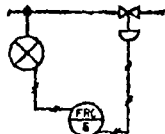
Registrador de flujo, transmisión neumática, transmisor en el lugar, receptor montado en el tablero



Registrador de flujo, tipo mecánico con pluma registradora de presión conectada directamente, montado en lugar  
*(Nota: que si a este símbolo se le agrega una combinación de letras especificaciones, etc., se escribe FR-4 y PR-2, pero de cada elemento como una entidad separada)*



Registrador de flujo con pluma registradora de presión, ambos elementos con transmisión neumática, transmisores en el lugar y receptor montado en el tablero  
*(El receptor se debe escribir como FR-3 y PR-2 y la de transmisión debe identificarse por su propia abreviatura)*



Registrador y regulador de flujo, transmisión neumática con el receptor montado en el tablero y transmisor en el lugar

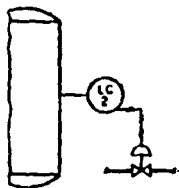
SÍMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO (CONTINUACION)

U. I. A. N.
IESIS PROFESIONAL
JESUS A. CORDERO VERAÑO
OSCAR CHIER VERAÑO
APÉNDICE - II

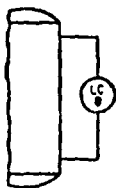




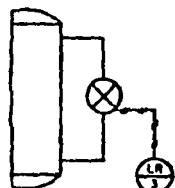
## SIMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION PARA NIVELES



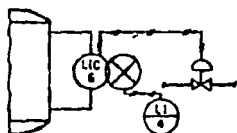
Regulador cierre de nivel, tipo interno



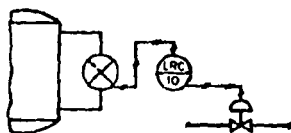
Medidor de mirilla



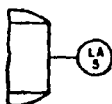
Registrador de nivel, transmisión neumática, con receptor montado en el tablero, transmisor externo



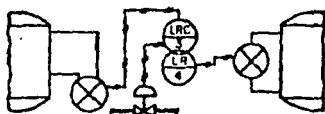
Regulador y transmisor indicadores de nivel, combinados, con receptor indicador del nivel montado en el tablero



Regulador y registrador de nivel, tipo externo, transmisión neumática



Alarma de nivel, tipo interno



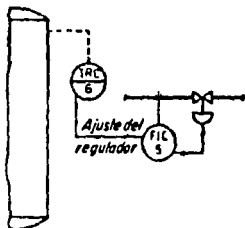
Regulador registrador de nivel y registrador de nivel, transmisión neumática, receptor combinado montado en el tablero

SIMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO <CONTINUACION>

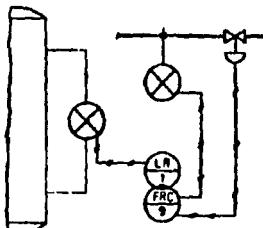
S. I. N. A. M.  
I. E. T. I. S. PROFESIONAL  
E. C. U. E. A. CHICO VENANCIO  
S. U. L. I. A. N. CHICO VENANCIO  
A. P. T. M. D. I. C. E. F. - 12



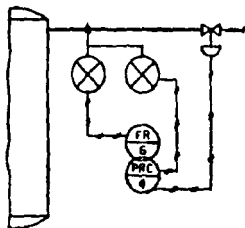
**SIMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION PARA INSTRUMENTOS COMBINADOS**



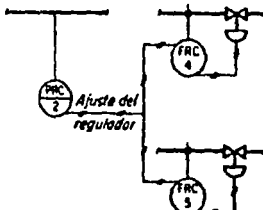
Regulador y registrador de temperatura, montado en el tablero, regulador indicador de presión para ajuste montado en el lugar (Notarse que debe escribirse "Ajuste del regulador" a lo largo de la línea de aire para indicar que la regulación es en cascada)



Regulador y registrador de flujo con registro del nivel. Ambos elementos con transmisión neumática. Transmisor de nivel de tipo externo. Receptor combinado montado en el tablero



Regulador y registrador de presión con registro del flujo. Ambos elementos con transmisión neumática. Receptor combinado montado en el tablero



Regulador y registrador de presión, montado en el tablero, reguladores y registradores de flujo para ajuste montados en el lugar

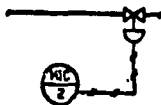
SIMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO (CONTINUACION)

UNAM
INGENIERO PROFESIONAL
EN SUS A CIUDADELA VERANCI
ADRIAN ENRIQUE VERANCI
APÉNDICE-13

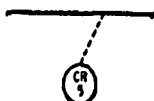




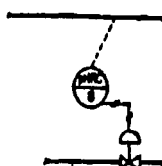
## SIMBOLOS TÍPICOS DE INSTRUMENTACION (MISCELANEOS)



Regulador neumático accionado e mero, montado en el tablero, con indicación



Registrador de conductividad, montado en el tablero



Regulador y registrador de pH, montado en el lugar



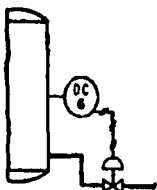
Registrador de velocidad, montado en el lugar



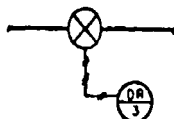
(Transportador de banda)  
Registrador de peso, montado en el lugar



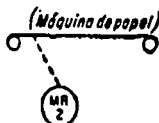
Registrador de viscosidad, transmisión neumática, montado en el tablero (elemento en una línea de flujo de muestra)



Regulador ciego de densidad, elemento tipo interno



Registrador de densidad, transmisión neumática, montado en el tablero (elemento en una línea de flujo de muestra)

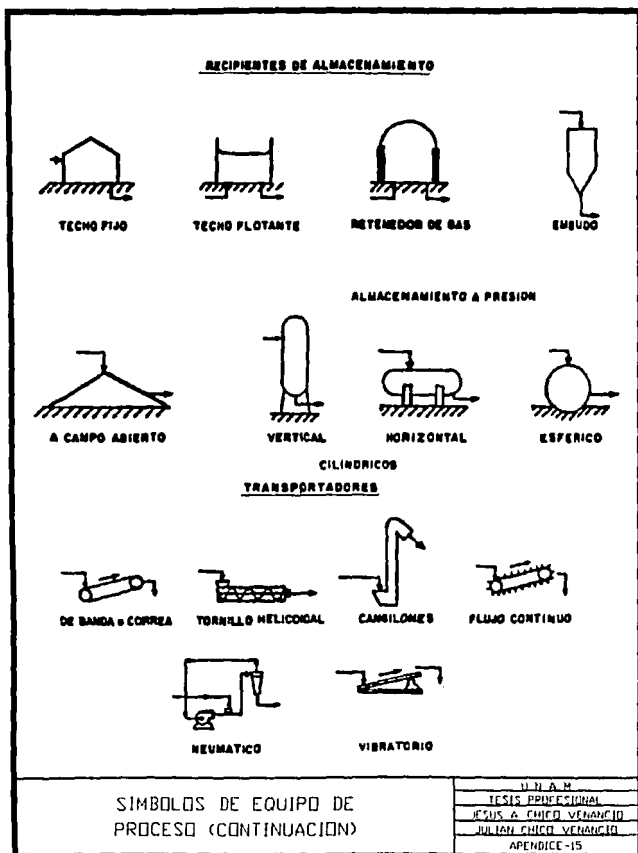


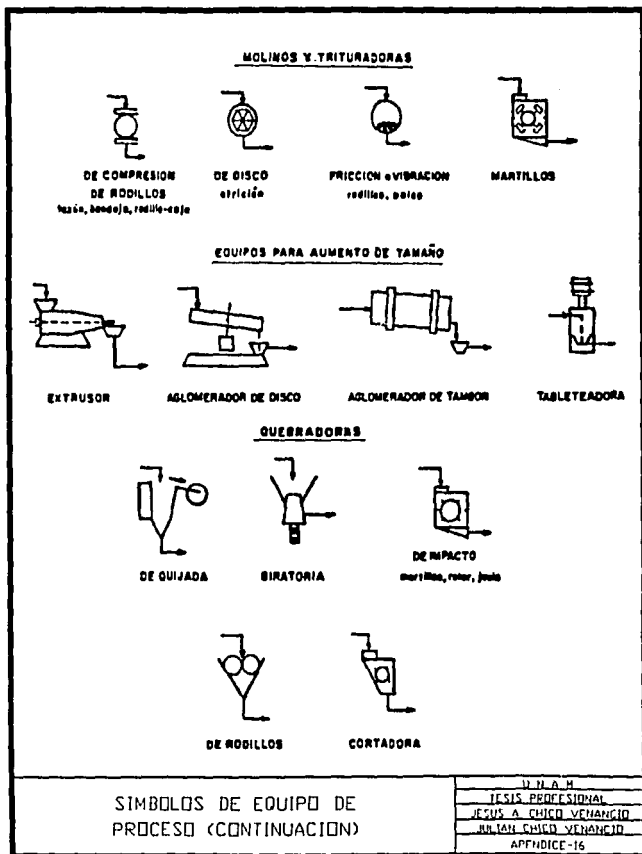
(Máquina de papel)  
Registrador de humedad, montado en el lugar

SÍMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO (CONTINUACION)

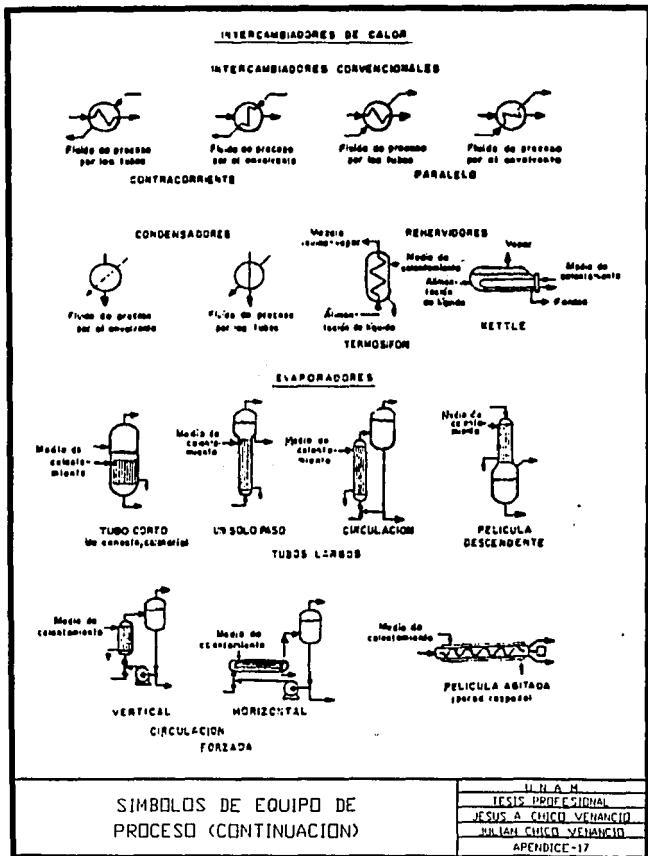
U. N. A. H.
TESIS PROFESIONAL
JESUS A. CHICO VENANCIO
JULIAN CHICO VENANCIO
APÉNDICE - 14

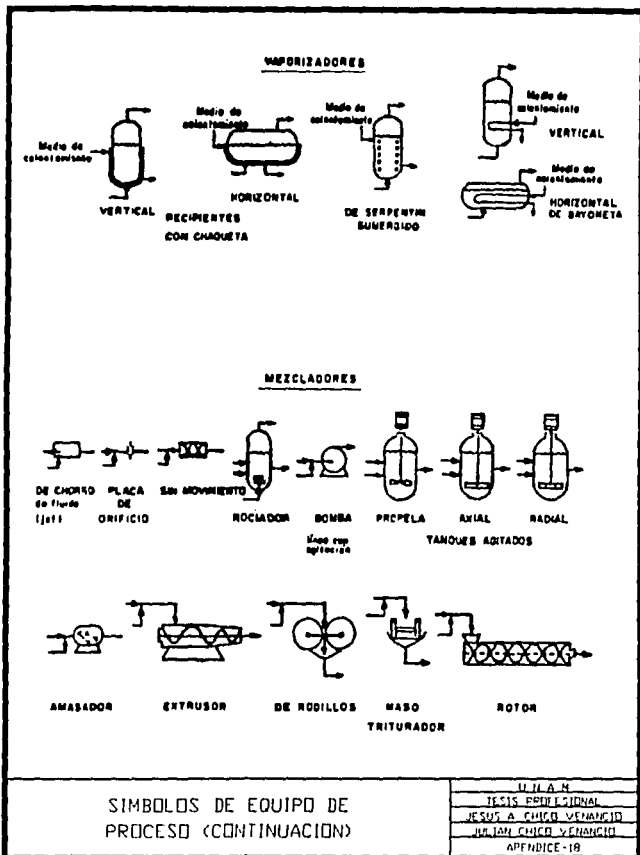


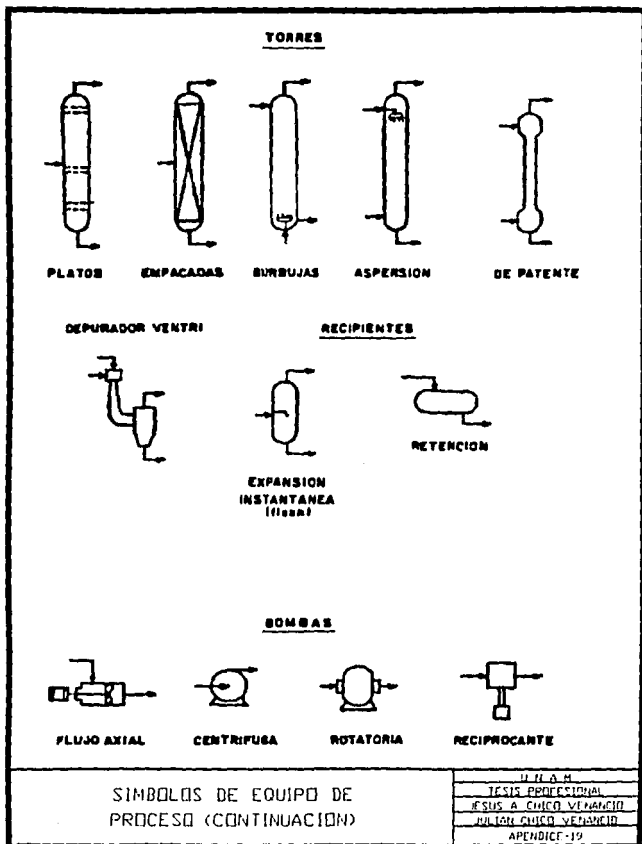


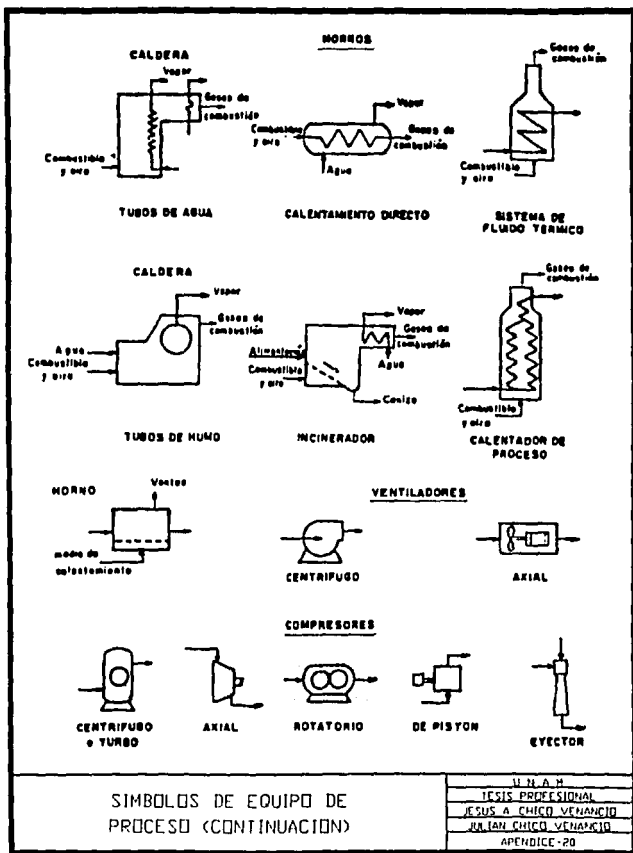






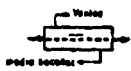








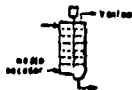
**EQUIPOS DE CONTACTO SOLIDO-SAB**



TUNEL



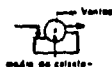
ROTATORIO



TORRE VERTICAL



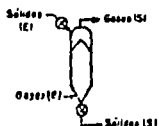
TRANSPORTADOR VIBRATORIO



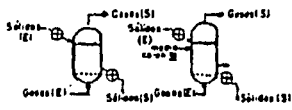
SECADOR DE TAMBOR



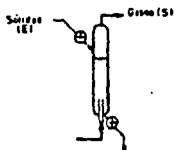
SECADOR TRANSPORTADOR DE TORNILLO



DE CONTACTO DE LECHE GRAVITACIONAL



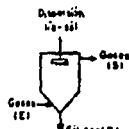
DE CONTACTO DE LECHO FLUIDIZADO



DE CONTACTO DE LECHE LIQUIDO



DE CONTACTO POR TRANSPORTE NEUMATICO



TORRE DE ASPERSION

SIMBOLOS DE EQUIPO DE PROCESO (CONTINUACION)

U. N. A. M.
IESIS PROFESIONAL
IESUS A CHICO VENANCIO
MILIAN CHICO VENANCIO
APENDICE -21

FALLA DE ENERGIA





MÁQUINAS DE IMPULSION Y RECUPERACION DE ENERGIA



**MOTOR ELECTRICO  
O GENERADOR**



**MOTOR DE  
COMBUSTION INTERNA**



**DE TURBINA  
O EXPANSION**

REACTORES



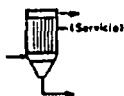
SEPARADORES



**CENTRIFUGO**



**CICLON**



**PRECIPITADOR  
ELECTROSTATICO  
FILTRO DE BOLSAS**



**CLASIFICADOR  
ESPESADOR**



**DECANTADOR  
SEDIMENTADOR**



**FILTRO DE  
CARTUCHO**



**FILTRO DE  
ARENA**



**FILTRO CONTINUO**



**FILTRO PRESA**

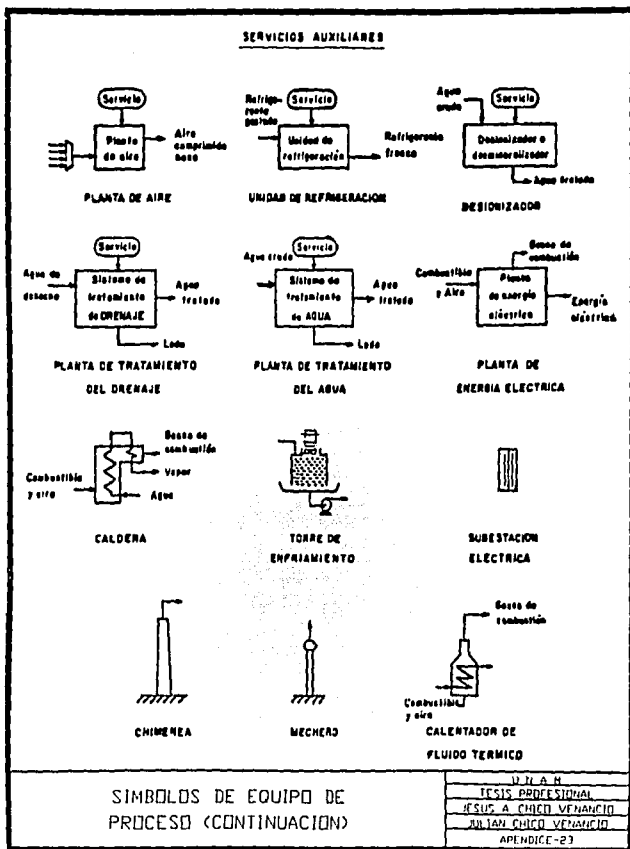


**CRIBA**

SIMBOLOS DE EQUIPO DE  
PROCESO (CONTINUACION)

U N A M  
TESIS PROFESIONAL  
JESUS A CHICO VENANCIO  
D. I. M. CHICO VENANCIO  
APENDICE-22







## APÉNDICE 24

CLAVES PARA EQUIPO DE PROCESO	
AD	Trincheras, Sumideros, Paredes contra incendio, Separadores, Represas, Losas, Canales y Vertedores.
AE	Carreteras.
AF	Espuelas de vías de ferrocarril.
AG	Bordos de tierra.
AH	Cercas.
AL	Alcantarillas y cruceros de caminos.
AM	Cimentaciones para tanques de almacenamiento.
BA	Calentadores de aceite y petróleo crudo.
BB	Homos termofor y regeneradores.
BC	Calentadores de aire.
BD	Ductos de aire, Elutriadores, Compuertas de chimenea.
BE	Generadores de gas inerte.
BF	Calderas de vapor y Sobrecalentadores.
BG	Equipo de tratamiento de agua.
BH	Separadores de línea de vapor y accesorios de vapor.
BZ	Normas de calentadores.
CA	Chimenea, Calentadores y Calderas.
CB	Quemador, Venteos y Succiones elevadas.
DA	Torres-Cascarón.
DB	Torres-Platos y partes internas.
DC	Reactores y tambores de coko.
EA	Cambiadore de calor.
EB	Equipo Intercambio de calor-Núcleos sumergidos, Serpentin y Caja.
EC	Equipo Intercambio de calor-Especiales.
ED	Cambiadore de Calor y subenfriadores de doble tubo -Tipo ajetado.
EE	Eyectores de vacío y Barómetros.
EF	Torre de enfriamiento de agua.
EG	Desaerendoy y Educutores.
EZ	Normas de cambiadores de calor.
FA	Recipientes de proceso y acumuladores.
FB	Tanques de almacenamiento.
FC	Separadores ciclónicos.
FD	Filtros, Mallas, Rondanas, Mamparas y Sujetadores.
FE	Recipientes de almacenamiento, Depósitos y Cajas.
FF	Secadores.
FG	Filtros y Silenciadores.
FZ	Normas de torres y tanques.
GA	Bombas e impulsores.
GB	Compresores, Sopladore, Bombas de vacío y Motores.
GC	Equipo de Refrigeración.
GD	Mezcladores agitadores accionados con motor de cualquier HP.
GE	Generadores eléctricos-Partes moltriz y generadora.







<p><b>CLAVE PARA LAS GRÁFICAS</b></p>	<p>Ampliación esférica</p>	<p>Acido ácido</p>	<p>Acido básico</p>	<p>Acido clorhídrico</p>	<p>Acido cromico</p>	<p>Acido fosfórico</p>	<p>Acido nítrico</p>	<p>Acido oxalico</p>	<p>Acido sulfúrico</p>	<p>Acido tartárico</p>
<p><b>TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION</b></p>										
<p>U. T. A. M.                      TESIS PROFESIONAL                      JESUS A CHICO VENANCIO                      DE JUAN CHICO VENANCIO                      APÉNDICE-25</p>										

FALLA DE ORIGEN





CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Acabado exterior	Acabado exterior	Acabado blanco	Acabado cromado	Acabado único	Acabado forjado	Acabado laminado	Acabado resqueado
<p>Temperatura</p> <p>Concentración</p>									
<p>Hierro color to</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.02 puig al año</li> <li>● &lt; 0.02 puig al año</li> <li>■ 0.02-0.25 puig al año</li> <li>▼ &gt; 0.25 puig al año</li> </ul>									
<p>Hierro con un contenido de zinc</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.02 puig al año</li> <li>● 0.02-0.02 puig al año</li> <li>■ 0.02-0.25 puig al año</li> <li>▼ &gt; 0.25 puig al año</li> </ul>									
<p>Plomo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 puig al año</li> <li>● &lt; 0.02 puig al año</li> <li>■ 0.02-0.10 puig al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 puig al año</li> </ul>									
<p>Metal Místal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.02 puig al año</li> <li>● &lt; 0.02 puig al año</li> <li>■ 0.02-0.25 puig al año</li> <li>▼ &gt; 0.25 puig al año</li> </ul>									
<p>Niobio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Bueno para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Níquel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.02 puig al año</li> <li>● &lt; 0.02 puig al año</li> <li>■ 0.02-0.25 puig al año</li> <li>▼ &gt; 0.25 puig al año</li> </ul>									
<p>Resacas laminares</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Resacas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Resacas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resacas a completa</li> <li>● Algunas resacas</li> <li>▼ Algunas o descomposicion</li> </ul>									
<p>Cloruro de plomo en el plomo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resacas a completa</li> <li>● Algunas resacas</li> <li>▼ Algunas o descomposicion</li> </ul>									
<p>Caucho natural CR 50</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Satisfactorio para usos limitados</li> </ul>									
<p>Caucho negro</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Satisfactorio para usos limitados</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U N A M  
 INSTITUTO PROFESIONAL  
 DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
 DE CHILE  
 APÉNDICE - 26





CLAVE PARA LAS GRÁFICAS									
		Acido acético	Acido acético	Acido bórico	Acido crómico	Acido cítrico	Acido fórmico	Acido gálico	Acido láctico
<b>Caucho nitrilo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Satisfactorio no satisfactorio</li> </ul>								
<b>Saran</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>								
<b>Cermentos de sílice</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>								
<b>Acero inoxidable 18-8</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Acero inoxidable Tipo 316</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Acero inoxidable Tipo 304</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Acero inoxidable Tipo 321</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Acero</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Compuestos de aluminio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>								
<b>Cermentos de azufre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>								
<b>Asfalto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 pulgadas/año</li> <li>● 0.005 - 0.02 pulgadas/año</li> <li>▼ 0.02 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								
<b>Cemento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulgadas/año</li> <li>● 0.002 - 0.02 pulgadas/año</li> <li>▼ 0.02 - 0.05 pulgadas/año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulgadas/año</li> </ul>								

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

UNAM  
 IESIS PROFESIONAL  
 IESUS A. CHICO VENEZIANO  
 JULIAN CHICO VENEZIANO  
 APÉNDICE-27



FALLA DE ORIGEN

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Acido nítrico	Acido oxálico	Acido fosfórico	Acido sulfúrico	Acido sulfúrico	Cloruro de aluminio	Sulfato de aluminio y potasio (alumbre)	Ammonio cloruro
<p>Temperatura, °F</p> <p>Concentración, %</p>									
<p><b>Aluminio</b></p> <p>▲ = &lt; 0.005 pulg al año                  ● = 0.005-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02 - 0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Resinas asfálticas</b></p> <p>▲ = Satisfactorio                  ● = Satisfactorio para usos limitados                  ▼ = No satisfactorio</p>									
<p><b>Chromum 2</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Chromum 1</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Cable de aluminio de aluminio bronce</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Químico 20</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Resinas epoxi</b></p> <p>▲ = Satisfactorio                  ● = Satisfactorio para usos limitados                  ▼ = No satisfactorio</p>									
<p><b>Resinas de furano</b></p> <p>▲ = Satisfactorio                  ● = Satisfactorio para usos limitados                  ▼ = No satisfactorio</p>									
<p><b>Aluminio</b></p> <p>▲ = &lt; 0.005 pulg al año                  ● = 0.005-0.02 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Resinas B</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Resinas C</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									
<p><b>Resinas D</b></p> <p>▲ = &lt; 0.002 pulg al año                  ● = 0.002 pulg al año                  ■ = 0.02-0.05 pulg al año                  ▼ = &gt; 0.05 pulg al año</p>									

FABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

J. N. A. H.  
 INGENIERO PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 INGENIERO CIVIL VENANCIO  
 APÉNDICE - 28





<p>CLAVE PARA LAS GRÁFICAS</p>	Acido nítrico	Acido ureico	Acido fosfórico	Acido sulfúrico	Acido sulfurico	Cloruro de aluminio	Sulfato de aluminio y oxido de aluminio	Amoníaco	Acido acético
<p>Materia orgánica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ &lt; 0.05-0.15 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Materia con alto contenido de azufre</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02-0.05 mg/g al año</li> <li>■ &lt; 0.05-0.15 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.15 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Plomo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ &lt; 0.05-0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Materia orgánica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ &lt; 0.05-0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Resistencia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactoria</li> <li>● Satisf. para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactoria</li> </ul>									
<p>Resistencia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ &lt; 0.05-0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Resistencia mecánica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactoria</li> <li>● Satisf. para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactoria</li> </ul>									
<p>Resistencia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactoria</li> <li>● Satisf. para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactoria</li> </ul>									
<p>Resistencia</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resistencia completa</li> <li>● Algunos ataques</li> <li>▼ Ataques o descomposición</li> </ul>									
<p>Cloruro de aluminio no precipitado</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resistencia completa</li> <li>● Algunos ataques</li> <li>▼ Ataques o descomposición</li> </ul>									
<p>Caucho sintético (R-S)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									
<p>Caucho butilo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. N. A. M.  
 IESIS PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE-29





Llave para las Gráficas		Acido nítrico	Acido oxálico	Acido fosfórico	Acido sulfúrico	Acido sulfúrico	Cloruro de aluminio	Sulfato de aluminio potásico (alumbrado)	Amoniaco acido
Temperatura °F	Temperatura °C								
<p>300 200 100 0</p> <p>0 50 100</p> <p>Concentración, %</p>									
<p><b>Caucho nitrilo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfacción</li> <li>● Satisfacción para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Seda</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfacción</li> <li>● Satisfacción para usos limitados</li> <li>▼ No se sacramento</li> </ul>									
<p><b>Cemento de silicatos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfacción</li> <li>● Satisfacción para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> <li>◐ Refracto de alta resistencia</li> </ul>									
<p><b>Acero inoxidable 18-8</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.02 pulg al año</li> <li>◐ 0.02 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Acero inoxidable 304 18%</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.02 pulg al año</li> <li>◐ 0.02 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Acero inoxidable 316 16% Cr</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.02 pulg al año</li> <li>◐ 0.02 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Acero inoxidable 321 18% Cr</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.02 pulg al año</li> <li>◐ 0.02 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Acero</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.02 pulg al año</li> <li>◐ 0.02 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Equipamiento de acero al carbono</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfacción</li> <li>● Satisfacción para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Cemento de azufre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfacción</li> <li>● Satisfacción para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Aluminio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.025 pulg al año</li> <li>◐ 0.025 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									
<p><b>Carbono</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 pulg al año</li> <li>● &lt; 0.025 pulg al año</li> <li>◐ 0.025 - 0.05 pulg al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg al año</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. N. A. M.  
TESIS PROFESIONAL  
JESUS A. CHICO VERANEJO  
JULIAN CHICO VERANEJO  
APENDICE - 30





CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Carbonato de amonio	Cloruro de amonio	Anilina	Benceno	Cloruro de calcio	Hidrocloruro de calcio	Dihidruro de carbono	Tetróxido de carbono
<b>Aluminio</b> ▲ < 0.005 mg/lit. al año ● 0.005 - 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Resinas salificadas</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio									
<b>Chiquimot 2</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● 0.002 - 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Chiquimot 3</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● 0.002 - 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Color óptico de soluciones saturadas de ensayo</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● 0.002 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Dureza Jk</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● 0.002 - 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Resinas epoxi</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio									
<b>Resinas de furano</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio									
<b>Vitrío</b> ▲ < 0.005 mg/lit. al año ● 0.005 - 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Hastelloy B</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● < 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Hastelloy C</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● < 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									
<b>Hastelloy D</b> ▲ < 0.002 mg/lit. al año ● < 0.02 mg/lit. al año ■ 0.02 - 0.05 mg/lit. al año ▼ > 0.05 mg/lit. al año									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

UNAM  
 IESIS PROFESIONAL  
 JESUS A CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE - 31

FALLA DE ORIGEN



CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Cubiertas de asfalto	Cubiertas de aluminio	Azuleja	Benceno	Cubierta de calico	Mezcladura de calico	Difusor de carburo	Tetrahidro de carburo
Temperatura, °F	Concentración, %								
<b>Hierro colorado</b> ▲ = < 0.002 pulg al año ● = 0.02 pulg al año ■ = 0.02-0.05 pulg al año ▼ = > 0.05 pulg al año									
<b>Hierro sin contenido de silicio</b> ▲ = < 0.002 pulg al año ● = 0.02-0.05 pulg al año ■ = 0.02-0.05 pulg al año ▼ = > 0.05 pulg al año									
<b>Plomo</b> ▲ = < 0.002 pulg al año ● = < 0.02 pulg al año ■ = 0.02-0.05 pulg al año ▼ = > 0.05 pulg al año									
<b>Acero inoxidable</b> ▲ = < 0.002 pulg al año ● = 0.02 pulg al año ■ = 0.02-0.05 pulg al año ▼ = > 0.05 pulg al año									
<b>Neopreno</b> ▲ = Satisfactorio ● = Solo para usos limitados ▼ = No satisfactorio									
<b>Níquel</b> ▲ = < 0.002 pulg al año ● = < 0.02 pulg al año ■ = 0.02-0.05 pulg al año ▼ = > 0.05 pulg al año									
<b>Resinas fenólicas</b> ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio									
<b>Poliésteres</b> ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = No satisfactorio									
<b>PVC rígido</b> ▲ = Resistencia completa ● = Algunos ataques ▼ = Ataques o intromisión									
<b>Cubierta de pulvino no plastificado</b> ▲ = Resistencia completa ● = Algunos ataques ▼ = Ataques o intromisión									
<b>Caucho natural (GR 5)</b> ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente no satisfactorio									
<b>Caucho butilo</b> ▲ = Satisfactorio ● = Satisfactorio para usos limitados ▼ = Generalmente satisfactorio									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. I. L. A. M.  
 IESIS PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE - 32







CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Cemento de anchura	Cemento de altura	Anchura	Barrera	Cemento de caliza	Mortero de caliza	Unidad de caliza	Tercera de Caliza
Temperatura °F	Concentración %								
<b>Cemento de caliza</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ Generalmente no satisfactorio									
<b>Sales</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No se recomienda									
<b>Contaminación de agregados</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio *Requiere un nivel especial de control									
<b>Aluminio soluble 18 %</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Aluminio soluble 10% - 17%</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Aluminio soluble 12% de Cl</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Aluminio soluble 17% de Cl</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Alúmina</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Cuadernos de ensayo de alta calidad</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio									
<b>Cemento de caliza</b> ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio									
<b>Asbesto</b> ▲ < 0.005 mg/l año ● 0.005 - 0.02 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									
<b>Curtientes</b> ▲ < 0.002 mg/l año ● 0.002 - 0.01 mg/l año ● 0.02 - 0.05 mg/l año ▼ > 0.05 mg/l año									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

11 21 4  
 IECIS PROFESIONAL  
 JESUS A CHICO VERANICIO  
 ANILAN CHICO VERANICIO  
 APÉNDICE - 33



CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Sulfato de cobre	Etanol	Etilenglicol	Acidos grasos	Cloruro ferrico	Cloruro ferroso	Sulfato ferroso	Glicerina
<p>Temperatura °F</p> <p>Concentración %</p>									
<p><b>Aluminio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0005 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.0005-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Resinas sintéticas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Sal Marina</li> <li>● Sal Marina para usos especiales</li> <li>▼ No sal al 100%</li> </ul>									
<p><b>Empaques 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0002 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.0002-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Empaques 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0002 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.002-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Cloruro ferrico en algunos tipos de metales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.002 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Formas 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0002 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.002-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Resinas sintéticas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Sal Marina</li> <li>● Sal Marina para usos especiales</li> <li>▼ No sal al 100%</li> </ul>									
<p><b>Resinas sintéticas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Sal Marina</li> <li>● Sal Marina para usos especiales</li> <li>▼ No sal al 100%</li> </ul>									
<p><b>Vitro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0005 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.005-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Aluminio 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0005 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.0005-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Aluminio 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0005 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.0005-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									
<p><b>Aluminio 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ 0.0005 p.p.m. al 1%</li> <li>● 0.0005-0.02 p.p.m. al 1%</li> <li>■ 0.02-0.05 p.p.m. al 1%</li> <li>▼ 0.05 p.p.m. al 1%</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U N A M  
 INGENIERO PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 REGION CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE - 34





LLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Sulfato de cobre	Etenol	Etenolalcol	Acido oxalico	Cloruro ferrico	Sulfato ferrico	Cloruro ferrico	Glicerina
<p>Temperatura °F</p> <p>Concentración %</p>									
<p>Hierro colado</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pug. al año</li> <li>● &lt; 0.02 pug. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pug. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pug. al año</li> </ul>									
<p>Hierro alto contenido de silicio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pug. al año</li> <li>● &lt; 0.02 pug. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pug. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pug. al año</li> </ul>									
<p>Plomo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pug. al año</li> <li>● &lt; 0.02 pug. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pug. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pug. al año</li> </ul>									
<p>Metal Manganese</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pug. al año</li> <li>● &lt; 0.02 pug. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pug. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pug. al año</li> </ul>									
<p>Ferrocromo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Níquel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pug. al año</li> <li>● &lt; 0.02 pug. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pug. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pug. al año</li> </ul>									
<p>Resmas ferrosas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Pulverizadas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Plumbismo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resaca o incompleta</li> <li>● Acople de 200 p.p.m.</li> <li>▼ Acople de 250 p.p.m.</li> </ul>									
<p>Control de unido no satisfactorio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Resaca o incompleta</li> <li>● Acople de 200 p.p.m.</li> <li>▼ Acople de 250 p.p.m.</li> </ul>									
<p>Caucho natural GR SI</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									
<p>Caucho butilo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U N A M  
 TESIS PROFESIONAL  
 JOSU A FERRER VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APENDICE-35

FALLA DE ORIGEN





CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Sulfato de calcio	Etanol	Etenológico	Acidos grasos	Cloruro ferrico	Cloruro ferroso	Sulfato litico	Glicerina
<p>Temperatura %</p> <p>Concentración %</p>									
<p>Caucho nitrilo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente no satisfactorio</li> </ul>									
<p>Silico</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No se recomienda</li> </ul>									
<p>Comuestos de silicio*</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul> <p>*Resistencia al agua, agua, agua salada</p>									
<p>Aerosol de agua 14.9</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Aerosol inerte tipo 316</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Aerosol inerte tipo 316 y 304</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Aerosol inerte tipo 316 y 304</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Aerosol</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Equipamiento de extremo alta imp. par.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Comuestos de azufre</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Waxolina</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 mg/g al año</li> <li>● 0.005 - 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									
<p>Carbón</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● 0.002 - 0.02 mg/g al año</li> <li>■ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES  
DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. I. A. M.  
INGENIERO PROFESIONAL  
JESUS A. CHICO VENANCIO  
ALIANZA CHICO VENANCIO  
APÉNDICE - 36





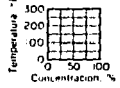
CLAVE PARA LAS GRAFICAS		Porcentaje de hidrogeno	Cambio de progreso	Sulfato de magnesio	Metales	Cambio de niquel	Sulfato de niquel	Fenol	Mediando de polianilo
Temperatura °F	Concentración %								
<p>Aluminio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 pulg. al año</li> <li>● 0.005-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Resinas estiricas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Cloruro de Z</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Cloruro de S</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Cloruro de calcio de aluminio sulfato</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Dureza 20</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Resinas epoxi</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Resinas de fenoles</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p>Resinas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 pulg. al año</li> <li>● 0.005-0.02 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Resinas B</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Resinas C</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									
<p>Resinas D</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 pulg. al año</li> <li>● 0.002 pulg. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 pulg. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 pulg. al año</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U S A N I  
 INSTITUTO NACIONAL  
 DE ESTANDARES Y  
 TECNICAS DE CALIDAD  
 APÉNDICE-37





CLAVE PARA LAS GRÁFICAS  Temperatura °F Concentración, %	Prueba de hidrogeno	Cloruro de magnesio	Sulfato de magnesio	Metanol	Nitrato de niquel	Sulfato de niquel	Fenol	Mediador de polifosfo
Huevo cocido ▲ < 0.002 pulg al año ● < 0.02 pulg al año ■ 0.02-0.05 pulg al año ▼ > 0.05 pulg al año								
Huevo sin contenido de sal ▲ < 0.002 pulg al año ● < 0.02 pulg al año ■ 0.02-0.05 pulg al año ▼ > 0.05 pulg al año								
Plomo ▲ < 0.002 pulg al año ● < 0.02 pulg al año ■ 0.02-0.05 pulg al año ▼ > 0.05 pulg al año								
Metal Mueles ▲ < 0.002 pulg al año ● < 0.02 pulg al año ■ 0.02-0.05 pulg al año ▼ > 0.05 pulg al año								
Nandierno ▲ Satisfactorio ● Satis para usos limitados ▼ No satisfactorio								
Niquel ▲ < 0.002 pulg al año ● < 0.02 pulg al año ■ 0.02-0.05 pulg al año ▼ > 0.05 pulg al año								
Resinas sinteticas ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio								
Poliesteros ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ No satisfactorio								
Resinas sinteticas ▲ Resistencia completa ● Algunos ataques ▼ Ataques o descomposicion								
Cloruro de polivinilo no plastificado ▲ Resistencia completa ● Algunos ataques ▼ Ataques o descomposicion								
Caucho Inesural GR SI ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ Generalmente no satisfactorio								
Caucho butilo ▲ Satisfactorio ● Satisfactorio para usos limitados ▼ Generalmente no satisfactorio								

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES  
DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. I. L. A. M.  
 TECNICO PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE - 38





CLAVE PARA LAS GRAFICAS		Período de hidrogenio	Curso de magisterio	Satisfacción de magisterio	Médico	Nicho de metal	Satisfacción de magist	Firma	Hidrógeno de potasio
Temperatura	Concentración %								
<b>Clave para las graficas</b> ● Satisfacción ● Satisfacción para usos limitados ● Satisfacción en satisf. firma									
<b>Sales</b> ● Satisfacción ● Satisfacción para usos limitados ● No satisf. firma									
<b>Comentarios de uso firme</b> ● Satisfacción ● Satisfacción para usos limitados ● No satisf. firma									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● < 0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● < 0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● < 0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● < 0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● < 0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Comentarios de uso firme para usos limitados</b> ● Satisfacción ● Satisfacción para usos limitados ● No satisf. firma									
<b>Comentarios de uso firme</b> ● Satisfacción ● Satisfacción para usos limitados ● No satisf. firma									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.005 pH en el año ● 0.005-0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									
<b>Alta concentración (100%)</b> ● < 0.002 pH en el año ● 0.002-0.02 pH en el año ● 0.02-0.05 pH en el año ● > 0.05 pH en el año									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. N. A. M.  
 TESIS PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 JUNION CHICO VENANCIO  
 APENDICE-39

FALLA DE CONDUCCION

CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Permanencia de polvos	Sulfato de potasio	Carbonato de sodio	Cloruro de sodio	Hidróxido de sodio	Nitrato de sodio	Cloruro de zinc	Sulfato de zinc
Temperatura, °F	Concentración, %								
<b>Aluminio</b> ▲ = < 0.005 p.p.m. al año ● = 0.005 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Resinas estéricas</b> ▲ = Satisfacción ● = Satisfacción para usos limitados ▼ = No satisfacción									
<b>Chromite 2</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Chromite 3</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Cobres de zinc de alta pureza de esteño</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Chromite 70</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Resinas epoxi</b> ▲ = Satisfacción ● = Satisfacción para usos limitados ▼ = No satisfacción									
<b>Resinas de resina</b> ▲ = Satisfacción ● = Satisfacción para usos limitados ▼ = No satisfacción									
<b>Velcro</b> ▲ = < 0.005 p.p.m. al año ● = 0.005 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Mestales 6</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Mestales 7</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									
<b>Mestales 10</b> ▲ = < 0.002 p.p.m. al año ● = 0.002 - 0.02 p.p.m. al año ■ = 0.02 - 0.05 p.p.m. al año ▼ = > 0.05 p.p.m. al año									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U N A M  
 TESIS PROFESIONAL  
 JESUS A GIBED VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE-40







CLAVE PARA LAS GRÁFICAS		Permeabilidad de pedruzco	Sulfato de pirazuo	Carbonato de sodio	Cloruro de sodio	Hidróxido de sodio	Nitrato de sodio	Cloruro de zinc	Sulfato de zinc
Temperatura °F	Concentración								
<p><b>Horno (1) 300</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 unid. al año</li> <li>● &lt; 0.02 unid. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 unid. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 unid. al año</li> </ul>									
<p><b>Horno (2) 300</b> (contenedor de 5 litro)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 unid. al año</li> <li>● 0.002-0.02 unid. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 unid. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 unid. al año</li> </ul>									
<p><b>Prueba</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 unid. al año</li> <li>● &lt; 0.02 unid. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 unid. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 unid. al año</li> </ul>									
<p><b>Water Meter</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 unid. al año</li> <li>● &lt; 0.02 unid. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 unid. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 unid. al año</li> </ul>									
<p><b>Permeámetro</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Si está en uso</li> <li>● Si está en uso limitado</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Tubo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 unid. al año</li> <li>● &lt; 0.02 unid. al año</li> <li>■ 0.02-0.05 unid. al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 unid. al año</li> </ul>									
<p><b>Material de prueba</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Materiales</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No satisfactorio</li> </ul>									
<p><b>Instalación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Instalación completa</li> <li>● Instalación parcial</li> <li>▼ Instalación no satisfactoria</li> </ul>									
<p><b>Estado de operación no especificado</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Instalación completa</li> <li>● Instalación parcial</li> <li>▼ Instalación no satisfactoria</li> </ul>									
<p><b>Caucho natural (R-5)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Operación no satisfactoria</li> </ul>									
<p><b>Caucho butilo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Operación no satisfactoria</li> </ul>									

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U. N. A. M.  
 TESTES PROFESIONAL  
 JESUS A. CHICO VENANCIO  
 NAIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE-41



FALLA DE UNION



CLAVE PARA LAS GRÁFICAS	Permanencia de patata	Sulfato de potasio	Carbonato de sodio	Cloruro de sodio	Hidróxido de sodio	Nitrato de sodio	Cloruro de zinc	Sulfato de zinc
<p><b>Caucho nitrilo</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Generalmente insatisfactorio</li> </ul>								
<p><b>Silico</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ No se recomienda</li> </ul>								
<p><b>Compuestos de silicio*</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Insatisfactorio</li> <li>*Formas de silicio: hidruros y óxidos</li> </ul>								
<p><b>Acero inoxidable 18-8</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.02 mg/g al año</li> <li>● 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								
<p><b>Acero inoxidable tipo 316</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.012 mg/g al año</li> <li>● 0.012 - 0.02 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								
<p><b>Acero inoxidable tipo 304</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.012 mg/g al año</li> <li>● 0.012 - 0.02 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								
<p><b>Aluminio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● 0.002 - 0.01 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.01 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								
<p><b>Resinas epoxi de 2 componentes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Insatisfactorio</li> </ul>								
<p><b>Compuestos de zinc</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Satisfactorio</li> <li>● Satisfactorio para usos limitados</li> <li>▼ Insatisfactorio</li> </ul>								
<p><b>Aluminio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.005 mg/g al año</li> <li>● 0.005 - 0.02 mg/g al año</li> <li>▼ 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								
<p><b>Aluminio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▲ &lt; 0.002 mg/g al año</li> <li>● 0.002 - 0.02 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.02 - 0.05 mg/g al año</li> <li>▼ &gt; 0.05 mg/g al año</li> </ul>								

TABLAS DE SELECCION PARA MATERIALES DE CONSTRUCCION (CONTINUACION)

U.N.A.M.  
 ITCIS PROFESIONAL  
 JESUS A CHICO VENANCIO  
 JULIAN CHICO VENANCIO  
 APÉNDICE-42



## **BIBLIOGRAFÍA**

## BIBLIOGRAFÍA



1. Kirk Raymond.  
Olthemer F. Donald.  
Enciclopedia de la Tecnología Química.  
Tomos II, IV, VI, IX, XI, XIV.  
Editorial UTEHA, México, 1983.
2. Fritz Tegeeder and Ludwig Mayer.  
Métodos de la Industria Química.  
Tomo I, Inorgánica.  
Editorial Reverté.
3. Colegio de Ingenieros Mecánicos y Eléctricos.  
XI Congreso Bienal 1984.  
Desarrollo Integral Reto y Compromiso de la Ingeniería Mexicana, Medio ambiente  
y Ecología, Tomo VIII.
4. Información Proporcionada por la Cámara Nacional de la Industria de Aceites,  
Grasas y Jabones sobre la Fábrica de Jabones la Corona.
5. López Alegría Pedro.  
Abastecimiento de agua Potable y Disposición y Eliminación de Excretas.  
Instituto Politécnico Nacional, México, 1990.
6. Revista UNAM Hoy.  
Tema de Tratamiento de Aguas Residuales.  
Año 1, Num. 3, Abril-Junio-1992.
7. Rodríguez Dupont Nestor.  
Instituto de Capacitación de la Industria Azucarera.  
Elaboración de Azúcar.  
México, 1980.
8. Martínez Rodríguez José María.  
Instituto de Capacitación de la Industria Azucarera.  
Proceso de Elaboración de Azúcar.  
México, 1980.
9. Instituto de Capacitación de la Industria Azucarera.  
Curso de Control de la Contaminación de los Ingenios Azucareros.  
México 1986.
10. Libby C. Earl.  
Ciencia y Tecnología Sobre Pulpa y Papel.  
Comisión Conjunta de Libros de Texto de la Industria del papel.  
Tomo I México, 1980.  
Tomo II, México, 1981.  
Editorial CECSA.





11. Revista Industria.  
Temas sobre Papel y Cemento.  
Números 12, 29 y 54.  
Editada por CONCAMIN.
12. H. Duda Walter.  
Manual Tecnológico del Cemento.  
Editorial ETA, Barcelona, 1977.
13. Información Proporcionada por la Cámara Nacional del Cemento sobre el Grupo de Cementos Mexicanos.
14. Folleto "La Industria del Cemento".  
Editado por la Cámara de la Industria del Cemento.
15. Felder Richard and Rousseau W. Ronald.  
Principios Básicos de los Procesos Químicos.  
Editorial Manual Moderno, México, 1982.
16. Giral José, Barnes Francisco y Ramírez Alejandro.  
Ingeniería de Procesos  
Editorial Alhambra, México, 1979.
17. Viejo Zubicaray Manuel.  
Bombas.  
Editorial Limusa, México, 1990.
18. Mataix Claudio.  
Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas.  
Editorial Harla, México, 1990.
19. Massey S. Bernard.  
Mecánica de Fluidos.  
Editorial CECSA, México, 1984.
20. Perry Robert and Cecil H. Chilton.  
Manual del Ingeniero Químico Tomos I y II.  
Tomo I, México, 1982  
Tomo II, México, 1982  
Editorial Mc Graw Hill
21. Geankoplis Christie J.  
Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias  
Editorial CECSA, México, 1993.
22. Marks, L. S.  
Manual del Ingeniero Mecánico  
Tomo I, México, 1985  
Editorial Mc Graw Hill



## BIBLIOGRAFÍA



23. **Dossat Roy, J.**  
Principios de Refrigeración  
Editorial CECSA, México, 1980
24. **Brostow Witold.**  
Introducción a la Ciencia de los Materiales.  
Editorial Limusa, México, 1981.
25. **Métodos de Control de la Corrosión**  
Información Recopilada de la National Association of Corrosion Engineers (NACE)  
México, 1993.
26. **Apuntes del Profesor Arquímedes Solís Téllez.**  
Semestre 94-II.
27. **El ABC del Tratado del TLC**  
Suplemento Especial  
Editado por la SECOFI.
28. **C. Judson King.**  
Procesos de separación.  
Editorial Reverté, Barcelona, 1980
29. **Henley E. J. and J. D. Seader.**  
Operaciones de Separación por Etapas de Equilibrio en Ingeniería Química.  
Editorial Repla, México, 1990.
30. **Himmelblau David M.**  
Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química.  
Editorial CECSA, México, 1986.
31. **H. F. Rase and M. H. Barrow.**  
Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso.  
Editorial CECSA, México, 1981.
32. **Valiente Barderas Antonio.**  
Rudi Primo Sívalel Corral.  
Problemas de Balances de Materia y Energía.  
Editorial Alhambra, México, 1991.

