

00568 2051



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PROYECTO DE PLANTA PILOTO DE PROPOSITOS MULTIPLES

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS QUIMICAS (Ingeniería Química ,Opción Ingeniería de Proyectos)
P R E S E N T A :
BERNABE ACOLTZI NAVA

Asesor: Ing. Jorge Carmona Donato



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1989



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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.

# INDICE

Reconocimientos	iv
Resumen	v
Abstract	vi
Nomenclatura	vii
Introducción	xiii
Capítulo I	
Generalidades	3
Etapas de un Programa de Investigación	4
Investigación Necesaria Antes de Comercialización	7
Importancia de una Planta Piloto	9
Necesidad de una Planta Piloto	10
Capítulo II	
Plantas Piloto y Microplantas	15
Tipos de Plantas Piloto	17
Clasificación de Plantas Piloto	19
Concepto de Modularidad	23
Planta Piloto de Propósitos Múltiples	25
Capacidad de Plantas Piloto	27
Capítulo III	
Escalación	30
Métodos de Escalación	32
Principio de Similitud	33
Análisis Dimensional	44
Ecuaciones Diferenciales	54

El Regimen	74
Criterio de Similitud y Ecuaciones de Escalación	80
Extrapolación	104
Efectos de Límite	110
Teoría de Modelos	115
<b>Capítulo IV</b>	
Diseño de Experimentos	124
Variables	125
Ambiente Experimental y sus Limitaciones	129
Experimentación en Etapas	133
Consideraciones Varias	135
Experimentación Formal	137
Experimentación al Azar	139
Diseños de Clasificación Múltiple	146
<b>Capítulo V</b>	
Sistemas de Adquisición de Datos y Control de Plantas Piloto	176
<b>Capítulo VI</b>	
Diseño Básico de Planta Piloto de Propósitos Múltiples	188
Propósitos	188
Objetivos	191
Bases de Diseño	193
Sistemas Considerados	231
Descripción del Proceso	245
Balance de Materia y Energía (un caso)	249
Dimensionamiento de Equipo	261
Diagramas de Flujo	284
Diagramas de Tuberías e Instrumentos (un caso)	288

Filosoffas de Operación (un caso)	295
Servicios Auxiliares	303
Clasificación de Areas	304
Materiales de Construcción	307
Medidas de Seguridad	308
Capítulo VII	
Aspectos Económicos	312
Plantas Piloto y Microplantas	312
Estimación de Costos	316
Costo del Producto	326
Capítulo VIII	
Aspectos de Control	334
Procedimientos Para Aprobación, Diseño y Operación de Plantas Piloto	334
Formatos Varios	346
Capítulo IX	
Control de Proyecto	354
Programa de Barras	355
Programa de Avance	358
Estimado de Horas	361
Capítulo X	
Conclusiones y Recomendaciones	366
Bibliografía	368
Apendice	378

## RECONOCIMIENTOS

Quiero extender mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas de la Facultad de Química, así como a otras ajenas a esa Institución, que hicieron posible, con su ayuda y orientación, la realización de este trabajo.

En particular a mi asesor, Ing. Jorge Carmona Donato, cuyas advertencias y consejos fueron de gran ayuda.

Por último, doy mis más sinceras gracias a todos los profesores que impartieron las correspondientes asignaturas, a mis compañeros de maestría, a mi familia, a mi esposa y a todas las personas que en algún momento creyeron en mí.

Especial agradecimiento debo al eminente Ing. Roberto Ochoa - Hernández, gran amigo y maestro a quien debo parte de los conocimientos y el haber realizado los estudios de la presente maestría.

Dedico este trabajo a la memoria de mi gran amigo, al Ing. -- Elías Moreno Bañuelos, que en paz descanse.

Dedicatoria especial para mi hija ANALILIA.

## RESUMEN

Este trabajo presenta un proyecto de planta piloto de propósitos múltiples, como una proposición para llevar a cabo la etapa experimental en el desarrollo tecnológico, así como para la obtención de parámetros necesarios para llevar a cabo la escalación desde el nivel piloto ó laboratorio a un nivel mayor, al mismo tiempo, solucionar problemas operativos y de diseño, además de comprobar la operabilidad de el o los procesos investigados, los que se convertirán en unidades de producción industrial.

Se ha abarcado desde las etapas que se llevan a cabo en un programa de investigación. Se hace resaltar también, en el caso de un proceso a comercializar, la cantidad de experimentación necesaria, con el fin de obtener un proceso rentable y operable. Se menciona la necesidad de usar una planta piloto, indicando también el lugar que ocupa en el programa de investigación camino a la comercialización.

Las plantas piloto que se usan en la industria son diferentes unas de otras, obligando a realizar una clasificación de ellas en distintas formas.

Los datos obtenidos de una planta piloto se someten a un proceso de tratamiento de datos, cuya finalidad es el poder diseñar y construir una planta industrial. A este proceso se le denomina "Escalación" y hace uso de diferentes técnicas.

La recopilación de datos, y el control de una planta piloto son de las partes más importantes, ya que sin estos, sería muy difícil poder obtener los datos necesarios para la escalación.

La planta piloto de propósitos múltiples está constituida por varios sistemas que conforman módulos interconectados, a fin de darle flexibilidad suficiente para poder experimentar con diferentes procesos.

Otro aspecto, de gran importancia, es el económico, por lo que se tiene una evaluación de la planta piloto y la determinación del costo del producto para un caso particular a nivel piloto.

Para el diseño, construcción y operación de plantas piloto son necesarias una serie de aprobaciones y registros, de tal manera que se adjuntan -- algunos formatos útiles para este fin.



## ABSTRACT

The scope contain in general form the steps of a investigation - program, the necessary research for the commercialization of a process, the need of designing a pilot plant in accordance with the type of process in development, as well as the place of a pilot plant in the research program in a path to commercialization.

The pilot of the industry are quite different between them, consequently it is required a classification of them according with the types.

The information obtained from the operation of the pilot plant - requires of methods for the data treatment in order to design and construct an industrial plant, this process called "Scaleup", uses different techniques.

The pilot plant requires of a high quality control and data gathering systems in order to facilitate the data treatment in the scale up process.

The economic aspects are very important and contain a comparison - of costs between the different types of pilot plants, including an economic evaluation of "the multipurpose pilot plant" in connection with the cost of the product for a particular case.

In the aspects of control, this work includes some official procedures for the approval of design, construction and operation of pilot plants thus some formats covering those aspects are included.

## NOMENCLATURA

- A = Constante Adimensional  
= Area Sometida a Esfuerzo  
= Reactante
- a = Concentración Molar  
= Concentración de Sustancia difundándose por Unidad de Volumen
- B = Mínimos cuadrados estimados de  $\beta$
- BHP = Potencia al Freno
- b = Mínimos cuadrados estimados de Coeficientes
- C = Costo
- C<sub>m</sub> = Concentración media de vapor de agua
- C<sub>p</sub> = Calor específico a presión constante
- D = Coeficiente de Difusión  
= Difusividad  
= Diámetro
- dt = Diferencial de Tiempo
- E = Energía de Activación para reacción química
- E<sub>v</sub> = Energía de Activación para flujo viscoso
- E<sub>d</sub> = Energía de Activación para Difusión
- E = Módulo de elasticidad en el modelo
- E' = Módulo de elasticidad en el prototipo
- E = Razón del Módulo Elástico
- E<sub>ij</sub> = Error de Azar
- e = Emisividad combinada de superficie caliente y fría
- e = Base de Logaritmos Naturales
- F = Alimentación
- F = Fuerza neta sobre el modelo, fuerza aplicada
- F' = Fuerza neta sobre el prototipo
- F = Razón de Fuerzas Netas

- F = Factor Cinético, Función
- f = Función
- G = Gas de Alimentación,  $G_0$  Gas alimentado en el fondo,  $G_1$  producto de domo
- g = Aceleración Gravitacional
- $g_c$  = Constante Gravitacional
- H = Cabeza a Vencer
- H = Rapidez de Transferencia de Calor para todo el Sistema  $\frac{dQ}{dt}$
- H = Razón de Escala de Calor Transferido
- $H_c$  = Calor Transferido por Conducción
- $H_f$  = Calor Transferido por Transporte de Materia
- $H_r$  = Calor Transferido por radiación
- $H_v$  = Calor Transferido por Convección
- $H_w$  = Flujo de Calor a través de paredes de un recipiente de reacción
- $H_p$  = Caballos de potencia
- h = Coeficiente de transferencia de calor de película
- $\Delta H_r$  = Calor de Reacción
- $\Delta H_p$  = Entalpia de Productos
- $\Delta H_r$  = Entalpia de reactivos
- $\Delta H_f^\circ$  = Calor de Formación
- $\Delta H_i$  = Entalpia Inicial
- I = Indices de Costos
- J = Pérdida de Calor Total
- K = Constante de Proporcionalidad
- $K_n$  = Constante de velocidad de reacción química de orden n
- $K_n^1$  = Constante de Velocidad de Reacción Heterogénea
- K = Coeficiente de Transferencia de masa
- k = Conductividad Térmica
- k = Tratamiento
- L = Longitud
- L = Razón de Escala

- L = Dimensión de Longitud
- L = Dimensión Lineal
- $L_0$  = Producto de Fondo
- $L_1$  = Solvente Alimentado
- $L^2$  = Area Superficial de Radiación
- $L^2$  = Superficie
- M = Dimensión de Masa
- Mip = Materias primas en el producto
- Mri = Materias primas reaccionadas
- Mila = Materia Prima Alimentada a Reacción
- Mril = Materia Prima Limitante
- Mlea = Materia Prima en Exceso Alimentada a Reacción
- Mirec = Materias Primas en Recirculación
- Miap = Materias Primas Alimentadas a la Planta
- m = Número de Restricciones
- N = Número de Cantidades
- N = Número de Moles
- N = Velocidad de rotación
- N = Módulo de Rigidez
- n = Orden de Reacción
- n = Observaciones
- n = Número de Etapas
- n = Factor de Lang.
- P,p = Presión
- p = Número de grupos adimensionales
- P = Consumo de potencia
- PM = Peso Molecular
- $\Delta P$  = Caída de Presión
- Q = Capacidad de Bombeo
- Q = Cantidad Particular
- Q = Dimensión de Carga Eléctrica
- Q = Cantidad neta de calor transferido

Q retirar	=	Calor a Retirar
Q Calent.	=	Calor de Calentamiento
Q Vap.	=	Calor de vaporización
q	=	Rapidez de flujo volumétrico
qv	=	Flujo Volumétrico Total
q	=	Calor de Reacción específico ( por unidad de masa de producto )
R	=	Constante Universal de los Gases
R	=	Resistencia Total de Reacción
Rc	=	Relación de Compresión
r	=	Número de dimensiones primarias
S	=	Capacidad para la Ley de las seis décimas
S	=	Superficie Interfacial Específica
Sp. Gr.	=	Gravedad Específica
Sx,Sy,Sz	=	Desplazamiento a lo largo de los ejes X, Y, Z
S <sup>2</sup>	=	Estimados de Varianza
T	=	Dimensión de Temperatura
T	=	Temperatura Absoluta
Tr	=	Temperatura Absoluta de Superficie Radiante
Ta	=	Temperatura Absoluta de Superficie Absorbente
ΔT	=	Diferencia de Temperatura
t	=	Temperatura Relativa
t	=	Dimensión de Tiempo
t	=	Razón de Escala de Tiempo
t'	=	Tiempo del Prototipo
t	=	Tiempo del Modelo
U	=	Coefficiente Global de Transferencia de Calor
u	=	Velocidad en la Dirección x
V	=	Volumen del espacio de reacción
V	=	Razón de Velocidades Correspondientes
V	=	Producto de Domo
v	=	Velocidad del Modelo
v'	=	Velocidad del Prototipo

v	=	Velocidad del fluido, o de agitación
v	=	Velocidad en la Dirección y
W	=	Peso de Materia
w	=	Velocidad en la Dirección z
X	=	Razón de Escala en la Dirección X
X	=	Coordenada de un punto del Modelo
X'	=	Coordenada de un punto en el prototipo
x	=	Dimensión Lineal sobre la superficie de deslizamiento y en la dirección del movimiento
x	=	Eje de las x
Y	=	Razón de la Escala en la Dirección y
Y	=	Razón de puntos de cedencia
Y	=	Punto de cedencia del modelo
Y'	=	Punto de cedencia del prototipo
Y	=	Coordenada de un punto del modelo
Y'	=	Coordenada de un punto del prototipo
y	=	Eje de la y
Y <sub>ij</sub>	=	Observación en hilera ith y columna jth
Z	=	Razón de Escala en la Dirección Z
Z	=	Coordenada de un punto del Modelo
Z'	=	Coordenada de un punto del prototipo
OC	=	Factor de proporcionalidad para actividad catalítica de interfase
OC	=	Angulo
OC	=	Riesgo de Error
OC <sub>x</sub>	=	Angulo entre el eje x y la dirección de acción de una fuerza
β	=	Constante de proporcionalidad de Newton
β	=	Coefficiente volumétrico de expansión térmica
P <sub>i</sub>	=	Contribución del bloque ith
σ	=	Fatiga
σ <sub>i</sub>	=	Efecto de Columna

$\delta$	=	Espesor de película de gas sobre la superficie del catalizador
$\eta$	=	Medida total
$\eta$	=	Eficiencia de Reacción
$\theta$	=	Angulo
$\theta$	=	Angulo entre la superficie de deslizamiento y la vertical
$\lambda$	=	Calor latente de vaporización
$\mu$	=	Viscosidad
$1/\mu$	=	Fluidez
$\nu$	=	Viscosidad cinemática
$\nu$	=	Grados de libertad
$\Pi$	=	Grupo adimensional del teorema $\Pi$ de Buckingham
$\rho$	=	Densidad
$\rho_i$	=	Efecto de hilera
$\sigma$	=	Constante de Stefan Boltzmann
$\sigma^2$	=	Varianza
$\sigma$	=	Tensión superficial
$\sigma$	=	Relación de Poisson
$\tau_j$	=	Distribución fija de tratamiento j
$\tau_{ij}$	=	Efecto de tratamiento
$\phi$	=	Función
$\phi$	=	Función desconocida
$\gamma$	=	Velocidad de Reacción
$\gamma$	=	Velocidad de Reacción heterogénea
$\partial$	=	Derivada parcial

## INTRODUCCION

Una de las técnicas más comunes en el diseño de procesos es la experimentación en planta piloto.

La experimentación a este nivel se ha hecho una necesidad en el desarrollo de procesos, debido a que representa una medida del grado de desconocimiento o ignorancia acerca del proceso en etapa de desarrollo y representa una serie de manifestaciones como son:

- Producir una determinada cantidad de producto para probar su aceptación en el mercado
- Obtener información acerca del comportamiento de la reacción en condiciones que no es posible reproducir en el laboratorio
- Obtener información acerca de la acción corrosiva de la o las sustancias manejadas y de la resistencia a esta acción de los materiales de construcción a diferentes condiciones de operación
- Obtener información del grado de pureza que es factible lograr y de la mejor secuencia de separación y purificación que conduzca a obtener el producto con las especificaciones deseadas
- Determinar la influencia de impurezas sobre la reacción, influencia del catalizador, influencia de la agitación, etc.

Es decir, la experimentación a nivel piloto debe proporcionar la suficiente información que permita una escalación segura y que tam -



bién permita evaluar el impacto de los costos en el proyecto, como son - el capital necesario para la inversión total y sus efectos sobre la de -preciación del equipo y el costo de financiamiento, el personal para controlar y operar, mantener y administrar la operación, y evaluar los ser -vicios auxiliares necesarios.

## **I. GENERALIDADES**

## GENERALIDADES

En el desarrollo de tecnología de procesos, la etapa de planta piloto es una de las principales, ya que nos ayudará en la solución de problemas de diseño y operación en plantas industriales, y también en la recopilación de datos útiles en el proceso de escalación.

En la época actual se cuenta con herramientas como la simulación de procesos, que se lleva a cabo con ayuda de las computadoras, esto ha ocasionado que las plantas piloto vayan disminuyendo de tamaño en forma gradual hasta el grado de micropilotos, donde se llevan a cabo las corridas experimentales para determinar el efecto que ocasionan las variables y factores como la intensidad de mezclado, viscosidades, rugosidades, por mencionar algunos, en cada experimento que se realiza se determinan las variables y factores que serán estudiados, esto requiere de una cuidadosa planeación experimental de primordial importancia en la etapa de planta piloto.

## ETAPAS DE UN PROGRAMA DE INVESTIGACION

Con demasiada frecuencia visualizamos resultados prácticos sin considerar el tremendo abismo existente entre el descubrimiento científico y la aplicación de dicho descubrimiento.

En la sociedad moderna el tiempo entre el descubrimiento científico y su aplicación industrial, se ha visto reducido en forma bastante considerable debido al rápido cambio del mercado y al cambio social - por un lado, y largas entregas y aprobaciones gubernamentales por otro - lado, esto hace al tiempo una variable verdaderamente esencial en el desarrollo de nuevas tecnologías.

En el desarrollo tecnológico se ve involucrado un programa de investigación sistematizado y constituido por una serie de etapas que nos llevarán a obtener la o las tecnologías que se persiguen.

Muchos desarrollos importantes han sido resultado de experimentación a escala laboratorio, y muchos de ellos pueden consistir únicamente en separaciones físicas de los productos deseados, sin embargo y con mayor frecuencia, se involucran cambios en las estructuras moleculares.

Para llegar a determinar lo que realmente se requiere, se lleva a cabo el programa de investigación con sus etapas respectivas, iniciándose con la concepción de la idea hasta llegar a la comercialización.

El programa deberá estar constituido por las etapas siguientes:

1. Concepción de la idea. Esta etapa se refiere a la necesidad inicial, que se debe hacer o investigar.

2. Investigación básica. Esta etapa tiene como objetivo la de terminación de la factibilidad de la idea.
3. Experimentación de laboratorio. En esta etapa se desarro - llan los datos básicos de la idea.
4. Diseño preliminar y evaluación económica. La presente eta - pa incluye un panorama amplio del proceso comercial basado en los resultados de laboratorio.
5. Evaluación en planta piloto. Aquí se prueban las condicio - nes del primer diseño y el rango de incertidumbre es reduci - do, asimismo, provee la integridad del proceso o diseño pro puesto.
6. Diseño del proceso y evaluación económica. En esta etapa - se diseña en base a los resultados y datos obtenidos en la planta piloto y se determina la factibilidad económica del proyecto.
7. Demostración. La etapa demostrativa puede llevarse a cabo en la planta piloto o en una planta de tamaño mayor de mane - ra similar a la etapa de planta piloto.
8. Diseño final y evaluación económica. En base a los datos - obtenidos se realiza el diseño final considerando los facto - res técnicos de escalación, y también se realiza la evalua - ción económica de la unidad comercial.
9. Unidad comercial. En esta etapa se construye y se pone en operación la planta industrial, cuya finalidad es el produc to satisfactor que se planteó en la concepción de la idea.

Las etapas mencionadas pueden ser tomadas en cuenta en su tota - lidad, sin embargo, algunas pueden ser eliminadas, dependiendo de la com

**plejidad del proyecto a realizarse, con la finalidad de cubrir una necesidad.**

## INVESTIGACION REQUERIDA ANTES DE COMERCIALIZACION

El trabajo experimental para el desarrollo de tecnología involucra costos elevados de trabajo y mano de obra de experimentación, es bien sabido que el ahorro en recursos económicos es considerable al reducir la cantidad de trabajo experimental, llevándonos a plantear las siguientes preguntas:

¿Cómo puede llevarse a cabo la reducción de trabajo experimental?

¿La experimentación reducida podría conducir a errores costosos?

aquí podemos citar el consejo dado por Leo H. Baekeland que nos dice: "Has tus errores en pequeña escala y tus adelantos en gran escala".

Las preguntas planteadas serán enfrentadas por una decisión hecha para comercializar un nuevo producto, proceso o tecnología, y en las respuestas apropiadas siempre habrá alguna incertidumbre, cuidadosas consideraciones del proceso y los problemas encontrados en el desarrollo del mismo mejorará mucho la oportunidad de éxito.

La decisión de la cantidad de investigación o trabajo experimental que se requerirá, será dada para asegurar una escalación exitosa y la facilidad de poder ensayar y evaluar todos los problemas encontrados en el desarrollo del proceso, estos problemas incluyen:

1. Operabilidad del proceso
2. Sincronización entre evaluación piloto y comercialización

3. Tamaño de la unidad comercial
4. La cantidad de producto necesario para una evaluación adecuada
5. La economía del diseño
6. La selección entre un proceso intermitente y uno continuo
7. Los efectos de variables físicas en unidades de pequeña escala versus escala mayor
8. La calidad de la alimentación o carga a probar
9. Las impurezas encontradas durante el procesado
10. El riesgo implicado y las probabilidades de falla.

Cada problemas será y debe ser considerado en forma independiente y el planteamiento de estos problemas en forma detallada serán - muy provechosas en la evaluación del proceso propuesto para la nueva tecnología.



## IMPORTANCIA DE UNA PLANTA PILOTO

La importancia que tiene una planta piloto en el programa de investigación para el desarrollo de tecnología es significativo, ya que es una etapa en que se visualizan una serie de problemas, con el fin de ser resueltos a este nivel y así evitar que ocurran a nivel industrial. En planta piloto se prueban también los diseños propuestos inicialmente para demostrar su operabilidad y factibilidad.

La planta piloto ocupa la quinta etapa en el programa de investigación, esta etapa la debe pasar todo proceso para asegurar una evaluación técnica exitosa y una escalación confiable para el proceso en desarrollo.

## NECESIDAD DE UNA PLANTA PILOTO

En el desarrollo de tecnología, una planta piloto es fundamentalmente necesaria para medir el grado de nuestra ignorancia en el desarrollo de un proceso.

Esta necesidad involucra, no sólo el conocimiento del proceso específico bajo consideración sino también, el estado del oficio; siempre debe tenerse en cuenta que el estado del oficio cambia con el tiempo, es decir, que a medida que pasa el tiempo, progresamos algunas veces con experiencias desastrosas.

En el desarrollo de un proceso, la etapa de investigación, antes de planta piloto, es la que más tiempo consume, y la etapa de planta piloto puede llegar a ser la parte más costosa del programa. Una planta piloto se diseña por consideraciones propias, e incluye la instalación de equipos muy complejos, incluyendo instrumentación y servicios auxiliares ajustados para investigación de variables de proceso en un amplio rango, así como para la producción de muestras para comercialización.

El propósito fundamental de una planta piloto es la obtención de datos para diseñar una planta comercial, sin embargo, en muchos casos los datos obtenidos no son adecuados para un diseño comercial, esto hace necesario reabrir el programa, modificar la planta piloto y hacer investigaciones adicionales.

En la actualidad los conocimientos nos hacen preguntar si es necesaria una planta piloto, ya que desde datos de laboratorio se pueden estimar equipos comerciales con un grado de precisión razonable, donde los datos no son suficientemente confiables o los equipos no han sido to

talmente desarrollados para la operación específica, se pueden reconocer las limitaciones y definir áreas específicas, en las que son necesarios estudios de planta piloto y equipos específicos requeridos, los resultados de los estudios piloto son más aplicables a la escalación comercial.

Una vez determinadas las áreas que requieren experimentación - piloto, se especifica que la planta piloto consistirá sólo de algunos - procesos discontinuos y que serán semejantes a los equipos comerciales - propuestos, y de un tamaño mayor que el equipo a nivel de banco en el - que se llevó a cabo la investigación del proceso.

## II. PLANTAS PILOTO Y MICROPLANTAS

## PLANTAS PILOTO Y MICROPLANTAS

El diseño, construcción y arranque de una planta nueva representa una tremenda inversión en tiempo y dinero, los ingenieros químicos juegan un papel importante en el desarrollo de nuevos procesos y en el mejoramiento significativo realizado, los riesgos son igualmente grandes si una planta comercial multimillonaria falla. Para reducir el grado de riesgo, se emprenden con demasiada frecuencia programas de investigación largos y costosos.

Estos programas están constituidos por una serie de etapas, las cuales son combinadas o eliminadas, dependiendo de la complejidad del proyecto, ya que cada etapa representa un desembolso considerable de recursos, tiempo y dinero, por lo tanto, mientras se procede hacia la unidad comercial a través de las etapas, la cantidad de recursos en recirculación debe disminuirse. La tentación a mejorar continuamente los procesos por rediseño debe ser resistida, en algunos puntos la decisión será hecha de manera que las preguntas de proceso remanentes sean riesgos aceptables.

La oportunidad de un nuevo producto o proceso es de importancia extrema cuando un mercado está siendo asegurado para un nuevo producto, contrariamente a minimizar riesgos, la decisión puede ser hecha para preceder directamente a la comercialización antes de resolver satisfactoriamente todo el problema de diseño. Es entonces necesario aplicar más conservativismo en el diseño, esto puede aumentar costos, pero si la sincronización es crítica puede ser la mejor y acaso la única selección.

Una planta piloto es una colección de equipos construidos para investigar algunos aspectos críticos de una operación de proceso o de in

investigación básica de funcionamiento, puede variar en tamaño, desde una unidad de banco de laboratorio hasta casi una unidad comercial, pero es usualmente intermedia en tamaño, su propósito es proveer soluciones a problemas de ingeniería o para proveer la factibilidad económica de un proceso.

Los descubrimientos científicos básicos fundamentales de proceso, son generalmente investigados antes de que una planta piloto sea construida, esto distingue el trabajo de planta piloto de la investigación de laboratorio.

La necesidad de una planta piloto es la medida de la incertidumbre en desarrollo de procesos directamente desde la investigación básica a una planta comercial.

La adaptación de un proceso es altamente riesgosa, por consiguiente, es deseable construir una o más unidades de tamaño intermedio para demostrar la factibilidad del proceso y determinar factores de escala confiables.

El objetivo específico del trabajo de planta piloto incluye: Confirmación de factibilidad del proceso propuesto, previsión de datos de diseño para la planta comercial, determinación de los materiales de construcción óptimos, experimentación de un esquema de control, determinación de la amplitud de mantenimiento de planta, producción de cantidades suficientes de producto para evaluación del mercado y evaluar riesgos y problemas de disposición de residuos del proceso.

Algunos objetivos incluyen obtención de datos cinéticos, cernido de catalizadores, determinación de efectos de largos períodos, áreas de prueba de tecnología avanzada y previsión de datos para escalación.

## TIPOS DE PLANTAS PILOTO

El término planta piloto significa diferentes cosas, según sea la persona que lo plantee. Por simplicidad se usa este término para describir las cuatro categorías de sistemas de investigación de procesos, que son:

1. Sistema a escala laboratorio
2. Sistema a escala banco
3. Sistema de planta piloto
4. Sistema de demostración de proceso.

El propósito común de los sistemas de investigación es generar datos y evaluar la sensibilidad paramétrica alrededor del desarrollo de nuevos productos, nuevos procesos o mejoras a productos y procesos comerciales existentes.

Estos sistemas, con excepción del sistema a nivel de laboratorio y de demostración de proceso se conocen también como "unidad a nivel de banco" y "microunidad", "planta piloto" y "micropiloto".

La unidad Escala-Banco, es una sección de aparatos usualmente pequeños correspondientes a la planta piloto y frecuentemente instalados en un rack de laboratorio, es usado para simular una parte importante de un proceso, pero no incluye todas las características del proceso, a esta unidad también se le llama "microunidad".

La planta piloto es una unidad pequeña que abarca todas las etapas principales del proceso de una unidad comercial propuesta, por miniaturización de los componentes se llega a la "micropiloto".

## CLASIFICACION DE PLANTAS PILOTO

Las plantas piloto, de acuerdo a los fines que con ellas se persiguen, también se clasifican en diferentes formas y una de las más comunes es por tamaño.

La clasificación por tamaño es la más uniformemente proporcional para construcción y costos de operación, desde las unidades de tamaño demostrativas, las que han sido en gran parte reemplazadas por unidades de banco o microunidades, debido a la reducción de tiempo de dirección y costos.

La excepción puede ser encontrada en la rápida expansión de la industria "synfuels", la cual ha sido forzada a construir y operar grandes plantas piloto para obtener datos sobre nuevas tecnologías y equipos.

Otra clasificación está basada sobre el grado de automatización, desde el tipo más simple de planta piloto, en la que la responsabilidad para operar y determinar las condiciones óptimas de operación y ajustarlas manualmente recae sobre el investigador, todos los datos reunidos, reducción e interpretación se hacen manualmente, las condiciones de proceso se ajustan manualmente, este tipo de planta piloto es de fabricación económica, fácil para diseñar y rápida para construir, pero es manual y requiere de gran cantidad de mano de obra y es lenta para responder a cambios de proceso, frecuentemente produce datos poco confiables o sospechosos debido a la lenta respuesta de operación y a las variaciones del sistema.

El siguiente tipo de plantas piloto usa controles automáticos locales para todas las variables del proceso, aumentando los costos in



## CLASIFICACION DE PLANTAS PILOTO POR TAMAÑO

CLASE DE PLANTA PILOTO	CARACTERISTICAS
ESCALA BANCO Y MICROUNIDADES	Ocupa un área menor del 1.5 m <sup>2</sup> y se localiza normalmente bajo una cubierta o sobre un banco con cubierta. Se usa tubería pequeña (tubing) de 3 a 6 mm. de diámetro con automatización limitada.
PLANTA PILOTO INTEGRADA	Este tipo de planta ocupa un área entre 10 y 25 m <sup>2</sup> y es instalada en lugar abierto o celdas presurizadas. Se usa tubería pequeña (tubing y pipe) de 13 a 25 mm. de diámetro, la automatización es mediana y cuenta con sistemas de alimentación y productos.
UNIDAD DEMOSTRATIVA O PROTOTIPO	Las unidades demostrativas ocupan áreas mayores a 250 m <sup>2</sup> y se instalan normalmente en áreas o edificios dedicados a la planta con tuberías de amplio uso, son plantas altamente automatizadas y sistemas de alimentación y productos incluidos.

CLASIFICACION DE PLANTAS PILOTO  
POR GRADO DE AUTOMATIZACION

CLASE DE PLANTA PILOTO	CARACTERISTICAS
CONTROL MANUAL	En este tipo de plantas todas las condiciones de proceso son ajustadas y monitoreadas por operadores, por lo que se tiene un control sobre el proceso poco exacto.
CONTROL LOCAL SOLAMENTE CON AUTOMATIZACION LIMITADA	Las plantas que cuentan con este grado de automatización tienen la capacidad de que las variables más importantes del proceso son monitoreadas por controladores específicos, esto hace posible tener un control estrecho sobre el proceso, existe también la posibilidad de recopilar algunos datos por medio de los instrumentos.
CONTROL LOCAL Y REMOTO CON AUTOMATIZACION ELEVADA	La automatización es elevada en estas plantas y todas las variables de proceso son monitoreadas por controladores locales o distribuidos, el control del proceso es firme, los puntos de ajuste son remotos y fáciles de manipular, la recopilación de datos es usualmente compleja, debido a que el suministro se hace registrador de datos o computadora.

## CONCEPTO DE MODULARIDAD

La modularidad es un concepto relativamente simple, pensando en una planta piloto como un ensamble de bloques fabricados discretamente; cada bloque o módulo representa una función particular del proceso, en la actualidad cada uno de los bloques con función diferente se fabrica de manera tal que son de tamaño estándar, formando módulos, y la construcción de una planta piloto viene a ser un problema de simple selección y ensamble de los módulos apropiados.

Este concepto viene a ser más poderoso si se extiende más allá del "hardware" del proceso a otros aspectos, tales como diseño básico, instrumentación y control, computadora I/O, construcción, experimentación y aún documentación.

La tecnología modular de plantas piloto presenta ciertas ventajas y una de las principales, es que reduce dramáticamente el esfuerzo requerido por concepto de Ingeniería y diseño, el uso de módulos con preingeniería permite al ingeniero dedicar más tiempo a las características no rutinarias y a requerimientos especiales del sistema, la fabricación de plantas piloto modulares requiere menos mano de obra que aquellas de plantas convencionales, ya que todas las secciones son construidas en forma separada y pueden ser probadas en forma individual.

Desmontar una planta piloto modular para embarque, transporte e instalación en el lugar es también muy sencillo.

Otra ventaja importante de la planta piloto modular es su flexibilidad, ya que puede ser usada primero en investigación, aunque implica alguna incertidumbre, sin embargo, este problema es relativamente fá-

cil de manejar. Por otra parte, si existen necesidades de cambio o ampliación se facilita el cambio o adición de nuevos módulos, dando una gran flexibilidad a la planta, haciendo resaltar el concepto de modularidad.

## PLANTA PILOTO DE PROPOSITOS MULTIPLES

Una planta de propósitos múltiples deberá ser diseñada y construida con la flexibilidad necesaria y suficiente para poder usarse en diferentes procesos, esto es procesos nuevos o para mejorar procesos existentes.

Con la finalidad de obtener las características mencionadas se deben seguir algunas normas o guías en el diseño y construcción de una planta piloto de propósitos múltiples, estas guías son:

1. Minimizar el costo y tiempo requerido para instalar el equipo
2. Considerar los riesgos que estarán presentes, como toxicidad, inflamabilidad, y explosividad, que en cierto momento pudiese existir debido a los materiales que se manejen.
3. Permitir la flexibilidad suficiente para poder cambiar en forma rápida y sencilla de un proceso a otro.
4. Considerar los sistemas de seguridad necesarios, a fin de evitar siniestros que pudiesen ocurrir.
5. Considerar un sistema de prueba de materiales, ya que uno de los objetivos es el de indicar los materiales de construcción que deben ser usados.
6. Serán considerados también los servicios auxiliares necesarios, desde fuerza y vapor, aire, agua en sus diferentes clasificaciones, electricidad, hasta el tratamiento de efluentes.

7. La planta piloto de propositos multiples debe ser dividida en áreas específicas para operaciones unitarias determinadas con el fin de tenerlo en módulos o secciones independientes, pero a la vez integradas.
8. La interconexión entre módulos deberá hacerse de manera - tal que aún estando en conjunto o integrados, puedan operarse en forma independiente.

Considerando las guías anteriores, se logrará una planta piloto con la flexibilidad suficiente y capaz de poder usarse en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la mejora de las existentes en nuestro país.

## CAPACIDAD DE PLANTAS PILOTO

Existen varios factores que determinan el tamaño de una planta piloto, de manera muy general, el límite inferior está fijado por la cantidad de producto necesario que permita la determinación analítica de su calidad y de los cambios o alteraciones que sufre cuando se modifican las condiciones de operación. Es decir, que el equipo debe ser suficientemente grande para poder medir el efecto de las impurezas sobre la reacción, la eficiencia de la separación y la calidad del producto.

El límite superior lo determina la cantidad de producto mínimo necesario que permita una evaluación confiable del mercado potencial - existente.

También se debe considerar la facilidad y confiabilidad de la extrapolación y escalamiento de los resultados, así como la función que desempeña la planta piloto, y así se tiene que para el caso de un sistema de laboratorio, se puede manejar un flujo de rango entre 100 y 200  $\text{cm}^3/\text{hora}$ , para sistemas a escala de banco el flujo a manejar cae en el rango de 1000 y 2000  $\text{cm}^3/\text{hora}$ , en el caso de una planta piloto, ésta podrá manejar un flujo volumétrico de algunos barriles por día; algunas plantas piloto tienen capacidades de 50 a 100 barriles/día y hasta de 1000 barriles/día, pero también existen pequeñas con capacidades de 0.1 barriles/día o menos que 0.25 barriles/hora.

Sin embargo, los datos de capacidades anteriores no es un criterio mandatorio y la capacidad final dependerá de las necesidades de evaluación requeridas, ya sea: del producto, del mercado y de los parámetros de diseño y operación que permitan una extrapolación y escalamiento confiables.

### III. ESCALACION



## ESCALACION

La operación de una planta piloto tiene como meta principal la comercialización de un proceso o producto nuevo, desprendiéndose también una serie de consideraciones cuidadosas que ayudarán en la selección de equipo, dimensionamiento del mismo, condiciones de operación de la planta, y alimentación suministrada.

Para proveer la máxima información pertinente requerida por el diseño de la unidad comercial, y teniendo presente el proceso de "escalación", el estudio de planta piloto deberá duplicar las condiciones de la planta comercial lo más cercanamente posible, los problemas críticos deberán incluir los efectos de aumento de tamaño, patrones de mezclado en recipientes y reactores, distribución de alimentación, área interfacial, tiempo de residencia, masa velocidad del fluido para contacto catalítico, entrada de potencia y materiales de construcción.

La escalación es considerada afortunada si la planta produce - el producto en proporción y dentro del costo planeado y con la calidad - deseada.

Esta etapa de planta piloto operando a escala total es acaso - una de las etapas más precarias en el desarrollo de un nuevo proceso, debido a que a estas alturas del proyecto grandes sumas de dinero han sido gastadas y corresponde a la etapa de mayor riesgo.

Los problemas de escalación existen por muchas razones e incluyen ecuaciones que no pueden ser resueltas por técnicas matemáticas conocidas, los aspectos de procesos físicos están interconectados, por soluciones convenientes para la planta piloto, pero no para la planta comer-

cial, ya que se desconoce el funcionamiento del equipo escalado.

Una operación exitosa de una planta piloto no garantiza una -  
operación adecuada de la planta comercial, por tal motivo se deberán to-  
mar precauciones en todas las etapas de un programa de investigación, con  
la finalidad de asegurar que una buena escalación sea realizada conforme  
a las prácticas recomendadas.

## MÉTODOS DE ESCALACION

El proceso de "escalación" se realiza durante el paso de planta piloto a planta comercial en el desarrollo tecnológico.

La escalación no es más que el aumento de escala de los equipos que constituirán la planta de producción, y se puede llevar a cabo por varios métodos o prácticas recomendadas, las cuales han dado buenos resultados cuando éstos se han aplicado, entre ellos se encuentran los que se mencionan a continuación:

1. El principio de similitud
2. Análisis dimensional
3. Ecuaciones diferenciales
4. El régimen
5. Criterio de similitud y ecuaciones de escalación
6. Extrapolación
7. Efectos de límite
8. Teoría de modelos

La aplicación adecuada de estos métodos ayudan a obtener una escalación aceptable de los equipos que conformarán la planta comercial del nuevo proceso.

## PRINCIPIO DE SIMILITUD

El principio de similitud se refiere a la relación existente entre sistemas físicos de diferentes tamaños y a sus fundamentos para el aumento de escala (escalación) o la reducción de la escala en procesos físicos y químicos.

El principio de similitud fue inicialmente enunciado por Newton para sistemas compuestos de partículas sólidas en movimiento, las aplicaciones de este principio va desde sistemas fluidos, agitación, sistemas químicos reaccionantes, diseño de hornos, funcionamiento de aviones, etc.

Este principio denominado "principio de similitud" está usualmente aceptado y es confundido con bastante frecuencia con el método de "análisis dimensional", el principio de similitud es un principio general por naturaleza, y el análisis dimensional es solamente una técnica por el cual el principio de similitud puede ser aplicado a casos específicos.

El principio establece que "la configuración espacial y temporal de un sistema físico es determinado por relaciones de magnitudes con el sistema mismo y no depende del tamaño o naturaleza de las unidades en que estas magnitudes son medidas". Lo anterior indica que el tamaño, forma y composición, que son las tres cualidades que caracterizan los objetos materiales y sistemas físicos, se pueden relacionar; sin embargo, el principio se ocupa más de la "forma" e involucra proporciones geométricas de sus miembros y superficies sólidas, patrones de flujo de fluidos, gradientes de temperatura, perfiles de concentración, tiempo, etc.

Los sistemas que tienen la misma configuración en uno o más de estos factores, se dice que son similares.

La similitud puede ser definida en dos formas, por especificar las relaciones de diferentes medidas en el mismo cuerpo o de medidas correspondientes en cuerpos diferentes.

La forma geométrica de un cuerpo es determinada por sus proporciones intrínsecas y en cuerpos geoméricamente similares sus relaciones son constantes y se denominan "razón de escala".

Esto da una ventaja práctica a la segunda forma de definición, ya que una simple razón de escala es sustituida por un número de factores de forma, por esta razón la similitud geométrica es definida en términos de correspondencia y razón de escala.

En Ingeniería Química existen cuatro estados similares de importancia, y son:

1. Similitud geométrica
2. Similitud mecánica
3. Similitud térmica
4. Similitud química.

Estrictamente hablando, cada uno de los estados anteriores, necesita de los estados previos, así para que exista una similitud química completa deberá existir similitud térmica, mecánica y geométrica.

## SIMILITUD GEOMÉTRICA

La similitud geométrica se define mejor en términos de correspondencia, si se consideran dos sólidos, cada uno con tres ejes imaginarios intersectándose en el espacio, de forma que todos los puntos son -

descritos por tres coordenadas, si localizamos un punto con coordenadas X, Y, Z en el primer cuerpo y otro punto con coordenadas X', Y', Z' en el segundo cuerpo y relacionamos sus coordenadas por la ecuación

$$\frac{X'}{X} = \frac{Y'}{Y} = \frac{Z'}{Z} = L$$

donde la razón de escala es constante estos dos puntos y todos los otros pares, cuyas coordenadas del espacio son similares y relacionadas de la misma manera en términos de L se conocen como "puntos correspondientes", de esto se desprende que:

"Dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para cada punto en un cuerpo existe un punto correspondiente en el otro".

Es posible que cada punto en el primer cuerpo pueda tener más de un punto correspondiente en el segundo, y ocurre cuando el segundo cuerpo está compuesto de una multiplicidad de elementos idénticos, cada uno geoméricamente similar al primero.

No es necesario que la razón de escala sea la misma a lo largo de cada eje, y una definición más general de puntos correspondientes está dada por la ecuación

$$\frac{X'}{X} = X \quad \frac{Y'}{Y} = Y, \quad \frac{Z'}{Z} = Z$$

En esta ecuación X, Y, Z son razones de escala constante y no necesariamente la misma.

Quando la relación entre dos cuerpos, en los que las razones -

de escala son diferentes en direcciones diferentes, se dice que es una - "similitud distorsionada".

La aplicación de estos conceptos geométricos a plantas de proceso sugieren diferentes clases de aparatos a pequeña escala, que serán considerados similares a un aparato de escala grande.

## SIMILITUD MECANICA

La similitud mecánica comprende las siguientes clases:

1. Similitud estática o de fuerza estática
2. Similitud cinemática
3. Similitud dinámica

Cada una de las cuales puede ser considerada como una extensión del concepto de similitud geométrica para sistemas estacionarios o en movimiento y que están sujetos a fuerzas externas a ellos.

## SIMILITUD ESTÁTICA

Se ocupa de cuerpos sólidos o estructuras sujetas a esfuerzos constantes, considerando que todos los cuerpos sólidos se deforman bajo la influencia de fuerzas que actúan sobre ellos, ciertas partes de los cuerpos se desplazan de sus posiciones originales por la acción de las fuerzas, considerando lo anterior la similitud dinámica se defina de la manera siguiente

"Cuerpos geoméricamente similares son similares estáticamente cuando, bajo fuerzas constantes, sus de

fomaciones relativas son tales que permanecen geométricamente similares".

La razón de los correspondientes desplazamientos será igual a la razón de escala lineal y los esfuerzos en los puntos correspondientes son los mismos. En el caso de deformación elástica, la condición de igualdad de esfuerzos correspondientes es que éstos estarán en la razón del módulo elástico, la razón de las fuerzas netas, actuando en puntos correspondientes en sistemas estáticamente similares, es:

$$\frac{F'}{F} = E = EL^2$$

Donde:

$E = E'/E$  la razón del módulo elástico en prototipo y modelo respectivamente,  $L =$  la razón de escala lineal (prototipo/modelo). En el caso de deformación plástica, la condición de igualdad de esfuerzos correspondientes, es:

$$F = YL^2$$

Donde:

$Y = Y'/Y$  la razón de los puntos de cedencia del prototipo y modelo, donde hay similitud geométrica distorsionada, las razones requeridas de formas para similitud estática será diferente en direcciones diferentes.

## SIMILITUD CINEMATICA

Se ocupa de sistemas sólidos o fluidos en movimiento, donde la similitud geométrica involucra tres coordenadas del espacio, introduce -



la dimensión adicional de tiempo medido desde un cero arbitrario para cada sistema y los tiempos correspondientes son definidos como tiempos, - de manera que  $t = t'/t$  es constante y  $t$  es la razón de escala de tiempo, la diferencia entre pares de tiempos correspondientes se llaman "intervalos correspondientes".

Partículas geomótricamente similares que están centradas en - puntos correspondientes se llaman partículas correspondientes.

"Los sistemas en movimiento geomótricamente similares son similares cinemáticamente, cuando las partículas correspondientes trazan caminos geomótricamente similares en intervalos de tiempo correspondiente".

Si la razón de escala de tiempo  $t$  es mayor que la unidad, el - prototipo está describiendo movimientos más lentamente que el modelo.

El concepto de razón de escala de tiempo es menos familiar que aquel de una razón de escala lineal, y para propósitos de ingeniería es más conveniente calcular en términos de "velocidades correspondientes" - que son las velocidades de partículas correspondientes en tiempos correspondientes, la razón de velocidades correspondientes es

$$v = \frac{v'}{v} = \frac{L}{t}$$

En el caso de similitud geométrica distorsionada, las razones de velocidades correspondientes será diferente en direcciones diferentes.

## SIMILITUD DINAMICA

La similitud dinámica trata con las fuerzas que aceleran o retardan el movimiento de masa en los sistemas dinámicos. Fuerzas de la misma clase que actúan sobre partículas correspondientes en tiempos correspondientes se llamarán "fuerzas correspondientes".

En sistemas fluidos o sistemas compuestos de partículas sólidas discretas, la similitud cinemática necesariamente ocasiona similitud dinámica, entonces el movimiento de sistemas son función de las fuerzas aplicadas, de manera que:

"Los sistemas en movimiento geoméricamente similares son dinámicamente similares cuando las razones de todas las fuerzas correspondientes son iguales".

$$F = \frac{F_1'}{F_1} = \frac{F_2'}{F_2} = \dots = \frac{F_n'}{F_n}$$

## SIMILITUD TERMICA

Trata con sistemas en donde hay un flujo de calor e introduce la dimensión de temperatura, longitud, fuerza y tiempo, el calor puede fluir desde un punto a otro por: radiación, conducción, convección y movimiento de materia, por acción de un gradiente de presión; para los primeros tres procesos, una diferencia de temperatura es necesaria, la razón del flujo de calor entre dos puntos cualesquiera varía con la diferencia de temperatura entre ellos; el cuarto proceso requiere movimiento de materia y depende del patrón de flujo en el sistema, entonces en sistemas de movimiento la similitud térmica requiere similitud cinemática.

La diferencia de temperaturas entre un par de puntos dados en tiempos correspondientes en un sistema y aquella entre el par de puntos correspondientes de otro sistema se conoce como "diferencia de temperatura correspondiente".

"Los sistemas geoméricamente similares, son térmicamente similares cuando las diferencias de temperaturas correspondientes llevan una razón constante de uno a otro, y cuando los sistemas sí están en movimiento son similares cinemáticamente".

En sistemas similares térmicamente, los patrones de distribución de temperatura formados por superficies isotérmicas en tiempos correspondientes son geoméricamente similares. La razón de diferencia de temperaturas correspondientes puede ser llamada "razón de escala de temperatura" y cuando es unitaria, las temperaturas en puntos correspondientes son iguales o difieren de uno a otro por un número fijo de grados.

La similitud térmica requiere que las razones correspondientes de flujo de calor sean una relación constante de uno a otro, si  $H_r$ ,  $H_c$ ,  $H_v$  y  $H_f$  representan las cantidades de calor transferido por segundo por radiación, conducción, convección y transporte de materia respectivamente, y a través de un elemento de sección transversal dada entonces para similitud térmica

$$\frac{H_r'}{H_r} = \frac{H_c'}{H_c} = \frac{H_v'}{H_v} = \frac{H_f'}{H_f} = H$$

y en términos de relaciones intrínsecas

$$\frac{H'_r}{H'_c} = \frac{H_r}{H_c}, \quad \frac{H'_r}{H'_v} = \frac{H_r}{H_v}, \quad \frac{H'_r}{H'_f} = \frac{H_r}{H_f}$$

En general no es posible mantener las tres relaciones simultáneamente en todos los puntos y la similitud térmica puede ser establecida solamente cuando radiación, conducción y convección son despreciables.

## SIMILITUD QUIMICA

Trata con sistemas reaccionantes, en los que varía la composición de un punto a otro y, en procesos batch o cíclicos, de un instante a otro, en estos sistemas hay varios parámetros de concentración, dependiendo del número de constituyentes químicos, variando independientemente con respecto a la similitud a ser establecida. Es necesario que la composición química en los dos sistemas sea la misma, debiendo haber una relación fija entre las concentraciones puntuales de ciertos constituyentes que son comparados, si un sistema contiene un constituyente químico variable A, y otro sistema contiene un constituyente químico variable B, donde es necesario establecer similitud con respecto a A y B, estas sustancias serán llamadas "constituyentes correspondientes"

La concentración de un constituyente químico dado en un elemento de volumen a un tiempo dado, depende de la concentración inicial, la velocidad en la que el constituyente es generado o destruido por la acción química, la velocidad con que se difunde hacia adentro o hacia afuera del elemento de volumen y la velocidad a la cual es transportado por el movimiento del material.

La velocidad de la acción química depende de la temperatura, la velocidad de difusión depende del gradiente de concentración, la velocidad de transporte de material depende del patrón de flujo existente en el sistema.

Entonces la similitud química necesita similitud térmica y ci-

nenática y depende de las diferencias de concentración más que de las -  
concentraciones absolutas.

La diferencia de concentraciones entre un par de puntos a tiempos correspondientes en un sistema y aquel entre el par de puntos correspondientes en otro sistema se llama "diferencia de concentraciones correspondientes", de lo anterior se concluye que

"Los sistemas son químicamente similares cuando son geoméricamente y térmicamente similares y las diferencias de concentración correspondientes tienen - una razón constante entre ellos, y si los sistemas están en movimiento son similares cinemáticamente".

La razón de diferencias de concentración correspondiente se llama "razón de escala de concentración" si es igual a la unidad, las concentraciones en puntos correspondientes son iguales o difieren por una cantidad constante. Las relaciones intrínsecas que definen la similitud química, adicionales a aquellas requeridas por la similitud cinemática y térmica, son:

Velocidad de formación química

Velocidad de flujo de material

y

Velocidad de formación química

Velocidad de difusión molecular

comparando las razones anteriores, con frecuencia se puede despreciar la segunda.

Teóricamente la velocidad de reacción química puede ser variada independientemente por cambio en la temperatura. Prácticamente el equilibrio químico y la velocidad relativa de reacciones laterales indeseables varían con la temperatura, y hay un rango estrecho de temperaturas en el que la reacción puede proceder en pequeña y gran escala que asegura producción máxima.

## ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es una técnica que sirve para expresar el comportamiento de un sistema en términos del mínimo número de variables independientes y de forma que no sea afectada por cambios en la magnitud de las unidades de medición. Las cantidades físicas son arregladas en grupos adimensionales, consistiendo de razones de cantidades similares (longitudes, velocidades, fuerzas, etc.) que caracterizan el sistema, estos grupos constituyen las variables en las ecuaciones de estado o del sistema, las cuales son adimensionales.

El análisis dimensional puede dar resultados falsos, a menos que todas las variables que tengan influencia significativa sobre el sistema sean tomadas en cuenta. Si la lista es muy grande e incluye variables cuyo efecto es despreciable, los factores superfluos, en algunos casos, son eliminados en el curso del análisis, pero en otros casos, el número de criterios de similitud derivados se hace innecesariamente largo, y el problema de establecer similitud parece ser más difícil de lo que es, pero si se omite una variable relevante, el análisis dimensional dará conclusiones erróneas, como complicación adicional, existen las llamadas "constantes dimensionales" y que deben tomarse en cuenta para que el análisis conduzca a un resultado correcto.

### UNIDADES Y DIMENSIONES

Para entender los principios del análisis dimensional, es necesario el entendimiento total de la naturaleza de las dimensiones y unidades.

La palabra "dimensión" deberá ser distinguida de la palabra - "unidad", cuyo significado de ambas son diferentes, así, longitud, tiempo y masa son dimensiones y, metros, segundos y kilos son unidades.

El sistema dimensional consiste de dimensiones primarias o independientes y dimensiones secundarias o dependientes; las dimensiones - primarias son de naturaleza simple y las dimensiones secundarias son las que se expresan en función de las primarias, y pueden ser expresadas en unidades que de alguna forma se relacionan con los estándares de masa, - longitud, tiempo, temperatura y carga eléctrica prescritos internacionalmente, entonces tiempo, longitud y temperatura son idealmente dimensiones primarias, la dimensión de tiempo está dada por el símbolo  $t$ , a la - dimensión de longitud corresponde el símbolo  $L$ , y la dimensión de temperatura se representa por  $T$ , la dimensión de masa es representada por  $M$  y la dimensión de carga eléctrica por  $Q$ , sin embargo, para  $M$  y  $Q$ , dependerá también del sistema dimensional usado.

Las unidades de medición de masa, longitud, tiempo, temperatura y carga eléctrica son prescritos por acuerdo internacional y de estas unidades de medición estándar pueden ser definidas otras unidades, la de finición puede ser arbitraria, así el gramo internacional está definido como la milésima parte del kilogramo internacional, por otro lado la de finición puede estar basada sobre una ecuación física fundamental que go bierna el fenómeno en la que la unidad de medición particular está involucrada, y así es como se definió la unidad de carga eléctrica estandarizada internacionalmente.

Las unidades pueden ser clasificadas en tres sistemas sobre la base de los tipos de unidades de masa, longitud, y temperatura. En el - sistema inglés "fps" la masa se expresó en libras, la longitud en pies y la temperatura en grados Fahrenheit. En el sistema métrico "Cgs", la ma sa es expresada en gramos, la longitud en centímetros y la temperatura -



en grados centígrados, y en el Sistema Internacional de Unidades "SI", - las unidades son masa en kgrs., la longitud en metros y la temperatura - en grados Kelvin, el tiempo es expresado en segundos en todos los sistemas. Existen también sistemas especiales de unidades para usarse con - sistemas dimensionales especiales.

#### SISTEMA ABSOLUTO

En el sistema absoluto, la masa es una dimensión primaria con el símbolo M, y la fuerza es dimensión secundaria, en el sistema Inglés de unidades, la unidad primaria de masa es la libra gruesa estándar, la unidad de fuerza es el poundal y se define como la fuerza requerida para dar a una libra gruesa una aceleración de  $1 \text{ ft}/\text{seg}^2$ ; en el sistema métrico "Cgs", la unidad primaria de masa es el gramo internacional y la unidad de fuerza es llamada dyna y se define como la fuerza requerida para dar a un gramo una aceleración de  $1 \text{ cm}/\text{seg}^2$ , en el sistema internacional la unidad primaria de masa es el kilogramo internacional y la unidad de fuerza es llamada newton y se define como la fuerza requerida para dar a un kilogramo una aceleración de  $1 \text{ m}/\text{seg}^2$ .

#### SISTEMA GRAVITACIONAL

El sistema técnico o gravitacional tiene como dimensión pri - maria a la fuerza, y a la masa como dimensión secundaria, entonces no -- hay unidad de fuerza estándar prescrita internacionalmente, el recurso - puede ser hecho para una masa estándar "sólo para el propósito de defi - nir la unidad primaria de fuerza", en el Sistema Inglés de Unidades, la unidad primaria de fuerza es la libra-fuerza estándar, y se define como la fuerza que da a una libra gruesa una aceleración igual a la - - -

aceleración estándar de la gravedad, y que es de  $32.1740 \text{ ft/s}^2$ . La unidad secundaria de masa es llamada "slug" y se define como la cantidad de masa que es acelerada  $1 \text{ ft/s}^2$ , cuando actúa en ella una libra-fuerza estándar. En el sistema métrico de unidades, la unidad de fuerza primaria es el kilogramo-fuerza, y se define como la fuerza que imparte al kilogramo estándar una aceleración igual a la aceleración estándar de la gravedad de  $980.665 \text{ cm/s}^2$  ó  $9.80665 \text{ m/s}^2$ . La unidad secundaria de masa en el sistema métrico no tiene un nombre especial, pero se define como la cantidad de masa que es acelerada  $1 \text{ m/s}^2$  cuando se somete a una fuerza de un kilogramo-fuerza.

## SISTEMA DE INGENIERIA

En el sistema dimensional de ingeniería ambas dimensiones fuerza y masa son primarias, y como consecuencia, la constante de proporcionalidad de Newton es una constante dimensional.

## DEFINICIONES

En base a la "Segunda Ley de Newton", también conocida como la "Ley del Movimiento de Newton" o simplemente la "Ecuación de Newton", que relaciona dimensionalmente a la fuerza, masa, longitud y tiempo de interés ingenieril, junto con la temperatura, se obtienen las definiciones en forma dimensional.

La ecuación que representa la ley Física Fundamental puede ser escrita en la forma siguiente

$$\text{Fuerza} = \frac{1}{\beta} (\text{masa}) (\text{aceleración})$$

Donde  $\beta$  = constante de proporcionalidad de Newton.

Si se seleccionan tiempo y longitud como dimensiones primarias las dimensiones de aceleración se fijan automáticamente, y tendrá las dimensiones de  $(L/t/t)$  ó  $L/t^2$ .

Puede seleccionarse a la masa como dimensión primaria y fuerza como dimensión secundaria y también la fuerza puede ser seleccionada como dimensión primaria y masa como dimensión secundaria o ambas fuerza y masa como dimensiones primarias.

Con las consideraciones anteriores obtenemos, para los sistemas dimensionales mencionados, los resultados siguientes:

Para el Sistema Absoluto, con masa como dimensión primaria y fuerza como dimensión secundaria.

$$\text{Fuerza} = \frac{1}{\beta} (\text{masa}) (\text{aceleración})$$

$$\beta = 1$$

$$F = (M) (L/t^2) = ML/t^2$$

y la fuerza tiene dimensiones de  $ML/t^2$ .

Para el Sistema Gravitacional, con fuerza como dimensión primaria y masa como dimensión secundaria.

$$\text{Fuerza} = \frac{1}{\beta} (\text{masa}) (\text{aceleración})$$

$$\beta = 1$$

$$F = (M) (L/t^2); M = Ft^2/L$$

En este sistema la masa tiene dimensiones de  $Ft^2/L$ .

Para el Sistema de Ingeniería, con fuerza y masa como dimensiones primarias.

$$F = \frac{1}{\beta} \text{ (masa) (aceleración)}$$

$$F = \frac{1}{\beta} \text{ (M) (L/t}^2\text{)}$$

y  $\beta$  tiene dimensiones de  $ML/Ft^2$  y es numéricamente igual a la aceleración de la gravedad y se denota por  $g$  ó  $g_c$  y se considera como una "verdadera constante dimensional" y de aquí se deriva que la Ley de Newton para Ingeniería se puede escribir como:

$$\text{Fuerza} = \frac{1}{g_c} \text{ (masa) (aceleración)}$$

#### HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL

La representación de un proceso físico por medio de una ecuación matemática puede lograrse a través del Análisis Dimensional, y la ecuación que representa al proceso debe tener los términos con los mismos resultados dimensionales, cuando esto se cumple se dice que la ecuación es dimensionalmente homogénea y entonces es aplicable, sin hacer caso de la unidades usadas, con tal de que las unidades sean compatibles con el sistema dimensional empleado en la ecuación, esto es llamado el "Principio de Homogeneidad Dimensional", y establece que "toda ecuación física completa es dimensionalmente homogénea y capaz de ser resuelta en dos o más ecuaciones separadas que son dimensionalmente homogéneas", de lo que se concluye que una ecuación física completa es aquella que permanece válida cuando las unidades de medida son cambiadas.

Las cantidades que entran en la ecuación física son de tres - clases, y son: las variables físicas, constantes numéricas y constantes dimensionales.

Las constantes numéricas tienen cero dimensiones, ya que el exponente de cada cantidad primaria en la fórmula dimensional es cero, y su valor numérico no cambia cuando son cambiadas las unidades.

Una constante dimensional es cualquier constante que aparece en una ecuación física, y cambia su valor cuando las unidades de medida de las cantidades primarias cambian.

Las constantes dimensionales tienen fórmulas dimensionales similares a las de las variables físicas, por medio de las cuales pueden ser transformadas de un sistema a otro.

El principio de homogeneidad dimensional presupone que las dimensiones de las constantes dimensionales han sido tomadas en consideración, así como aquellas de las variables físicas.

## MÉTODOS DE ANÁLISIS DIMENSIONAL

### El Método de Rayleigh

Este método de análisis dimensional fue descrito en la literatura en 1892, cuando Lord Rayleigh aplicó la técnica al problema de caída de presión debido a la fricción en flujo de fluidos, pero hasta 1915 Rayleigh publicó un artículo relacionado con los principios del método.

El método Rayleigh está basado sobre la premisa de que si  $N$  - cantidades  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  están involucradas en un cierto fenómeno -

físico para el propósito de análisis dimensional su mutua dependencia - puede ser expresada como producto de potencias del siguiente tipo.

$$Q_1 = K Q_2^{a_2} Q_3^{a_3} \dots Q_n^{a_n}$$

donde K es una constante adimensional, y  $Q_1$  puede ser interpretada como la cantidad de interés principal, tal interpretación es totalmente inesen- cial para el método. El juego de Q's incluyen todas las variables conoci- das del fenómeno particular.

Los requerimiento de homogeneidad dimensional pone algunas res- tricciones a los valores de los  $n-1$  exponentes  $a_2, a_3, \dots, a_n$ , si el - sistema dimensional requerido para describir completamente las  $n$  varia- bles y constantes dimensionales consistentes de  $r$  dimensiones primarias, entonces existe un máximo de  $r$  condiciones, con las cuales los exponen- tes de las constantes satisfacen la ecuación.

Consecuentemente de los  $n-1$  exponentes, un mínimo de  $n-1-r$  no están restringidas por los requerimientos de la homogeneidad dimensional.

El resultado final del análisis dimensional por el método de - Reyleigh es un arreglo de  $n$  cantidades en forma tal, que un producto adi- mensional o grupo conteniendo  $Q_1$  es igualada al producto de un mínimo de  $n-1-r$  grupos adimensionales, cada uno elevado a la potencia representada por uno de los  $n-1-r$  exponentes no restringidos. Como consecuencia, re- sulta un arreglo de las  $n$  cantidades dentro de un mínimo de  $n-1-r+1=n-r$  grupos adimensionales.

#### El Teorema $\Pi$ de Buckingham

Este método fue introducido por Edgar Buckingham en 1914, el - nombre de "Teorema  $\Pi$ " se debe a que Buckingham usó el símbolo  $\Pi$  para - un grupo adimensional.

El método considera cualquier juego de  $n$  cantidades físicas -

que pueden ser significativas en una situación física particular, y establece que "si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede ser reducida a una relación entre un juego completo de productos adimensionales" un juego de productos adimensionales de variables dadas está completa si cada producto en el juego es independiente de los otros, y todos los productos adimensionales de las variables es un producto de potencias de productos adimensionales en el juego. La dependencia de  $n$  cantidades puede ser expresada en la siguiente forma:

$$Q_1^{a_1}, Q_2^{a_2}, Q_3^{a_3}, \dots, Q_m^{a_m}, \dots, Q_n^{a_n} = \prod_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, P$$

$m$  es el número de restricciones en la ecuación, en virtud de los requerimientos de homogeneidad dimensional y tendrá como máximo valor el número de dimensiones primarias  $r$ , si hay  $m$  restricciones en los valores de  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$ . entonces habrá  $n-m$  exponentes no restringidos y en consecuencia, resultarán  $n-m$  grupos adimensionales.

$p$  es el número de grupos adimensionales que constituyen un juego completo para  $n$  cantidades y está dada por

$$p = n - m$$

Los  $p$  grupos adimensionales  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_p$  están relacionados por la ecuación general

$$Q(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_p) = 0$$

Esta ecuación establece que el fenómeno particular puede ser descrito rigurosamente y precisamente en términos del juego completo de los  $p$  grupos adimensionales, y también puede ser descrito en términos de las  $n$  cantidades involucradas en el fenómeno.

Para cada valor de  $\prod_1$  se obtiene una ecuación, por lo que se tendrán tantas ecuaciones como valores de  $\prod$ .

$$\prod_1 = Q_1^{a_1} \cdot Q_2^{a_2} \cdot Q_3^{a_3} \dots Q_m^{a_m} \cdot Q_{m+1}$$

$$\prod_2 = Q_1^{a_1} \cdot Q_2^{a_2} \cdot Q_3^{a_3} \dots Q_m^{a_m} \cdot Q_{m+2}$$

$$\prod_p = Q_1^{a_1} \cdot Q_2^{a_2} \cdot Q_3^{a_3} \dots Q_m^{a_m} \cdot Q_n$$

Este juego representa las ecuaciones que resultan desde las cantidades en cualquier problema.



## ECUACIONES DIFERENCIALES

La mayor parte de los procesos físicos y químicos que son utilizados en Ingeniería química pueden ser representados por ecuaciones diferenciales fundamentales conocidas, el problema que se presenta es la integración de estas ecuaciones.

Si la representación matemática pudiera elaborarse para sistemas de todas las formas y grado de complejidad, entonces los experimentos en planta piloto y modelos serían innecesarios y el comportamiento de cualquier sistema a gran escala podría ser predicho desde datos de laboratorio.

Para procesos simples que se llevan a cabo en sistemas de formas simplificadas, es algunas veces posible integrar matemáticamente las ecuaciones diferenciales que lo representan como es el caso de flujo de fluidos en tuberías rectas. Sin embargo, cuando el sistema es más complejo, una integración matemática puede ser imposible, entonces se hará una integración empírica.

Cuando un proceso particular es gobernado por una ecuación diferencial conocida, completa y dimensionalmente homogénea, se facilita poner la ecuación diferencial en forma adimensional, y así, derivar el criterio de similitud sin la ayuda del análisis dimensional.

La solución de ecuaciones, ya sean diferenciales o integrales, pueden ser resueltas dentro de tres factores que las constituyen, y son:

1. Una fuerza impulsora o diferencia de potencial
2. Un factor de resistencia o su recíproco, una conductancia

### 3. Una resultante.

Los factores 1 y 2 son seleccionados y la resultante (3) es directamente proporcional a la fuerza impulsora e inversamente proporcional a la resistencia.

Las dimensiones de la fuerza impulsora y resistencia o conductancia dependen de las dimensiones de la resultante en una ecuación física, entonces la resultante puede ser:

- a) Un desplazamiento o cantidad total (con respecto al tiempo)
- b) Una razón o velocidad (con respecto al tiempo)
- c) Una aceleración (con respecto al tiempo).

Una simple ecuación puede contener los tres órdenes de diferencial de tiempo, cada una asociada con otras variables, de manera que los términos de la ecuación son dimensionalmente homogéneas.

Para procesos en serie las ecuaciones físicas tienen la forma de series, y el criterio adimensional son razones de fuerzas impulsoras; para procesos en paralelo, las ecuaciones físicas tienen la forma de paralelo y el criterio adimensional son razones de flujos, conductancias o cantidades totales.

Para procesos serie-paralelo la ecuación que los represente será resuelta en sus ecuaciones simples que lo componen, cada componente podrá tener uno o más criterios dimensionales.

La aplicación de los anteriores principios se hace en varios tipos de procesos como son:



con ecuaciones similares para los ejes Y y Z.

La forma dimensional generalizada es:

$$\left[ \frac{N}{(1-2\sigma)L} \right] + \left[ \frac{N}{L} \right] + \left[ \frac{\mu}{Lt} \right] = \left[ \frac{\rho L}{t^2} \right] + [\rho g]$$

I                      II                      III                      IV                      V

Si hay una fuerza aplicada externamente al sistema representada por la dimensión de fuerza F, ésta deberá ser incluida y expresada por unidad volumétrica

$$\left[ \frac{N}{(1-2\sigma)L} \right] + \left[ \frac{N}{L} \right] + \left[ \frac{\mu}{Lt} \right] = \left[ \frac{\rho L}{t^2} \right] + [\rho g] + \left[ \frac{F}{L^3} \right]$$

I                      II                      III                      IV                      V                      VI

Los términos representan una fuerza paralela al eje X, actuando sobre una unidad de volumen, y son:

- I = Resistencia elástica al cambio de volumen
- II = Resistencia elástica al cambio de forma
- III = Resistencia viscosa al corte
- IV = Fuerza inercial
- V = Fuerza gravitacional o del cuerpo
- VI = Fuerza externa actuando sobre el cuerpo

De los cuatro grupos adimensionales que hay, si se pone  $L/t = v$  y dividiendo I ó II y III, IV, V y VI, la ecuación adimensional

puede ser escrita como

$$\Phi \left( \frac{NL}{\mu v}, \frac{N}{\rho v^2}, \frac{N}{\rho gL}, \frac{NL^2}{F} \right) = \text{constante}$$

con N reemplazada por  $\left( \frac{N}{1-2\sigma} \right)$  si el movimiento elástico es puramente longitudinal.

Para sistema de tiempo invariante bajo esfuerzo las fuerzas viscosa e inercial desaparecen y la ecuación queda en la forma

$$\Phi \left( \frac{N}{\rho gL}, \frac{NL^2}{F} \right) = \text{constante}$$

#### DEFORMACION PLASTICA DE SOLIDOS

Las fuerzas aplicadas para este caso son generalmente altas comparadas con la fuerza gravitacional que puede ser despreciada y el material es deformado más allá de su límite elástico y la ley de Hooke no describe más la relación entre esfuerzo y tensión.

La ecuación que represente este proceso es

$$\rho \frac{\partial^2 s_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \Phi \left( \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} + \frac{\partial s_z}{\partial z} \right) \right] + \mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 s_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s_x}{\partial z^2} \right)$$

con ecuaciones similares para los ejes Y y Z.

La forma dimensional generalizada de la ecuación dimensional es

$$\left[ \frac{Y}{L} \right] + \left[ \frac{\mu}{L t} \right] = \left[ \frac{L}{t^2} \right] + \left[ \frac{F}{L^3} \right]$$

I

II

III

IV

con tres grupos adimensionales independientes, poniendo  $L/t = v$  y reorganizando

$$\Phi \left( \frac{Yt}{\mu}, \frac{Y}{\rho v^2}, \frac{YL^2}{F} \right) = \text{constante}$$

Para el caso estático, donde la fuerza inercial y viscosa desaparecen, la ecuación se reduce a

$$\Phi \left( \frac{YL^2}{F} \right) = \text{constante}$$

#### MOVIMIENTO DE SÓLIDOS GRANULARES

El flujo de sólidos granulares y polvos en conductos inclinados hacia abajo, la forma y densidad de lechos y montones granulares, y el grado de segregación del material de acuerdo con el tamaño de partícula a ser procesada pueden ser estudiados por medio de experimentos de modelo.

Las fuerzas involucradas son: inercia, gravedad y fricción de sólidos, y la ecuación diferencial que representa el proceso para el movimiento a lo largo de la superficie inclinada es:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \rho g \sin \phi - f \rho g \cos \phi$$

la forma dimensional generalizada es:

$$\left\{ \frac{\rho v^2}{L} \right\} = \{ \rho g \} - \{ \rho g \}$$

dividiendo I y III por II, se obtiene la ecuación adimensional

$$\Phi \left( \frac{v^2}{Lg}, f \right) = \text{constante}$$

## FLUJO DE FLUIDOS

El flujo isotérmico de fluidos Newtonianos está representado por la ecuación diferencial fundamental denominada Ecuación de Navier-Stokes

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g \cos \alpha_x - \frac{\partial p}{\partial x} +$$

$$\frac{1}{3} \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

con ecuaciones correspondientes para componentes paralelos a los ejes Y y Z.

La ecuación de Navier-Stokes es una ecuación dinámica en la que cada término tiene las dimensiones de fuerza y representan

- 1 Fuerza requerida para acelerar una unidad de masa de fluido, donde el flujo es inestable

- II Transporte de momentum por flujo de fluido a través de un -  
área de sección transversal unitaria
- III Fuerza gravitacional del cuerpo
- IV Gradiente de presión estática
- V Resistencia viscosa al cambio de volumen del fluido (despre-  
ciable para líquidos)
- VI Resistencia viscosa al corte

La ecuación dimensional generalizada es:

$$\left[ \frac{\rho v}{\mu} \right] + \left[ \frac{\rho v^2}{L} \right] = \left[ \rho g \right] - \left[ \frac{\Delta p}{L} \right] + \left[ \frac{\mu v}{L^2} \right]$$

I            II            III            IV            V            VI  
La ecuación adimensional es

$$\Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{\Delta p}{\rho v^2} \right) = \text{constante}$$

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v^2}{Lg} \right)$$

## PROCESOS TÉRMICOS

En este apartado recaen los procesos de transferencia de calor y que incluyen desde calentamiento, enfriamiento, y los mecanismos de transporte de energía en sólidos y fluidos.



## CONDUCCION EN SOLIDOS

La conducción de calor está representada por la ecuación diferencial siguiente:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

para conductores isotrópicos, la ecuación se modifica a:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

I  
II  
Los términos de la ecuación representan respectivamente

- I Razón de aumento en entalpia por unidad de volumen
- II Razón de conducción dentro de la unidad de volumen

La ecuación dimensional es:

$$\left[ \frac{\rho c_p T}{t} \right] = \left[ \frac{k T}{L^2} \right]$$

entonces el grupo adimensional es:

$$\Phi \left( \frac{\rho c_p L^2}{k t} \right) = \text{constante}$$

## CONVECCION FORZADA EN FLUIDOS

El flujo de calor por el mecanismo de convección forzada en un fluido en movimiento está representado por las ecuaciones diferenciales -



el grupo  $\rho c_p v L / k$  presenta la razón de velocidad de transferencia de calor por conducción y flujo del fluido y es conocido como el NÚMERO DE PE-CLET y constituye una de las condiciones para similitud térmica.

Otra condición de similitud térmica es que el patrón de flujo - deberá ser similar a aquel donde existe similitud cinemática. El criterio adimensional para similitud dinámica (y entonces cinemática) es derivada de la ecuación de Navier-Stokes y son: el número de Reynolds, que representa la razón de fuerzas inercial a viscosa, y el número de Froud, que representa la razón de fuerzas inercial a gravitacional, entonces la ecuación adimensional para transferencia de calor por convección forzada es:

$$\Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{\rho c_p v L}{k}, \frac{hL}{k} \right) = \text{constante}$$

## RADIACION

El proceso de transferencia de calor por radiación es un proceso de acción a distancia y no de transferencia de punto a punto, lo que - hace de la ecuación de velocidad una forma integral y no diferencial y - puede escribirse como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = \sigma e (T_1^4 - T_2^4) L^2$$

dimensionalmente la ecuación se escribe como:

$$\left[ \frac{Q}{L^2 T} \right] = [T e \sigma_1^4] \left[ \frac{T_1^4 - T_2^4}{T_1^4} \right]$$

y la ecuación adimensional es:

$$\Phi \left( \frac{Q}{\sigma e L^2 T^4 t}, \frac{T_1}{T_2} \right) = \text{constante}$$

$$\Phi \left( \frac{H}{\sigma e L^2 T^4}, \frac{T_1}{T_2} \right) = \text{constante}$$

La radiación de calor es inevitable, acompañada de conducción, y desde las superficies radiantes; por lo que el grupo adimensional  $\frac{\rho_{cp} L^2}{kt}$  debe ser incluido.

$$\Phi \left( \frac{H}{\sigma e L^2 T^4}, \frac{T_1}{T_2}, \frac{\rho_{cp} L^2}{kt} \right) = \text{constante}$$

En un sistema continuo como un horno el calor es transportado - también por movimiento de fluido, la velocidad de transporte es proporcional a  $\rho_{cp} v L^2 \delta T$ , donde  $T$  es el cambio de temperatura sufrido por el fluido a condición de que  $T_1/T_2$ , la razón de pares correspondientes de temperatura sea constante,  $\delta T$  es proporcional a  $T$  y la razón del calor total transferido para transporte por movimiento de fluido del calor es:

$$\frac{H}{v L^2 \rho_{cp} T}$$

con este grupo en la ecuación anterior y sustituyendo  $v = L/t$

$$\Phi \left( \frac{\rho_{cp} v}{\sigma e t^3}, \frac{T_1}{T_2}, \frac{\rho_{cp} L v}{k}, \frac{H}{k L T} \right) = \text{constante}$$

I      II      III      IV

Los términos de la ecuación significan

- I Razón de transporte por movimiento de fluido a radiación
- II Razón de temperatura absoluta



la forma dimensional de la ecuación es:

$$\left[ \frac{va}{L} \right] + \left[ \frac{aD}{L^2} \right] = - \left[ \frac{a}{t} \right]$$

Los términos I y III son dimensionalmente equivalentes, quedando un grupo adimensional que se expresa de la forma siguiente:

$$\textcircled{\text{I}} \left( \frac{vL}{D} \right) = \text{constante}$$

o para estado inestable:

$$\textcircled{\text{II}} \left( \frac{L^2}{Dt} \right) = \text{constante}$$

La ecuación adimensional para el estado estacionario derivado de la ecuación de Navier-Stokes es:

$$\textcircled{\text{I}} \left( \frac{\rho vL}{\mu}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \frac{vL}{D} \right) = \text{constante}$$

Si al último grupo lo dividimos entre el número de Reynolds, se obtiene un grupo con propiedades físicas del fluido únicamente y la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\textcircled{\text{II}} \left( \frac{\rho vL}{\mu}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \frac{\mu}{\rho D} \right) = \text{constante}$$

el grupo que resulta de dividir el último término entre el número de Reynolds se llama número de Schmidt o grupo de Schmidt.

## PROCESOS QUÍMICOS

Como procesos químicos tomaremos a las reacciones químicas y -- que se llevan a cabo en un medio fluido acompañados por desprendimiento o absorción de calor, dependiendo de la exotermicidad o endotermicidad de la reacción. La velocidad con que se sucede una reacción es fuertemente influenciada por la temperatura, por la concentración de productos y reactantes y por el patrón de flujo del fluido y de la velocidad de transferencia de masa. Considerando los parámetros anteriores, la representación matemática de un proceso químico homogéneo requiere: la ecuación de Navier-Stokes, gobernando el flujo del fluido, una ecuación que relacione la velocidad de transferencia de calor con la velocidad de evolución de calor, y una ecuación adicional, relacionando velocidad de transferencia de masa, con velocidad de consumo de reactantes o formación de productos. También se deberá tomar en cuenta una ecuación que relaciona velocidad de reacción con temperatura y concentración de reactantes.

La ecuación que comprende transferencia de calor por convección y conducción, y velocidad de evolución de calor es:

$$q_r = \rho_{cp} (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}) + k (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}) + \rho_{cp} \frac{\partial T}{\partial t}$$

dimensionalmente esta ecuación se puede expresar como:

$$\left[ \frac{\rho_{cp} v T}{L} \right] + \left[ \frac{k T}{L^2} \right] + \left[ \frac{\rho_{cp} T}{t} \right] = [q_r]$$

La ecuación adimensional es:

$$\Phi \left( \frac{\rho_{cp} v L}{k}, \frac{q_r L}{\rho_{cp} v T} \right) = \text{constante}$$

La ecuación de transferencia de masa es:

$$r = \left( u \frac{\partial a}{\partial x} + v \frac{\partial a}{\partial y} + w \frac{\partial a}{\partial z} \right) + D \left( \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial a}{\partial t}$$

y la ecuación adimensional es:

$$\textcircled{0} \left( \frac{vL}{D}, \frac{rL}{av} \right) = \text{constante}$$

En todo proceso la pérdida de calor por radiación no se puede evitar, por lo que este concepto no se puede despreciar y deberá ser tomada en cuenta, y la ecuación adimensional para una reacción química homogénea que se lleva a cabo en un medio fluido en movimiento es:

$$\textcircled{0} \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v^2}{2g}, \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \frac{\rho c_p v L}{k}, \frac{qrL}{c_p v T^3}, \frac{vL}{D}, \frac{rL}{av}, \frac{Q}{\sigma e T^4}, \frac{T_1}{T_2} \right) = \text{constante}$$

I    II    III    IV    V    VI    VII    VIII    IX

Quando la fuente de calor es la misma reacción (únicamente), Q es el término VIII se reemplaza por  $qrL^3$ , los términos III y IV se convierten en los números de Prandtl y Schmidt, dividiéndolos por el término I, los términos V y VIII se dividen por VII y se elimina r.

En los sistemas reaccionantes los efectos gravitacionales y fraccionales son despreciables, en cuyo caso se omiten los términos II y III, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{rL}{av} = \textcircled{0} \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{c_p \mu}{k}, \frac{\mu}{\rho D}, \frac{qa}{\rho c_p T}, \frac{qav}{\sigma e T^4}, \frac{T_1}{T_2} \right) \dots \dots \dots (A)$$

I            II    III    IV    V    VI    VII

El significado de los términos de la ecuación es el siguiente:

- I Razón de concentración de productos a reactantes después de un tiempo dado o tramo recorrido (reactor-tubular)
- II Número de Reynolds, representa la razón de fuerzas inercial a viscosa y gobernando el patrón de flujo, y por con-



siguiente la distribución estadística de tiempos de residencia entre las moléculas reactantes

- III Número de Prandtl, representa la razón de calor transferido por transporte de masa y el calor transferido por conducción
- IV Número de Schmidt, representa la razón de material transferido por transporte de masa y material transferido por difusión molecular
- V Razón de contenido de calor químico potencial a contenido de calor sensible por unidad de volumen
- VI Razón de calor químico potencial transferido por transporte de masa a calor radiado
- VII Razón de velocidad de emisión caliente y superficie de radiación frfa.

Si los efectos de radiación se omiten por ser despreciables, los términos VI y VII se pueden omitir y la ecuación resultante es dimensionalmente equivalente a la ecuación derivada por Damköhler para un reactor continuo

$$\frac{\tau L}{av} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{c_p \mu}{k}, \frac{\mu}{D}, \frac{q_a}{\rho c_p T} \right)$$

Como alternativa si se compara el calor transmitido por radiación y conducción y el resultado es que el calor por conducción es despreciable, como el caso de una combustión o una reacción gaseosa a alta temperatura los términos III y V pueden ser omitidos y la ecuación adimensional queda en la forma siguiente:

$$\frac{\tau L}{av} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{\mu}{\rho D}, \frac{q_{av}}{\sigma \epsilon_r T^4}, \frac{T_1}{T_2} \right)$$

## VELOCIDAD DE REACCION

La velocidad de reacción no es una variable controlable directamente, sino que depende de las variables controlables, como son temperatura y concentración.

La ecuación de velocidad de reacción para una reacción química homogénea es:

$$r = K_n F(a_1, a_2, \dots, a_n)$$

Las dimensiones de  $K_n$  varían con el orden de la reacción y el producto  $K_n(a_1, a_2, \dots, a_n)$  siempre tiene  $ML^{-3}t^{-1}$ , el valor de  $K_n$  está fuertemente influenciada por la temperatura de reacción concordando con la ecuación de Arrhenius

$$K_n = A T^{\frac{1}{2}} e^{-E/RT}$$

la combinación de las dos ecuaciones anteriores y considerando que las concentraciones  $a_2, \dots, a_n$  proporcionales a  $a_1 = a$ , el grupo  $r/\text{av}$  se reemplaza por los dos grupos siguientes:

$$\frac{K a^{2n-2} L^2 T}{v^2} \qquad \frac{E}{RT}$$

o para estado inestable

$$K a^{2n-2} t^2 T \qquad \frac{E}{RT}$$

La ecuación de Arrhenius no aumenta el número de grupos adimensionales requeridos para especificar la similitud química, sin embargo el

grupo de Arrhenius  $E/RT$  puede reemplazar uno de los grupos de temperatura o ser combinado con el grupo de temperatura, eliminando la temperatura desde el  $V$  término en la ecuación (A) de la manera que se indica:

$$\frac{q_a}{\rho_{cp}T} \div \frac{E}{RT} = \frac{q_a R}{E_{cp}}$$

la ecuación (A) queda en la siguiente forma

$$\frac{K_a^{2n-2} L^2 T}{v^2} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{c_p \mu}{k}, \frac{\mu}{\rho D}, \frac{q_a R}{E_{cp}}, \frac{q_a}{\rho e T^{\theta}}, \frac{T_1}{T_2} \right)$$

Para reacciones por lotes (batch) el grupo  $i$  es reemplazado por

$$K_a^{2n-2} t^2 T$$

Esta última ecuación es aplicable a reacciones irreversibles únicamente o en el caso de reacciones simultáneas con el mismo orden, pero sin las reacciones simultáneas son de órdenes diferentes el grupo  $i$  deberá ser reemplazado por varios grupos, uno para cada orden de reacción.

## REACCIONES HETEROGÉNEAS

La velocidad de una reacción química heterogénea depende del área interfacial entre las fases en este caso el grupo:

$$\frac{rL}{av} = \frac{r'sL}{av}$$

y para sistemas geoméricamente similares  $s \propto L$  y  $r'sL/av$  se transforma en  $r'/av$

En una reacción química heterogénea la velocidad de reacción es una función compleja de concentración de reactantes y es afectada por tales factores como la extensión o grado, para el cual los reactantes y productos son absorbidos en la interfase y cualquier actividad catalítica específica que la interfase pueda poseer.

La ecuación que representa lo anterior es:

$$r' = \Phi [K'n F_{cc}(a_1 a_2 a_3 \dots a_n)]$$

Las dimensiones de  $K'n$  varían con el orden de la reacción de forma que el producto  $K'n (a_1, a_2, \dots, a_n)$  siempre tiene las dimensiones  $ML^{-2}t^{-1}$ .

La velocidad de reacción heterogénea  $r'$  conforme a una ecuación de Arrhenius modificada en la que  $E$  es reemplazada por la energía de activación aparente  $E'$  incluye efectos, debido a colores de absorción y el grupo (1) de la ecuación (B) para reacciones heterogéneas es:

$$\frac{K'_{cc} s a^{2n-2} L^2 T}{v^2}$$

y para el estado inestable:

$$K'_{cc} s a^{2n-n} t^2 T$$

## EL REGIMEN

El régimen se considera como la fuerza particular, flujo o factor de resistencia que controla la razón total de cambio en un sistema, - en otras palabras, el régimen distingue los factores que gobiernan la velocidad de un proceso determinado dentro de un sistema, así en un sistema estático el régimen hace distinción de los factores que rigen los desplazamientos.

En el caso de un proceso químico, el estudio de Laupichler acerca de la reacción catalítica del gas de agua se encontró que la velocidad de reacción es inversamente proporcional a un factor de resistencia de - reacción total R, expresada por la ecuación:

$$R = \frac{1}{k \cdot \zeta_m} + \frac{S}{D}$$

El primer término del lado derecho se denomina resistencia de - conversión, y el segundo, resistencia de difusión, estos términos se consideran convenientes para la caracterización de reacciones químicas.

En la reacción catalítica del gas de agua la velocidad de reacción es lenta comparada con la velocidad de difusión de los reactantes y es controlada por la resistencia de conversión, ya que la resistencia de difusión es despreciable.

En reacciones heterogéneas, como la absorción de amoníaco gaseoso en ácido sulfúrico, la resistencia de conversión es baja y la velocidad total es controlada por la resistencia de difusión.

La resistencia de conversión es una función inversa de la velocidad de reacción, entonces cuando este factor determina la velocidad de reacción total se dice que el sistema está sujeto a un "régimen químico" si la resistencia de difusión es el factor controlante, la velocidad de reacción depende de la dinámica del fluido del sistema y, entonces, está sujeto a un "régimen dinámico".

De forma similar la transferencia de calor está sujeta a un régimen dinámico, donde la convección forzada es determinante en la velocidad determinante del proceso, en casos donde la velocidad es determinada por convección natural o por radiación el régimen es térmico.

El régimen depende de las magnitudes relativas de las varias resistencias y éstas variarán con las condiciones de operación, en una reacción química sujeta a régimen dinámico, el aumento de agitación puede disminuir eventualmente la resistencia de difusión, a tal grado que la resistencia de conversión predomina y el régimen cambia a "régimen químico".

El régimen intermedio en el que la resistencia de difusión y la resistencia de conversión son considerables se llama "régimen mezclado". Existen varias posibles variantes de acuerdo a la naturaleza de la fuerza impulsora o factor de resistencia que controla la resultante y así el régimen puede ser estático, dinámico, térmico o químico.

Un régimen dinámico puede ser controlado por la razón de fuerzas inercial a viscosa, gravitacional o tensión superficial.

Para la escalación o disminución de escala confiable de un proceso físico o químico se deben tomar en cuenta dos condiciones, las cuales son necesarias:

1. El régimen debe ser relativamente puro, es decir, que la velocidad de reacción dependa principalmente de un simple grupo adimensional.
2. El régimen debe ser del mismo tipo en escala pequeña y escala mayor.

El peligro de un cambio de régimen ocurre principalmente cuando es necesario extrapolar la relación de similitud, lo que no debe ocurrir sino que el régimen debe prevalecer.

Para comprobar que el régimen prevalece existen dos métodos: - uno teórico, que consiste en estudiar la ecuación de velocidad y calcular el orden de magnitud de los factores de resistencia separados, componentes de la fuerza impulsora o flujos, los que se combinan para determinar la velocidad de reacción total, y otro empírico que consiste en observar experimentalmente el efecto de ciertas variables sobre la velocidad de reacción total, no es necesario conocer la ecuación de velocidad de reacción del sistema y es aplicable donde las resistencias difusional y química están involucradas, para el diseño de la planta y selección de condiciones de operación de este tipo de sistemas será tomado en cuenta el tipo de régimen que prevalezca, y para determinarlo se debe observar el efecto de la temperatura y del grado de agitación sobre la velocidad de reacción total.

#### EFFECTO DE TEMPERATURA

Dependiendo del tipo de reacción, ya sea exotérmica o endotérmica, será el efecto ocasionado por la temperatura mas en forma general y aplicado a reacciones físicas y químicas un aumento en temperatura tenderá a aumentar la velocidad de reacción por disminución del factor de resistencia en la ecuación de velocidad generalizada.

Para una ecuación química balanceada, un aumento en temperatura puede llevarla el equilibrio en una dirección que reduce la fuerza impulsadora de la reacción.

En reacciones físicas, tales como transferencia de calor o masa también tienden a ser aceleradas por un aumento en temperatura especialmente cuando toman lugar en fase líquida, el factor principal es la reducción de viscosidad, en el caso de transferencia de masa hay un aumento en difusividad o coeficiente de difusión.

Comparando velocidad de reacción química y difusividad, se considera que fluidez es la inversa de viscosidad.

La velocidad de reacción química y la fluidez y difusividad de líquidos todas concuerdan con ecuaciones exponenciales, relacionándolas con la temperatura absoluta.

Las tres ecuaciones son:

$$k = A e^{-E/RT}$$

$$\frac{1}{\mu} = B e^{-E_v/RT}$$

$$D = C e^{-E_d/RT}$$

donde las constantes A, B y C son definidas por las ecuaciones siguientes según Glasstone, Laidler y Eyring:

$$A = a T^{\frac{1}{2}}$$

$$B = b T^{2/3}$$

$$C = c T^{\frac{1}{2}}$$

las constantes a, b, y c son constantes verdaderas y A, B y C se consideran constantes en un pequeño rango de temperatura.



## EFECTO DE AGITACION

El aumento del grado de turbulencia en un medio fluido, es el efecto general de la agitación, reduciendo el espesor de películas límite en conductos rectos y también disminuye la resistencia en procesos de transferencia de calor o masa por efecto de convección.

La ecuación de velocidad para transferencia de calor, bajo un régimen dinámico controlado por viscosidad, es:

$$\frac{hL}{k} = \left(\frac{\rho vL}{\mu}\right)^x \left(\frac{c_p \mu}{k}\right)^p$$

la ecuación correspondiente para transferencia de masa es:

$$\frac{KL}{D} = \left(\frac{\rho vL}{\mu}\right)^x \left(\frac{\mu}{\rho D}\right)^q$$

Comparando los sistemas a diferentes valores de  $v$ , obtenemos para ambos:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^x$$

Para un flujo en línea recta, el valor de  $X$  es cero, lo que indica que el movimiento laminar del fluido no contribuye a la transferencia de calor o masa y la conducción o difusión procede como un fluido estacionario. Para flujo turbulento con interfase mezclada como un sistema de un sólido en un líquido el valor de  $X$  varía de 0.6 a 0.8, de acuerdo a

la geometría del sistema. Para un sistema líquido-líquido o líquido-vapor en flujo turbulento con interfase libre, la agitación tiene dos efectos, disminuye la resistencia a la transferencia en la interfase y aumenta el área interfacial, por dispersión más completa de una fase en la otra.

Para líquidos inmiscibles, el efecto combinado produce valores de  $X$  de 3.8 a 5.0 de acuerdo a la geometría del sistema.

En forma general, un proceso fluido sujeto a un régimen dinámico en la región turbulenta, tiene una velocidad de reacción dependiente - de la velocidad del fluido elevada a alguna potencia o a la velocidad de agitación.

## CRITERIO DE SIMILITUD Y ECUACIONES DE ESCALACION

El criterio de similitud de un sistema depende del tipo de régimen que existe en él, y como consecuencia a cada criterio le corresponden una serie de ecuaciones de escalación.

Estos criterios de similitud para los principales tipos de régimen conocidos en Ingeniería Química acompañados de varias ecuaciones de - escalación dan las razones entre cantidades correspondientes.

En sistemas homólogos, las cantidades correspondientes están re lacionadas en términos de la razón de escala.

En estos sistemas, la forma de los miembros sólidos correspon - dientes o de las superficies sólidas que encierran el fluido son geométri - camente similares y también las composiciones químicas y propiedades ffsi - cas en puntos correspondientes son idénticas.

### REGIMEN ESTÁTICO

Este tipo de régimen se interesa en la deformación de cuerpos - sólidos y estructuras bajo esfuerzos, y para que exista similitud se re - quiere que los cuerpos geoméricamente similares sufran deformaciones geo - métricamente similares, estas deformaciones deben ser iguales en puntos - correspondientes.

Para este tipo de régimen existen dos tipos de sistemas a ser - considerados y son aquellos en los que el esfuerzo es debido a una carga externa y sistemas donde los esfuerzos son generados por la masa de la es

estructura.

#### CARGA CONTROLANTE

En este tipo de estructuras el peso de la misma se considera - despreciable comparada con la carga aplicada externamente, el criterio de similitud depende de la deformación en el rango elástico bajo el punto de cedencia del material de construcción de la estructura.

Este criterio de similitud en el rango mencionado es:

$$\delta = \frac{F}{EA} = \text{constante}$$

usando la relación de escala para cantidades, obtenemos la ecuación de escalación:

$$F = EL^2$$

y el sistema homólogo:

$$F = L^2$$

En el rango plástico, la forma de la relación es similar, pero el módulo de elasticidad es reemplazado por el esfuerzo de cedencia y el criterio de similitud es:

$$\delta = \frac{F}{YA}$$

y la ecuación de escalación es:

$$F = \gamma L^2$$

que se reduce en el sistema homólogo a:

$$F = L^2$$

#### MASA CONTROLANTE

Las estructuras sólidas sufren ciertas deformaciones debido a su propio peso, estas deformaciones pueden ser determinadas por observación de modelos apropiados, en el caso de un cuerpo rotante, la fuerza centrífuga es una función de la masa, y puede usarse un modelo para predecir el punto de falla.

Existen cuatro criterios de similitud que dependen de la fuerza que actúa sobre la masa, ya que puede ser gravitacional o centrífuga y de la deformación resultante que puede ser plástica o elástica.

Considerando la deformación plástica bajo gravedad, la fuerza debida al peso de la estructura es proporcional a  $\rho L^3 g$  y se obtiene el siguiente criterio:

$$\bar{\sigma} = \frac{Lg}{E} = \text{constante}$$

En este caso la fuerza que actúa sobre la masa es la gravedad y la ecuación de escalación correspondiente es:

$$L = \frac{E}{\bar{\sigma}}$$

no hay ecuación de escalación para sistema homólogo, de manera que estructuras geoméricamente similares, fabricadas del mismo material que el modelo, no sufren distorsiones geoméricamente similares.

Para deformación plástica bajo la acción de la gravedad, el criterio de similitud correspondiente es:

$$\gamma = \frac{\rho L g}{Y}$$

y la siguiente ecuación de escalación:

$$L = \frac{Y}{\rho}$$

En los sistemas centrífugos la dirección de la fuerza que actúa sobre la masa es radial y varía con la velocidad y el radio y consecuentemente la similitud entre sistemas homogéneos es posible, la fuerza centrífuga es proporcional a  $N^2 L^2$  y se obtiene el siguiente criterio de similitud para la deformación elástica:

$$\gamma = \frac{\rho N^2 L^2}{E}$$

y la ecuación de escalación:

$$N = \frac{1}{L} \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

o para el sistema homólogo:

$$N = \frac{1}{L}$$

Para la deformación plástica y falla última bajo la acción de una fuerza centrífuga el criterio de similitud es:

$$\gamma = \frac{\rho N^2 L^2}{Y^2}$$

y la ecuación de escalación:

$$N = \frac{1}{L} \left( \frac{Y}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

o para el sistema homólogo

$$N = \frac{1}{L}$$

#### RÉGIMEN MEZCLADO

El régimen estático es mezclado cuando las deformaciones son debidas parcialmente al peso o masa de la estructura y parcialmente a una fuerza o carga aplicada externamente.

Tomando en cuenta las condiciones mencionadas, la similitud estricta no es posible entre modelo y prototipo, pero se puede alcanzar una aproximación de similitud cuando las cargas o fuerzas aplicadas se consideran o pueden ser consideradas distribuidas de igual forma que el peso de la estructura, para el caso de deformación elástica el criterio es:

$$\gamma = \frac{F + mg}{EA} = \text{constante}$$

expresando  $mg = w$ , obtenemos la ecuación de escalación:

$$W + w = EL^2$$

$$W + w = \frac{W^1 + w^1}{W + w}$$

Para calcular las magnitudes de las cargas aplicadas para deformaciones totalmente similares, se debe conocer L, E y  $\rho$ .

#### REGIMEN DINAMICO

Un sistema dinámico puede consistir de cuerpos sólidos únicamente o de cuerpos sólidos y fluidos. Los sistemas fluidos puros no existen por que todo fluido alguna vez estuvo o estará en contacto con un sólido, sin embargo y por conveniencia, se puede hacer referencia a un sistema - fluido, ya que la influencia del límite sólido no es implicado.

#### SISTEMAS FLUIDOS

Los criterios de similitud para sistemas fluidos son derivados desde las ecuaciones de movimiento suplementadas con Análisis Dimensional.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan el movimiento de - - fluidos viscosos es la de Navier-Stokes:

$$\frac{\Delta p}{L} = \rho \left( \frac{v^2}{L}, \frac{\mu v}{L^2}, \rho g \right)$$

dividiendo la ecuación por  $v^2/L$ , queda de la forma siguiente:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \rho \left( \frac{vL}{\mu}, \frac{v^2}{Lg} \right)$$



Esta ecuación adimensional describe el movimiento de un fluido viscoso. La ecuación de Navier-Stokes no toma en cuenta los efectos de superficie o tensión interfacial, que es importante en sistemas donde un fluido está disperso en otro en forma de gotas.

El Análisis Dimensional indica que estos efectos son función - del grupo adimensional  $\rho v^2 L / \sigma$ , entonces la ecuación adimensional completa que describe los efectos no tomados en cuenta por la ecuación de Navier--Stokes, es:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v^2}{Lg}, \frac{\rho v^2 L}{\sigma} \right)$$

En esta ecuación el grupo de la izquierda es el coeficiente de presión y los de la derecha son: el número de Reynolds, el número de Froude y el número de Weber, respectivamente.

Para sistemas homólogos que tienen el mismo fluido o fluidos en cubiertas geoméricamente similares de diferentes magnitudes absolutas, - los tres grupos de la derecha son totalmente incompatibles debido a que - las relaciones requeridas entre velocidades correspondientes y longitudes correspondientes, son:

Número de Reynolds	$v \propto \frac{1}{L}$
Número de Froude	$v \propto (L)^{\frac{1}{2}}$
Número de Weber	$v \propto \frac{1}{(L)^{\frac{1}{2}}}$

Por el uso de fluidos con propiedades físicas diferentes en los dos sistemas y la selección de razones de escala de velocidad y lineal - apropiadas, es teóricamente posible satisfacer dos de los tres criterios adimensionales en forma simultánea.

Es deseable que las reacciones y operaciones físicas se lleven a cabo bajo condiciones, de manera que cada velocidad de reacción sea controlada por un grupo o número adimensional en forma predominante.

Esto conduce a tres subdivisiones del régimen dinámico de fluidos, conforme al número o grupo que predomine como son: el número de Reynolds, el número de Froude y el número de Weber.

Estos tres tipos de régimen dinámico de fluidos pueden describirse como controlado por tensión superficial.

#### REGIMEN DINAMICO CONTROLADO POR VISCOSIDAD

Este régimen es uno de los más importantes en ingeniería química, ya que muchas operaciones unitarias se llevan a cabo en sistemas cerrados y bajo condiciones de convección forzada y en estas circunstancias se llevan a cabo procesos de: fricción de fluidos, transferencia de calor y transferencia de masa, conforme a un régimen dinámico gobernado por la viscosidad cinemática del fluido.

Las ecuaciones de velocidad para el régimen mencionado han sido determinadas de manera empírica para distintos tipos y formas de sólidos, pero para sistemas de forma poco usual o complicada es necesario hacer uso de modelos experimentales, a fin de predecir el funcionamiento a escala mayor.

Para este régimen, la ecuación de movimiento adimensional generalizada se reduce a:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu} \right)$$

con el siguiente grupo de ecuaciones de escalación:

$$v = \frac{u}{\rho L} = \frac{\nu}{L}$$

$$q = \frac{uL}{\rho} = \nu L$$

$$\Delta p = \frac{u^2}{\rho L}$$

$$p = \frac{u^3}{\rho^2 L}$$

Para sistemas homólogos  $\rho$  y  $\mu$  toman un valor unitario y las ecuaciones de escalación se reducen a:

$$v = p = \frac{1}{L}$$

$$q = L$$

$$\Delta p = \frac{1}{L^2}$$

Los procesos de transferencia de calor y masa por convección - forzada están representadas por las ecuaciones siguientes.

Para transferencia de calor:

$$\frac{hL}{k} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{c_p \mu}{k} \right)$$

Para transferencia de masa:

$$\frac{KL}{D} = \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{\mu}{\rho D} \right)$$

Como los grupos o números de Prandtl y Schmidt contienen únicamente propiedades físicas del fluido, entonces en sistemas homólogos se mantienen constantes.

En el caso de sistemas diferentes (no homólogos) los números de Prandtl y Schmidt son generalmente diferentes, pero la diferencia es pequeña y puede ser ignorada y las ecuaciones de escalación son para sistemas diferentes, son:

$$h = \frac{k}{L}$$

$$K = \frac{D}{L}$$

$$H = kLAt$$

$$m = DLAC$$

y para sistemas homólogos:

$$h = K = \frac{1}{L}$$

$$H = m = L$$

## REGIMEN DINAMICO CONTROLADO POR GRAVEDAD

El efecto de gravedad en sistemas gaseosos son despreciables - excepto cuando hay grandes diferencias de densidad, debido a sus gradientes de temperatura o concentración, en sistemas líquidos el control por - gravedad se encuentra donde una superficie libre de líquido está sujeta a disturbios para este fenómeno, el criterio de similitud es el grupo o número de Froude y la ecuación adimensional se reduce a:

$$\frac{A_p}{\rho v^2} = \Phi \left( \frac{v^2}{Lg} \right)$$

y las ecuaciones de escalación son:

$$v = (L)^{\frac{1}{2}}$$

$$q_v = L^{2.5}$$

$$A_p = \rho L$$

$$P = \rho L^{3.5}$$

En recipientes geoméricamente similares o pasajes de flujo - cualquiera de las ecuaciones de escalación se satisface cuando las otras también son satisfechas. El consumo de potencia se refiere únicamente a la potencia que se consume para elevar el material y no a aquella que se consume por fricción del fluido.

## REGIMEN DINAMICO CONTROLADO POR TENSION SUPERFICIAL

Un sistema compuesto dos líquidos Inmiscibles y es agitado; uno de los líquidos se dispersa en el otro en forma de pequeñas gotas, si se

considera que las viscosidades son bajas y sus densidades son cercanamente iguales, los efectos de viscosidad y gravedad sobre el patrón de flujo pueden ser despreciables.

El grado de dispersión y el rango de tamaño de las gotas depende únicamente de la geometría del sistema, grado de agitación y tensión superficial de los dos líquidos. El mecanismo de dispersión es que a través de la turbulencia, los glóbulos de la fase dispersa están girando y por acción de la fuerza centrífuga se rompen en glóbulos de menor tamaño hasta alcanzar un orden de magnitud en las que se balancean la fuerza centrífuga con la tensión superficial, manteniendo el tamaño de los glóbulos.

Para similitud dinámica, el criterio es una razón constante de fuerzas centrífuga a interfacial.

$$\frac{\rho v^2 L}{\sigma} = \text{constante}$$

El grupo anterior es conocido como el grupo o número de Weber y su constancia define la condición bajo la que un sistema de dos fases líquidas forma dispersiones geométricamente similares.

Para sistemas homólogos, las ecuaciones de escalación son:

$$\begin{aligned}v &= \frac{1}{(L)^{1/2}} \\N &= \frac{1}{(L)^{3/2}} \\S &= \frac{1}{L}\end{aligned}$$

La razón del consumo de potencia no puede ser calculado desde el grupo de

Weber, sino que depende del número de Reynolds de la fase continua, y en sistemas homólogos es imposible que el número de Weber sea igual al número de Reynolds.

## REGIMEN TÉRMICO

Cuando el criterio de similitud no puede ser formulado únicamente en términos de masa, longitud y tiempo, aún en sistemas homólogos, sino que también deben tomarse en cuenta las diferencias de temperatura, entonces se dice que existe un régimen térmico.

En un sistema de transferencia de calor pueden tomar parte cinco procesos, en los que no hay acción química y ellos son: el transporte de calor por movimiento másico de material, transferencia de calor por conducción, transferencia de calor por convección natural, transferencia de calor por convección forzada, y transferencia de calor por radiación.

La ecuación generalizada que representa el régimen térmico es:

$$\frac{H}{kL\Delta T} = \frac{hL}{k} = \Phi \left( \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{c_p \mu}{k}, \frac{\beta g \Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2}, \frac{\rho c_p v}{G_e T^3}, \frac{T_a}{T_r} \right)$$

Por análisis de la ecuación anterior se llega a la conclusión de que solamente existen dos regímenes estrictamente térmicos, y son controlados por convección natural y por radiación.

## REGIMEN TERMICO CONTROLADO POR CONVECCION NATURAL

Este régimen está representado por la ecuación adimensional generalizada y reducida a:

$$\frac{H}{kL\Delta T} = \Phi \left( \frac{\beta g \Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2}, \frac{c_p \mu}{k} \right)$$

El primer requerimiento para Similitud Térmica es que el número de Prandtl en los dos sistemas sea aproximadamente igual, en base a esta consideración y con un valor unitario para  $g$ , se obtienen las siguientes ecuaciones de escalación:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{u^2}{\beta \rho^2 L^3} \\ H &= \frac{k u^2}{\beta \rho^2 L^2} \\ h &= \frac{k}{L} \end{aligned}$$

Para sistemas homólogos:

$$\Delta T = \frac{1}{L^3}$$

## REGIMEN TERMICO CONTROLADO POR RADIACION

Un sistema de flujo continuo, en el que se aprecian únicamente procesos de transferencia de calor por: conducción, radiación y transporte masico de material caliente, viene representado por la ecuación adimensional generalizada reducida a:



$$\frac{H}{kL\Delta T} = \frac{hL}{k} = \left( \frac{\rho c_p v}{\sigma^2 e T^3}, \frac{T_1}{T_2}, \frac{\rho c_p v L}{k} \right)$$

Para sistemas totalmente homólogos y geoméricamente similares, pero de tamaños diferentes, los grupos de Radiación y de Peclet son incompatibles y como consecuencia  $v$  es constante en el precedente y es inversamente proporcional a  $L$  en el último, resultando que aunque se elimine la convección hay tendencia a un régimen mezclado.

En muchos sistemas radiantes conocidos en la práctica, los efectos de convección o convectivos son despreciables, debido a la alta viscosidad cinemática de los gases calientes y la conducción es importante sólo que afecta la pérdida de calor a través de las paredes.

En estos casos, no es necesaria una similitud estricta con respecto a conducción y la similitud con respecto a radiación y transporte másico puede lograrse.

Considerando dos recipientes de reacción geoméricamente similares en sus dimensiones internas, pero no necesariamente en el espesor de sus paredes, y representando la diferencia de temperatura a través de las paredes por  $\Delta T$  y el cambio de temperatura del fluido por pasar a través del recipiente por  $\delta T$ , obtenemos que la velocidad de transporte másico de calor está dado por:

$$\rho c_p v L^2 \delta T$$

mientras que la velocidad de conducción a través de las paredes es proporcional a:

$$k L^2 \Delta T/w$$

Entonces se deduce que la razón de calor transportado a calor - perdido por conducción es:

$$\frac{\rho_{cp} v \delta T w}{k \Delta T}$$

siendo este grupo una modificación del número de Peclet, considerando que la conducción térmica es despreciable y obtenemos la ecuación:

$$\frac{H}{\rho_{cp} v L^2 \delta T} = \left( \frac{\rho_{cp} v}{\sigma \epsilon T^3} \cdot \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{\rho_{cp} v \delta T w}{k \Delta T} \right)$$

Los grupos de radiación y Peclet modificados no tienen una gran incompatibilidad, por lo que para sistemas homólogos fluidos, en los que las temperaturas correspondientes son iguales,  $T_1/T_2$  es constante y  $\delta T=1$ , entonces las ecuaciones de escalación para similitud son:

$$v = 1$$

$$\frac{k \Delta T}{w} = 1$$

$$H = L^2$$

Esto indica que las velocidades de los fluidos y las pérdidas - de calor por conducción por unidad de área de pared, será igual en el modelo y el prototipo, y la cantidad de calor transferido en la unidad de - tiempo será proporcional al cuadrado de la dimensión lineal para la velocidad volumétrica de flujo.

Si las paredes son hechas del mismo material y sujetas a la mis ma temperatura externa, se obtiene:

$$W = 1$$

y ambos espesores de pared deberán ser iguales.

## REGIMEN QUIMICO

Cuando la velocidad total de cambio es controlada por una velocidad de reacción química prevalece un régimen químico que aparecen en uno o más criterios adimensionales.

Si la reacción principal de un régimen químico es acompañada por varias reacciones laterales, la escalación o reducción de escala del régimen es problemática, debido a que las reacciones laterales reducen la producción de la reacción principal y se comportan de diferente manera cuando se cambia el tamaño del sistema, lo que hace que el principio de similitud tenga una aplicación restringida al régimen químico, y sólo se aplica a sistemas homólogos.

Para un sistema de flujo continuo Danckwörtz propone cinco criterios adimensionales, representados en la ecuación:

$$\frac{rL}{av} = \Phi \left( \frac{rL}{aD}, \frac{qrL}{\rho C_p T v}, \frac{qrL^2}{kT}, \frac{QvL}{\mu} \right)$$

I
II
III
IV
V

Cada grupo de similitud de la ecuación como proporciones de velocidades de proceso significan lo siguiente:

I  $\frac{\text{Reacción Química}}{\text{Flujo de Masa}}$

II  $\frac{\text{Reacción Química}}{\text{Difusión Molecular}}$

III  $\frac{\text{Calor Liberado}}{\text{Calor Transportado por Flujo de Masa}}$

IV	Calor Liberado
	Calor Transportado por Conducción
V	Momentum Transferido por Flujo de Masa
	Momentum Transferido por Viscosidad

(Número de Reynolds)

transformando los grupos adimensionales en grupos más comunes y eliminando  $r$  del lado derecho

$$\frac{rL}{av} = \Phi \left( \frac{\mu}{\rho D}, \frac{ca}{\rho c_p T}, \frac{cp\mu}{k}, \frac{\rho v L}{\mu} \right)$$

Esta ecuación representa la velocidad de reacción química (grupo de velocidad de reacción del lado izquierdo) como una función de los números de Schmidt, Prandtl y Reynolds y un grupo conteniendo un término entrópico.

Si ahora consideramos el efecto de transferencia de calor por radiación se obtiene una ecuación generalizada que incluye el grupo de radiación de Tring y la relación de temperaturas absolutas.

$$\frac{rL}{av} = \Phi \left( \frac{\mu}{\rho D}, \frac{ca}{\rho c_p T}, \frac{cp\mu}{k}, \frac{\rho c_p v}{\sigma \epsilon T^3}, \frac{T}{T_r}, \frac{\rho v L}{\mu} \right)$$

Esta ecuación representa un sistema reaccionando químicamente y de flujo continuo, efectos menores como transferencia de calor por convección natural han sido despreciados, de los grupos contenidos en la ecuación algunos no pueden mantenerse constantes cuando las dimensiones del sistema cambian, en la práctica ciertos grupos pueden ser despreciados sin afectar seriamente la similitud, sin embargo, pueden introducir un --

apreciable efecto de escala.

En una ecuación simple se inicia despreciando el número de Schmidt, esto equivale a despreciar la transferencia de masa por difusión molecular, en sistemas gaseosos esta consideración puede no ser justificada donde el movimiento del fluido es de tipo laminar y para gases donde el número de Schmidt es aproximadamente constante en cualquier caso.

El número de Reynolds también es frecuentemente permisible menospreciarlo, considerando que el patrón de flujo no influye en forma significativa sobre la reacción química, estrictamente hablando, esta consideración se justifica únicamente en dos regiones extremas a números de Reynolds altos, donde el perfil de velocidades es casi plano y en la región laminar donde el perfil de velocidades es parabólico. En ambos casos la relación de velocidad media a máxima es casi constante y toma como valor mínimo 0.5 en la región laminar y 0.8 a Reynolds mayores de 10,000.

La última simplificación considerada que los gradientes de temperatura transversal dentro del sistema reaccionante son despreciables comparados con los gradientes a través de las paredes del recipiente de reacción y equivale a decir que el patrón de distribución de temperatura no tiene influencia significativa sobre la reacción, esta consideración se justifica únicamente donde los gradientes de temperatura dentro del sistema son relativamente pequeños.

En la práctica, el flujo de calor por unidad de área de pared del recipiente de reacción puede ser variado por aislamiento, enchaquetado o calentamiento eléctrico del recipiente de reacción.

Con las consideraciones anteriores, la ecuación se simplifica y queda en la siguiente forma:

$$\frac{rL}{av} = \Phi \left( \frac{qa}{\rho_{cp}T}, \frac{qv}{Hw} \right)$$

El régimen químico tiene dos subdivisiones principales de acuerdo a como se lleva a cabo la reacción principal, estas subdivisiones son sistemas homogéneos y sistemas heterogéneos. En el primer caso, el factor determinante de la velocidad es la acción de masas y en el segundo caso es la extensión de superficie o interfase entre las fases.

### REGIMEN QUIMICO CONTROLADO POR ACCION DE MASAS

La ecuación generalizada que gobierna la velocidad de una reacción química homogénea se representa en la forma siguiente:

$$r = - \frac{ca}{dt} = K_n (a_1 a_2 a_3 \dots a_n) F$$

Las dimensiones de  $K_n$  varían con el orden de la reacción, de manera que el producto  $K_n (a_1 a_2 \dots a_n)$  siempre tiene las dimensiones  $M/L^3 t$ , considerando que  $a = a_1$ , la ecuación para reacciones homogéneas es:

$$\frac{K_n F (a_1 a_2 \dots a_n)}{v} = \Phi \left( \frac{qa_1}{\rho_{cp}T}, \frac{qa_1 v}{Hw} \right)$$

y para sistemas homólogos las ecuaciones de escalación son:

$$v = L$$

$$H = L$$

$$qv = L^3$$

$$J = L^3 = V$$

El criterio de similitud consiste en tiempos de residencia iguales en la zona de reacción con pérdidas de calor superficial por unidad de área reducida en proporción de la escala lineal, esto requiere a menudo una chaqueta adiabática para el modelo y se considera que el patrón de flujo no influye la reacción y la similitud geométrica del recipiente de reacción no es necesaria.

La pérdida de calor total debe ser reducida en proporción al espacio de reacción si los recipientes no son similares geométricamente.

En reacciones químicas continuas la velocidad de flujo de reactantes debe ser establecida en términos de espacio velocidad, entonces se debe especificar igual espacio velocidad en pequeña escala y escala mayor.

#### REGIMEN QUIMICO CONTROLADO POR SUPERFICIE

En muchas reacciones químicas heterogéneas la velocidad de reacción total es controlada por la velocidad a la que las sustancias reaccionantes llegan o los productos removidos de la interfase, lo que provoca que estas reacciones estén en régimen dinámico en lugar de régimen químico.

La velocidad de una reacción química heterogénea es influenciada por factores dinámicos, el área interfacial entre las fases, el límite para el que los reactantes y productos son absorbidos en la interfase y cualquier actividad catalítica que pueda tener la interfase, de lo anterior se obtiene la ecuación generalizada que tiene la forma:

$$r = - \frac{da}{dt} = \Phi [ K_n F (a_1 a_2 a_3 \dots a_n) c^s ]$$

Las dimensiones de  $K_n$  varían en función del orden de la reacción y el producto  $K_n (a_1 \cdot a_2 \dots a_n)$  siempre tiene las dimensiones  $M/L^2 t$ .

Para sistemas heterogéneos en los que las actividades superficiales son iguales, las ecuaciones de escalación son:

$$v = H = 1$$

$$q_v = L^2$$

Para reactores catalíticos geoméricamente similares, en los que la similitud abarca las dimensiones de los granos de catalizador, las velocidades correspondientes de los fluidos son iguales en el modelo y prototipo y las pérdidas de calor por unidad de área de superficie externa son iguales, los espesores de aislamiento por variación de actividad del catalizador es posible satisfacer simultáneamente el criterio de similitud química y el número de Reynolds.

Si  $\alpha$  es variable independiente, la ecuación se transforma a:

$$v = H = \alpha$$

y para números de Reynolds iguales:

$$v = \frac{1}{L}$$

y para satisfacer ambas ecuaciones:

$$\alpha = \frac{1}{L}$$



Esta relación parece tener utilidad limitada, entonces los factores económicos requieren que el catalizador a gran escala tenga una actividad elevada y es poco probable que el catalizador modelo sea L veces más activo.

En términos de espacio velocidad, la ecuación de escalación para granos o tamaños de poro es:

$$S = \frac{1}{L}$$

Prácticamente conviene reducir la escala del grano o tamaño de poro de un sistema heterogéneo, pero como es difícil variar el tamaño de grano y poro sin variar la actividad, es mejor usar el catalizador a nivel piloto idéntico al catalizador para escala mayor.

El catalizador con tamaño de grano y poro constante tiene una ventaja particular, ya que el reactor a pequeña escala es como un elemento del prototipo y las velocidades promedio y números de Reynolds son iguales en ambos sistemas.

Para el caso general en el que las dimensiones lineales y superficies específicas son independientes uno de otro, la ecuación es:

$$\frac{K_n F(a_2, a_3, \dots, a_n) C_0^{\alpha} S L}{v} = \phi \left( \frac{q a_1}{\rho c_p T}, \frac{q a_1 v}{H w} \right)$$

Para S constante en los casos en que así se considere, las ecuaciones de escalación son:

$$V = L$$

$$H = L$$

$$qv = L^3$$
$$J = L^3 = V$$

y los requerimientos para similitud son igual espacio velocidad e iguales superficies de pérdida de calor por unidad de volumen y tiempo.

#### REGIMEN MEZCLADO

Para tratar un régimen mezclado existen tres modos principales, y son:

1. Los equipos de pequeña escala se considera que sean un elemento del prototipo antes que un modelo a escala.
2. Cambiar las condiciones de operación, de modo que un sólo tipo de régimen sea el predominante, es importante asegurar que el régimen predominante es el que controla la velocidad de reacción en pequeña escala y escala mayor.
3. Calcular el efecto de un factor controlante de la velocidad de reacción y llevar a cabo la experimentación bajo condiciones de similitud con respecto a otros factores.

Con los modos o criterios anteriores es posible fijar las ecuaciones y factores para llevar a cabo una escalación exitosa de un sistema con régimen mezclado.

## EXTRAPOLACION

La extrapolación se aplica en sistemas donde la similitud dinámica es impráctica, en estos casos algún método de extrapolación se hace necesario para que el modelo puede extrapolarse a condiciones dinámicamente disimilares en el prototipo.

En otras palabras, el asunto de la extrapolación es mejorar el parecido entre el modelo y el prototipo, considerando el diseño de una pieza de equipo como un proceso de aproximaciones sucesivas.

En el caso de querer diseñar un cambiador de calor, se hacen varias aproximaciones. La primera es considerar un valor fijo para el coeficiente total de transferencia de calor, sin embargo, ésta es una aproximación burda y requiere de un factor de seguridad grande. La segunda aproximación es calcular los coeficientes individuales de película por medio de ecuaciones de velocidad empíricas o semiempíricas, todas estas ecuaciones consideran un principio que puede ser denominado el "Principio de Similitud Extendido", si el principio de similitud se expresa por ecuaciones de la forma:

$$Q = \theta (R, S, \dots)$$

donde Q, R, S, ... son grupos adimensionales y  $\theta$  es una función desconocida, el principio extendido sustituye a  $\theta$  por una función de potencias, conduciendo a ecuaciones de la forma:

$$Q = C (R)^x (S)^y$$

siendo C, x, y ... constantes.

Los procesos físicos de transferencia de calor, masa y momentum obedecen a ecuaciones de potencias del tipo mencionado para el principio extendido.

Los exponentes empíricos  $x$  y  $y$  son ligeramente afectados por la geometría del sistema, mientras que  $C$  es bastante afectada y se considera como un factor de forma.

La tercera aproximación en diseño es eliminar el factor de forma  $C$  por comparación de sistemas de geometría similar y tomando razones de grupos adimensionales antes que los grupos mismos. Esto ocasiona experimentación con un modelo, aunque no necesariamente bajo condiciones dinámicas o térmicas similares.

Entonces la ecuación de velocidad para sistemas geoméricamente similares toma la forma:

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{R'}{R}\right)^x \left(\frac{S'}{S}\right)^y$$

De esta manera, además del factor de forma  $C$ , se cancelan también en sistemas homólogos los términos de propiedades físicas en los grupos adimensionales, quedando una relación simple entre razones de dimensiones lineales y velocidades, del tipo de las ecuaciones de escala y permanecen únicamente los exponentes empíricos  $x$  y  $y$ .

La aproximación final y teórica es eliminar  $x$  y  $y$  ó la función desconocida  $\phi$  por comparación de sistemas geoméricamente similares en valores iguales de los criterios adimensionales, así si

$$R' = R$$

$$S' = S$$

$$Q' = Q$$

Estas ecuaciones expresan el principio de similitud y definen - estados correspondientes para aumento o disminución de escala, práctica - mente los estados correspondientes son difíciles de alcanzar con mucha -- frecuencia.

Con el principio de similitud extendida y considerando la ecuación, donde se reduce únicamente el factor de forma se gana mayor grado - de flexibilidad, aunque con cierta pérdida de precisión, debido a la lige - ra variación de  $x$  y  $y$ .

Los exponentes  $x$  y  $y$  pueden determinarse de dos formas: por ex - perimentación a pequeña escala o de la literatura.

El mejor método es probablemente por experimentación en equipos a pequeña escala, debido a que provee un rango de condiciones amplio y - permite verificar que el exponente no varíe en forma apreciable. Los ex - ponentes experimentales son menores que la unidad y un error en estos cau - sa un ligero error en la función de potencias.

Para muchos procesos físicos y configuraciones geométricas más comunes, los valores de los exponentes están disponibles en la literatura con una buena confiabilidad para muchos propósitos.

El exponente más usado en extrapolación, en condiciones de simi - litud, es el índice de Reynolds, y es el exponente del número de Reynolds en las ecuaciones de velocidad empíricas para transferencia de calor, ma - sa y transferencia de momentum por convección forzada.

Otro exponente empírico empleado para extrapolación es el expo - nente  $Z$  en la ecuación de Lorenz para transferencia de calor por convec - ción natural.

La ecuación adimensional generalizada es:

$$\frac{hL}{k} = \Phi \left( \frac{Bo \Delta T L^3 Q^2}{\mu^2}, \frac{c \rho \mu}{k} \right)$$

Lorenz evaluó la función  $\Phi$  en forma teórica y obtuvo una ecuación de la forma:

$$\frac{hL}{k} = c \left( \frac{Bo \Delta T L^3 Q^2}{\mu^2}, \frac{c \rho \mu}{k} \right)$$

El valor teórico de  $Z = 0.25$ , pero Saunders encontró que varía con la magnitud del término entre paréntesis (Número de Grashof y Número de Prandtl).

Al evaluar el Número de Grashof, la dimensión lineal  $L$  se toma como la altura vertical de un serpentín o chaqueta o la anchura media de una superficie horizontal de transferencia de calor.

Para transferencia de calor por convección forzada, la ecuación de velocidad es del tipo Dittus-Boelter y cuando sistemas homólogos son comparados, las propiedades físicas y factor de forma se cancelan, y se obtiene la ecuación de escalación:

$$h = \frac{v^{xh}}{L^{1-xh}}$$

Para convección natural, la ecuación de Lorenz expresada en forma de relación se reduce a:

$$h = \frac{(\Delta T)^z}{L^{1-3z}}$$

La transferencia de masa por convección forzada sigue una ecuación similar en forma de la de Dittus-Boelter, para sistemas homólogos la ecuación de escalación viene a ser:

$$K = \frac{v^{x_m}}{L^{1-x_m}}$$

Y aplica únicamente donde el área de transferencia de masa es constante, y es estrictamente verdadero sólo para transferencia de masa de un fluido a un sólido insoluble, debido a que una interfase fluido-fluido es siempre susceptible a ser alterada y a cambiar su área por el movimiento relativo entre las fases.

Para fricción de fluidos la ecuación puede ser escrita en la forma:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} = C' \left( \frac{\rho v L}{\mu} \right)^{x_f - 1}$$

ó

$$\frac{\Delta p L}{\mu v} = C' \left( \frac{\rho v L}{\mu} \right)^{x_f}$$

conduciendo a la ecuación de escalación para sistemas homólogos:

$$\Delta p = \frac{v^{1+x_f}}{L^{1-x_f}}$$

Si modelo y prototipo operan a velocidades de fluido no menores que cuatro veces la velocidad crítica,  $X_f$  pueda considerarse como la unidad y la ecuación se modifica a:

$$\Delta p = v^2$$

Entonces la caída de presión y consumo de potencia pueden escalarse para condiciones, partiendo de similitud dinámica.

La ecuación de escalación para consumo de potencia es:

$$P = L^2 v \Delta p = v^3 L^2$$

El principio de similitud extendida es esencial en aumento o - disminución de escala para comprobar que el régimen es el mismo en modelo y prototipo y, así, evitar errores en el proceso de escalación.



## EFFECTOS DE LIMITE

Para separar un sistema experimental de los alrededores, se requiere un límite del sistema, el cual, además de lo anteriormente dicho, también delimita las variables que están bajo control del experimento.

Quando un sistema es escalado, la relación de superficie limita a volumen interno, disminuye, es decir, que la relación de recipientes - geoméricamente similares varían en forma inversa con la dimensión lineal.

Las planta de proceso se ven influenciadas en su funcionamiento por superficies o interfaces de dos clases, estas son superficies límite y superficie interior.

La superficie límite es normalmente la pared del recipiente.

La superficie interior puede estar compuesta de tubos, empaques como anillos Rashing, gránulos, etc., e interfaces de fluidos.

En aparatos a escala pequeña, que se consideran un elemento geométrico del prototipo, la relación interior de superficie a volumen es la misma en ambos, elemento geométrico y prototipo.

En el caso de un modelo o elemento modelo, la relación es mayor que en el prototipo, pero la diferencia se toma en cuenta en las relaciones de similitud, tienen también una mayor relación de superficie límite a volumen y las condiciones físicas externas al límite no necesariamente deben estar conforme al criterio de similitud interno, así pueden elevarse a la superficie límite, partiendo desde similitud, lo que se denomina efecto de límite o pared, y pueden, a menos que sea controlado, casi impo

sibilitar la predicción el funcionamiento a gran escala a partir del modelo experimental.

Los efectos de límite no pueden eliminarse aumentando el alcance del sistema bajo control.

Las paredes de un tanque pueden tener cuatro diferentes clases de efectos sobre una reacción química o física, y son:

1. Influencia del patrón de flujo del fluido y resistencia - - friccional
2. Transferencia de calor hacia o desde el sistema
3. Posibilidad de adsorción de materia desde o desorber materia a la corriente de fluido
4. Catalizar positivamente o negativamente una reacción química en la fase fluida.

#### PATRON DE FLUJO

Un modelo geoméricamente similar bajo un régimen dinámico controlado por viscosidad no sufre efectos de pared friccional. La diferencia en ambas relaciones de superficie límite a volumen, interior y exterior, se compensa por la velocidad aumentada en el modelo, ya que a números Reynolds iguales, el patrón de flujo de fluido en modelo y prototipo son similares.

En el caso de un elemento, el efecto de pared es pronunciado cuando la sección es reducida tanto que la superficie límite alcanza el mismo grado de magnitud que la superficie interior.

Esto fija un límite práctico a la sección proporcional que puede emplearse y no existe método simple para contrarrestar los efectos de la relación alta superficie a volumen sobre el patrón de flujo y arrastre friccional. En general, el mejor camino es limitar la proporción de sección de un elemento a un valor tal que la relación de superficie límite a superficie interior no exceda el 10%.

Para evaluar la resistencia friccional es preferible un modelo a escala que un elemento o elemento modelo, ya que la velocidad correspondiente para similitud no es excesiva, debido a que en el modelo a igual número de Reynolds no hay efecto de pared.

#### PERDIDA O GANANCIA DE CALOR

En operaciones y reacciones que se llevan a cabo sobre o bajo la temperatura ambiente, el flujo de calor a través de la superficie externa del aparato es el principal efecto de pared contra el que se debe proteger al sistema.

En el lado exterior del sistema existe un coeficiente de película que no es influenciada por las condiciones internas de flujo. El coeficiente de película externo tiende a ser de un orden de magnitud pequeño debido al mecanismo de convección natural comparado con el coeficiente de película interno que es influenciado por el mecanismo de convección forzada y flujo turbulento.

El resultado en forma general, es que la resistencia térmica a la transferencia de calor de la película del fluido interno es despreciable, comparada con las resistencias conocidas de la película de aire y -

aislantes si existen, como en el caso de recipientes que trabajan a temperaturas mayores o menores a la ambiente, que normalmente se aíslan por razones económicas.

El coeficiente de película interno varía con la velocidad del fluido y los coeficientes totales del interior de un recipiente al aire que lo rodea tiende a ser del mismo orden en modelo y prototipo, considerando que donde el recipiente es aislado, la misma resistencia térmica por unidad de área se aplica a ambos.

Un aparato a pequeña escala puede ser llamado "similar térmico inherente" cuando existen tres casos en los que el flujo de calor por unidad de área externa es la misma para modelo o elemento y prototipo, y son:

1. Régimen Térmico. En sistemas donde existe este régimen se plantean modelos de transferencia de calor en los que los mecanismos controlantes son radiación y conducción a través de las paredes.
2. Régimen Químico. En modelos de sistemas de reacción heterogénea con interfases fijas, en los que las superficies internas son geométricamente similares y en la misma razón de escala como el recipiente de reacción, su actividad superficial permanece constante.
3. Régimen Dinámico. Inherente a similitud térmica bajo un régimen dinámico es imposible para modelos o elementos, pero pueden ser asegurados por medio de un elemento modelo de proporciones aceptables.

Para similitud bajo un régimen dinámico, la superficie de pérdida de calor por unidad de área en un modelo a escala se requiere que sea  $L$  veces tan grande como aquel en el prototipo.

Quando opera sobre la temperatura ambiente, el modelo debe ser enfriado externamente.

Por otro lado un elemento dinámicamente similar es requerido para perder menos calor por unidad de área externa que el prototipo.

## SUPERFICIES CATALITICAS

Los efectos de superficies catalíticas deben ser detectadas en pequeña escala y considerarla para el diseño de plantas a escala mayor. Muchas reacciones químicas aparentemente homogéneas son catalizadas por las paredes del recipiente y darán producciones diferentes en recipientes de reacción diferentes bajo las mismas condiciones de tiempo y temperatura, debido a las proporciones de superficie a volumen.

## TEORIA DE MODELOS

### PROPOSITO DE UN MODELO

La aplicación directa de leyes bien conocidas, basadas en equilibrios u otras condiciones de estado, dan una simple y oportuna solución a muchos problemas de ingeniería. El número de variables o la complejidad de la situación en otros problemas, ocasiona la aplicación del tedioso procedimiento analítico usual y puede conducir a una solución matemática tediosa. Las leyes generales gobiernan el comportamiento del sistema, en otros problemas; son desconocidas y los procedimientos analíticos no han sido bien desarrollados.

Para los dos últimos grupos de problemas, el análisis dimensional, complementado con evidencia experimental, pueden conducir a la formulación de una ley general que gobierne el fenómeno bajo consideración. Sin embargo, si un gran número de cantidades primarias están involucradas, siendo éstas un número de términos; entonces la colección de datos y su subsecuente reducción a una fórmula general consume tiempo. Muchos datos suplementarios pueden ser necesarios para que el rango de la ecuación resultante sea suficientemente amplio para obviar la extrapolación en la mayoría de aplicaciones.

En muchos casos no es necesaria una fórmula general, bajo estas circunstancias un modelo puede dar el resultado deseado en forma rápida y económica.

## DEFINICION DE MODELO

Un modelo es un dispositivo relacionado con un sistema físico, y se usa para hacer observaciones sobre éste, para predecir el funcionamiento correcto del sistema físico que recibe el nombre de prototipo.

Para predecir el comportamiento de un prototipo dado, pueden usarse varios tipos de modelos, un tipo puede ser aparentemente similar al prototipo, otros diferentes pueden no parecerse al prototipo frecuentemente varias características del prototipo pueden ser predichas desde un modelo, pero es posible tener un modelo que sólo pueda predecir una sola característica.

## TEORIA DE MODELOS

Una teoría general de diseño de modelos se desarrolla con facilidad por una simple extensión de la ecuación general del prototipo, que se escribe en la forma:

$$\pi_1 = F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n)$$

Esta ecuación es totalmente general y es aplicable a cualquier sistema que sea función de las mismas variables, aplicada a un sistema específico llamado modelo, se escribe en la forma:

$$\pi_{1m} = F(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \dots, \pi_{nm})$$

Con las ecuaciones anteriores es posible encontrar una ecuación que sea capaz de predecir  $\pi_1$  desde  $\pi_{1m}$  por una simple división entre ellas:

$$\frac{\pi_1}{\pi_{1m}} = \frac{F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n)}{F(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \dots, \pi_{nm})}$$

Si el modelo se diseña y opera, de manera que:

$$\pi_{2m} = \pi_2$$

$$\pi_{3m} = \pi_3$$

$$\pi_{4m} = \pi_4$$

.

.

.

.

$$\pi_{nm} = \pi_n$$

se llega a la siguiente igualdad:

$$F(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_n) = F(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \dots, \pi_{nm})$$

dando una función idéntica entre modelo y prototipo, y aparentemente:

$$\pi_1 = \pi_{1m}$$

esta igualdad es la ecuación de predicción, válida si el diseño y condiciones de operación del modelo son satisfechas. Si las condiciones de di



seño son satisfechas, se dice que el modelo es "verdadero" y dará información precisa concerniente al funcionamiento del prototipo.

Si todas las condiciones de diseño no son satisfechas, el funcionamiento del modelo puede ser distorcionado con referencia a los factores incluidos en los términos correspondientes y la ecuación de predicción puede ser afectada en forma drástica.

En forma general, las condiciones de diseño involucran distancias indicativas de tamaño del modelo y prototipo.

La razón de alguna distancia pertinente o longitud del prototipo a la distancia correspondiente del modelo se llama "escala de longitud" y se designa como n:

$$l = nm$$

debido a que el modelo es más pequeño que el prototipo, es ventajoso que la escala de longitud sea mayor de la unidad.

## TIPOS DE MODELOS

Existen cuatro tipos de modelos, cada uno de los cuales es útil para predecir el funcionamiento del prototipo, estos cuatro tipos de modelos son:

- a) Modelos Verdaderos
- b) Modelos Adecuados
- c) Modelos Distorcionados
- d) Modelos Disímilares.

a) Los Modelos Verdaderos son modelos en los que todas las características significantes del prototipo están fielmente reproducidas a escala, siendo además geoméricamente similar al prototipo, el modelo satisface todas las restricciones que se introducen por las condiciones de diseño.

b) Los Modelos Adecuados son modelos para predecir una característica del prototipo, pero no necesariamente de otras características.

c) Un Modelo Distorsionado es aquel donde alguna condición de diseño es violada, a tal grado que la ecuación de predicción requiere de una corrección, particularmente donde esté involucrado el flujo de fluidos, es impráctico si no imposible satisfacer todas las condiciones de diseño con una escala de longitud diferente a la unidad.

d) Los Modelos Disimilares son modelos que no parecen tener semejanza aparente con el prototipo, pero que a través de analogías simples de predicciones exactas de funcionamiento del prototipo.

## ESCALAS

Para un modelo verdadero, la selección de la distancia es indiferente y todas las distancias en el modelo son  $1/n$  veces la distancia correspondiente en el prototipo, sin embargo, un modelo distorsionado puede tener más de una escala de longitud.

Oviamente otras escalas diferentes a las de longitud pueden ser planeadas, tales como: escalas de fuerza, escalas de masa, escalas de área, escalas de volumen, escalas de tiempo, escalas de velocidad, es-

calas de aceleración, etc., las escalas que se mencionan pueden ser derivadas desde las escalas de longitud y las condiciones de diseño o de la aplicación de una ley general, tal como la ley del movimiento de Newton.

## CANTIDADES PERTINENTES

La etapa más importante y más difícil en el diseño de experimentos es la determinación de las cantidades primarias significativas, cuando se han seleccionado el proceso puede llevarse a cabo con dificultades mínimas, el número de términos necesarios son estipulados por el teorema de Buckingham y técnicas para determinar un juego de términos aceptables.

Con los términos establecidos siguen los requerimientos de diseño. En algunos casos es difícil satisfacer los requerimientos de diseño, sin embargo, hay medios disponibles para vencer ciertas dificultades, en otros casos un modelo distorsionado puede llegar a ser imperativo.

Algunas dificultades involucradas en la selección de las pertinentes cantidades primarias pueden clasificarse en tres grupos generales, que son: fuerza, geometría y propiedades de materiales.

a) Fuerza. El término fuerza se usa para señalar cualquier causa que produzca un efecto medible como tendencia a alterar el estado o posición del objeto. Estas fuerzas pueden ser: pesos mecánicos, reacciones o masas, esfuerzos térmicos, cambios en temperatura o contenido de calor, esfuerzos eléctricos o magnéticos, incluyendo líneas de fuerza, flujos, fuerza electromotriz o corriente, pueden ser también esfuerzos químicos, incluyendo cambios de estado o esfuerzos electroquímicos. Todos es-

tos factores están presentes y pueden afectar las cantidades a predecir y deben ser incluidas entre las cantidades primarias. Con fuerzas variables, debe incluirse el factor de tiempo apropiado.

b) Geometría. Incluye todas las relaciones de espacio que pueden influenciar los resultados. Todas las distancias o longitudes y todos los ángulos pertinentes deben representarse, su inclusión conduce a los requerimientos de similitud geométrica de modelo y prototipo para el modelo verdadero. Si hay razones de cambio de relaciones de espacio involucradas, el factor tiempo no será ignorado.

c) Propiedades del Material. La respuesta del sistema es evidenciada por un cambio en su geometría, un cambio en fuerza es dependiente de los materiales del sistema.

Algunas propiedades indican la magnitud de la cantidad, otras el rango en que permanece constante una característica, como es el módulo de elasticidad, que indica la magnitud de la resistencia de un sólido a la deformación, el esfuerzo elástico indica la máxima resistencia a la -- que el módulo de elasticidad es una medida de la resistencia a la deformación, y debe serlo en modelo y prototipo para que exista similitud.

#### **IV. DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

## DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Diseñar un experimento es semejante a diseñar un producto, todo producto sirve a un propósito que debe ser claramente definido al principio y puede ser para optimizar un proceso, para estimar la probabilidad de que un componente opere apropiadamente bajo un esfuerzo dado por cierto período de años, para evaluar los efectos relativos sobre el funcionamiento del producto de diferentes fuentes de variabilidad, o para determinar si un proceso nuevo es superior a uno existente.

Para definir el propósito de un programa de experimentación, se debe decidir sobre su alcance.

Un experimento es generalmente un vehículo para detectar interferencia acerca del mundo real, puesto que es altamente riesgoso eliminar interferencias acerca de situaciones más allá del alcance del experimento, se debe tener cuidado al elaborar el alcance, el que debe ser suficientemente amplio.

Esto puede ser mantenido en mente si los hallazgos de laboratorio están aplicados a la línea de fabricación.

Si los resultados son dependientes del material, el material para fabricación de la unidad experimental debe ser representativo de lo que se pueda encontrar en producción.

Si el programa de pruebas es limitado a una simple variable, -

las conclusiones que se obtengan serán aplicables únicamente a dicha variable, independientemente del tamaño de la muestra. Por lo que el programa experimental debe incluir tantas variables como sean necesarias para determinar el comportamiento bajo diferentes preparaciones y condiciones de operación.

## VARIABLES

Una parte importante de la planeación experimental es la identificación de las variables que afectan la respuesta y la decisión de qué hacer.

La decisión de cómo tratar con cada una de las variables candidato puede ser hecha en conjunto por el experimentador y el estadístico, y la identificación de las variables es responsabilidad del experimentador.

Las variables controlables o independientes en un experimento estadístico puede ser distribuido de cuatro maneras diferentes.

La designación de una variable particular a una determinada categoría a menudo involucra un balance entre información costo y tiempo.

## VARIABLES PRIMARIAS

Este tipo de variables son aquellas cuyos efectos sobre el funcionamiento son evaluados directamente, estas variables son las que más probablemente crearon la necesidad de investigación y pueden ser cuanti-

tativas, tales como concentración de catalizador, temperatura o presión, o pueden ser cualitativas como, método de preparación, tipo de catalizador o proceso batch.

Las variables controlables cuantitativamente son relacionadas a la variable funcionamiento por alguna relación estadística o modelo. - El número mínimo de condiciones o niveles por variable es determinado - por la forma del modelo considerado.

Las variables cualitativas pueden ser divididas en dos categorías, el primer grupo consiste de aquellas variables cuyos efectos específicos son comparados directamente, como la comparación de dos métodos de preparación propuestos, o de tres tipos de catalizador específico, el número de condiciones requerido es evidente y se conocen como variables de efectos fijos o variables de tipo I.

El segundo tipo de variables cualitativas son aquellas cuyas - contribuciones individuales a la variabilidad de funcionamiento son evaluadas, las condiciones específicas de tales variables son determinadas - al azar y se conocen como variables de efectos al azar o variables de tipo II.

Cuando hay dos o más variables, puede haber interacción entre ellas y el efecto de una variable sobre la respuesta depende de la combinación de las otras variables.

#### VARIABLES DE FONDO Y BLOQUEO

Estas variables no son de interés primario y no pueden mante -



nerse constantes, y no deben interactuar con las variables primarias para que se introduzcan en el experimento en forma de bloques experimentales. Representando así un juego de condiciones relativamente homogéneas, dentro de las que son comparadas las diferentes condiciones de las variables primarias.

La razón principal para llevar a cabo un experimento en bloques es asegurar que los efectos de una variable de fondo no afecta la evaluación de las variables primarias.

Sin embargo, el bloqueo permite también eliminar el efecto de las variables bloqueadas del error experimental, suministrando evaluaciones más precisas de las variables primarias.

#### VARIABLES INCONTROLABLES Y RANDOMIZACION

Otras variables adicionales, como las condiciones ambientales, pueden ser identificadas pero no controladas, o son solamente ligeramente identificadas o no identificadas, pero que afectan los resultados experimentales, deben ser randomizadas, a fin de eliminar este efecto. La randomización es introducida en el experimento de varias formas, a fin de que tenga un alcance práctico.

La randomización significa que la secuencia de preparación de unidades experimentales, asignación de tratamientos, corridas de prueba, toma de datos (mediciones), etc., es determinado al azar.

El efecto total de las variables no controlables es, así, conjuntado en el error experimental como variabilidad no evaluado.

Las variables de fondo pueden ser introducidas también en el experimento por randomización más bien que por técnicas de bloqueo.

El bloqueo y randomización aseguran que las variables de fondo no perjudican la evaluación de las variables primarias.

#### VARIABLES QUE SE MANTIENEN CONSTANTES

Algunas variables deben mantenerse constantes, limitando así el tamaño y complejidad del experimento, pueden también limitar el alcance de las interferencias resultantes.

Las variables que se mantienen constantes durante todo el tiempo del experimento, deben identificarse y el mecanismo para lograrlo debe ser bien definido.

## AMBIENTE EXPERIMENTAL Y SUS LIMITACIONES

Las condiciones operacionales bajo las cuales se lleva a cabo un experimento y la forma en la que cada uno de los factores es variado, debe ser indicado con claridad.

Algunas variables pueden ser variadas más fácilmente que otras, debido a que las variables no son creadas de la misma forma.

Las consideraciones prácticas en el plan experimental indican - que en muchos programas las variables son introducidas en diferentes niveles de operación.

En situaciones, tales como la de elaborar una preparación de - tamaño regular, que permita dividirlo en varias partes para someterlo a diferentes condiciones experimentales, se denomina como experimento de - "diagrama partido", y así se obtiene información más precisa para las variables de bajo nivel. La naturaleza de "diagrama partido" en el ambiente experimental es importante en planeación y análisis del experimento.

## CONOCIMIENTO PREVIO

El conocimiento previo está disponible con mucha frecuencia - con respecto a los resultados esperados en ciertas condiciones experimentales.

Además, todas las condiciones propuestas deben ser probadas, - omitiendo las condiciones no razonables desde el diseño del experimento, ajustándolo así a la realidad.

## LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO

Las características de funcionamiento o variables dependientes a ser evaluadas, deben ser claramente establecidas, debido a que aún en experimentos bien diseñados fallan si la respuesta no se puede medir en forma apropiada, esto hace que los procedimientos estandar para medir cada variable sea establecida y documentada.

Algunas veces las variables de funcionamiento están en una escala semicuantitativa, en este caso es particularmente importante que los estándares sean desarrollados inicialmente.

## DIFERENTES TIPOS DE INFORMACION REPETIDA

Existen varias formas o modos para obtener resultados repetidos en la experimentación, esta información acerca de la repetibilidad puede ser obtenida por

- a) Tomar réplica de mediciones en la misma unidad experimental
- b) Dividir una muestra al final del experimento y obtener una lectura en cada mitad
- c) Tomar lecturas en dos muestras preparadas en forma independiente y a las mismas condiciones.

Una mejor homogeneidad entre réplica de mediciones sobre la misma muestra que sobre muestras diferentes es esperada.

## ESTIMADOS PRELIMINARES DE REPETIBILIDAD

Los estimados iniciales de repetibilidad total deberán ser obtenidos antes de iniciar cualquier programa de prueba. Esta información debe estar disponible desde pruebas previas, si no es así, corridas preliminares deberán realizarse a diferentes tiempos bajo condiciones supuestamente idénticas. Si estas corridas resultan con una variabilidad grande en funcionamiento, las variables importantes que afecten los resultados no han sido identificadas e investigación adicional puede ser necesaria antes de iniciar el experimento.

## DATOS CONSISTENTES - PROCEDIMIENTO DE REGISTRO

Procedimientos claros para registrar todos los datos pertinentes del experimento deberán ser desarrollados y documentados, y deberán establecerse formas para registros de datos, evitando ambigüedades, estas formas deberán incluir estipulaciones para registro de los valores de respuestas medidas, así como para las condiciones experimentales deseadas y las condiciones reales del experimento si éstas difieren de las planeadas.

Es generalmente preferible usar los valores de las condiciones reales en el análisis estadístico de los resultados experimentales.

En la experimentación con procesos industriales, el equilibrio del proceso debe ser alcanzado antes de que la respuesta sea medida, esto es de particular importancia cuando están involucradas en el proceso reacciones químicas complejas.

Los valores de cualquier otra variable que pueda afectar la -

respuesta, también deberá ser registrada. Es decir que las variaciones de los factores que deben mantenerse constantes, eventos especiales y - otros eventos no planeados, deberán ser registrados, los valores de tales covariantes pueden ser factorizados en el análisis estadístico de modo que se reduzca la variabilidad inexplicable o error experimental. El efecto de las covariantes si lo tienen conduce a una evaluación más precisa de las variables primarias. Alternativamente, tales covariantes - pueden estar relacionadas a la variación residual que queda después del análisis, usando técnicas gráficas u otro tipo de técnicas.

## EXPERIMENTACION EN ETAPAS

Contrariamente a la creencia popular, un experimento planeado estadísticamente no requiere que todas las comprobaciones sean conducidas a un tiempo, sino que el programa experimental puede llevarse a cabo en los datos iniciales y permite reportar conclusiones y resultados preliminares.

Si se obtienen resultados inesperados en una etapa inicial, las etapas finales deberán ser cambiadas.

Al conducir o no un programa experimental en etapas depende de los objetivos del programa y de la situación experimental específica. Una aproximación prudente de etapa dirigida es recomendada cuando las unidades están hechas en grupos o una a la vez y una rápida retroalimentación de resultados es posible.

Correr el experimento en etapas es también atractivo en investigación para una respuesta óptima, por que permite un movimiento cerrado al óptimo de etapa a etapa.

Por otro lado, un experimento de simple etapa puede ser deseable si hay altos costos de arranque en cada etapa o si hay un tiempo de espera largo entre la fabricación de la unidad y la medición de eficiencia de la misma.

Para correr un experimento en etapas deben tomarse las precauciones necesarias para asegurar que las posibles diferencias de resultados en

tre etapas no invaliden los resultados, también deben incluirse procedimientos apropiados para comparar las etapas que deben ser incluidas tanto en el plan de prueba como en el análisis estadístico.



## CONSIDERACIONES VARIAS

En el diseño de experimento y en la etapa de planeación muchas preguntas deberán ser consideradas y particularmente las siguientes, sin pretender que éstas sean las únicas.

Se debe buscar cuál es la forma más significativa para expresar las variables controlables o independientes. La selección adecuada y juiciosa de la forma de representar las variables independientes con frecuencia reducen o eliminan interacciones entre variables, de este modo conduce a un experimento y análisis simples.

Acercas del rango experimental se debe conocer cuál es el rango apropiado para las variables controlables seleccionadas, con el fin de obtener datos cuantitativos de las mismas. Si se considera una relación lineal entre estas variables y el funcionamiento, la amplitud del rango de condiciones o ambiente, lo mejor son las oportunidades de detectar el efecto de las variables.

La selección del rango de las variables dependen en parte del propósito del experimento.

Los modelos estadísticos deberán definirse claramente, por lo que se hace necesario especificar cuál es el modelo estadístico razonable o ecuación para aproximar la relación entre las variables independientes y cada respuesta de variable. Se debe considerar también si la relación pueda ser aproximada por una ecuación incluyendo términos lineales para las variables cuantitativas independientes y los términos de interacción de dos factores solamente o es un modelo más complejo, inclu-

yendo términos de interacción cuadráticos o quizás multifactores. Es de cir, que un modelo estadístico más sofisticado puede ser requerido para describir en forma adecuada las relaciones en un rango experimental amplio que sobre un rango limitado. Así, una relación lineal puede ser -- adecuada para un rango estrecho, pero no para un rango experimental amplio, y por consiguiente, un modelo más complejo debe ser considerado y más corridas experimentales serán requeridas.

La confiabilidad de los datos recae en la exactitud y precisión, por lo que se deberá aclarar qué grado de precisión y exactitud es requerida para los resultados y conclusiones finales, y así se tiene que a mayor grado de exactitud y precisión se requiere un mayor número de -- pruebas experimentales.

Hablando del funcionamiento el investigar acerca de si existen algunas marcas de banco previas de funcionamiento. Si es así, puede ser deseable, juicioso y adecuado incluir las condiciones de las marcas de - banco para checar los resultados.

Una consideración que no debe descuidarse es acerca de las técnicas usadas y debe especificarse qué técnicas estadísticas son requeridas para el análisis de los datos resultantes y si estas herramientas - pueden ser rápidamente obtenidas y realizadas tan pronto como el experimento finalice.

## EXPERIMENTACION FORMAL

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, y después de que éstas hayan sido cubiertas, un plan de prueba estadístico formal puede ser elaborado y puede incluir uno de los planes estándar desarrollado por estadísticos como son:

### DISEÑO POR BLOQUES (BLOCKING DESIGNS)

Este tipo de diseño usa técnicas de bloqueo para eliminar los efectos de variables extrañas, desde el error experimental; los diseños de bloqueo bien conocidos incluyen diseños de bloque incompleto balanceado y casuístico para eliminar efectos de una simple variable extraña. - Los diseños de Latín Cuadrado (Latin Square) y Youden Cuadrado (Youden - Square) se usan para eliminar efectos de dos variables extrañas, y planes Greco-Latino-Cuadrado (Greco-Latin Square) y Hiperlativo Cuadrado - (Hyperlatin-Square) para eliminar los efectos de tres o más variables extrañas.

### DISEÑO FACTORIAL COMPLETO Y FACTORIAL FRACCIONAL (COMPLETE FACTORIAL AND FRACTIONAL FACTORIAL DESIGNS)

Estos diseños aplican para dos o más variables independientes primarias. Los factores son variados en forma simultánea y más de una a la vez, así como para obtener información acerca de las interacciones entre variables y para obtener un máximo grado de precisión en los estimados resultantes. En los planes Factorial Completo, todas las combinacio

nes de condiciones de las variables independientes son corridas. Un diseño Factorial Fraccional es frecuentemente usado cuando hay un gran número de combinaciones de puntos de prueba posibles, surgiendo desde muchas variables o condiciones por variable, y no es posible o práctico correr todas las combinaciones y una fracción seleccionada especialmente es corrida.

Una ventaja adicional de los diseños Factorial Fraccional y Fraccional Total es que por suministro de un escudriñado adecuado de la región experimental pueden frecuentemente identificar, sin cualquier otro análisis, una o dos condiciones de prueba que son mejores que cualesquiera otros previamente vistos.

#### DISEÑOS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (RESPONSE SURFACE DESIGNS)

Estos diseños son especialmente multivariantes para variables independientes cuantitativas, la relación entre las variables independientes y la variable de funcionamiento es adaptado para desarrollar ecuaciones de predicción, usando la técnica de análisis de regresión de mínimo cuadrados.

El diseño de Superficie de Respuesta Popular incluye los diseños compuesto central ortogonal y los diseños rotatorios (rotatable).

Frecuentemente las combinaciones de los planes precedentes son encontrados, tales como un experimento factorial conducido en bloques o un diseño compuesto central usando una base Factorial Fraccional. También hay planes para acomodar situaciones especiales denominados experimentos de mezcla y aplican a situaciones donde las variables experimentales consisten de porcentajes de ingredientes que constituyen un material y que pueden entonces agregarse al 100%.

## EXPERIMENTACION AL AZAR

En el diseño de experimentos y en particular a la experimentación al azar existen varios métodos en los que las medias de  $n$  observaciones de diferentes tratamientos son comparados, y así se llega a una conclusión.

### ARREGLO EXPERIMENTAL MODO UNO

Totalmente al azar, en el que las medias  $n_1, n_2, \dots, n_k$  de  $k$ , diferentes tratamientos son comparados, dado que  $n$  observaciones son tomada en cada tratamiento.

Los promedios  $\bar{Y}_i$  varían y esta variabilidad debe ser asignada a la varianza ( $\sigma^2$ ) del método de medición o a las diferencias entre los tratamientos  $n_i$ , o en forma compartida.

Un análisis visual y rápido de los datos es provisto por graficación de los promedios de los  $k$  tratamientos, comparándolos contra una distribución de referencia, la que es una distribución normal con media  $n$  y error estándar  $\sigma / (n)^{\frac{1}{2}}$ .

Distribución de referencia significa que una colección de promedios  $\bar{Y}_i$ , cada uno basado en  $n$  observaciones hechas al azar desde una simple distribución con media  $n$  y varianza  $\sigma^2$ , forman una distribución normal con la misma media  $n$ , pero con varianza menor  $\sigma^2/n$ .

Un histograma de los promedios será normal en apariencia y aproximadamente el 95% de los promedios caerá en el intervalo  $n \pm 2 \sigma / (n)^{\frac{1}{2}}$ .

Si la varianza de las observaciones es desconocida y puede ser estimada desde las observaciones por la estadística

$$S^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{(n - 1)}$$

entonces la distribución de referencia viene a ser la distribución de  $t$  de Student apropiadamente escalada por  $S/(n)^{1/2}$ . (Tabla 1).

#### COMPARACION DE $k$ PROMEDIOS. UN PROCEDIMIENTO ESTADISTICO EXACTO

En base al Modo Uno de diseño experimental, en el que es posible diferenciar entre medias  $n$  de  $k$  tratamientos, si los promedios difieren, entonces se deberá determinar si su variabilidad observada es debida únicamente a la variabilidad del proceso de medición. Si se representa en forma tabular (Tabla 2), los datos pueden ser representados por el modelo

$$Y_{ij} = \bar{y} + T_j + E_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n_j \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$Y_{ij}$  = observación en  $i$ th hilera,  $j$ th columna

$\bar{y}$  = media total

$T_j$  = contribución fija de tratamiento  $j$

$E_{ij}$  = errores de azar, normalmente distribuidos con media cero y varianza fija  $\sigma^2$ .

la respuesta media para el tratamiento  $j$  es

$$\bar{y}_j = \bar{y} + T_j$$

Para probar que todos los efectos del tratamiento  $T_j = 0$ , o equivalentemente que no existe diferencia entre las medias  $\bar{y}_j$  del tratamiento  $k$ , la variabilidad total de las  $N = \sum n_j$  observaciones está dividida en

dos componentes

- 1) Variabilidad debida a las diferencias entre las medias del tratamiento
- 2) Variabilidad debida a los errores de observación.

Estas dos fuentes de variabilidad son comparadas en un análisis de varianza (Tabla 3).

Bajo la hipótesis de que los efectos del tratamiento  $T_j$  son cero, la media cuadrada del tratamiento y la media cuadrada del error son estimados apropiadamente desde la varianza  $\sigma^2$ . Su relación  $MST/MSE$  es entonces la distribución (F) estadística de Snedecor con  $v_1 = k-1$  y  $v_2 = k(n-1)$  grados de libertad. Haciendo referencia a los valores de la distribución  $F_{v_1, v_2}$  de la Tabla 3 se puede determinar la probabilidad de cualquier distribución (F) observada.

Esta probabilidad debería ser pequeña, es decir, menor que 0.05, entonces la decisión estimada para rechazar la hipótesis de que las  $T_j$  son cero, aquello es que la prueba es estadísticamente significativa.

El analista así infiere que las diferencias observadas entre los promedios del tratamiento reflejan de verdad las diferencias reales entre las medias del tratamiento.

En un experimento de clasificación Modo Uno es común ajustar los números de observaciones con cada tratamiento  $n_j = n$ . Todas las observaciones  $N = n_j$  deberían ser corridas en orden casual, si estimados de intervalo o pruebas de hipótesis son requeridas para cualquier simple media  $n_j$ , o para cualquier comparación entre las medias, el estimado de

varianza  $S^2$  con  $k(n-1)$  grados de libertad es empleado y es siempre usual graficar los promedios y sus distribuciones de referencia asociadas.

## COMPARACIONES MULTIPLES

Las pruebas del análisis anterior de la hipótesis compuesta de que todas las medias del tratamiento  $n_j$  son iguales, muchas otras pruebas exactas son posibles, la simple media cuadrada de grado de libertad puede ser construida en el análisis de varianza (ver Tabla 3) para cualquier "contraste". Procedimientos ajustados son usados algunas veces para mantener "riesgo de error" total constante  $\alpha$  donde la simple hipótesis de grado de libertad es probada.

## ARREGLO EXPERIMENTAL MODO DOS. EL DISEÑO DE BLOQUE AL AZAR

En muchas situaciones experimentales no es posible controlar el ambiente, así como eliminar las principales fuentes de variabilidad indeseables.

Para evitar estas fuentes de variación que influyen la precisión de los estimados o los efectos del tratamiento, los experimentos se llevan a cabo en bloques, cada bloque representando un día, o un lote o un grupo de personal.

El diseño experimental que indica que el experimento debe llevarse a cabo de esta manera se llama "Diseño al Azar" y los tratamientos son corridos en orden casual con cada bloque.

Los datos se pueden representar por el modelo

$$Y_{ij} = \mu + B_i + T_j + E_{ij} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, k \end{array}$$



$B_i$  representa la contribución de  $i$ th bloque y donde  $Y_i$ ,  $n$ ,  $T_j$  y  $E_{ij}$  son definidos en el modelo.

La variabilidad total de las observaciones  $Sy^2$  está ahora dividida en componentes, debido a 1) bloques, 2) tratamientos y 3) errores (ver Tabla 4).

Para probar la hipótesis nula en que los efectos del tratamiento  $T_j = 0$ , se calcula la relación  $F_{MST/MSE}$  de manera similar, para probar la hipótesis nula en que los efectos de la columna  $B_j = 0$  la relación  $F_{MSB/MSE}$  es calculada.

Si un valor observado de  $F$  excede su valor crítico tabulado, la hipótesis nula asociada se rechaza.

El concepto de bloqueo se introdujo formalmente en experimentos agrícolas, donde el bloque fue una porción de terreno, en donde diferentes variedades de granos u otro tipo de cosecha fueron comparados.

#### CLASIFICACIONES DE MODO DOS COMO DISEÑOS FACTORIALES

El análisis puede ser ejecutado cuando las hileras y columnas representan niveles o versiones de dos diferentes variables causantes que influyen significativamente sobre la respuesta. En este caso el experimento se denomina un " $n \times k$  factorial", donde  $n$  son las hileras y  $k$  las columnas, el modelo y análisis subsecuentes de varianza considera que las hileras y columnas tienen efectos que son simplemente aditivos, esto es:

$$Y_{ij} = \mu + \rho_i + \delta_j + E_{ij}$$

$\rho_i$  representa los efectos de la hilera y  $\delta_j$  los efectos de las columnas y  $\rho_i$  y  $\delta_j$  son llamados los "Efectos Principales" de los factores.

#### INTERACCIONES DEL FACTOR DOS

Quando las hileras y columnas representan variables causativas controladas es común observar "interacciones del factor dos", esto es significativamente efectos de antagonismo sobre y superior a aquellos explicados por el simple efecto principal de los factores.

El modelo asociado con la interacción presente es

$$Y_{ij} = \mu + \rho_i + \tau_j + \rho\tau_{ij} + E_{ij}$$

En este modelo  $\rho\tau_{ij}$  representa la interacción adicional y -- que es contribución única para la combinación del factor i-j.

Para estimar los efectos de interacción  $\rho\tau_{ij}$  palpable de contribuciones de error  $E_{ij}$  es necesario repetir experimentos comúnmente cada combinación hilera - columna n veces con n usualmente igual a 2 ó 3.

#### ANÁLISIS DE VARIANZA

En general el modelo matemático describe fundamentalmente un análisis de varianza, para cada observación como una combinación lineal de componentes como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y_{ijl} = \mu + \rho_i + \delta_j + \rho\delta_{ij} + E_{ijl}$$

donde los componentes son los efectos de hileras  $\rho_i$ , columnas  $\sigma$  e interacciones hilera-columna  $\rho\sigma$  más errores E.

Los componentes con excepción de E, pueden todos ser de efectos fijos, o todos de efectos al azar o mezclas de efectos fijos y al azar. Ordinariamente un análisis de regresión por mínimos cuadrados es una adaptación de análisis general de procedimientos de varianza para ciertos modelos de efectos fijos. El número y naturaleza de los componentes en un modelo es una función del diseño experimental y otras posibles covariables de interés. Se considera usualmente que los errores E y todos los otros efectos al azar son independientes y normalmente distribuidos, considerando que permiten la estimación de los componentes del modelo y pruebas estadísticas de hipótesis. La teoría y métodos numéricos asociados para el análisis de varianza tienen su origen en el trabajo original de R.A. Fisher.

## DISEÑOS DE CLASIFICACION MULTIPLE

Los arreglos de datos complicados son fácilmente imaginados, - cada uno con su correspondiente modelativo y análisis de la tabla de varianza, si un programa experimental compuesto por  $n$  hileras y  $k$  columnas deberá ser corrido a  $r$  niveles de algún factor adicional, y cada uno de los  $nkr$  tratamientos será repetido  $m$  veces, para un total de  $nmkr$  observaciones. En estadística y particularmente en la de ciencia de ingeniería, tales diseños factoriales grandes son usados con poca frecuencia. El objetivo existente para descubrir la información requerida antes que el programa experimental conceptual de  $N$  corridas sea llevado a cabo.

### EL DISEÑO LATIN CUADRADO

La eliminación de más de una fuente de variabilidad en un programa experimental para estudiar  $k$  tratamientos, puede emplear con frecuencia el Diseño Latín Cuadrado.

Suponiendo que se desea llevar a cabo un experimento con  $k=4$  niveles de una variable  $x$  que debe ser estudiada, a fin de ver su efecto sobre alguna variable de respuesta, además de que solamente se pueden correr cuatro experimentos en un día y adicionalmente que un operador diferente es necesario para cada experimento, esto produce variabilidad al comparar los tratamientos, a fin de eliminar la variabilidad día a día, cada tratamiento debe ser corrido cada día, adicionalmente cada tratamiento por el mismo operador correspondiente para eliminar los efectos de operador. El Diseño Latín Cuadrado provee para el Modo Dos eliminación de variabilidad por medio del uso de dos variables de "bloqueo" -- (días y operadores) combinadas con una variable estudiada (ver Tabla ).

Para este caso el modelo apropiado para cada observación es:

$$Y_{ijk} = \mu + \rho_i + \gamma_j + T_k + E_{ijk}$$

En este modelo  $\rho_i$  representa los efectos de las hileras,  $\gamma_j$  son los efectos de las columnas y  $T_k$  son los efectos de los tratamientos. El análisis de varianzas para el Diseño Latín Cuadrado es muy directo, - una simple extensión de los cálculos para el arreglo Modo Dos, deben aplicarse también algunos aspectos de azar cuando se usa este diseño.

El presente diseño puede también ser aplicado para compensar - una posición o un tiempo de secuencia.

#### DISEÑOS CRUZADOS (CROSS OVER DESIGNS)

Una clase de programas experimentales son los diseños cruzados en los que cada tratamiento sigue todos los otros tratamientos un número fijo de veces, y tienen una importancia particular cuando, en adición al efecto primario de algún tratamiento individual, puede existir un efecto residual que pueda influenciar la subsecuente prueba experimental.

Este diseño es de tipo Latín Cuadrado y cuando se usa un diseño de este tipo, únicamente una clasificación deberá ser usada para identificar las versiones de la variable estudiada, todas las otras clasificaciones serán reservadas para variables de bloqueo, considerando también que las variables de bloqueo no interactúan con los tratamientos. Si se requiere más de una clasificación para identificar tipos de variables de tratamientos, los diseños vienen a ser Diseños Fraccional Factorial y las consideraciones de cero interacciones adquieren gran importancia.

## DISEÑOS DE BLOQUE INCOMPLETO

Es común encontrar que una variable de bloqueo puede no ser suficientemente grande para abarcar todos los tratamientos, así en un experimento diseñado para estudiar  $t$  diferentes tratamientos y que en un día sólo se pueden hacer  $t-1$ , para eliminar el efecto del bloque se emplea el Diseño de Bloque Incompleto Balanceado.

El diseño es arreglado de manera que todo par de tratamientos - aparecen con un bloque, una constante  $\lambda$  número de veces, y cada tratamiento aparece un número igual  $r$  de veces, y  $\lambda = r(k-1)/(t-1)$ .

El Diseño de Bloque Incompleto Balanceado (BIB) siempre puede ser formado tomando todas las combinaciones de  $t$  tratamientos  $k$  a la vez.

En el análisis del diseño BIB el tratamiento promedio debe ser ajustado para compensar los bloques particulares en los que aparecen los tratamientos.

En diseños de Bloque Incompleto Balanceado Parcialmente (PBIB) algunos pares de tratamientos aparecen junto con bloques  $\lambda_1$  veces, mientras que otros pares aparecen juntos  $\lambda_2$  veces y ambos  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son integrales.

Los Diseños Enrejados (Lattice Designs) son diseños de bloque - incompleto balanceado parcialmente con  $\lambda_2 = 0$ . Variedades adicionales - de diseños de bloque balanceado son proporcionados por los diseños Enrejado Cuadrado, Enrejado Rectangular y Enrejado Cuboidal.

Los Diseños de Bloque Incompleto Balanceado con bloques de tamaño pequeño (dos o tres tratamientos por bloque) encuentran extensas apli-

caciones en programas de prueba organoléptica, en donde los probadores - (los bloques) no pueden ser invitados para saborear u oler más de dos tra-  
tamientos a la vez. Estos diseños son frecuentemente modificados, de ma-  
nera que cada tratamiento aparecen un número fijo de veces en secuencia -  
después de todos los otros tratamientos.

El objetivo de los Diseños de Bloque Balanceado es compensar -  
los efectos de las variables de bloqueo a través de los tratamientos.

Otra variación son los Diseños de Cadena en los que ciertos tra-  
tamientos se usan para encadenas o mantener juntos diferentes bloques. Es-  
tos diseños son particularmente usuales cuando la variabilidad con los -  
bloques es mucho menor que aquella entre bloques.

Otra clase de diseños de bloque incompleto son los "Cuadrados -  
Youden". El diseño Latín Cuadrado requiere que ambas variables de blo- -  
ques (hileras y columnas) tengan el mismo número de versiones. Un Cuadra-  
do Youden es un Latín Cuadrado incompleto.

#### DISEÑO DE DIAGRAMA PARTIDO

En muchos programas experimentales es común estudiar  $n$  diferen-  
tes versiones de una variable de tratamiento secundario con cada una de -  
las versiones de alguna variable de tratamiento primario.

El nombre "Diagrama Partido" se derivó de orígenes agrícolas -  
donde los tratamientos primarios fueron diferentes fertilizantes aplica-  
dos para separar diferentes parcelas de terreno y donde cada parcela fue  
sombreada con diferente tipo de grano.

El análisis de un experimento de diagrama partido requiere la estimación separada de dos varianzas, una apropiada para diferencias entre diagramas (parcelas) totales y una segunda para comparaciones dentro del diagrama (parcelas).

Aunque hay dos clasificaciones de tratamientos, el análisis de varianza es solamente superficialmente similar para que den por arriba para el diseño de clasificación dos modos.

Los programas de Diagrama Partido son comunes en experimentación industrial, siempre que algunas variables de tratamiento sean más difíciles para cambiar, que otras, el resultado es que, con distribución al azar así forzado, el análisis y procedimientos inferenciales serán modificados.

#### DISEÑO JERARQUICO (ANIDADO)

Estos diseños son idénticos en estructura a los diseños de Diagrama Partido, son comúnmente usados para estimar fuentes separadas de varianza que juntas contribuyen a la varianza total de un método de medición, estos diseños son denominados frecuentemente Diseños Jerárquicos o Anidados. La diferencia esencial entre un análisis de Diagrama Partido y un análisis de varianza de componentes consiste en la naturaleza de la clasificación: en el diagrama partido, las clasificaciones de tratamiento son consideradas a ser controladas y fijadas por el experimentador, mientras que en el caso de varianza de componentes las clasificaciones jerárquicas son consideradas como selecciones al azar desde grandes poblaciones hipotéticas. La clasificación de efectos fijados y al azar pueden tener consecuencias importantes en el análisis de diseños de diagrama partido o diseños experimentales jerárquicos.



## EXPERIMENTO ROUND-ROBIN

En suma, para determinar los componentes de la varianza asociada con un método de medición, considerable interés a menudo atiende la varianza de un proceso de medición, aquello es, el método de medición usado por diferentes laboratorios, en diferentes localidades, y a través de períodos de tiempo variable. Los programas experimentales Round-Robin requieren protocolos de muestreo y análisis escritos cuidadosamente para ser distribuidos a muchos y diferentes laboratorios.

Las observaciones registradas son retornadas a un grupo central para el análisis y reducción de datos. Los resultados combinados son publicados con cada identificación del laboratorio manteniéndolo en forma - confidencial.

El propósito de los Programas Round-Robin es estudiar los componentes de varianza asociada con métodos de medición propuestos, y entonces, reducir la varianza total del proceso de medición por laboratorios - confiables para estimar y corregir sus mediciones individuales.

## DISEÑOS FACTORIAL

Los diseños experimentales son frecuentemente compuestos por - combinación de  $p$  versiones de una variable controlada o factor con las  $q$  versiones de una segunda, para dar un total de  $pq$  combinaciones, si hay -  $k$  variables, con  $l_k$  niveles o versiones respectivamente, entonces el diseño factorial correspondiente consistirá de  $(l_1)(l_2) \dots (l_k)$  tratamientos, si  $l$  es una constante, el diseño se denomina un factorial  $l^k$ . Los tratamientos incluidos en el factorial pueden ser estudiados en un diseño de - bloque al azar, Latín Cuadrado o bloque incompleto.

El más simple de los diseños Factorial son los factoriales  $2^k$ , - así para  $K=3$  factores equivale a tener  $2^3=8$  tratamientos que consisten de todas las posibles combinaciones de las dos versiones de cada factor.

El diseño experimental para el factorial  $2^3$  en tres notaciones diferentes, pero comúnmente encontradas se muestran en el apéndice.

Los factores  $k$  pueden ser cuantitativos, nominales o cualitativos en cualquier combinación.

Las matrices de diseño escritas en orden para  $k=2, 3$  y  $4$  se encuentran en el apéndice.

Los diseños  $2^k$  son usados en conexión con el modelo factorial - para las  $N$  observaciones registradas dadas por

$$y = \eta + \sum \delta_i + \sum_{i \neq j} \sum \delta_{ij} + \sum \sum \sum \delta_{ijl} + \dots + \delta_{ijl\dots k} + E$$

Siendo

- $\eta$  = media de las observaciones
- $\delta_i$  = representa los  $k$  principales efectos (efectos de primer orden)
- $\delta_{ij}$  = representa los  $k(k-1)/2$  efectos de interacción del factor dos (2fi)
- $\delta_{ijl}$  = representa los  $k(k-1)(k-2)/(2)(3)$  efectos de interacción del factor tres (3fi).
- $\delta_{ijl\dots k}$  efecto de interacción simple del factor  $k$
- $E$  = distribuido al azar (tomado como independiente con media cero y varianza  $\sigma^2$ ).

Cuando la distribución de error puede ser considerada normal se encuentra que los estimados mínimos cuadrados de todos los efectos son estadísticos de la forma  $\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-$  con varianza  $4\sigma^2/N$  y cero covarianza. Los efectos estimados son así mutuamente ortogonales, garantizando que la magnitud y signo de cualquier efecto estimado individual no puede ser influenciado por la magnitud y tamaño de cualquier otro efecto estimado. Los estimados están libres de otro, cada uno teniendo la cualidad de ser solamente el estimado determinado desde el programa experimental, además, cada estimado tiene una varianza mínima proveyendo así los estrechos intervalos confiables posibles.

El gran número de corridas requeridas por un diseño factorial  $2^k$  con frecuencia hace el bloqueo del diseño en pequeños grupos de corridas imperativas, así que las fuentes no controladas de variabilidad no pueden perturbar indebidamente la información esencial demandada del programa experimental. Varios arreglos de bloqueo para la serie  $2^k$  son provistos por el concepto usual de "confusión" y ocurre siempre que una simple estadística puede ser usada para estimar dos o más cantidades diferentes.

Cuando un factorial  $2^k$  es dividido con bloques de dos tamaños, las corridas comprendidas en un bloque son complementarias ("fold-over") en pares y todos los  $2^{k-1}$  son confundidos con bloques. Los arreglos de bloques alternativo son posibles a través del uso de confusión parcial. Los factoriales  $2^k$  cuando se corren en bloques son analizados frecuentemente en forma secuencial, suministrando así la oportunidad para cambiar el diseño o los objetivos del programa experimental.

Los cálculos asociados a los factoriales  $2^k$  pueden ser grandemente reducidos a través del uso del Algoritmo de Yates. Cuando los diseños no están reproducidos, diagramas de Daniel son usados para detectar los efectos significantes estadísticamente.

Los diseños factoriales  $3^k$  y  $4^k$  también existen a lo largo con diseños factoriales de nivel mezclado, como el  $2^k 3^l$ . En muchos casos es tos diseños pueden ser reemplazados por diseños factorial fraccional, requiriendo muchas veces algunas cuantas corridas.

Los cálculos asociados con el modelo factorial y diseños asociados pueden ser colocados en forma matricial, así

$$Y = X \beta + E$$

Donde:

- Y = vector de observación
- X = n (p+1) matriz asociada de variables independientes
- p+1 = número de términos en el modelo
- $\beta$  = n (p+1) vector de coeficientes desconocidos

dando el elemento individual del (n+1) vector E son normalmente independientes con media cero y varianza constante, entonces el estimado de mínimos cuadrados de  $\beta$  está dada por

$$B = [X^T X]^{-1} X^T Y$$

y la varianza de estos estimados por

$$\text{Var}(B) = [X^T X]^{-1} \sigma^2$$

la varianza  $\sigma^2$  es estimada, dando  $n > p+1$  por

$$s^2 = [Y^T Y - B^T X^T Y] / (n - p - 1)$$

Para los diseños factorial  $2^k$  y modelo  $[X^T X] = NI$ , donde  $I$  es la matriz identidad.

#### DISEÑOS FACTORIAL FRACCIONAL, $2^{k-p}$

En problemas donde  $n$ , una variable de respuesta, es una función desconocida de factores  $k$  bajo el control del experimentador, esto es que

$$\eta = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Se tiene como objetivo tamizar (discriminar) para los factores importantes, a fin de determinar que grupo de los factores, están variando dentro del rango, además de tener gran influencia sobre  $n$ .

Los diseños  $2^{k-p}$  (la fracción  $(1/2)^p$  de los diseños factorial  $2^k$ ) proveen un poderoso medio para identificación de los factores importantes.

Los diseños usuales que proveen estimados ortogonales de varianza mínima de cada efecto están disponibles para  $N$  igual a múltiplos de 4.

Quando  $k=N-1$  el diseño se denomina "Factorial Fraccional Saturado" (los diseños para  $N$  igual a un múltiplo de 4 fueron primeramente de terminados por Plackett y Burman).

Los estimados de los efectos de primer orden para cada factor se realizan usando estadística de la forma  $\bar{Y}_+$  -  $\bar{Y}_-$ . Equivalentemente, la función desconocida puede ser expresada en una expansión de series de Taylor de Primer Orden, obteniéndose

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k = \beta_0 + \sum \beta_i x_i$$

Los estimados mínimos cuadrados de los coeficientes son  $b_0 = \bar{y}$  (el promedio mayor) y  $b_i = \{iy\} / N$ .

$\{iy\}$  es el producto escalar de las observaciones con los correspondientes elementos  $\pm$  en la columna vector para el factor  $X_i$ .

Una particularidad importante de diseño alternativo, llamado el diseño Foldover, se obtiene por cambio de todos los signos.

Los diseños para un número de factores  $k$ , menor que los que aparecen en un diseño saturado son provistos por simple eliminación desde los diseños saturados del número de factores requerido.

Un diseño factorial fraccional que confunde términos de primer orden, términos de producto cruzado de segundo orden (2fi) se dice que es de Resolución III y se escribe simbólicamente como  $2_{III}^{k-p}$ .

Todos los diseños saturados de Plackett y Burman son de resolución III. Los diseños que no confunden efectos principales con 2fi, pero sí con 3fi son resolución IV. Un diseño de resolución IV puede ser obtenido por combinación de un diseño de Resolución II y su diseño foldover (plegado).

Un diseño de Resolución V confunde efectos principales con 4fi y 2fi con 3fi y en la práctica la función de respuesta es

esta función es razonablemente igual sobre el rango de las Xs en estudio, los términos de primero y segundo orden dominan en cualquier aproximación de series de Taylor. La posible confusión generada por confundir términos de tercero y cuarto orden con aquellos de primero y segundo orden, lo que no se considera un error serio.

El propósito de estos diseños factorial fraccional y sus modelos empíricos es ayudar al investigador en la identificación de las características importantes de la función de respuesta bajo estudio, particularmente cuando el número planeado  $n$  de corridas experimentales es pequeño y el número de factores  $k$  a ser variado es modestamente mayor  $k > 3$ . Hay resoluciones mezcladas fraccionales, niveles mezclados fraccionales, y una vasta clase de diseños simplemente referidos como "pedacitos y piezas" (bits and pieces).

Los diseños pueden ser bloqueados, las secuencias de clase de corrida están disponibles para minimizar el número de cambios de nivel de factor, los diseños pueden ser escritos, de manera que den protección contra tendencia lineal o cuadrática de tiempo, y varias estrategias existen para combinación de fracciones, para eliminación y adición de factores, para secuencias de organización de corridas, y para reproducciones parciales fraccionales.

Los diseños factorial fraccional supersaturados se usan para estudios  $k$  variables en  $n < k$  corridas y están disponibles para  $k$ 's grandes.

Diseños de dos niveles para  $N$  que no es múltiplo de 4 balanceado, así como ajustado para la no ortogonalidad de los efectos resultantes estimados, están también disponibles.

## DISEÑOS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

Después de discriminar para identificar que grupos de factores tienen el mayor efecto sobre una respuesta dentro del rango de variación, la atención del experimentador se centra en la caracterización de la función desconocida

$$n = f ( E_1, E_2, \dots, E_n )$$

Se considera que  $n$  es una función plana ( ) esto es, que solamente las derivadas de orden menor son importantes y que las discontinuidades en la función de respuesta no existen, de seguro todas las  $E_i$  se consideran continuas. Y la función puede entonces ser representada localmente por una serie de Taylor, si  $n$  es función de una simple variable  $E_1$  - la expansión de las series de Taylor de primer orden acerca del punto  $E_{10}$  es:

$$\eta \cong f ( E_{10} ) + ( E_1 - E_{10} ) \left. \frac{df}{dE_1} \right|_0$$

transformando desde el sistema métrico  $E_1$  a aquellas de una variable de trabajo  $X_1 = (E_1 - E_{10})/C$ , donde  $E_{10}$  se toma como el centro de la región experimental y  $C$  es alguna constante conveniente, la aproximación de primer orden se puede expresar como:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1$$

que es la ecuación de una línea recta con  $\beta_0$  como ordenada al origen, y pendiente  $\beta_1$  o coeficiente de primer orden.



La serie de Taylor de segundo orden es:

$$\hat{h} = f(E_{10}) + (E_1 - E_{10}) \left. \frac{df}{dE_1} \right|_0 + (E_1 - E_{10})^2 \left. \frac{d^2f}{dE_1^2} \right|_0$$

y equivale a:

$$\hat{h} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2$$

que es una ecuación de segundo orden con  $\beta_{11}$  como el coeficiente cuadrático. Cuando  $n$  es una función de dos factores

$$n = f(E_1, E_2)$$

Las aproximaciones de primero y segundo orden son:

$$\text{ajustando } X_1 = (E_1 - E_{10})/C_1$$

$$\hat{h} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \quad (\text{modelo de primer orden})$$

$$\hat{h} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

(modelo de segundo orden)

El modelo de primer orden aproxima la función de respuesta desconocida localmente por un plano, el modelo de segundo orden por una superficie cónica.

Si

$$n = f(E_1, E_2, \dots, E_k)$$

Los modelos equivalentes de primero y segundo orden son:

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i \quad (\text{modelo de primer orden})$$

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} \beta_{ij} x_i x_j \quad (\text{modelo de segundo orden})$$

Se debe observar que hay dos clases de coeficientes de segundo orden los cuadráticos  $\beta_{ii}$  y los de producto cruzado  $\beta_{ij}$ .

De seguro el experimento no registra la respuesta verdadera de  $n$  en cada ajuste de los factores, pero más bien una observación, y donde  $Y = n + E$ . Es usual considerar que el error al azar  $E$  esté normalmente distribuido, con una media igual a cero y con un volumen constante  $\sigma^2$ .

Dado el modelo para la respuesta  $n$  y los errores  $E$ , el problema de diseño experimental viene a ser uno de determinación de esos ajustes - de los factores controlados que suministrarán los datos más usuales para estimar los coeficientes desconocidos  $B$ .

Los modelos ajustados son:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i \quad (\text{modelo de primer orden})$$

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j \\ i \neq j}} b_{ij} x_i x_j \quad (\text{modelo de segundo orden})$$

En las anteriores expresiones  $Y$  es la respuesta predicha y los coeficientes  $B$  los estimados mínimos cuadrados de los parámetros  $B$ . Los-

modelos ajustados se usan para suministrar, por medio de representaciones de contorno, mapas ("maps") de la función de respuesta desconocida.

Esta vista ilustrada de la función de respuesta juega el papel principal en la subsecuente inferencia hecha desde el programa experimental.

En muchas superficies de respuesta apropiadas, el papel de un coeficiente individual es secundario para el uso total de los modelos como un Interpolante de primero y segundo orden para la función de respuesta desconocida.

En términos más generales, se considera  $n$  una respuesta continua dependiente de  $k$  variables  $X$  bajo el control del experimentador. Sobre los rangos de la  $X$  estudiada se considera a la función bien representada por un polinomio de primero o segundo orden, esto es:

$$n = f(X, B)$$

La función polinomial  $f(X, B)$  es lineal con respecto al parámetro desconocido  $B$ , de manera que, todas las derivadas de  $df/dB$ , en todos los puntos en la región experimental son funciones de  $X$  únicamente, de esta manera para cualquier modelo lineal y matriz de diseño  $D$  de  $n \times k$ , hay una matriz de derivadas  $X$  de  $n \times p$ , algunas veces llamada la matriz de variables independientes, donde  $p$  es el número de parámetros desconocidos. Dado que los errores experimentales  $E^0$  son independientes y normalmente distribuidos con varianza fija  $\sigma^2$ , entonces las máximas probabilidades de las  $B$  estimadas de los parámetros  $B$  están dados por:

$$B = [X^T X]^{-1} X^T Y$$

Siendo  $Y$  el  $n \times 1$  vector de observaciones.

La varianza de las  $B$  estimadas está dada por:

$$\text{Var} (B) = [ X^T X ]^{-1} \sigma^2$$

El vector  $n \times 1$  de los valores predichos por:

$$\hat{Y} = X B$$

Puede también ser mostrado que:

$$Y^T Y = \hat{Y}^T \hat{Y} + (Y - \hat{Y})^T (Y - \hat{Y})$$

donde:

$(Y - \hat{Y})$  es el vector de residuales  $n \times 1$

Previendo que el modelo polinomial seleccionado es adecuado para representar la función de respuesta desconocida, entonces el estimado de  $\sigma^2$  está dado por:

$$\sigma^2 = (Y - \hat{Y})^T (Y - \hat{Y}) / (n - p)$$

Existen varios criterios para ayudar en la construcción de matrices de diseño  $D$ .

Ya que la selección del modelo polinomial debe ser ajustado para representar la función desconocida sobre la región experimental, "rotabilidad" es un criterio usual, esto es que la selección del diseño se hace de manera que la  $\text{Var} (Y)$  sea constante a una distancia constante des-

de el centro de la región experimental. El diseño puede ser óptimo "Dn" para cualquier espacio de puntos experimentales ( $n \times k$ ) dentro de la región experimental, donde el determinante  $|X^T X|$  es maximizado. Tal vez el mejor criterio es uno en el cual, cuando la aproximación adecuada del modelo polinomial de segundo orden, reduce a un mínimo la influencia que puede ocurrir cuando son requeridos los términos de tercer orden.

Es criterio se presta al diseño óptimo "Gn". Muchos diseños experimentales usados en la práctica toman en cuenta todos estos criterios.

#### DISEÑOS DE PRIMER ORDEN, $K = 2$

Para  $k = 2$  factores el modelo de primer orden requiere la estimación de tres coeficientes. Las tres corridas experimentales caracterizadas por el diseño de triángulo equilátero provee estimados ortogonales de varianza mínima. Sin embargo este diseño no provee una medida de la posible carencia de ajuste del modelo de primer orden que se ha postulado.

Aumentando al diseño un punto central se provee una medida de curvatura [el promedio de las observaciones periféricas menos el promedio en el centro  $\bar{y}_p - \bar{y}_o$ , si es significativamente diferente de cero, implica una superficie curva y demuestra lo inadecuado, la falta de ajuste, del modelo de primer orden (plano)].

Un diseño alternativa de cuatro puntos es el factorial  $2^2$ , con este diseño no es posible una medida de curvatura, ahora bien, el diseño permite la estimación del coeficiente producto cruzado  $B_{12}$  (o el efecto de interacción equivalente) si este coeficiente es significativamente diferente de cero, el modelo plano es inadecuado y no deberá ser usado. En tonces el diseño de primer orden recomendado para  $k=2$  es el factorial  $2^2$  con punto central, este punto central producirá información adicional so-

bre posible curvatura.

#### DISEÑO DE PRIMER ORDEN, $K = 3$ .

El modelo de primer orden para  $k=3$  es

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3$$

El más pequeño y mejor diseño está provisto por los cuatro vértices de un tetrahedro en el espacio. Aumentando este diseño con uno o más puntos centrales se provee una medida de la curvatura de la función de respuesta, es decir, de los términos cuadráticos de segundo orden  $\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$  en el modelo de segundo orden. Para estimar los términos de segundo orden de producto cruzado  $\sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j$  el diseño factorial  $2^3$  puede ser empleado. El diseño recomendado es el factorial  $2^3$ , corriendo como dos tetrahedros (bloques) cada uno con uno o más puntos centrales. Este diseño puede ser compuesto secuencialmente, un tetrahedro a la vez y provee estimado de varianza mínimo del coeficiente  $\beta_0$  y  $\beta_i$  y excelentes medidas de falta de ajuste.

Arreglos análogos de ajuste de factores se usan para  $k > 3$ , estos diseños consisten generalmente de fracciones de los factoriales  $2^k$  con o sin puntos centrales.

#### DISEÑOS DE SEGUNDO ORDEN, $K = 2$ .

El modelo de segundo orden para  $k=2$  contiene seis coeficientes, así el diseño experimental más pequeño deberá contener seis puntos apropiadamente separados en el espacio de los factores  $k=2$ . Los diseños más

comunes son los de hexágono y octágono, ambos diseños tienen puntos centrales y pueden ser también ortogonalmente bloqueados (por triángulos o cuadrados).

Estos bloques son excelentes diseños de primer orden, proporcionando así la oportunidad para el aumento secuencial, debiendo el modelo de primer orden proveer insuficiencias.

Ambos diseños, el hexágono y octágono, son rotables, es decir, que proveen estimados de varianza constante de la respuesta a una distancia constante desde el centro del diseño.

El factorial  $3^3$  aunque simple en estructura no puede ser usualmente bloqueado y no es rotable.

Ajustando el modelo de segundo orden y chequeando su suficiencia, se obtiene la ecuación ajustada

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2$$

esta expresión representa el contorno de la superficie de respuesta, la que puede ser una elipse o una hipérbola, la superficie de respuesta es una intersección elevada dentro de la región experimental.

Si una segunda respuesta es medida simultáneamente puede ser ajustada separadamente a un modelo de primer o segundo orden y su contorno mapeado. Superponiendo los diagramas de contorno de dos o más respuestas se identifican ventanas de operabilidad de las respuestas.

Es el caso de diseños de primer orden pueden ocurrir otras configuraciones de puntos, y el análisis del diseño y modelo procede por mínimos cuadrados.

## DISEÑOS DE SEGUNDO ORDEN, $k \geq 3$ .

Un diseño experimental para ajustar un modelo de segundo orden para  $k \geq 3$  es el "diseño compuesto central", que se ilustra en el apéndice para  $k=3$ .

El diseño se ilustra con las coordenadas de cada punto y está arreglado en tres bloques, los bloques I y II son tetrahedros con puntos centrales, cualquiera de los dos son un excelente diseño de primer orden.

La combinación de los bloques I y II del factorial  $2^3$  provee estimados más precisos de los coeficientes  $b_j$  junto con estimados de los coeficientes del producto cruzado  $b_{ij}$  en el modelo de segundo orden. La estrella ("star") o diseño de octahedro, bloque III, es necesario para estimar los coeficientes cuadráticos  $b_{jj}$ . Para  $k > 3$  los diseños compuesto central se componen de factoriales  $2^k$  o diseños factorial fraccional de Resolución V combinado con un hiperoctahedrico k-dimensional con puntos  $2^k$  más puntos centrales, esto es, por puntos k-dimensional de la forma  $(\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$  para la porción fraccional, y de la forma  $(\pm \alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm \alpha)$  para la parte hiperoctahedrica.

Existen muchos criterios para la determinación de  $\alpha$ , la longitud del eje octahedrico. Ajustando  $\alpha = n_c^{1/4}$ , donde  $n_c$  = número de punto en la porción del cubo del diseño, da rotabilidad, valores ligeramente grandes para  $\alpha$  satisface la varianza más la tendencia a norma.

Otra clase de diseños de segundo orden, los diseños caja de Behnken (Box-Behnken) usan en parte ciertos diseños de bloque incompleto balanceado.

Estos diseños son fracciones de los factoriales  $3^k$  especialmen-



te seleccionados para modelado de segundo orden.

Después de que un modelo de segundo orden ha sido ajustado, cualquiera que sea el diseño experimental usado, la interpretación de la superficie de respuesta ajustada es usualmente muy importante, por convertir el modelo de segundo orden en la forma canónica

$$y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_{1i} X_i^2$$

donde los coeficientes  $B_0$  y  $B_{1i}$  con combinaciones lineales de los coeficientes ajustados originalmente y las  $X_i = \sum a_{ij} x_{ij}$  son los ejes de un nuevo sistema de coordenadas ortogonales.

#### DISEÑOS MEZCLADOS (MIXTURE DESIGNS)

En la investigación de una función desconocida

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

es común encontrar que los niveles de las variables controladas  $X_i$  están comprimidos, es decir, que las  $X_i$  pueden ser componentes de una mezcla y sujeto a la compresión tal que  $\sum x_i = 1$ . Una clase de diseños comprimidos, y la influencia de la compresión sobre la selección de modelos, fue discutida por Scheffé. El propuso diseños de enrejado simple (simplex lattice) y centroide simple (simplex centroid) y asocio los modelos polinomiales canónicos. Muchas modificaciones y mejoras en el diseño y análisis de problemas de mezcla han seguido, el principal trabajo posterior es el de Draper y colaboradores.

Cornell ha hecho una exposición particularmente buena de diseños mezclados y modelos.

## DISEÑOS PARA MODELOS NO LINEALES

Cuando la función desconocida:

$$n = f(X_i, \theta)$$

puede ser escrita en la forma

$$\eta = \sum \theta_i x_i$$

o más generalmente

$$\eta = \sum \theta_i g(x_i)$$

el modelo es "lineal" en los parámetros  $\theta$  entonces las derivadas  $\partial n / \partial \theta_i$ , dependen únicamente de  $X_i$ , muchos modelos en las ciencias de ingeniería, desafortunadamente no son lineales.

El diseño y análisis de experimentos para modelos no lineales - están sujetos a un desarrollo muy vigoroso.

Box y Lucas fueron los primeros en atacar formalmente el problema de diseño no lineal. Una parte integral del problema de diseño descansa sobre las dificultades asociadas de estimación de los parámetros desconocidos  $\theta$ . Para modelos lineales, mínimos cuadrados provee estimados de  $\theta$  directamente, demandando un poco más del experimentador, pero la matriz.

$$[ X^T X ]$$

es inevitable, la matriz  $[X]$  es la matriz de derivadas.

Para modelos no lineales los elementos de  $X$  contienen los pará-

metros desconocidos  $\theta$ , y para un modelo dado, diseño, y vector de observaciones  $Y$ , preliminarmente estima  $\theta_0$  y debe ser declarada antes que el máximo estimado de  $\theta$  pueda ser obtenida.

El problema de diseño no lineal también empieza con estimados - preliminares de  $\theta_0$ .

Alternativamente, un diseño factorial u otro diseño simple es - frecuentemente corrido para obtener observaciones iniciales  $Y$ , y entonces mejorar los estimados de los parámetros. La construcción del diseño procede entonces iterativamente con cada nuevo punto de diseño o serie de - puntos, dependiendo del mejor estimado de  $\hat{\theta}$ . Usualmente los puntos nuevos son seleccionados para el diseño, de manera que  $|X^T X|$  sea maximizada.

TABLA 1

ARREGLO EXPERIMENTAL , MODO UNO					
Tratamiento	1	2	3	.....	K
Observaciones	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	.....	$Y_{1k}$
	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	.....	$Y_{2k}$
TOTALES	$T_1$	$T_2$	$T_3$	.....	$T_k$
PROMEDIO	$\bar{Y}_1$	$\bar{Y}_2$	$\bar{Y}_3$	.....	$Y_k$
ESTIMADO DE $T^2$	$S_1^2$	$S_2^2$	$S_2^2$	.....	$S_k^2$

TABLA 2

ARREGLO MODO - UNO					
TRATAMIENTO					
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	
	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{13}$	$Y_{14}$	
	$Y_{21}$	$Y_{22}$	$Y_{23}$	$Y_{24}$	
	$Y_{31}$	$Y_{32}$	$Y_{33}$	$Y_{34}$	
	$Y_{41}$	$Y_{42}$	$Y_{43}$		
	$Y_{51}$		$Y_{53}$		
			$Y_{63}$		
TOTALES T	$I_j = 51$	$I_j = 42$	$I_j = 63$	$I_j = 34$	$K = 4$
	$\sum_{i_j = 1} Y_{ij}$	$\sum_{i_j = 1} Y_{ij}$	$\sum_{i_j = 1} Y_{ij}$	$\sum_{i_j = 1} Y_{ij}$	$G = \sum_{K=1} \sum_{i_j} Y_{ij}$
	$i_j = 11$	$i_j = 12$	$i_j = 13$	$i_j = 14$	$K = 1$
$N_j$	$N^o Y_{ij}$	$N^o Y_{ij}$	$N^o Y_{ij}$	$N^o Y_{ij}$	$K = 4$
	$N = \sum_{K=1} N^o Y_{ij}$				$K = 1$
PROMEDIOS	$\bar{Y}$	$\bar{Y}$	$\bar{Y}$	$\bar{Y}$	

TABLA 3

ANALISIS DE VARIANZA: CLASIFICACION MODO - UNO

FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS CORREGIDA	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	CUADRADO MEDIO ESPERADO
TOTAL	$Sy^2$	$N - 1$		
TRATAMIENTO	SST	$K - 1$	$SST / (K - 1) = MST$	$\sigma^2 + \sum_j N_j \sigma_j^2 / (K - 1)$
ERROR	SSE	$N - K$	$SSE / (N - K) = MSE$	$\sigma^2$

Hipótesis:  $\mu_j = 0$

Prueba:  $F_{v1, v2} = MST / MSE$

$$Sy^2 = \sum_i \sum_j (Y_{ij} - \bar{Y})^2 / (N - 1)$$

$$\left[ \sum_i \sum_j Y_{ij}^2 - G^2 / N \right] / (N - 1), \text{ donde } G = \sum_i \sum_j Y_{ij}$$

$$SST = \sum_j T_j^2 / n_j - G^2 / N$$

$$SSE = Sy^2 - SST$$

T A B L A 4

ANALISIS DE VARIANZA CLASIFICACION MODO - DOS			
FUENTE DE VARIABILIDAD	SUMA DE CUADRADOS CORREGIDA	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO
TOTAL	$Sy^2$	$N - 1$	
BLOQUES	SSB	$n - 1$	$MSB = SSB / (n-1)$
TRATAMIENTOS	SST	$K - 1$	$MST = SST / (k-1)$
ERROR	SSE	$N-n-k+1$	$MSE = SSE / (n-1) (K-1) = S^2$

$\sigma^2 = k \sum_j B_j^2 / (n-1)$   
 $\sigma^2 = n \sum_j J_j^2 / (k-1)$

$Sy^2$  y SST Están definidos en la tabla 3

**V. SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS Y  
CONTROL DE PLANTAS PILOTO**



## SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS Y CONTROL DE PLANTAS PILOTO

### INSTRUMENTACION Y CONTROL

Las plantas piloto son frecuentemente instrumentadas en exceso, sin embargo, también las hay con una instrumentación mínima y otras sin ella con un control totalmente manual.

La instrumentación para el control de procesos en plantas piloto van desde la muy simple con instrumentos sencillos para la detección de variables hasta equipo electrónico con transformadores de señales a -- voltajes para sistemas de computación en línea.

El propósito que se persigue es mantener una sección o secciones del proceso particulares a ciertas condiciones de operación específicas que permitan que un experimento proceda bajo condiciones controladas.

Para la selección de la instrumentación, para el control de procesos, se toman en cuenta generalmente los siguientes factores, sin embargo, para cada caso específico se podrán adicionar más o menos instrumentos según el caso.

El grado de control requerido determina la complejidad de la instrumentación, así para controlar un calentador a  $\pm 10\%$  del punto de ajuste, puede ser posible hacerlo con un mecanismo manual que transmita voltaje (triac), pero controlar el mismo calentador con una variación de  $\pm 0.1\%$  del punto de ajuste y con una carga de calor variable se requiere un controlador mucho más complejo, sin embargo si se desea tener un buen control se deberán seleccionar los mejores controladores para las principales variables de proceso (las más importantes).

La severidad de los trastornos posibles del proceso determinan

la velocidad de respuesta requerida de los instrumentos. Una corriente de alimentación gaseosa entrando a una proporción o composición razonablemente constante, puede ser controlada satisfactoriamente por un controlador de dos modos, pero una corriente de alimentación gaseosa, entrando con una composición variable puede requerir un microprocesador o computadora para aceptar un análisis en línea del gas alimentado, con el fin de corregir la proporción del flujo de gas, de forma tal, que se mantenga el balance de materiales y evitando así disturbios en las etapas posteriores del proceso.

La instrumentación para control de procesos constituye una parte significativa del costo de una planta piloto, entonces la sobrespecificación de instrumentos de control se debe evitar.

Las fuentes de soporte disponibles para servicio, reparación, y calibración de instrumentos debe ser considerada, si la planta piloto es localizada en un sitio remoto, sin personal de mantenimiento adecuado, un sistema de computación complicado puede ser un riesgo distinto. Frecuentemente la estandarización de la instrumentación reduce tiempo de mantenimiento y un controlador más complejo puede justificarse en el interés de la estandarización.

La instrumentación analítica fuera de línea (off-line) o en la línea (on-line) suministra la información sobre el suceso o falla del proceso. El análisis fuera de línea (off-line) es una operación Batch (por lotes) que requiere toma de muestras, manejo y almacenamiento, seguido -- por análisis de la muestra y de los datos, ya sea en el mismo lugar o en otro lado.

El análisis fuera de línea interfiere lo menos posible con el proceso, y es menos caro que el análisis de línea y permite ser realizado bajo condiciones rigurosamente controladas.

Algunos análisis deberán ser realizados de esta manera, debido

a limitaciones del equipo, pero esto está siendo cada vez menos frecuente.

Los análisis fuera de línea (off-line) tienen también muchas - desventajas, tales como el esfuerzo involucrado en la toma, manejo y almacenamiento de muestras, la dificultad en la obtención y almacenamiento de muestras representativas; y el hecho de que las condiciones de proceso no puedan modificarse sobre una base tiempo real como resultado del análisis.

Estos problemas han conducido a un aumento dramático en la cantidad de instrumentación de análisis en línea (on-line) disponibles.

La instrumentación de análisis en línea (on-line) es usualmente cara y con frecuencia impone restricciones o limitaciones sobre la operación óptima del proceso, pero con frecuencia es más precisa y menos molesta que el análisis fuera de línea.

En muchos casos, sobre el analizador en línea son acoplados sistemas basados en microprocesadores o computadoras para control de tiempo real de una variable de proceso secundaria, tal como severidad o conversión, así como para controlar una variable primaria, tal como temperatura, mejorando el control y aumentando la importancia del análisis en línea.

El mantenimiento de instrumentación analítica requiere personal adiestrado, siendo además una actividad que consume tiempo, además siempre es necesario checar la calibración y calibrar si es requerido. Un analizador calibrado incorrectamente o deficientemente generar más problemas en trabajo de planta piloto que el fluido más corrosivo.

La instrumentación para recopilación de datos está creciendo - firmemente en importancia a medida que las plantas piloto aumentan en complejidad y se requiere que más información sea recopilada y almacenada.

Hay tres clases de instrumentos para recopilación de datos, dependiendo de su aplicación y son:

- Instrumentos dedicados a registro (recording instruments)
- Transportadores de datos (data loggers)
- Computadoras (computers).

Los instrumentos dedicados a registro (dedicated recording instruments) son usados extensamente para seguir la tendencia de datos, pero están siendo reemplazados por transportadores de datos (data loggers) o computadoras, debido al alto costo inicial, requerimientos elevados de mantenimiento y la necesidad para interpolar y transcribir datos para cálculos e interpretación posterior.

Los transportadores de datos (data loggers) proveen básicamente una lista numérica de señales desde una gran variedad de fuentes.

Algunos de los más complicados y como consecuencia más caros modelos, son capaces de organizar los datos básicos. Para un gran número de entradas, los transportadores de datos son menos caros que los registros dedicados y produce valores numéricos que son fáciles de transcribir. Algunos modelos altamente complejos y por consecuencia más caros son capaces de reproducir los datos directamente sobre tarjetas o cintas para entrada directa de computadoras fuera de línea (off-line). Los principales inconvenientes de los transportadores de datos son la necesidad de transcribir los datos para análisis posterior en los modelos baratos.

Frecuentemente los costos de un transportador de datos complejo iguala o excede aquellos de un recopilador de datos unido directamente a una computadora existente.

## COMPUTADORAS

El uso de computadora para adquisición de datos se está extendiendo con gran rapidez.

Las computadoras fueron introducidas a trabajos de planta piloto a la mitad de los años 50's, los primeros esfuerzos en la integración de pequeñas computadoras para colección de datos en planta piloto estuvieron llenos de problemas casi insalvables en su mayor parte relacionados a funcionamiento.

En los años 60's la Digital Equipment Corporation introdujo las series PDP-8 de minicomputadoras y la recopilación de datos de planta piloto en línea llegó a ser una realidad.

Muchas de las primeras programaciones fueron dadas en lenguaje de máquina o como lenguaje de ensamble, debido a las restricciones de memoria.

En los años 70's el precio de minicomputadoras más poderosas, con grandes memorias y altos niveles de capacidad de lenguaje disminuyó bastante, justificando su uso en grupos pequeños de plantas piloto o en una simple planta piloto compleja. Durante este período su uso proliferó para tareas tales como adquisición de datos, análisis cromatográficos de gases y líquidos, control supervisor o control digital directo, y configuraciones distribuidas.

## SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS

Estos pueden ser desde inspecciones visuales hasta adquisición de datos por computadora directa, los cuales emplean mecanismos de inter-

face para digitizar las señales de entrada y enviarlas a un almacén de registro en la computadora, ahí los datos pueden ser reducidos, reproducidos o transferidos fácilmente por software.

Los intervalos de muestreo pueden ser desde segundos hasta horas, tales sistemas son usualmente programados para permitir a un operador examinar instantáneamente algunas o todas las señales de proceso.

Este tipo de sistemas tienen ventajas significantes sobre instrumentos dedicados a registro y transportadores de datos, los indicadores de línea frecuentemente pueden ser eliminados, ahorrando los costos iniciales y de mantenimiento continuo, las entradas de proceso adicionales son agregadas con suma facilidad y económicamente, el manejo de datos y la transcripción de los mismos es minimizada, ya que la información es almacenada en un archivo de datos.

Frecuentemente las minicomputadoras son usadas para muestrear señales analógicas y digitales en frecuencias específicas en el rango de segundos a una hora. Los datos son transmitidos generalmente a una gran computadora tipo batch para análisis y generación de reportes.

Algunos sistemas con más capacidad para promediar los datos, de las condiciones límite para la señal de salida, proveen al operador con datos variables seleccionados con tendencia en tablas impresas en lugares centrales dentro del área de planta piloto.

El balance de materiales retroalimentado al operador es la etapa siguiente. La entrada de algún operador vía terminales es provisto para datos no automatizados.

Muchos de estos sistemas han sido justificados sobre las bases de suministro más preciso y oportunamente de los datos al operador y al -

ingeniero de investigación, pero algunos estimados son funcionales para -  
cuantificar el mejoramiento.

## SISTEMA DE CROMATOGRAFIA DE GASES

En investigación del área química, petroquímica o del petróleo, un alto porcentaje de plantas piloto están equipados con uno o más cromatógrafos de gases para determinar la composición de los gases de carga, -  
recirculación y corrientes de productos.

Frecuentemente la muestra es llevada por tubería desde la planta piloto, sin embargo ocasionalmente, el cromatógrafo de gases está localizado en un laboratorio de control cercano a la unidad para inyección manual de la muestra.

Con mayor frecuencia los datos del cromatógrafo de gases o análisis son necesarios en una computadora para cálculos e integración con -  
otros datos y reportes de planta piloto.

Esta información es alimentada a una computadora por claves de entrada en una terminal, la entrada automática vía "smart" (teclado) de -  
los sistema de cromatografía de gases que analizan los datos y envían un paquete de información directamente a la computadora; y calculan directamente muestreando e integrando desde una señal de voltaje desde el detector del cromatógrafo de gases.

Las claves de entrada tienen la desventaja de errores en los datos de entrada y problemas de sincronización.

Los sistemas de cromatografía de gases por teclado, los cuales incorporan microprocesadores, parecen ser más ventajosos, pero son costo-

Los sistemas requieren transmisión múltiple si los canales de acceso a la computadora no están disponibles.

El método más generalmente usado, requiere de una microcomputadora exclusiva con software del cromatógrafo de gases especializado para manejar entre veinte y treinta sistemas de cromatografía de gases.

Un sistema de computadora y cromatógrafo de gases centralizado soporta (resiste) cuando ocurre una interrupción, pero ofrece algunas ventajas.

La computadora puede ser programada para mantener una historia de cambios en los métodos de análisis, funcionamiento del monitor y dar avisos de advertencia cuando se requiere mantenimiento, reduciendo así el número de resultados deficientes de la cromatografía de gases, así como al personal de mantenimiento.

#### SISTEMA SUPERVISOR Y SISTEMA DE CONTROL DIGITAL DIRECTO

El control por computadora de plantas piloto ofrecen más beneficios de los esperados, particularmente cuando el proceso en estudio requiere frecuentes arranques y paros o están orientados a lotes (batch).

Algunas ventajas del control por computadora son la capacidad para tener puntos de ajuste (set-point) más precisos ( $\pm 0.05\%$ ), para calcular puntos de ajuste desde variables correlacionadas, para rampear puntos de ajuste hacia arriba o hacia abajo, para adaptar control a la dinámica de los procesos, para integrar control con otra secuencia o acción (batch) por lote y para utilizar esquemas de control más avanzados.

El control supervisor, es comúnmente usado donde la computadora



ajusta los puntos de ajuste (set-points) de un instrumento separado.

Este tipo de control pone menos carga sobre la computadora en términos de reducción de tiempo y ofrece apoyo de seguridad para cada loop, pero es más caro y limita la flexibilidad.

El control digital directo (DDC), donde la computadora transmite una señal al elemento final de control, es más comúnmente usado en plantas piloto, debido a su flexibilidad, donde la velocidad de recalentamiento no es crítica, un DDC puede ser adaptado a la dinámica de un sistema de reacción de planta piloto para aumentar la productividad.

El control de computadora en batch y en secuencia combinada con DDC es más difícil de implementar, sin embargo, aunque el incentivo es alto para operación de plantas piloto específicamente químicas.

VI.

DISEÑO BASICO DE PLANTA PILOTO  
DE PROPOSITOS MULTIPLES

## DISEÑO BASICO DE PLANTA PILOTO DE PROPOSITOS MULTIPLES

### PROPOSITOS

La planta piloto de propósitos múltiples se caracteriza por tener una localización o edificio específico para este fin, el lugar o edificio contiene equipos de proceso como: tanques, reactores, destiladores, - columnas, cambiadores de calor, centrifugas, filtros, secadores, bombas, transportadores, etc., es decir, todo lo necesario para dar la configuración adecuada para cualquier trabajo específico, y cuenta con todos los servicios auxiliares como son : agua, aire, vapor, etc.

Debido a la multitud de equipos usados la planta piloto de propósitos múltiples daba cumplir con dos puntos importantes.

- a) El arreglo deberá tener todas las características de seguridad importantes y necesarias para la ejecución específica del trabajo en cuestión.
- b) Asegurar que la instrumentación es la adecuada para proporcionar todos los datos de diseño.

De la descripción general anterior se derivan los principales - criterios de diseño, y que son como sigue:

1. La planta piloto deberá proporcionar todos los datos esperados, éste criterio se cumple cuando:
  - a) La planta piloto se diseña para : asegurar una opera -

- ción uniforme, y si esto no es alcanzado, deberá hacerse factible de modificaciones, tanto para el equipo, como para tuberías, con la finalidad de resolver problemas de operación.
- b) Los requerimientos de datos deberán ser cuidadosamente obtenidos y la planta piloto instrumentada en forma adecuada para generar los datos requeridos.
  - c) Se deben dar consideraciones detalladas para escalabilidad.
2. La planta piloto debe producir cantidades de producto de calidad apropiada y con rendimientos predichos, el producto que se obtiene se usa para checar la pureza, para proveer al departamento de mercadeo para que éste lo proporcione a compradores potenciales, para suministrar muestras de campo para pruebas a gran escala, para llevar a cabo estudios toxicológicos y ambientales, etc.
3. La operación se debe enfocar sobre el equipo de proceso crítico y etapas unitarias, antes que a problemas de menor escala; problemas típicos de menor escala son:
- Tapones de líneas cuando se usa tubing o tubería muy pequeña.
  - Líneas congeladas cuando es impráctico trazar o aislar las líneas.
  - Dificultad para transportar material a pequeña escala principalmente cuando se incluyen sólidos.
  - Dificultad para reducir la escala (scaledown) de la instrumentación.
4. La planta piloto debe operar dentro del periodo de tiempo

predicho. Esto significa que los trastornos mecánicos de  
ben minimizarse al máximo.

Tomando en cuenta los criterios de diseño antes mencionados, -  
se puede llevar a cabo un diseño aceptable de una planta piloto de pro-  
pósitos múltiples

## OBJETIVO

Existen una variedad de razones u objetivos para construir una planta piloto; entre estos objetivos se encuentran:

- a) Proveer información y material para evaluar productos nuevos y abastecer el mercado en la prematura fase de crecimiento.
- b) Suministrar información sobre procesos nuevos o alternativas con vistas a reemplazar la tecnología usada con anterioridad en el proceso de manufactura.
- c) Suministrar información sobre procesos existentes para mejorar la operabilidad, productividad y entendimiento.

La intención es conocer las necesidades en escala pequeña consistente con información confiable.

En ciertos casos una miniplanta puede alcanzar los propósitos donde una planta piloto pueda ser necesaria

La información que se obtenga debe satisfacer las necesidades de diseño, así como establecer la factibilidad y seguridad del proceso.

El producto deberá dirigirse a una necesidad anticipada o a un mercado existente.

La información a desarrollar por una planta piloto, denominada también tecnología, debe ser acerca de:

1. Cinética y mecanismo de reacción
2. Rendimientos
3. Calidad
4. Efecto de recirculaciones
5. Materiales de construcción
6. Evaluación de equipo
7. Fenómenos de transporte
8. Seguridad
9. Toxicidad e higiene industrial
10. Efectos sobre el medio ambiente
11. Esquemas de control
12. Experiencia con proceso

Durante los años recientes los aspectos de regulación (seguridad, toxicidad, y efecto sobre el medio ambiente) han ganado prominencia; otro aspecto que puede ser causa de fallas es la recirculación, este aspecto es en ocasiones despreciada, sin embargo, debe ser tomado en cuenta.

## BASES DE DISEÑO

Este documento es el más importante, debido a que contiene la información para llevar a cabo el diseño de una planta.

El documento contiene información requerida para el diseño del proceso, como son: capacidad, rendimiento, flexibilidad, ampliaciones futuras, especificaciones de cargas y productos, condiciones en límites de batería, etc.; contiene también información para realizar la ingeniería de detalle, tales como: eliminación de desechos, requerimientos de almacenamiento, servicios auxiliares, sistemas de seguridad, condiciones climatológicas, localización de la planta, etc.

Las Bases de Diseño, además de fijar los requerimientos del proceso, es un documento útil desde el punto de vista legal.

Las Bases de Diseño se generan desde otro documento denominado Cuestionario de Diseño, que es un documento contestado por el cliente o el dueño de la planta, y abarca aspectos tanto de diseño de proceso como aspectos de diseño detallado, así como condiciones geográficas y climatológicas del lugar donde se construirá e instalará la unidad.



## CUESTIONARIO DE DISEÑO

NOBRE DEL CLIENTE: FACULTAD DE QUIMICA. UNAM.  
NOBRE DE LA PLANTA: PLANTA PILOTO DE PROPOSITOS MULTIPLES  
LOCALIZACION: CD. UNIVERSITARIA. MEXICO, D.F.  
NUM. DE CONTRATO: PRMP-001/86.

### A.1 GENERALIDADES

#### A.1.1. Función de la Planta.

La planta se usará en la investigación de procesos nuevos o existentes, con el fin de obtener datos para diseño, para resolver problemas operativos o para conocer mejor la tecnología en desarrollo o existente.

#### A.1.2 Tipo de Proceso.

Los procesos que se llevarán a cabo pueden ser lotes (batch) semicontínuos (semibatch) o continuos, así como criogénicos, a temperaturas medias y altas, a bajas, medias y altas presiones.

### A.2 CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y FLEXIBILIDAD

#### A.2.1 Capacidad

a) Diseño	125 Kgr/hr
b) Normal	100 Kgr/hr
c) Mínimo	60 Kgr/hr
d) Nominal	125 Kgr/hr

Para los gases se considerarán los flujos volumétricos a condiciones estándar (20°C y 1 atm).

#### A.2.2 Rendimiento

Se opera un tiempo de 7,200 Hr/año, con un factor de servicio de 0.90.



### A.3 MATERIAS PRIMAS

Listar las diferentes alimentaciones a la planta, indicando para ellas su composición, impurezas, flujo, etc.

#### A.3.1 Especificaciones

Estas dependerán del proceso en particular.

#### A.3.2 Condiciones de Alimentación

a) Flujo	<u>La necesaria para tener la capacidad mínima, normal o de diseño, indicada en el punto A.2.1 y se dará en Kg/hr.</u>
b) Presión	<u>Dependerá del estado físico de las materias primas, como mínimo 0 Kg/cm<sup>2</sup> man y como máximo 250 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
c) Temperatura	<u>La temperatura será de 20°C a 30°C o menos.</u>
d) Estado físico	<u>Pueden ser sólidos, líquidos o gases.</u>
e) Forma de recepción	<u>Dependerá del estado físico de las materias primas.</u>
Sólidos	<u>En sacos, tambos de cartón, - frascos o a granel.</u>
Líquidos	<u>Por carro tanque, en tambos, en recipientes a presión, frascos de vidrio o material plástico.</u>
Gases	<u>En cilindros a presión o licuados en carros tanque y recipientes criogénicos.</u>

### A.4 PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

Indicar las especificaciones, así como flujos y condiciones de los productos, indicando también las pruebas analíticas estándar que deben cumplir cuando sea necesario.

#### A.4.1 Especificaciones

Estas dependerán del proceso en particular.

#### A.4.2 Condiciones de entrega

a) Flujo Será cualquier valor de los in-

		<u>dicados en el punto A.2.1</u>
b)	Presión	<u>Dependerá del estado físico y será entre 0kg/cm<sup>2</sup>man y 250kg/cm<sup>2</sup>man.</u>
c)	Temperatura	<u>Se entregará entre 20 y 30°C o menos, si así se requiere.</u>
d)	Estado físico	<u>Pueden ser sólidos, líquidos o gases.</u>
e)	Forma de entrega	<u>Serán según el estado físico.</u>
	Sólidos	<u>En sacos, en tambos de cartón, en bolsas de polietileno o a granel.</u>
	Líquidos	<u>En tambos, en recipientes a presión, en frascos o en carros-tanques.</u>
	Gases	<u>En cilindros a presión, en carros tanque o en tanques criogénicos.</u>

#### A.5 ALMACENAMIENTO

Indicar los requerimientos de almacenamiento, para materias primas y productos - necesarios.

A.5.1	Materias Primas	<u>Área para materiales sólidos, para materiales líquidos y para gases, así como para combustibles.</u>
A.5.2	Productos	<u>Área para materiales sólidos, para líquidos y para gases.</u>

#### A.6 SERVICIOS AUXILIARES

##### A.6.1 Vapor

¿Existe vapor dentro de límite de batería?

a) Se generará vapor con las condiciones siguientes (alta presión)

Presión	60 Kg/cm <sup>2</sup> man mín.	85 Kg/cm <sup>2</sup> man máx.
Temperatura	400°C	422.4°C
Recalentamiento	125°C	125°C
Disponibilidad	La necesaria	

Este vapor es de alta presión.

¿Se requiere vapor de media presión? Si

b) Se acondicionará el vapor de alta presión a las condiciones siguientes:

Presión	17.57 Kg/cm <sup>2</sup> man
Temperatura	216.22°C
Calidad	Recalentado (10°C)
Disponibilidad	La necesaria.

¿Se requiere vapor de baja presión? Si

c) El vapor de alta presión o de media presión se acondicionará como se indica:

Presión	3.5 Kg/cm <sup>2</sup> man
Temperatura	155°C
Calidad	Recalentado (10°C)
Disponibilidad	La necesaria.

#### A.6.2

##### Condensado

¿Se recuperará el condensado para reusarse? Si

a) Condensado de alta presión

Presión	60 Kg/cm <sup>2</sup> man mfn	85 Kg/cm <sup>2</sup> man -8x.
Temperatura	275°C	297.4°C
Se debe flashear hasta	3.5 Kg/cm <sup>2</sup> man para su recuperación.	

b) Condensado de media presión

Presión	17.57 Kg/cm <sup>2</sup> man	
Temperatura	206.22°C	
Se debe flashear hasta	3.5 Kg/cm <sup>2</sup> man para su recuperación.	

c) Condensado de baja presión

Presión	3.5 Kg/cm <sup>2</sup> man
Temperatura	145°C

d) Extensión de la recuperación de condensado, la máxima posible.

#### A.6.3

##### Agua de enfriamiento

El agua de enfriamiento a usarse, ¿de dónde proviene y cuáles son los sistemas y condiciones para el suministro?

Fuente de suministro De pozo (u otra similar).

Sistema de enfriamiento Torre de enfriamiento.

	Presión de entrada en límite de batería	<u>Después de la torre de enfriamiento 5Kg/cm<sup>2</sup>man.</u>
	Temperatura de entrada en límite de batería	<u>32°C (90°F).</u>
	Disponibilidad	<u>La necesaria.</u>
	Presión de retorno en límite de batería	<u>3 Kg/cm<sup>2</sup>man min.</u>
	Temperatura de retorno en límite de batería	<u>46°C (115°F).</u>
	Factor de incrustación para cambiadores de calor	<u>0.0006 m<sup>2</sup> Hr °C/Kcal.</u>
	Análisis pH	<u>6.8 - 7.2</u>
	Sílice como SiO <sub>2</sub>	<u>ppm</u>
	Sólidos disueltos totales como CaCO <sub>3</sub>	<u>ppm</u>
	Dureza total como CaCO <sub>3</sub>	<u>ppm</u>
A.6.4	Agua de Servicios	
	Mencione la fuente, así como calidad y condiciones de esta clase de agua, así como sus principales usos.	
	Fuente de suministro	<u>De Cisterna.</u>
	Calidad	<u>Clarificada y filtrada.</u>
	Usos	<u>Se usará para estaciones de servicios, usos sanitarios, regaderas de emergencia, etc.</u>
	Presión en límite de batería	<u>3.5 Kg/cm<sup>2</sup> (50 psiq).</u>
	Temperatura en límite de batería	<u>20°C a 30°C (68°F a 86°F).</u>
	Disponibilidad	<u>La requerida.</u>
4.6.5	Agua potable	
	Análisis Químico	<u>Conforme a normas vigentes SSA.</u>
	Análisis Bacteriológico	<u>Conforme a normas vigentes SSA.</u>
	Presión en límite de batería	<u>_____</u>
	Temperatura en límite de batería	<u>_____</u>
	Disponibilidad	<u>La requerida, y será suministrada en garrafones.</u>
4.6.6	Agua contra incendio	
	Presión en límite de batería	<u>12.3 Kg/cm<sup>2</sup>man.</u>

Disponibilidad La requerida.

A.6.7 Agua para caldera

Indicar la calidad del agua para generación de vapor y sus condiciones.

Análisis Desmineralizada

pH 7.0

Dureza total como  $\text{CaCO}_3$  ppm

Silice como  $\text{SiO}_2$  ppm

Contenido de  $\text{O}_2$  ppm

Sólidos disueltos totales como  $\text{CaCO}_3$  ppm

Alcalinidad

Presión en límite de batería  $\text{kg/cm}^2$  man (la necesaria).

Temperatura  $109^\circ\text{C}$

A.6.8 Agua de proceso

El agua de proceso debe ser de calidad similar al agua para caldera, como a continuación se indica:

Fuente de suministro Misma fuente que agua para calderas.

Calidad Desmineralizada y desaerada -- y/o vapor condensado limpio.

Análisis

pH

Contenido de gases disueltos Mínimo.

Alcalinidad

Silice como  $\text{SiO}_2$  ppm

Presión en límite de batería  $7.0 \text{ kg/cm}^2$  man

Temperatura en límite de batería  $109^\circ\text{C}$  saturado

Disponibilidad La requerida

$\text{Na}^{++}$

$\text{Mg}^{++}$

$\text{K}^+$

$\text{Na}^+$

$\text{Cl}^-$

$\text{NO}_3^-$

$\text{NO}_2^-$

$\text{SO}_4^{--}$

$\text{HCO}_3^-$

### A.6.9 Aire

El aire debe ser suministrado para dos diferentes servicios como se indica:

#### a) Aire de instrumentos

Suministrado por Servicios Auxiliares

Generado por Compresores reciprocantes del tipo no lubricado

Y debe haber un sistema general fuera de límite de batería que suministre energía (neumática) a todas las áreas de la planta - piloto.

Capacidad extrarequerida 30%

Presión del Sistema 7 Kg/cm<sup>2</sup> man

Punto de rocío -40°C

Impurezas Libre de sólidos y aceite (tierra, polvo, aceite).

Temperatura de Operación Ambiente (20-30°C)

#### b) Aire de planta

Suministrado por Servicios Auxiliares

Generado por Compresor reciprocante no lubricado

Capacidad requerida 100% de capacidad del aire de instrumentos

Este compresor debe estar integrado al sistema de aire de instrumentos para que funcione como relevo en caso de que falle el compresor de aire de instrumentos.

Capacidad extrarequerida 30%

Presión del sistema 7.0 Kg/cm<sup>2</sup> man

Temperatura de operación Ambiente (20-30°C)

### A.6.10 Desfogues

Los desfuegos deben ser de dos niveles, alta y baja presión.

Contrapresión en límite de batería El diseño será hasta el tanque de sello, donde debe existir una contrapresión de 0.5Kg/cm<sup>2</sup>man

### A.6.11 Casos inertes

Se usarán para arranques y paros (barrido de líneas y equipo), así como para equipos de análisis en líneas.



Naturaleza	<u>Nitrógeno/Argón/Helio</u>
Composición	<u>99.99% N<sub>2</sub>/Ar/He</u>
	<u>4 ppm O<sub>2</sub> (máx).</u>
Temperatura	<u>Ambiente (20-30°C)</u>
Otra alternativa será usar vapor de agua a las condiciones que sean convenientes (media presión normalmente).	
Forma de entrega	<u>Para N<sub>2</sub>/Ar/He se recibirá en cilindros localizados dentro de límite de batería.</u> <u>El vapor se recibirá por tubería.</u>

#### A.6.12

#### Combustibles

a) Gas	<u>Por carros tanque a tanques de almacenamiento estacionario (gas natural).</u>
Naturaleza	<u>Gas natural</u>
Peso molecular	<u>18.06</u>
Densidad relativa	<u>0.625</u>
Poder calorífico bajo (LHV)	<u>8300 Kcal/m<sup>3</sup></u>
Presión	<u>3.5 Kg/cm<sup>2</sup></u>
Temperatura	<u>20°C (68°F)</u>
Disponibilidad	<u>La requerida</u>
b) Líquido	
Fuente de suministro	<u>Por carros tanque a tanques de almacenamiento estacionario.</u>
Naturaleza	<u>Combustible</u>
Análisis Químico	
Azufre	<u>3.5% máx</u>
Carbón	<u>15.0 máx. y 7.0 mín.</u>
Metales	<u>Vanadio 200 ppm máx.</u> <u>Sodio 11 ppm máx.</u>
Peso específico (densidad relativa)	<u>1.0 máx. 0.99 mín.</u>
Viscosidad	<u>550 SSF a 50°C</u>
Poder calorífico L.H.	<u>9361 Kcal/Kg mín.</u> <u>9600 Kcal/Kg norm.</u> <u>10113 Kcal/Kg máx.</u>
Presión de operación	<u>5 Kg/cm<sup>2</sup> man</u>
Temperatura	<u>85°C (185°F)</u>
Disponibilidad	<u>La requerida</u>

## A.6.13.

## Refrigeración

Naturaleza del refrigerante

Propano

Composición .

 $C_1, C_2, C_2^*$ 0.50 % mol. $C_3, C_3^*$ 98.0 % mol. min. $1C_4, nC_4, C_4^*$ 1.0 % mol. max. $nC_5, 1C_5, C_6, Pesados$ 0.50

Humedad

0.05 ppm mol

Método de Análisis

ASTM-D-2163 ( Para hidrocarburos )  
VOP-213-54 ( humedad )Forma de entrega en límite de  
bateríaDe carros tanque a tanque de al-  
macenamiento.

Presión en límite de batería

Temperatura en límite de batería

Disponibilidad

20°C a 30°Cla requerida.

## A.6.14

## Energía eléctrica

Fuente (s) de suministro

CFE y generación interna

Interrupciones

Frecuencia

veces/año

Duración

máxima

Hrs.

mínima

Hrs.

promedio

Hrs.

Causas

Tensión

440 Volts

Número de Fases

3

Frecuencia

60 HzCapacidad interruptiva de corto  
circuito0.85

Factor de potencia mínima

Número de conductores

Sección de conductores

Material del conductor

Diámetro del ducto

Acometida

Acometida

Nivel y Coordenadas de la

Acometida

Cobre electrolíticoAsbesto - LementoSubterránea

Se debe contar con un sistema para alimentación de Energía Eléctrica de emergencia con generación propia y las mismas características antes mencionadas.

## A.7

## EFLUENTES.

La eliminación de desechos debe hacerse conforme a:



A.9.2

## Temperatura.

Máxima extrema	_____ °C
Mínima extrema	_____ °C
Máxima promedio	_____ °C
Mínima promedio	_____ °C
Promedio	_____ °C
Promedio del mes más caliente	_____ °C
Promedio del mes más frío	_____ °C
De bulbo húmedo promedio	_____ °C
Máximo de diseño	_____ °C
Humedad relativa	_____ °C
Humedad máxima	_____ °C
Humedad mínima	_____ °C

De ser posible adjuntar un registro de los últimos 5 años.

A.9.3

## Precipitación Pluvial

Máximo horario	_____ mm
Máxima Diaria	_____ mm
Medio	_____ mm

De ser posible adjuntar un registro de los últimos 5 años.

A.9.4

## Tormentas Eléctricas.

Número de tormentas en cada mes.

Enero	_____
Febrero	_____
Marzo	_____
Abril	_____
Mayo	_____
Junio	_____
Julio	_____
Agosto	_____
Septiembre	_____
Octubre	_____
Noviembre	_____
Diciembre	_____

De ser posible adjuntar un registro de tormentas eléctricas de los últimos 5 años.

A.9.5

## Viento.

Dirección de los vientos dominantes	De _____ a _____
Dirección de los vientos reinantes	De _____ a _____
Velocidad media	_____ Km/Hr
Velocidad máxima	_____ Km/Hr
Atmósfera	_____ Corrosiva

Presión Atmosférica  
Contaminantes

mm/Kg.  
CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, etc.

A.9.6 Tormentas por año.

Enero	_____
Febrero	_____
Marzo	_____
Abril	_____
Mayo	_____
Junio	_____
Julio	_____
Agosto	_____
Septiembre	_____
Octubre	_____
Noviembre	_____
Diciembre	_____

Adjuntar una estadística de tormentas durante los últimos 5 años.

A.10

BASES DE DISEÑO CIVIL

A.10.1 Códigos y Reglamentos.

La parte civil debe cumplir con los siguientes reglamentos.

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| a) Estructuras de Concreto | <u>ACI-318-71</u>                        |
| b) Estructuras de Acero    | <u>AISC</u>                              |
|                            | <u>AWS</u>                               |
|                            | <u>AISI</u>                              |
| c) Generales               | <u>Reglamento de Construcciones de</u>   |
|                            | <u>D.F. (RCDF)</u>                       |
|                            | <u>Manual de Diseño de Obras Civiles</u> |
|                            | <u>de CFE.</u>                           |

A.10.2 Solicitaciones por Sismo.

Se usará el Manual de Diseño de Obras Civiles de DFE y se aplicará el criterio determinado por la zonificación sísmica de la República Mexicana.

Zona Sísmica \_\_\_\_\_

A.10.3 Estructuras

Con referencia a las estructuras, éstas se deben usar conforme al criterio siguiente.

Hasta 6 mts. de altura	<u>Concreto</u>
más de 6 mts. de altura	<u>Acero</u>

**A.10.4 Drenajes**

Se debe contar con los siguientes tipos de drenajes:  
 Químico, Pluvial y Sanitario en lo referente a materiales de Construcción será como se indica.

Químico	<u>Acero al Carbón o Barro vitrificado, lo que sea más resistente a la corrosión.</u>
Pluvial	<u>Concreto Reforzado</u>
Sanitario	<u>Asbesto Cemento</u>

**A.10.5 General.**

Nivel de Piso terminado	<u>100.00</u>
Nivel Freático	_____
Información General sobre el tipo de suelo	_____
Tipo de edificios o construcciones que se desean dentro de LB.	_____
Cuarto de Control de Instrumentos	<u>Si</u>
Cuarto de Control Eléctrico	<u>Si</u>
Oficinas	<u>Si</u>
Sanitarios	<u>Si</u>
Cobertizos para Compresoras de proceso	<u>Si</u>
Cobertizos para Compresoras de aire	<u>Si</u>
Cobertizos para bombas	<u>Si</u>

**A.11 BASES DE DISEÑO ELECTRICO.**

**A.11.1 Clasificación de Areas de acuerdo a resistividad eléctrica del terreno** NEC, NEMA, API

Mínima	_____
Máxima	_____
Promedio	_____

**A.11.2 Clasificación según el Servicio ( Alimentación a motores )**

<u>POTENCIA</u>	<u>HP</u>	<u>VOLTS.</u>	<u>FASES</u>	<u>CICLO</u>
De <u>0</u>	a <u>3/4</u>	115	1	60
De <u>1</u>	a <u>150</u>	220	3	60
De <u>200</u>	a <u>500</u>	440	1	60
Alumbrado		115/220	1	60
Instrumentos		115	1	60



¿ Se requiere dejar conexiones para medición de flujo de todos los servicios individuales ?

Si

A.12.5 ¿ Hasta qué grado de medición de temperatura deberán ser equipados los equipos de intercambio de calor y otros equipos de proceso ?

Con termopozos, indicadores de temperatura y registro.

A.12.6 ¿ Además de los analizadores de corrientes continuas necesarias para el proceso, qué analizadores adicionales se requieren ?

Cromatógrafos para gases y líquidos con registradores integrados

A.12.6 General.

La calibración de la instrumentación será en las siguientes unidades:

	Kg/cm <sup>2</sup>		Lb/pda <sup>2</sup>
Presión			
Temperatura	°C	y	°F
Flujo de líquidos	métrica	e	inglesa
Vapor	métrica	e	inglesa
Vapor de Agua	métrica	e	inglesa
Reactivos	métrica	e	inglesa
Agua	métrica	e	inglesa

métrica = Lts/Hr. ó Kg./Hr.

inglesa = Pie<sup>3</sup>/Hr. ó Lb./Hr.

A.13

### BASES DE DISEÑO MECANICO.

Los códigos y estándares que deben estar acordes con los diseños son:

A.13.1 Códigos y estándares para:  
 Recipientes y Columnas a Presión ASME Sec. VIII Div.1, Div.2.  
 Tanques de Almacenamiento de fondo plano y Addendas última edición.  
 Cambiadores de calor API-650  
TEMA

A.13.2 Condiciones de Diseño.

- a) Presión de diseño.  
 0 - 1.03 Kg./cm<sup>2</sup> abs. 1.03 Kg/cm<sup>2</sup> abs. externa  
1.75 Kg/cm<sup>2</sup> abs. interna  
 1.03 Kg/cm<sup>2</sup> y mayores Lo que resulte mayor de  
Pop + 1.4 Kg/cm<sup>2</sup>  
Pop x 1.1 Kg/cm<sup>2</sup>
- b) Temperatura Temperatura de Operación + 25°C
- c) Espesor por corrosión Se fijará conforme al desgaste del material por exposición a la sustancia manejada.



d) Espesores mínimos Diámetro en mm. entre 1000 + 2.5  
pero no menos de 6 mm.

A.14 BASES DE DISEÑO DE TUBERÍAS.

A.14.1 Códigos y Normas. ANSI, API

A.14.2 Tolerancias por Corrosión.  
Acero al Carbón 0.125 pulgadas  
Acero inoxidable 0.0625 pulgadas  
Material vidriado -----

A.14.3 Soportes.  
Se tendrá un rack de tuberías entre módulos de 2 mts. de ancho en 2 -  
camas y proyecciones laterales de 1.5 mts.  
Tipo de soportes Perfiles I  
Requerimientos especiales de altura de soportes altura de rack 4.5 mts.  
¿ Se permite el uso de trincheras ? Sólo en caso necesario.

A.14.4 Espacios libres.  
Se deben respetar los espacios según los siguientes criterios.

Tanques y recipientes	<u>1.5 mts. - 1 mto.</u>
Columnas	<u>2.4 mts. - 1 mto.</u>
Bombas hasta 10 HPs. mayores de 10 HPs	<u>2.4 mts. - base común</u> <u>0.90 mts.</u>
Cambiadores de calor	<u>0.90 mts.</u>
Pasillos	<u>1.5 mts.</u>

A.14.5 General.

Se usarán los siguientes tipos de drenajes:

Químico	<u>Acero al carbón o barro vitri-</u> <u>ficado</u>
Pluvial	<u>Concreto reforzado</u>
Sanitario	<u>Asbesto - cemento</u>

Se construirán maquetas

Los dibujos que se desean son:

Plantas y elevaciones, isométricas de tuberías, despieces de tuberías.

A.15 BASES DE DISEÑO GENERAL DE EQUIPOS.

Normas, Códigos y Especificaciones.

Equipo de intercambio de calor	<u>TEMA, ASME, API, HEI.</u>
Edificios, Estructuras	<u>ACI-318, AISC, AWS, AISI, CFE, -</u> <u>RCDF.</u>

	Recipientes	<u>ASME, API</u>
	Tuberías	<u>ANSI, API</u>
	Electricidad	<u>NEC, NEMA, API</u>
	Ruido	<u>API, NFPA</u>
	Seguridad	<u>NFPA, PEMEX</u>
	Contaminación	<u>NFPA, PEMEX</u>
<b>A.15.1</b>	<b>Bombas.</b>	
	Tipo de accionador	<u>Motor eléctrico</u>
	Sobrediseño deseado	<u>20 %</u>
	Tipo preferido de bomba	<u>Según el servicio y va desde cen-</u> <u>trífuga, rotatoria, de despla-</u> <u>zamiento positivo y dosificadores.</u>
<b>A.15.2</b>	<b>Compresores.</b>	
	Tipo de accionador	<u>Motor eléctrico</u>
	Sobrediseño deseado	<u>20%</u>
	Tipo preferido de Compresor	<u>Según el servicio, y puede ser:</u> <u>centrífuga, rotatorio o recipro-</u> <u>cante.</u>
<b>A.15.3</b>	<b>Recipientes.</b>	
	Tipo de recipiente	<u>Según el servicio puede ser a --</u> <u>presión o atmosférico, horizon-</u> <u>tal o vertical</u>
	tipo de soporte	<u>Recipientes horizontales serán -</u> <u>soportados por silletas.</u> <u>Recipientes verticales serán so-</u> <u>portados por patas.</u> <u>Recipientes de almacenamiento se</u> <u>soportarán sobre su fondo ( gran</u> <u>des capacidades.)</u>
<b>A.15.4</b>	<b>Equipo de Intercambio de Calor.</b>	
	Tipo preferido	<u>Serán de varios tipos: tubo y co-</u> <u>raza doble tubo, multitubo, etc.</u> <u>con factores de incrustación de:</u> <u>0,0006 <math>\frac{^{\circ}\text{C Hr m}^2}{\text{cal}}</math> para agua.</u>
<b>A.15.5</b>	<b>Evaporadores.</b>	
	Tipo de evaporador.	<u>Será de tubos cortos, de tubos -</u> <u>largos, y de tubos cortos hori-</u> <u>zontales en arreglos de simple y</u> <u>múltiple efecto, y circulación -</u> <u>natural y forzada.</u>

A.15.6	Cristalizadores. Tipo preferido	<u>Serán de acuerdo a requerimientos de proceso</u>
A.15.7	Filtros Tipo preferido	<u>A presión y a vacío de operación continua e intermitente.</u>
A.15.8	Centrifugas. Tipo preferido	<u>Canasta de operación continua e intermitente</u>
A.15.9	Secadores. Tipo preferido	<u>Continuo e intermitente</u>
A.15.10	Agitadores. Tipo preferido	<u>Propela y turbina y para fluidos viscosos</u>
A.15.11	Reactores Tipo preferido	<u>Serán del tipo continuo e intermitente</u>
A.15.12	Equipos Varios. Tipo preferido.	<u>Conforme a requerimientos de proceso</u>

## A.1 GENERALIDADES.

### A.1.1 Función de la Planta.

La planta piloto de múltiples propósitos se debe abocar al desarrollo de nuevas tecnologías, así como el estudio de las existentes para su mejor comprensión. Se obtendrán también datos para diseño y escala - ción a nivel industrial de los procesos que se estudien, incluyendo también solución de problemas de tipo operativo.

### A.1.2 Tipo de Proceso.

El proceso o los procesos que se llevarán a cabo serán muy variados, de manera que pueden ser: procesos continuos, procesos semicontinuos y también procesos batch, en lo referente a condiciones de coacción pueden ser a vacío y a presiones altas, así como criogénicos y temperaturas elevadas. En base a lo anterior la planta contará con los no dulos y equipos necesarios para poder integrar cualquier unidad para el proceso correspondiente.

## A.2 CAPACIDAD, RENDIMIENTO Y FLEXIBILIDAD.

### A.2.1 Capacidad.

La capacidad de la planta será la siguiente:

a)	Capacidad de diseño	{ 125 Kg/Hr }
b)	Capacidad normal	{ 100 Kg/Hr }
c)	Capacidad mínima	{ 60 Kg/Hr }
d)	Capacidad nominal	{ 125 Kg/Hr }

La planta deberá manejar tanto líquidos como gases y aún sólidos cuando se requiera, esta capacidad debe considerarse para cada módulo que integre la planta.

Las condiciones de los gases se consideran a 1 atm. y 20° C.

### A.2.2 Rendimiento.

Se considera que la planta operará 7,890 Hr/año aunque el tiempo de - operación pueda ser menor ya que los procesos que se implementen utilizarán diferentes tiempos de operación para obtener los datos necesg rios.

En base a lo anterior se considera un factor de servicio de 0.9

### A.2.3 Flexibilidad.

La flexibilidad de la planta será tal que permita operación continua,

semicontinua y ( en batch ) por lotes, así como el tener la capacidad para ensamblar los módulos en diferentes formas con el fin de tener procesos muy variados y deberá tener las facilidades para seguir operando a falta de:

Aire y electricidad, pero no debe operar a falta de agua de enfriamiento o refrigerante, en estos casos se debe contar con las facilidades necesarias para tener un paro ordenado, lo mismo debe ser para el caso de falta de vapor.

#### A.2.4

#### Requerimientos Especiales.

##### a) Suministro Eléctrico.

La planta no debe interrumpir su operación a falta de energía eléctrica, esto implica que se tenga una unidad para suministro eléctrico alternativo y que operará cuando el suministro de CFE se vea interrumpido y que pudiese causar un paro repentino, en caso de que éste fuera de operación se deberá tener un paro ordenado y un sistema de emergencia para operación de los equipos necesarios para el vaciado de los sistemas que pudieran dañarse en un paro repentino.

##### b) Aire de Instrumentos.

El aire necesario para operación de los instrumentos que lo requieran ( instrumentos de control ) será suministrado desde el sistema de aire de instrumentos, en caso de falla se tomará del sistema de aire de planta, si ambos fallan, se deberá tener una instrumentación de control manual adicional y como curso final se tendrá un paro ordenado de la planta.

##### c) Agua de Enfriamiento y Refrigerante.

El agua de enfriamiento, así como refrigerantes serán suministrados desde los servicios auxiliares con los que la planta debe contar y en caso de falta de éstos se debe cortar también el suministro de energía como el vapor en circuitos que así lo requieran y como consecuencia se debe tener un paro ordenado.

##### d) Vapor.

El vapor de calentamiento y para otros usos será suministrado por los servicios auxiliares y en caso de falta de vapor de acuerdo a la necesidad se debe tener un paro ordenado de planta.

##### e) Previsiones Futuras.

Se prevee para el futuro ciertos requerimientos de espacio pa

ra equipos adicionales que requieran de pruebas, así como para tecnologías novedosas.

El excedente considerado será de un 30 % por módulo y 30 % del total para módulos adicionales.

### A.3 MATERIAS PRIMAS.

Las materias primas que se alimentarán a la planta serán muy diversas y dependerán del proceso en estudio o en desarrollo.

#### A.3.1 Especificaciones.

Puesto que la planta piloto será de múltiples propósitos, las especificaciones de la carga serán particulares de cada caso específico.

#### A.3.2 Condiciones de Alimentación.

a) Flujo.

El flujo de materias primas será el correspondiente para cada proceso en particular con el cual se tenga la capacidad mínima o normal y aún la de diseño que se indica en el punto A.2.1.

b) Presión.

La presión a que se recibirán las materias primas en límite de batería dependerá del estado de éstas y puede ser desde presión atmosférica hasta presiones altas ( o a  $250 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man}$  )

c) Temperatura.

La temperatura de recepción deberá ser la ambiente, es decir, alrededor de  $20^\circ \text{ C.}$  a  $30^\circ \text{ C.}$

d) Estado Físico.

Las materias primas pueden estar como: sólidos, líquidos, o gases.

e) Forma de ( Entrega ) Recepción.

La forma de entrega dependerá del estado físico de las materias primas, de tal manera que se hará de la siguiente forma :

Sólidos  
Líquidos

En sacos o a granel  
Por carro tanque, en tambos o en  
recipientes a presión y aún en -  
frascos de vidrio o de material-  
plástico.

Gases

En cilindros a presión, por ca-  
rro tanque o licuado en recipien-  
tes criogénicos.

#### A.4 PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS.

Los productos y subproductos de la planta serán muy variados en función del proce-  
so en estudio o tecnología en desarrollo.

##### A.4.1 Especificaciones.

Las especificaciones dependerán de cada caso en particular, por lo -  
que serán bastante específicas según el caso de que se trate.

##### A.4.2 Condiciones de entrega.

###### a) Flujo.

El flujo de productos se ha determinado como de 100 Lt/Hr. co-  
mo normal y como mínimo de 60 lts/Hr o en su caso de 100 Kg/  
Hr. como normal y 60 Kg/Hr como mínimo

###### b) Presión.

La presión de entrega en límite de baterías dependerá del esta-  
do físico del producto y puede ser desde presión atmosférica -  
hasta presiones altas ( o a 250 Kg/cm<sup>2</sup> man. )

###### c) Temperatura.

La temperatura de entrega será la ambiente, es decir, alrededor  
de 20°C. a 30°C.

###### d) Estado Físico.

Los productos pueden ser sólidos, líquidos o gases, según el -  
proceso de que se trate.

###### e) Forma de entrega.

Los productos se entregarán según el estado físico de los mis-  
mos, de manera que hará de la siguiente forma:

Sólidos

En sacos , en pequeñas bolsas de  
material plástico a granel o en  
pequeños tambores de cartón.

## Líquidos

En tambos, en recipientes a presión o en carros tanque y aún en frascos de material plástico y o vidrio.

## Gases

En forma licuada o a presión, en recipientes a presión, en cilindros, en carros tanque o tanques criogénicos.

### A.5

#### ALMACENAMIENTO.

Para la recepción de materias primas químicas y combustibles, así como para almacenar los productos terminados se deben tener los espacios y equipos necesarios para este fin y se debe considerar de la forma siguiente:

##### A.5.1 Materias Primas.

Se debe contar con un área para almacenamiento de materiales sólidos, ya sea en sacos o a granel para una operación de la planta de 15 días, para el caso de líquidos que se reciban en carros tanque, se debe contar con recipientes de almacenamiento atmosféricos y a presión con capacidad para 15 días de operación, se debe contar también con un área para almacenamiento de tambos y frascos de vidrio, garrafones o porrones.

Para gases presurizados o licuados se debe contar con un área para cilindros a presión y tanques refrigerados y criogénicos con capacidad para 15 días de operación.

Para los combustibles líquidos se deberá tener capacidad de almacenamiento para un mes de operación por medio de tanques atmosféricos y para combustibles gaseosos se debe tener un recipiente a presión con la misma capacidad.

##### A.5.2 Productos.

La capacidad de almacenamiento debe ser de 15 días, ya sea que los productos estén en estado sólido, líquido o gas.

Para sólidos el área debe considerar sólidos en sacos o a granel.

Para líquidos, se debe considerar el uso de recipientes a presión o atmosféricos, garrafones y frascos.

Para gases se deben tener recipientes a presión o criogénicos a fin de mantener el producto licuado, se debe considerar también el área para cilindros.



Los servicios auxiliares necesarios serán generados dentro de límite de batería, garantizando así una operación eficiente y segura.

#### A.6.1 Vapor.

El vapor necesario se generará en servicios auxiliares a alta presión y recalentado, de manera que a partir de éste se generen otros niveles de presión y calidad en el vapor de acuerdo a las necesidades requeridas. El vapor se generará bajo las condiciones siguientes:

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr.</u>
Presión	<u>60 Kg/cm<sup>2</sup> man. o 85 Kg/cm<sup>2</sup> man</u>
Temperatura	<u>400 °C a 422,4 °C</u>
Recalentamiento	<u>125 °C</u>

#### A.6.2 Condensado.

El condensado producto se recuperará y se retornará al sistema de generación de vapor, los condensados de presiones altas se semetarán a una expansión súbita para tenerlo a las condiciones requeridas.

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr</u>
Presión	<u>3,5 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>138 °C</u>
Calidad	<u>Saturado</u>

#### A.6.3 Agua de Enfriamiento.

El agua de enfriamiento se usará en equipos que requieran ser enfriados como condensadores, reactores etc., las condiciones serán las siguientes.

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr.</u>
Presión	<u>5 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>32 °C</u>

Las condiciones de retorno después del paso por el equipo que la requieran serán.

Flujo	<u>La requerida Kg/Hr</u>
Presión	<u>3 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>46 °C y como máximo 49 °C</u>
Factor de ensuciamiento	<u>0.0006 m<sup>2</sup> Hr °C/K cal.</u>
Índice de Langelier	<u></u>

pH

6.8 a 7.2

**A.6.4 Agua de Servicios**

Se usará principalmente para estaciones de servicios sanitarios y otros. Las condiciones de ésta será la siguiente:

Flujo	<u>El necesario Kg/Hr. (variable)</u>
Presión	<u>3.5 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>Ambiente</u>
Servicio	<u>Intermitente</u>

**a.6.5 Agua potable.**

Se usará para beber y será suministrada en garrafones o botellones.

**A.6.6 Agua contra incendio.**

Se usará en condición de emergencia por fuego y se usará con las siguientes condiciones.

Flujo	<u>El necesario Kg/Hr. (variable)</u>
Presión	<u>12.3 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>Ambiente</u>
Servicio	<u>Intermitente</u>

**A.6.7 Agua para Caldera.**

El agua de alimentación a caldera será desmineralizada debido a que se genera vapor de alta presión.

Flujo	<u>La requerida Kg/Hr.</u>
Presión	<u>La necesaria Kg/cm<sup>2</sup> man. (3.5 Kg/cm<sup>2</sup> man.)</u>
Temperatura	<u>109 °C</u>

**A.6.8 Agua de Proceso.**

Para proceso se requiere agua de calidad comparable a la de caldera por lo que podrá usarse agua desmineralizada y condensado.

**a) Agua Desmineralizada.**

Esta agua se usará después de haber pasado por el desaerador.

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr.</u>
Presión	<u>7.0 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>109 °C. (saturado)</u>

b) Condensado.

El condensado se puede tomar directamente de los cabezales a -- las condiciones que se requieran.

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr.</u>
Presión	<u>7.0 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>Saturado</u>

A.6.9

Aire.

El aire necesario para instrumentos y servicios se generará dentro de límite de batería.

a) Aire de Instrumentos.

Presión	<u>7 kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Punto de Rocío	<u>- 40 °C.</u>
Impurezas	<u>Libre de sólidos y aceite</u>
Temperatura	<u>Ambiente</u>

b) Aire de Planta.

Se usará principalmente en estaciones de servicios, válvulas de pistón, motores neumáticos, etc.

Presión	<u>7 Kg/cm man.</u>
Impurezas	<u>Libre de sólidos y aceite.</u>
Temperatura	<u>Ambiente</u>

A.6.10

Desfogues.

Deben existir dos (2) niveles alta y baja presión.

Contrapresión en:

Tanque de sello	<u>0.5 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
-----------------	-----------------------------------

A.6.11

Gas Inerte.

Suministrado desde tanques localizados dentro de límite de batería, - se usará para barridos de líneas y equipos en arranques y paros. Así como para equipo de análisis en línea.

Naturaleza	<u>Nitrógeno/Argón/Helio</u>
Composición	<u>99.99% N<sub>2</sub>/Argón/Helio</u>
Presión	<u>4 ppm. de O<sub>2</sub> ( max )</u>
Temperatura	<u>7 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
	<u>Ambiente</u>

También se usará como inerte donde aplique vapor de agua que es generado dentro del Area de Servicios Auxiliares.

Flujo	<u>El requerido Kg/Hr</u>
Presión	<u>17 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>310 °C</u>
Recalentamiento	<u>125 °C</u>

#### A.6.12

#### Combustibles.

Los combustibles se usarán principalmente en la generación de vapor.

##### a) Gas.

Se usará gas natural como combustible gaseoso.

Flujo	<u>El requerido Kg/hr.</u>
Peso molecular	<u>18.06</u>
Densidad relativa	<u>0.625</u>
Poder Calorífico Bajo	<u>8,300 K cal/m<sup>3</sup></u>
Presión	<u>3.5 Kg/cm<sup>2</sup></u>
Temperatura	<u>Ambiente</u>

##### b) Líquido.

Naturaleza	<u>Combustible</u>
Composición	
Azufre	<u>3.5% max.</u>
Carbón	<u>15.0 RB max. y 7.0 min.</u>
Metales	
Vanadio	<u>200 ppm max.</u>
Sodio	<u>11 ppm max.</u>
Densidad relativa	<u>1.0 max. 0.99 min.</u>
Poder Calorífico	<u>9,361 K cal/Kg min.</u>
	<u>9,600 K cal/Kg. normal</u>
	<u>10,113 K cal/Kg. max.</u>
Presión	<u>5 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>85 °C.</u>

#### A.6.13 Refrigeración.

Se contará con un sistema de refrigeración con el fin de alcanzar - temperaturas de enfriamiento inferiores a la ambiente y se aplicará cuando sea necesario.

Naturaleza del refrigerante	<u>Propano</u>
Flujo	<u>El requerido Kg/Hr.</u>
Presión	<u>7 Kg/cm<sup>2</sup> man.</u>
Temperatura	<u>Menor que la ambiente</u>

#### A.6.14 Energía Eléctrica.

El suministro de energía eléctrica será exterior; sin embargo, se - contará con un sistema de emergencia capaz de suministrar la energía necesaria para la operación segura, también se tendrá un sistema de fuerza ininterrumpible para instrumentos.

Voltaje	<u>440 Volts.</u>
Fases	<u>3</u>
Ciclos	<u>60 Hz.</u>
Acometida	<u>Subterránea</u>
Generador	<u>SI, para emergencia</u>
Localización	<u>Dentro de L.B.</u>

#### A.7 EFLUENTES.

La eliminación de desechos deberá satisfacer las normas de seguridad y los re - quierimientos oficiales respecto a la pureza del agua y del aire.

##### A.7.1 Gases.

Se debe contar con un sistema de eliminación de polvos para evitar - que vayan a la atmósfera.

##### A.7.2 Líquidos.

El agua contaminada con químicos y orgánicos deben tratarse en la co - rrespondiente unidad de tratamiento .

#### A.8 PROTECCION Y SEGURIDAD.

##### A.8.1 Criterios y Diseño.

El diseño se hará conforme al NFPA y a los reglamentos locales .

A.8.2 Sistema Contra Incendio.

El sistema contra incendio deberá estar constituido principalmente - por hidrantes y monitores.

Equipo móvil y Portátil  
Extintidores  
Rociadores, donde se requiera  
Cámaras de espuma, donde se requiera

A.8.3 Protección de Personal.

Para protección del personal se contará con regaderas, tomas de aire y lava ojos, según se requieran; así como detectores de gases tóxicos.

A.8.4 Protección de Equipo.

Para evitar mala operación del equipo de manera que se garantice su buen funcionamiento se contará con estaciones de servicio donde esté disponible agua, aire y vapor.

A.9 CONDICIONES DEL LUGAR.

A.9.1 Localización.

La planta piloto de múltiples propósitos se localizará en la ciudad de México, dentro del área asignada a la Universidad Nacional Autónoma de México y dentro de la Facultad de Química.

Elevación sobre el nivel del

mar	mts.
Presión Barométrica	mm Hg
Atmósfera	Corrosiva (CO <sub>2</sub> , CO, etc.)
Coordenadas	N
Coordenadas de referencia	N <sub>1</sub> E <sub>1</sub>

A.9.2 Temperatura.

Máxima extrema	°C
Máxima promedio	°C
Mínima promedio	°C
Mínima extrema	°C
Promedio del mes más caliente	°C
Temperatura de bulbo húmedo de diseño	°C

Temperatura de bulbo

húmedo máximo

°C

mínimo

°C

Humedad relativa

°C

Humedad máxima

°C

Humedad mínima

°C

A.9.3 Precipitación pluvial.

Máxima Horaria

mm

Máxima Diaria

mm

Media Anual

mm

A.9.4 Tormentas Eléctricas.

Número Mensual Máximo

Número Mensual Mínimo

Número Mensual Promedio

A.9.5 Viento.

Dirección de Vientos

Dominantes

Dirección de Vientos

Reinantes

Velocidad Media

Velocidad Máxima

A.9.6 Número de Tormentas por año.

Enero

Febrero

Marzo

Abril

Mayo

Junio

Julio

Agosto

Septiembre

Octubre

Noviembre

Diciembre

**A.10****BASES DE DISEÑO CIVIL.****A.10.1 Códigos y Reglamentos.**

a) Estructuras de Concreto	<u>ACI 318-71</u>
b) Estructuras de Acero	<u>AISC</u>
	<u>AWS</u>
	<u>AISI</u>
c) Generales	<u>Reglamentos de Construcciones</u>
	<u>del D.F.</u>
	<u>Manual de Diseño de Obras</u>
	<u>Cíviles de C.V.E.</u>

**A.10.2 Sísmicidad.**

Se determinará por la zonificación sísmica de la República Mexicana.

Zona

**A.10.3 Estructuras.**

Concreto, hasta 6 mts. de altura  
Acero, arriba de 6 mts.

**A.10.4 Drenajes.**

a) Químico	<u>Acero al Carbón o barro</u>
	<u>Vitrificado, lo más resistente</u>
b) Pluvial	<u>Concreto Reforzado</u>
c) Sanitario	<u>Asbesto cemento</u>

**A.11****BASES DE DISEÑO ELECTRICO.****A.11.1 Clasificación de acuerdo a NEC y API****A.11.2 Clasificación según el servicio ( características )**

	<u>VOLTAJE</u>	<u>FASES</u>	<u>CICLOS</u>
Motores de 0 a 3/4 HP	115	1	60
Motores de 1 a 150 Hr	220	3	60
Motores de 200 a 500 Hr	440	3	60
Alumbrado	115/220	1	60
Instrumentos	115	1	60



A.11.3	Suministros.	Subestación Carga Conectada Estimada Factor de Demanda Factor de Potencia	<u>Dentro de L.B.</u> <u>0,9 máximo</u> <u>0.85</u>
A.11.4	Distribución de Fuerza.	CCH's Localización Espacios para Reservas Cable tipo Calibre ( Mínimo )	<u>SI</u> <u>Cuarto de Control</u> <u>20 %</u> <u>TIM</u> <u>12 AWG</u>
A.11.5	Alumbrado.	Tipo de Lámparas a) Area de Proceso b) Oficinas c) Exteriores Alumbrado de Emergencia	<u>Vapor de Mercurio y Fluorescente</u> <u>Fluorescente</u> <u>Vapor de Mercurio o sodio</u> <u>SI</u>
A.11.6	Sistema de Intercomunicación.	Requerido	<u>SI, a base de teléfonos e inter</u> <u>fonos</u>
A.12	BASES DE DISEÑO DE INSTRUMENTOS.		
A.12.1	Tablero de Control	El tablero de control de instrumentos será del tipo semigráfico y - consola	
A.12.2	Tipo de instrumentación.	Por su fuente de energía Por su tipo de lectura	<u>Electrónica y neumática</u> <u>Análogica y digital</u>
A.12.3	Consola de Temperatura.	Tipo de lectura. Consola Tipo	<u>Multipunto digital</u> <u>Escritorio</u>

## A.12.4

## Flujo.

Se requieren totalizadores de flujo en:

Corrientes de entrada y salida	<u>SI</u>
Servicios Auxiliares	<u>SI</u>
Tipo de Totalizadores	<u>Montados en tablero con señal digital</u>

## A.12.5

## Temperatura.

Los equipos de intercambio serán equipados con termopozos e indicadores de temperatura con lecturas analógica.

## A.12.6

## Analizadores.

Se tendrán analizadores en línea de corrientes continuas como son cronógrafos con registradores integradores.

## A.13 BASES DE DISEÑO MECANICO.

## A.13.1

## Códigos y Estándares Aplicables.

Recipientes y columnas sujetos a presión	<u>ASME Sec. VIII Div. 1 y Addendas Última edición</u>
Tanques de Almacenamiento de fondo plano	<u>API-650 Última edición</u>
Cambiadores de Calor	<u>ASME Sec. VIII Div.1 y TEMA</u>

## A.13.2

## Condiciones de Diseño.

- a) Presión de Diseño  
Presión de Operación  
0 - 1.03 Kg/cm<sup>2</sup> abs.  
1.03 Kg/cm<sup>2</sup> y mayores
- Presión de Diseño  
1.03 Kg/cm<sup>2</sup> abs. externa  
1.75 Kg/cm<sup>2</sup> abs. interna  
La mayor de  
a) P.op + 1.4 Kg/cm<sup>2</sup>  
b) P.op A-1:1
- b) Temperatura de Diseño  
Temperatura de operación  
mas 25 °C
- c) Espesor por corrosión  
Se fijará conforme al desgaste del material por exposición a la sustancia manejada y se indica en hoja de datos
- d) Espesores mínimos  
Diámetro en mm entre 1000 mds -  
2.5 mm, pero no menos de 6 mm



### A.15.3

#### Recipientes de Proceso.

Se dimensionarán de acuerdo a tiempos de residencia requeridos por el proceso, la posición se determinará de acuerdo a la función a desempeñar, así como factores de operación y control.

Se soportarán de acuerdo a los siguientes criterios

a) Recipientes horizontales

Se soportarán por medio de silletas

b) Recipientes verticales

Se soportarán por medio de patas.

c) La altura de los soportes desde peso terminado ( NPT ) incluyendo la altura de cimentación se determinará conforme a los requerimientos de proceso o a un espacio mínimo permisible requerido para conexiones y tuberías aplicándose lo que resulte mayor.

### A.15.4

#### Equipo de Intercambio de Calor.

Se diseñarán de acuerdo a los requerimientos de proceso considerando equipos de tubo y coraza, tubos concéntricos ( doble tubo ) y multi-tubo.

### A.15.5

#### Evaporadores.

Se deberán diseñar considerando arreglos de simple y múltiple efecto, los evaporadores serán de tubos largos verticales, tubos cortos verticales y tubos cortos horizontales, se debe considerar también el tipo de circulación de fluido, es decir, por circulación natural y circulación forzada.

### A.15.6

#### Cristalizadores.

Se diseñarán según los requerimientos de proceso considerando el crecimiento de cristales.

### A.15.7

#### Filtros.

Serán del tipo a presión y a vacío de operación preferentemente continuo.

### A.15.8

#### Céntrifugos.

Serán de tipo canasta de operación continua e intermitente.

**A.15.9**

**Secado.**

Los secadores serán continuos y por lotes según se requieran.

**A.15.10**

**Agitadores.**

Los agitadores serán preferentemente del tipo propela y turbina. Se deben considerar también los aplicables a pastas y fluidos viscosos

**A.15.11**

**Reactores.**

Los reactores serán de varios tipos continuos e intermitentes con los elementos necesarios para su buen funcionamiento.

**A.15.12**

**Equipos Varios.**

Se diseñarán conforme a requerimientos de procesos y casos especiales

## SISTEMAS CONSIDERADOS

Para que una planta piloto de propósitos múltiples cumpla con los objetivos principales como son: capacidad para manejar más de un proceso a la vez, flexibilidad de operación, adaptabilidad de los equipos, entre otros, se requiere que la planta se integre de diferentes módulos, cada uno de ellos con una operación unitaria y con los equipos necesarios, debe contar también con módulos de procesos unitarios con un reactor químico como constituyente principal en cada módulo de este tipo.

Los módulos de operaciones unitarias y módulos de procesos unitarios integrados constituirán la planta piloto de múltiples propósitos.

Cada módulo de operación unitaria y proceso unitario debe basarse en un sistema específico para fines de diseño de los equipos que integren el módulo.

Los módulos de operaciones unitarias se basan en los sistemas indicados en la siguiente tabla.

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
1	ABSORCION	MEZCLA DE HIDROCARBUROS ALTIM. MINERAL, REMOVER 90% DE ISOBUTANO PM ACEITE 200 GRAVEDAD ESPECIFICADA 0.825 CONDICIONES DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS $P = 7.3 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ CONDICION DE ACEITE $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_1$ 70.50 $C_2$ 6.50 $C_3$ 8.00 $iC_4$ 3.50 $nC_4$ 5.00 $nC_5$ 2.00 $nC_5$ 3.00 $nC_6$ 1.50	TORRE DE PLATOS
2	ABSORCION	MEZCLA DE AIRE - AMONIACO AGUA REMOVER 99% DE AMONIACO CONDICIONES DE MEZCLA-AIRE-AMONIACO $P = 0.24 \text{ KG/cm}^2 \text{ man.}$ $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ CONDICIONES DEL AGUA $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	AIRE 60.00 $NH_3$ 40.00	TORRE EMPACADA
3	ADSORCION	MEZCLA AIRE - BENCENO CARBON ACTIVADO REMOVER BENCENO	AIRE 95.00 BENCENO 5.00	COLUMNA EMPACADA

MÓDULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MÓDULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.		TIPO DE EQUIPO
4	ADSORCION	AGUA COLOREADA CARBON ACTIVADO REMOVER	COLOR NUMERO APHA 70,000		TANQUES AGITADORES TORRES FLUIDIZADAS CLARIFICADORES
5	CENTRIFUGACION	AGUA CARBONATO DE CALCIO REMOVER CARBONATO DE CALCIO	AGUA	50% PESO	CENTRIFUGACION
			CARBONATO	50% PESO	INTERMITENTE CONTINUA
6	CRISTALIZACION	SOLUCION SULFATO DE AMONIO SATURADO A 100 °C REMOVER LA SAL EL LICOR MADRE DEBE SALIR A 25 °C.	AGUA-SULFATO DE AMONIO SATURADA		VARIOS
7	DECANTACION	MEZCLA AGUA-ACEITE REMOVER ACEITE DENSIDAD DEL ACEITE 0.903 gr/cm <sup>3</sup> VISCOSIDAD DEL ACEITE 10 cp CONDICIONES P = ATMOSFERICA T = 25 °C	AGUA	80% PESO	VARIOS
			ACEITE	20% PESO	



MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
8	DESORCION	SOLUCION DE DIOXIDO DE AZUFRE Y BUTADIENO EN SULFOLENO SATURADO. NITROGENO COMO GAS DE ACOTAMIENTO REMOVER DIOXIDO DE AZUFRE Y BUTADIENO CONDICIONES DE LA SOLUCION $P = 1.07 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man}$ , $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	ALIMENTACION BUTADIENO 8.30 $\text{SO}_2$ 8.30 SULFOLENO 83.40 SOLUCION FINAL BUTADIENO 0.50 $\text{SO}_2$ 0.05	TORRE DE PLATOS TORRE EMPACADA
9	DESTILACION	SOLUCION DIMETILETER - METANOL SE DEBE SEPARAR EL DIMETILETER PRESION DEL SISTEMA $3 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man}$	ALIMENTACION DIMETILETER 42% mol METANOL 58% mol PRODUCTO DIMETILETER 99.6% mol METANOL 0.4% mol	DESTILADOR SIN PLATOS
10	DESTILACION BATCH	SOLUCION DE HIDROCARBUROS EN PRODUCTOS DE FONDOS SE TENDRA UN 10 % DEL PROPANO ALIMENTADO	$\text{C}_2$ 10.0 $\text{C}_2$ 25.0 $\text{C}_4$ 30.0 $\text{nC}_4$ 35.0	HERVIDOR CON TORRE DE PLATOS Y/O EM PACADA

## MÓDULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MÓDULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICIÓN % MOL.	TIPO DE EQUIPO
11	DESTILACION FLASH	SOLUCION BENCENO - TOLUENO CON RECUPERACION DEL 90% DEL BENCENO, PRESION DEL SISTEMA 0.5 Xg/cm <sup>2</sup> man, TEMPERATURA DE LA CARGA 25 °C.	ALIMENTACION BENCENO 40.00 TOLUENO 60.00	DESTILADOR FLASH
12	DESTILACION MULTI-ETAPA O RECTIFICACION	MEZCLA DE HIDROCARBUROS A SEPARAR EN TRES ETAPAS: PRIMERA; SEPARAR METANO, SEGUNDA; SEPARAR PROPANO, TERCERA; SEPARAR N-BUTANO	C 0.21 C <sub>2</sub> 0.79 C <sub>3</sub> 13.00 iC <sub>4</sub> 8.49 nC <sub>4</sub> 26.90 iC <sub>5</sub> 5.89 nC <sub>5</sub> 13.21 nC <sub>6</sub> 31.51	DESTILADOR FLASH TORRE DE PLATOS TORRE DE PLATOS
13	DIALISIS	SOLUCION RAFINOSA - AGUA Y AGUA COMO MEDIO DE DIFUSION, SE REQUIERE REMOVER EL 90 % DE LA SAL CONTENIDA	ALIMENTACION 100 Gr. DE SAL POR LITRO DE SOLUCION	DIALIZADOR

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
14	EVAPORACION	SOLUCION DE SOSA, Y SE ALIMENTA A 93 % °C.	ALIMENTACION 20 % PESO DE SOSA PRODUCTO 50 % PESO DE SOSA	EFFECTO SIMPLE
15	EVAPORACION	SOLUCION DE SOSA, Y SE ALIMENTA A 93 % °C.	ALIMENTACION 10 % PESO DE SOSA PRODUCTO 50 % PESO DE SOSA	EFFECTO MULTIPLE
16	EXTRACCION	SOLUCION DE AGUA Y ACETONA, TRICLOROETANO COMO SOLVENTE, TEMPERATURA DE OPERACION 25 °C.	ALIMENTACION 50 % EN PESO REFINADO 10 % EN PESO DE ACETONA. EXTRACTO 70 % EN PESO DE ACETONA.	COLUMNA EMPACADA DE PLATOS, ESPREADO, PULSATORIA, ACITADA, ROTATORIA,
17	FILTRACION	HEZCLA DE CARBONATO DE CALCIO EN AGUA	25 % PESO	FILTRO INTERMITENTE FILTRO CONTINUO

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
18	FILTRACION CON MEMBRANAS	MICROFILTRACION, MEZCLA DE AGUA Y POLEN ULTRAFILTRACION Y OSMOSIS INVERSA, SOLUCION DE CLORURO DE SODIO EN AGUA	20 % PESO DE POLEN 5,000 ppm de NaCl	
19	FLOTACION	POR AIRE DISUELTO Y POR DISPERSION, MEZCLA DE AGUA Y SOLIDOS ORGANICOS E INORGANICOS FINAMENTE DIVIDIDOS	ALIMENTACION 40 % PESO DE SOLIDOS EFLUENTE 50 % PESO DE SOLIDOS MAXIMO	EQUIPO DE FLOTACION
20	FLOCULACION	AGUA DE RIO, REDUCIR DUREZA, Y ELIMINAR MATERIA SUSPENDIDA EFLUENTE, APTO PARA USO INDUSTRIAL.		FLOCULADOR
21	INTERCAMBIO DE CALOR	CAMBIADORES DE CALOR, ( SIN CAMBIO DE FASE ): MEZCLA DE HIDRO CARBUROS COMPUESTA POR N-BUTANO, N-PENTANO Y N-HEXANO	n-C <sub>4</sub> n-C <sub>5</sub> n-C <sub>6</sub>	33 % DOBLE TUBO 33 % MULTITUBO 34 % TUBOS Y CORAZA

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
		CONDENSADORES: MEZCLA DE BENCENO TOLUENO Y XILENO	BENCENO 33 % TOLUENO 33 % XILENO 34 %	TUBOS Y CORAZA
		REHERVIDORES : MEZCLA DE HIDROCARBUROS COMPUESTA POR - N-BUTANO, N-PENTANO, 1-PENTANO, N-HEXANO	n-C <sub>4</sub> 25 % n-C <sub>5</sub> 25 % i-C <sub>5</sub> 25 % n-C <sub>6</sub> 25 %	TERMOSIFORO CALDERETA TIPO HARMITA
		REFRIGERANTE: AGUA DE ENFRIAMIENTO, FUENTE DE CALENTAMIENTO, VAPOR SOBRE-CALENTADO DE MEDIA Y BAJA PRESION.		
22	INTERCAMBIO IONICO	SOLUCION DE AGUA Y SULFATOS, NITRATOS, BICARBONATOS Y CLORURO DE CALCIO, MAGNESIO Y SODIO	Ca <sup>++</sup> 2.0 meq/lit Mg <sup>++</sup> 1.5 meq/lit Na <sup>+</sup> 10.0 meq/lit Hco <sub>3</sub> <sup>-</sup> 3.6 meq/lit SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 2.8 meq/lit Cl <sup>-</sup>	TORRE ANCONICA TORRE CALCONICA TORRE MEZCLADA
23	LIXIVIACION	HARINA DE TRIGO - BENCENO PARA LA EXTRACCION DE ACEITE Y SE DEBE RECUPERAR EL 90 % DEL ACEITE ORIGINAL	30 % DE ACLITE EN HARINA ( BASE SECA Y AGOTADA ) SOLUCION, 60 % DE ACEITE.	EXTRACTOR CONTINUO Y A CONTRACORRIENTE.

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL	TIPO DE EQUIPO
--------	--------------------	---------------	-------------------	----------------

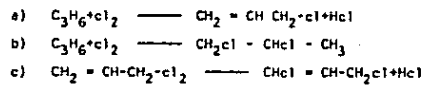
24 REACCION: POR LOTES, INTERMITENTE; REACCION ENTRE TRIMETILAMINA Y BROMURO DE N-PROPILO EN BENCENO Y SE PRODUCE UNA SAL CUATERNARIA DE AMONIO, LOS DATOS DEL SISTEMA A NIVEL LABORATORIO Y 139,4 °C SON:

CORRIDA No.	TIEMPO MIN.	CONVERSION %
1	13	11.2
2	34	25.7
3	59	36.7
4	120	55.2

25 REACCION: CONTINUA; REACCION ENTRE PROPILENO Y CLORO, SE PRODUCE CLORURO DE ALILO, LAS CONDICIONES DE ENTRADA AL REACTOR SON: TEMPERATURA 200 °C, PRESION 1.033 Kg/cm<sup>2</sup> MAN, EL PROCESO ES ADIABATICO.

ALIMENTACION REACTOR BACK-MIX  
4 MOL. PROPILENO POR REACTOR TUBULAR  
1 MOL. DE CLORO.

REACCIONES.



## MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
--------	--------------------	---------------	--------------------	----------------

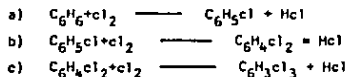
SE CONSIDERAN UNICAMENTE LAS REACCIONES a) Y b). SE SABE QUE LA REACCION b) SE LLEVA A CABO A TEMPERATURAS TAN BAJAS COMO 100 °C Y QUE LA REACCION a) ES MUY LENTA POR ABAJO DE 200 °C PERO SU VELOCIDAD AUMENTA RAPIDAMENTE, TANTO, QUE A 500 °C ES MUCHO MAS RAPIDA QUE LA REACCION b).

LAS ECUACIONES DE VELOCIDAD EN BASE A LO ANTERIOR SON:

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad a &= 20,600 e^{27,200/RT} & P_p P_{cl} & \frac{\text{lb mol } cl_2 \text{ convertido}}{\text{Hr } P_{fe}^3} \\
 \text{b)} \quad b &= 11.7 e^{-6,860/RT} & P_p P_{cl} & \frac{\text{lb mol } cl_2 \text{ convertido}}{\text{Hr } P_{fe}^3}
 \end{aligned}$$

26 REACCION

SEMICONTINUO; REACCION ENTRE BENCENO Y CLORO EN FASE LIQUIDA, LAS REACCIONES DEL PROCESO SON:



EL PROCESO SE LLEVA A CABO A 55 °C Y LOS COCIENTES DE LAS CONSTANTES DE LAS REACCIONES SON:

REACTOR AGITADO,  
ENCHAQUETADO Y CON  
CONDENSADOR.

MÓDULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MÓDULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % MOL.	TIPO DE EQUIPO
--------	--------------------	---------------	--------------------	----------------

$$\frac{K_a}{K_b} = 8$$

$$\frac{K_b}{K_c} = 30$$

LA ADICION DE CLORO DEBE SER LENTA, DE MANERA QUE LA CONCENTRACION DE CLORO Y CLORURO DE HIDROGENO SEAN PEQUERAS.

27	REACCION	CONTINUO: REFORMACION PARA PRODUCIR C <sub>5</sub> <sup>+</sup> REFORMADO CON - NUMERO DE OCTANO DE 95, LA ALIMENTACION A REFORMACION DES- TILA SEGUN LOS DATOS SIGUIENTES:	ALIMENTACION PARAFINAS NAFTEROS AROMATICOS	39.4 40.7 19.9	CATALITICO DE LE- CHO FIJO.
		JBP 115.55 °C 60 % 150 °C 10 % 127.77 70 % 155 20 % 133.33 80 % 161.11 30 % 137.22 90 % 168.33 40 % 140.00 95 % 174.44 50 % 144.44 EP 187.22			
		GRAVEDAD API = 51.9 PH = 123 FACTOR DE CARACTERIZACION = 11.7 VABP = 295 °F MABP = 285 °F SE RECIBIEN A 2.81 KJ/cm <sup>2</sup> min. y I = 93.34 %			



MÓDULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MÓDULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % HOL.	TIPO DE EQUIPO
28	SECADO	<p>POR LOTES O INTERMITENTE, SECAR CARBONATO DE CALCIO BAJO - LAS CONDICIONES DERIVADAS DE UN PROGRAMA DE LABORATORIO, A CONTINUACION INDICADO.</p> <p>TEMP. BULBO SECO DEL AIRE      125 °C.  TEMP. DE BULBO HUMEDO          43.33 °C.</p> <p>VELOCIDAD DEL AIRE SOBRE CHAROLAS = 152.44 MTS/MIN.</p> <p>CARGA DE CHAROLAS = 2.47 <math>\frac{\text{Kg. SOLIDO SECO}}{\text{MT}^2 \text{ DE CHAROLA}}</math></p> <p>ESPACIADO DE PLATOS    0.058 MTS ( 2 M )  TIEMPO DE SECADO        1.75 HRS.</p>	<p>ALIMENTACION  50 % DE HUMEDAD BASE - SECA.</p> <p>PRODUCTO  4 % DE HUMEDAD BASE - SECA ( % PESO )</p>	<p>SECADOR DE CHARO - LAS</p>
29	SECADO	<p>CONTINUO, SECAR ARCILLA DE CAOLIN BAJO LAS CONDICIONES - SIGUIENTES :</p> <p>TEMPERATURA DEL AIRE A LA ENTRADA = 215 °C  TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO DEL AIRE = 65.55 °C  VELOCIDAD DEL AIRE A TRAVES DE LA CAMA = 91.46 <math>\frac{\text{mts}}{\text{min}}</math>  TIEMPO DE SECADO = 5.5 MINUTOS  AP AIRE A TRAVES DE LA CAMA = 0.85 PULG. H<sub>2</sub>O  DIAMETRO PROMEDIO DE PARTICULA = 3/8 PULGAMA</p>	<p>ALIMENTACION  25 % DE HUMEDAD BASE - SECA</p> <p>PRODUCTO  5.26 % HUMEDAD BASE SE CA ( % PESO )</p>	<p>SECADOR CONTINUO - DE CIRCULACION - TRANSVERSAL.</p>

MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % SOL.	TIPO DE EQUIPO
		LONGITUD PROMEDIO DE PARTICULA = 1.0 PULGADA DENSIDAD A GRANEL DE LA CAMA = 704.15 Kg/m <sup>3</sup> FRACCION DE HUECOS DE LA CAMA = 0.35 CARGA DE LA CAMA SECA = 87.82 Kg/ Mt <sup>2</sup>		
30	SECADO	CONTINUO: SECAR LECHE A UNA TEMPERATURA DE 90 °C PROCE - DENTE DE UN EVAPORADOR	ALIMENTACION 45 % PESO SOLIDO PRODUCTO 0.05 % DE HUMEDAD	SECADOR POR ES - PREADO.
31	PRUEBA DE MATERIALES POR FLUJO DE FLUIDOS (LIQUIDOS)	AGUA A DIFERENTES CONDICIONES DE TEMPERATURA Y PRESION - CLASIFICADAS COMO BAJA MEDIA Y ALTA	100 %	TUBERIAS Y BOMBAS
32	PRUEBA DE MATERIALES POR ACCION DE VAPOR Y LIQUIDOS - EN EBULLI- CION.	AGUA EN EBULLICION A CONDICIONES DE TEMPERATURA Y PRESION CLASIFICADAS COMO BAJA, MEDIA Y ALTA	100 %	CAMARAS DE EVAPORA CION EQUIPADAS CON CONDENSADORES.

### MODULOS DE OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS

MODULO	OPERACION UNITARIA	S I S T E M A	COMPOSICION % HOL	TIPO DE EQUIPO
33	COMPRESION	LIQUIDOS: AGUA A COMPRIMIRSE HASTA UNA PRESION MAXIMA DE 200 Kg/cm <sup>2</sup> man.	100 %	BOMBAS DE BAJA, MEDIA Y ALTA PRESION
34	COMPRESION	GASES: AIRE A COMPRIMIRSE HASTA UNA PRESION MAXIMA DE 200 Kg/cm <sup>2</sup> man.	N <sub>2</sub> = 79 % O <sub>2</sub> = 21 %	COMPRESORES DE BAJA, MEDIA Y ALTA PRESION
35	PREPARACION	PURIFICACION DE BUTADIENO	100 %	EQUIPOS PARA PURIFICACION Y ACONDICIONAMIENTO DE MATERIAS PRIMAS.

## DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

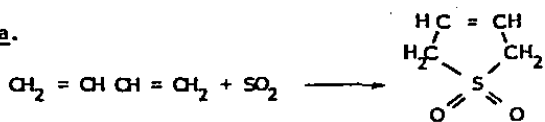
El proceso de que se trata corresponde a una planta piloto para producir sulfolano, también conocido como tetrahidrotiofeno -1, 1-dióxido y cuya aplicación está en la extracción de aceite lubricantes.

El proceso consiste en hacer reaccionar butadieno y dióxido de azufre para obtener un intermedio conocido como sulfoleno y que por subsecuente hidrogenación catalítica se produce el sulfolano. El proceso - en su primera etapa puede realizarse en fase líquida o en fase vapor; - sin embargo, en ambos casos presenta ventajas y desventajas, tales como, el tamaño del reactor y rendimientos para la misma producción.

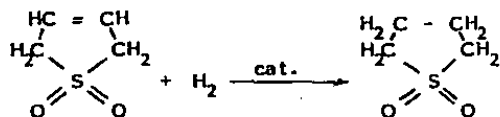
## FUNDAMENTOS DEL PROCESO

El proceso para producir sulfolano ( tetrahidrotiofeno -1,1-dióxido ) está dividido en dos etapas; en la primera, se lleva a cabo una reacción entre el butadieno y el dióxido de azufre, dando como resultado la formación de sulfoleno. La segunda etapa consiste en, --- hidrogenar catalíticamente al sulfoleno para producir sulfolano. Las - reacciones que se suceden son:

Primera Etapa.



Segunda Etapa.



La reacción de la primera etapa está limitada por el equilibrio termodinámico, ya que se favorece a bajar temperaturas debido a su exotermicidad; sin embargo, otras limitantes son las propiedades físicas del sulfoleno lo que hace que el proceso no pueda realizarse en, o - abajo de la temperatura de fusión del sulfoleno.

La reacción de la segunda etapa que también es influenciada - por la termodinámica, puede llevarse a cabo a temperaturas ligeramente mayores que la ambiente, ya que también las propiedades físicas del producto final deben ser tomadas en cuenta.

### DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Las secciones que comprende el proceso para producir sulfolano son:

- Sección de preparación de carga
- Sección de reacción y purificación
- Sección de preparación y reacción de sulfoleno
- Sección de separación de sulfolano

## SECCION DE PREPARACION DE CARGA

La corriente de butadieno, que es una de las materias primas para este proceso procedente del Cilindro de Butadieno C-04, es enviada al Tanque de Lavado de Butadieno V-02, donde el butadieno se hace burbujear en una solución acuosa saturada de sosa que se prepara previamente en el Tanque de Sosa V-01 y cargada al Tanque de Lavado de Butadieno V-02, con el fin de eliminar los peróxidos contenidos en el butadieno, éstos compuestos se forman por periodos largos de almacenamiento y/o por exposición al aire ó a la luz solar, el butadieno lavado pasa al Tanque Flash de Butadieno V-03, donde se le elimina el líquido que pudiese arrastrar, las condiciones a las que se recibe el butadieno son 25°C y 2.1 Kg/cm<sup>2</sup>, absolutos.

## SECCION DE REACCION Y PURIFICACION

En esta sección que es donde se produce el Sulfoleno, llegan las corrientes de dióxido de azufre y butadieno. El dióxido de azufre procedente del Cilindro de Dióxido de Azufre C-03, se recibe a 25°C y 2.1 Kg/cm<sup>2</sup> absolutos, y el butadieno se recibe a condiciones similares, ambas corrientes llegan a los correspondientes condensadores el Condensador de Butadieno EX-01 y el Condensador de Dióxido de Azufre EX-02, en estos equipos las materias primas gaseosas se cambian de fase y así se envían al Reactor de Sulfoleno R-01, el butadieno y el dióxido de azufre líquidos se alimentan al reactor en relación molar de 1 hasta 10; sin embargo, la relación molar mas adecuada es de 1.2 para obtener mejores conversiones, la reacción es exotérmica y debe retirársele calor a fin de poder desplazarla hacia los productos, la temperatura de reacción idónea debe mantenerse entre 70°C y 110°C y como máximo 150°C, la presión debe mantenerse entre 7.0 Kg/cm<sup>2</sup> y 35.2 Kg/cm<sup>2</sup> el producto que se obtiene es sulfoleno líquido que se envía al Evaporador de Dióxido de Azufre EV-01 con el fin de eliminar parte del

dióxido de azufre que no reaccionó y que constituye una impureza del sulfoleno, el dióxido de azufre gaseoso que sale del evaporador se comprime por medio del Compresor de  $\text{SO}_2$  y  $\text{C}_4^{\text{---}}$  CO-01, y se recircula hacia la alimentación del Reactor R-01 previa condensación del  $\text{SO}_2$  y  $\text{C}_4^{\text{---}}$  en el Condensador de  $\text{SO}_2$  y  $\text{C}_4^{\text{---}}$ , el sulfoleno aún con una considerable cantidad de  $\text{SO}_2$  disuelto se extrae por el fondo del evaporador y se envía a la Torre Agotadora de  $\text{SO}_2$  TA-01, con el fin de eliminarle el  $\text{SO}_2$  residual por medio de una corriente de nitrógeno, por el domo de la torre TA-01 se obtiene la mezcla  $\text{N}_2 - \text{SO}_2$  que se comprime con el Compresor de Nitrógeno CO-02, se enfría y se condensa ésta corriente por medio del Enfriador de  $\text{N}_2, \text{SO}_2, \text{C}_4^{\text{---}}$  y del Condensador de  $\text{SO}_2$  y  $\text{C}_4^{\text{---}}$  respectivamente el nitrógeno se separa de los condensados en el Tanque Separador de Nitrógeno V-08 y se envía a la Torre Agotadora de  $\text{SO}_2$  y los líquidos se regresa al Reactor de Sulfoleno R-01. El sulfoleno purificado se extrae por el fondo de la torre TA-01 y se envía al Tanque de Solución de Sulfoleno en Sulfolano V-09.

#### SECCION DE PREPARACION Y REACCION DE SULFOLENO

El sulfoleno para poder hidrogenarse debe estar en estado líquido o disuelto en un solvente, prefiriendose la segunda condición.

La solución de sulfoleno disuelto en sulfolano con una relación molecular de 0.5 a 1.4 se prepara en el Tanque de Solución de Sulfoleno en Sulfolano V-09 de donde se envía al Reactor de Sulfoleno R-02 por medio de la Bomba de Solución P-03, la solución entra al reactor previa mezcla con hidrógeno proveniente del Cilindro de Hidrógeno C-02. La hidrogenación es catalítica y usa como catalizador Niquel sobre tierra de diatomeas con un contenido de 70% a 80% de niquel, el espacio velocidad en el reactor debe ser de 1 a 10 volúmenes de solución por volumen de reactor hora, y se prefiere operar con espacios velocidad de 2 a 4, la reacción se lleva acabo a temperaturas de  $10^\circ\text{C}$  A  $100^\circ\text{C}$ , sin embargo, por razones de estabilidad el rango de temperatura debe estar entre  $10^\circ\text{C}$  y  $40^\circ\text{C}$ , y la presión entre  $3.5 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$ , y  $105 \text{ Kg/cm}^2 \text{ man.}$

La relación molar hidrógeno/sulfoleno debiera ser de 3 a 4 - es decir siempre estará en exeso molar de 2 a 3

### SECCION DE SEPARACION DE SULFOLANO

La mezcla de sulfolano e hidrógeno se extrae por el fondo - del Reactor de Sulfolano R-02 y se envía al Tanque Separador de Hidrógeno V-11 ,donde se separa el hidrógeno que no reaccionó y se envía - al Compresor de Hidrógeno CO-03 donde se comprime y se recircula ha - cia la alimentación del reactor R-02.

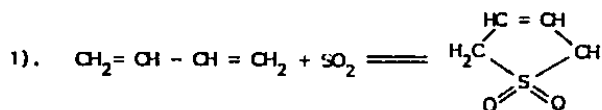
El sulfolano líquido se extrae por el fondo del Tanque Sepa - rador de Hidrógeno V-11 y se envía a través del Enfriador de Sulfolano EX-09 para bajar su temperatura y así enviar una parte al Tanque - de Solución de Sulfoleno en Sulfolano V-09 para adecuar la carga al - reactor R-02 ,y la fracción complementaria se envía al Tanque de Sul - folano V-12 como producto final y que posteriormente se envía a alma - cenamiento por medio de la Bomba de Sulfolano P-04.

### BALANCE DE MATERIA Y ENERGIA

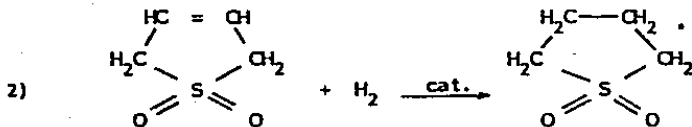
El balance se realiza para el caso correspondiente a la pro - ducción de sulfolano a partir de 1,3,Butadieno ,Dióxido de Azufre e - Hidrógeno

Producción = 124 Kg/Hr de sulfolano con un contenido máxi - mo de 1,3 butadieno = 0.5% en peso y un con - tenido máximo de dióxido de azufre = 0.5% en peso

Reacciones.







Requerimientos de materias primas.

a) Pesos moleculares de las especies.

1,3 Butadieno	=	54.092	gr/gr. mol.
Dióxido de Azufre	=	64.063	gr/gr. mol.
Hidrógeno	=	2.01594	gr/gr. mol.
Sulfoleno	=	118.1552	gr/gr. mol.
Sulfolano	=	120.17	gr/gr. mol.

b) Requerimientos.

Las materias primas que contendrá el sulfolano como máximo se determinan por la expresión:

$$M_{ip} = \text{Producción} \times \text{Contenido máximo}$$

Las materias primas que reaccionan se determinan por estequiometría conforme a la expresión:

$$M_{ri} = \left( \frac{RM_{mi}}{RM_{producto}} \right) \text{Producción}$$

Materias primas en el producto:

Butadieno	=	0.625	Kg/Hr.
Dióxido de Azufre	=	0.625	Kg/Hr.
Producto puro	=	123.751	Kg/Hr.

**Materias primas reaccionadas.**

Butadieno	=	55.703	Kg/Hr
Dióxido de Azufre	=	65.972	Kg/Hr
Hidrógeno	=	2.076	Kg/Hr

**c) Alimentación a reactores.**

Las cantidades de materias primas alimentadas a las etapas de reacción se determinan considerando las conversiones de las reacciones correspondientes. En el reactor de sulfoleno se considera una conversión de 85 % y en el reactor de hidrogenación de un 100 %, las conversiones son referidas al reactivo limitante, adicionalmente se deben considerar las relaciones molares de las materias primas a la entrada de las unidades de reacción, para sulfoleno la relación (  $SO_2/but$  ) = 1.2 y para hidrogenación (  $H_2/Sulfoleno$  ) = 3, lo que facilita determinar las recirculaciones de materias primas que no reaccionaron y la expresión para estas determinaciones es:

$$M_{i1a} = \frac{M_{ri1}}{n} + M_{ip}$$

$$M_{iea} = \text{Relación molar ( } M_{i1a} / FM_L \text{ ) } PM_E$$

$$M_{irec} = M_{i1a} - ( M_{ri} + M_{ip} )$$

**Alimentación a reactor de sulfoleno.**

Butadieno	=	66.158	Kg/Hr
Dióxido de Azufre	=	94.024	Kg/Hr

Recirculación es a Reactor de Sulfoleno

Butadieno = 9.83 Kg/Hr

Dióxido de Azufre = 27.427 Kg/Hr

Alimentación a Reactor de hidrogenación.

Hidrógeno = 6.228 Kg/Hr

Sulfoleno = 121.676 Kg/Hr

Butadieno = 0.625 Kg/Hr

Dióxido de Azufre = 0.625 Kg/Hr

Recirculación a Reactor de Hidrogenación.

Hidrógeno = 4.152 Kg/Hr

d) Alimentación a la planta.

Las materias primas alimentadas a la planta están dadas por la expresión:

$$M_{iap} = M_{ila} - M_{irec}$$

De manera que se mantengan las restricciones marcadas a la entrada de los reactores.

Butadieno = 56.328 Kg/Hr

Dióxido de Azufre = 66.597 Kg/Hr

Hidrógeno = 2.076 Kg/Hr

## Balances en Operaciones de separación, principales.

### 1) Evaporación

En esta operación cuyo objetivo es eliminar dióxido de azufre y butadieno de la corriente efluente del reactor de sulfoleno, el balance se realizó considerando un balance global de materia, balances por componentes, un equilibrio de fases ideal.

$$FM \text{ Solución alimentada} = 96.438 \text{ gr/grmol}$$

$$F = 160.182 \text{ Kg/Hr} = 1.6609 \text{ Kgrmol/Hr}$$

$$FM \text{ vapores} = 64.075 \text{ gr/grmol}$$

$$V = 34.658 \text{ Kg/Hr} = 0.5403 \text{ Kgrmol/Hr}$$

$$FM \text{ Líquido} = 112.0507 \text{ gr/grmol}$$

$$L = 125.521 \text{ Kg/Hr} = 1.12 \text{ Kgrmol/Hr}$$

La composición de las respectivas corrientes se da en fracción mol y % mol.

CORRIENTE	F		V		L	
	X	% MOL	Y	% MOL	X	% MOL
Sulfoleno	0.61998	61.998	0.05	5.0	0.895	89.50
Butadieno	0.11638	11.638	0.27	27.0	0.042	4.20
Dióxido de Azufre	0.26364	26.364	0.68	68.0	0.063	6.30

### 11) Desorción.

La operación de desorción tiene como objetivo realizar una purificación fina del sulfoleno eliminando el butadieno y dióxido de azufre que no se alcanza a reliminar en la operación previa.

El producto de esta operación deberá contener como máximo una concentración de 0.5 % peso de butadieno y 0.5 % peso de dióxido de azufre, se usará como medio de desorción un gas inerte como el nitrógeno.

El balance se realiza por medio de un balance total, balance por componente, determinación de la cantidad mínima de nitrógeno requerido y se usa 1-8 veces la cantidad mínima como flujo de operación.

RM solución alimentada	=	112.2019	gr/grmol
Lo = 128.23 Kg/Hr	=	1.1473	Kgrmol/Hr
RM Solución producto	=	116.9488	gr/grmol
L <sub>1</sub> = 122.899 Kg/Hr	=	1.0508	Kgrmol/Hr
RM Casos sólidos	=	51.7646	gr/grmol
Co = 6.81 Kg/Hr	=	0.1316	Kgrmol/Hr
RM Gas de desorción ( N <sub>2</sub> )	=	28.02	gr/grmol
G <sub>1</sub> = 1.00 Kg/Hr	=	0.03569	Kgrmol/Hr

La composición de las corrientes se dan en fracción mol. y % mol.

CORRIENTE	Lo		L <sub>1</sub>		Co		G <sub>1</sub>	
	X	% MOL	X	% MOL	Y	% MOL	Y	% MOL
Sulfoleno	0.8975	89.75	0.979725	97.9725				
Butadieno	0.0410	4.10	0.010989	1.0989	0.265595	26.5595		
Dióxido de Azufre	0.0615	6.15	0.009286	0.9286	0.466664	46.6664		
Nitrógeno					0.267741	26.7741	1.00	100.00

iii) Tanque de mezclado.

En este tanque se solubiliza el sulfoleno en sulfolano con la finalidad de alimentarse a la unidad de hidrogenación, se usa

una relación en peso de ( sulfoleno/sulfolano ) igual a 1.5.

Sulfoleno	=	121.676	Kg/Hr
Dióxido de Azufre	=	0.625	Kg/Hr
Butadieno	=	0.625	Kg/Hr
Sulfolano	=	81.117	Kg/Hr
Dióxido de Azufre	=	0.405	Kg/Hr
Butadieno	=	0.409	Kg/Hr

La composición de la solución de sulfoleno sulfolano que se va al reactor de hidrogenación es:

PM Solución = 117.734

Solución a hidrogenación = 204,8622 Kg/Hr = 1.74 Kgmol/Hr

La composición del líquido se da en fracción mol y % mol .

<u>COMPOSICION</u>	<u>X</u>	<u>% MOL.</u>
Sulfoleno	0.591839	59.1839
Sulfolano	0.387931	38.7931
Dióxido de Azufre	0.009253	0.9253
Butadieno	0.010977	1.0977

#### Efectos Térmicos.

Los efectos térmicos involucran los requerimientos y generaciones de calor por las reacciones que se realizan en el proceso.

#### a) Calores de reacción.

Para la determinación del calor de reaccion se consideró el - estado del medio reaccionante y se determinó a varias tempera- turas, mediante las expresiones siguientes:

$$\Delta H_r = \Delta H_p - \Delta H_r$$

$$\Delta H_i = \Delta H^\circ_{fi} + \int_{t_1}^{t_2} cp dt$$

Para la reacción de condensación entre el butadieno y el dióxido de azufre. El calor de reacción en función de temperatura es:

<u>TEMPERATURA (°C)</u>	<u>( 1 )</u>	<u>ΔH REACCION ( 2 )</u>	<u>( Kcal/Hr ) ( 3 )</u>
70	-17267.49	-30149.78	-21443.81
90	-17227.69	-30109.97	-21779.43
110	-17187.89	-30070.18	-21873.69
130	-17148.09	-30030.38	-21831.80
150	-17009.85	-29990.58	-21789.90

Para esta etapa se consideraron tres diferentes condiciones del medio reaccionante, como se indica a continuación:

- ( 1 ) Reactantes y productos gaseosos
- ( 2 ) Reactantes gaseosos y producto líquido
- ( 3 ) Reactantes y producto líquido

El calor necesario para calentamiento de las materias primas es como a continuación se indica:

<u>TEMPERATURA</u>	<u>CALOR DE CALENTAMIENTO ( GAS )</u>	<u>( Kcal/Hr ) ( LIQUIDO )</u>
70	1,492.55	2,454.23
90	2,155.91	3,515.73
110	2,819.26	4,636.72
130	3,482.62	5,727.72
150	4,145.97	6,818.70

El calor a retirar resulta de la diferencia entre el calor generado y el calor de calentamiento

<u>TEMPERATURA</u>	<u>CALOR A RETIRAR: ( Kcal/Hr )</u>		
°C	(1)	(2)	(3)
70	-15774.94	-28657.23	-18979.08
90	-15071.78	-27954.06	-18263.70
110	-14368.63	-27250.92	-17236.97
130	-13665.47	-26547.76	-16104.08
150	-12863.88	-25844.61	-14971.20

Los resultados anteriores nos proporcionan la información para determinar los requerimientos de refrigeración en este caso agua de enfriamiento que se suministra a 32 °C y se retorna a 50 °C para lo que se utiliza la expresión.

$$W_{\text{agua}} = \frac{Q_{\text{a retirar}}}{C_{p_{\text{agua}}} \Delta T_{\text{agua}}}$$

<u>TEMPERATURA</u>	<u>AGUA REQUERIDA ( Kg/Hr )</u>		
(°C )	(1)	(2)	(3)
70	876.38	1592.07	1054.39
90	837.32	1553.00	1014.65
110	798.26	1513.94	957.61
130	759.19	1474.87	894.67
150	714.66	1435.81	831.73

Para la reacción de hidrogenación de sulfoleno el calor generado en función de temperatura es:



<u>TEMPERATURA</u>	<u>ΔH REACCION ( Kcal/Hr )</u>
°C	
20	-38084.86
30	-38103.34
40	-38121.76
50	-38140.29

Las materias primas requieren de calentamiento cuando la operación es a 50 °C.

$$Q \text{ Calentamiento} = 1019.65 \text{ Kcal/Hr}$$

El calor a retirar resulta de la diferencia entre el calor de reacción y el calor de calentamiento.

<u>TEMPERATURA</u>	<u>CALOR A RETIRAR ( Kcal /Hr )</u>
°C	
20	-38084.86
30	-38103.34
40	-38121.76
50	-37120.64

Este calor debe eliminarse para tener el producto a temperatura ligeramente mayor a su punto de fusión, para ésto se utiliza una salmuera como refrigerante y se alimenta a -20 °C y se retoma a 25 °C

$$W \text{ refrigerante} = \frac{Q \text{ retirar}}{C_p \text{ refrig. } \Delta T \text{ refrig.}}$$

La temperatura del producto será de 30 °C.

W REFRIGERANTE (Kg/Hr)	TEMP. CARGA A REACTOR (°C)	TEMP. DEL PRODUCTO (°C)	TEMP. REFRIGERANTE ENT. (°C)	TEMP. REFRIGERANTE SALIDA
-----	20			
1292.73	30	30	-20	25
1080.07	40	30	-20	25
988.29	50	30	-20	25

b) Requerimiento de calor en operaciones principales.

Vaporización de Butadieno.

La vaporización se realiza para facilitar el lavado del butadieno con sosa y así eliminar los peróxidos y contaminantes indeseables, el calor se determina por la expresión:

$$Q_{\text{vap}} = W_{\text{but}} \lambda_{\text{but}}$$

La cantidad del calor resultado es:

$$Q_{\text{vap}} = 4942.92 \text{ Kcal/Hr}$$

Vaporización de dióxido de azufre.

Para vaporizar dióxido de azufre se requiere:

$$Q_{\text{vap}} = 5194.61 \text{ Kcal/Hr}$$

Condensación.

La condensación de butadieno requiere de una cantidad de refrigerante determinada por:

$$W \text{ Refrig} = \frac{Q \text{ vap}}{C_p \text{ Refrig } \Delta t \text{ refrig}}$$

La cantidad resultante es:

$$W \text{ Refrig} = 215.61 \text{ Kg/Hr}$$

La condensación de dióxido de azufre requiere de la siguiente cantidad refrigerante.

$$W \text{ Refrig} = 226.59 \text{ Kg/Hr}$$

Evaporación.

Para facilitar la purificación del sulfoleno crudo se suministra energía en el evaporador determinado por la expresión:

$$Q \text{ vap } \text{so}_2 = \lambda \text{ vap } \text{so}_2 W \text{ so}_2$$

$$Q \text{ vap } \text{but} = \lambda \text{ vap } \text{but} W \text{ so}_2$$

El calor necesario resultantes es de:

$$Q \text{ vaporización} = 525.81 \text{ Kcal/Hr}$$

Tanque de mezclado.

La temperatura de la solución del tanque de mezclado es diferente a la de sulfoleno y a la de sulfolano y resulta ser de:

$$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

y se requiere refrigerante para disminuir hasta 30 °C

$$W \text{ Refrigerante} = 32.86 \text{ Kg/Hr}$$

## DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPO

El dimensionamiento de los equipos que integran los módulos de la planta piloto de múltiples propósitos se realizó con base a los sistemas considerados, a los requerimientos estipulados en las bases de diseño, balances de materia y energía y condiciones de operación de cada sistema.

### Agitadores.

El equipo de agitación se seleccionó en función del tamaño de tanques y recipientes y a la capacidad de bombeo requerida para una buena operación de mezclado.

El diámetro del impulsor se determinó por la expresión:

$$D_{\text{impulsor}} = (1/3) D_{\text{tanque}} \text{ (pies)}$$

La capacidad de bombeo es directamente proporcional al diámetro del impulsor a la tercera potencia y a la velocidad de rotación.

$$Q = KND^3 \text{ (pies}^3 \text{ / seg)}$$

La potencia necesaria es función directa de la capacidad de bombeo, el tipo de mezcla a agitar y la cabeza necesaria para una buena agitación.

$$HP = \frac{QCH}{550 \eta} \text{ (HPs)}$$

### Bombas.

El tipo de bomba requerida para un servicio dado es función del gasto y tipo de fluido a manejar.

La potencia necesaria requiere además del gasto o capacidad de bombeo, la cabeza a vencer y se determina por la expresión:

$$\text{BHP} = \frac{\text{QH Sp. Gr.}}{3960 \eta} \quad (\text{HPS})$$

### Compresores.

El tipo de compresor es función de la presión requerida por el servicio y el flujo de gas a manejar, el número de etapas depende de la relación de compresión total

$$\left( \text{Rc/etapa} \right) = \sqrt[n]{\text{Rc total}}$$

n = número de etapas

La potencia requerida por etapa es:

$$\text{HP} = 0.0044 P_1 Q_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$$

La potencia total para n etapas es:

$$\text{HP}_{\text{total}} = n \text{ HP}$$

Y la potencia del motor es:

$$\text{BHP} = \text{HP}_{\text{total}} / \eta$$

Sopladores.

Los sopladores son compresores de baja presión por lo que la potencia de éstos se obtiene por la misma expresión utilizada para compresores.

$$\text{HP} = 0.0044 P_1 Q_1 \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\text{BHP} = \text{HP} / \eta$$

Equipos clave.

Los equipos principales se dimensionaron en base a las funciones a desempeñar, considerando las correspondientes fuerzas impulsoras, así como equilibrios de fases, cinética, química y necesidades energéticas.

Tanque y Recipientes.

Los tanques de alimentación y producto tienen capacidad para una hora de carga y un porcentaje de llenado de 65 % incluyendo las cabezas de tipo elipsoidal y una relación  $\frac{L}{D} = 1$ . Para los tanques con tapa plana se hizo un ajuste a fin de tener la misma longitud, incluyendo las cabezas.

Los recipientes de reflujo tienen capacidad para un cuarto de carga normal ( 15 minutos ) con un porcentaje de llenado de 50 %, incluyendo las cabezas de tipo elipsoidal y una relación  $\frac{L}{D} = 1$ .

Para los recipientes de flasheo se considera que les llega la carga normal con un porcentaje vaporizado de 20 %, la velocidad del vapor dentro del equipo es de 60 % de la máxima permitida, se da un tiempo de 15 minutos para el líquido y una  $\frac{L}{D} = 1.5$

El lavado de gases se llevará a cabo en recipientes con capacidad para solución lavadora de 125 Lts. y un porcentaje de llenado de 40 %, la velocidad del gas dentro del equipo es del 60 % del máximo permitido y una relación  $\frac{L}{D} = 1.5$

Los recipientes separadores de arrastre siguen el mismo criterio que recipientes de flasheo.

La tabla siguiente muestra las dimensiones, así como las potencias de los equipos que integran los módulos de la planta.

## CENTRIFUGAS.

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kgr/Hr	DIAMETRO MTS	ALTURA MTS	Nº DE CICLOS CICLOS/Hr	TIEMPO DEL CICLO MINUTOS	POTENCIA H Ps	OBSERVACIONES
CSOC	125	0.508	1.016			1	Operación continua
Cie SOC	125	0.508	0.406			3/4	
CSBDC	125	0.635	2.875			3	
TBC	125	0.104	0.762			1	Operación por lote
V ABC	125	0.508	0.254	6	10	1	
H ABC	125	0.508	0.254	6	10	1	
CSOC	-	Centrifuga de tamiz cónico continua					
Cie SOC	-	Centrifuga de tamiz cilíndrico continua					
CSBDC	-	Centrifuga decantadora de tazón continua					
TBCV	-	Centrifuga de tazón tubular continua					
VABC	-	Centrifuga axial vertical por lotes					
HABC	-	Centrifuga axial horizontal por lotes					



CLARIFICADORES.

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Lts/Hr	DIAMETRO Mts	LONGITUD Mts	FONDO TIPO	AGITACION	POTENCIA HPs	OBSERVACIONES
Clarificador	125	0.40	0.60	elipsoidal	si	1	
	125	0.50	0.50	elipsoidal	si	1	

C O L U M N A S .

EQUIPO NOMBRE	DIAMETRO MTS	LONGITUD MTS	PLATOS N°	SEPARACION ENTRE PLATOS MTS	UNIDADES DE TRANSF.	LONGITUD EMPACADA MTS	T A P A S		OBSERVACIONES
							SUPERIOR	INFERIOR	
Absorbedores	0.30	3.20	15	0.15			Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.30	5.30	15	0.30			Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.30	6.10			10	5.0	Elipsoidal	Elipsoidal	
Adsorbedores	0.30	1.22				0.92	Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.30	2.30				2.00	Elipsoidal	Elipsoidal	
Agotadores	0.30	3.70	20	0.15			Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.30	3.00			12	2.00	Elipsoidal	Elipsoidal	
Destilación por lotes	0.762	0.90					Elipsoidal	Elipsoidal	( 1 )
	0.1524	3.55	13	0.15			Elipsoidal	Elipsoidal	( 2 )
Súbita	0.354	0.61					Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.630	1.00					Elipsoidal	Elipsoidal	
Rectificación	0.30	6.00	33	0.15			Elipsoidal	Elipsoidal	
	0.30	4.60	25	0.15					
Extractores	0.10	2.00					Elipsoidal	Elipsoidal	riego
	0.164	3.00			10	2.00			empacada
	0.200	4.00	20	0.15					
Intercambiador de fones	0.15	1.00				0.75			

( 1 ) Recipiente de flashe incluye un serpiente de calentamiento

( 2 ) Incluye un recipiente con serpiente en el fondo D = 0.90 mts. L = 1.1 mts.



DECANTADORES .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Lts/Hr	DIAMETRO Mts.	LONGITUD Mts.	ALTURA Mts.	OBSERVACIONES
Decantador	125	0.305	1.53		Cilíndrico Horizontal
	125	0.46		0.305	circular

DIALIZADORES .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Lts/Hr	AREA DE TRANSFERENCIA Mts.	OBSERVACIONES
Dializador	125	17.52	

Equipo de intercambio de calor.

EQUIPO NOMBRE	DIAMETRO CORAZA (MIS) TUBOS	LUNGTUD TUBOS MIS	No. TUBOS CANTIDAD	ARREGLO TUBOS	No. PASOS/ TUBOS	AREA TRANSFERENCIA M <sup>2</sup>	OBSERVACIONES	
Calentadores	0.20	0.019	0.91	16	C 1"	4	0.740 ( 8 pies <sup>2</sup> )	
Condensadores	0.20	0.019	0.91	26	C 1"	2	1.210 (13 pies <sup>2</sup> )	
	0.25	0.019	2.44	52	C 1"	1	7.600 (81.66 pies <sup>2</sup> )	Piloto, H, J, & V.
	0.25	0.019	2.44	52	C 1"	1	7.600 (81.66 pies <sup>2</sup> )	Piloto (V. película)
	0.25	0.019	2.44	52	C 1"	1	7.60 (81.66 pies <sup>2</sup> )	Piloto refrija
Enfriadoras	0.20	0.019	0.91	16	C 1"	4	2.74 ( 8 pies <sup>2</sup> )	
Inter.C.Color	0.036	0.025	9.15	1		1	0.96 (10.32 pies <sup>2</sup> )	Piloto doble tubo (1)
	0.100	0.019	1.05	7		1	9.30 (100 pies <sup>2</sup> )	Piloto multitubo (2)
		0.019	2.44	52	T 1"	1	7.60 (81.66 pies <sup>2</sup> )	Piloto tubo y coraza
Rehervidores	0.250	0.025	0.91	42	T 1 1/2"	1	2.73 (29.38 pies <sup>2</sup> )	Termosifon vertical
	0.440	0.019	0.91	26	C 1"	2	1.21 (13 pies <sup>2</sup> )	Piloto carmita
	0.200	0.019	0.91	26	C 1"	1	1.21 (13 pies <sup>2</sup> )	Piloto termosifon H.
	0.200	0.019	0.91	26	T 1"	1	1.21 (13 pies <sup>2</sup> )	Piloto termosifon V.
Serpentinas		0.019	9.90	1		1	0.466 (5.02 pies <sup>2</sup> )	
		0.025	11.00	1		1	0.677 (9.44 pies <sup>2</sup> )	De destilador batch

NOTAS:

- (1) El cambiador está constituido por 1 Anrrollas de 10 pies de longitud.  
 (2) Los tubos internos son alistas  
 H Horizontal  
 I Inclinado  
 V Vertical

EQUIPO ROTATIVO.

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Lts/Hr	DIAMETRO MTS	ETAPAS No.	P. SUC. Kg/cm <sup>2</sup>	P. DESC. man	RELACION DE COMPRESION	FLUIDO ESTADO	POTENCIA HP <sub>e</sub>
Agitadores	418,616	0.20		Atm	0.0076		Líquido	1.5
Bombas	190			Atm	50.0		Líquido	1.5
Bombas	378			Atm	50.0		Líquido	3.0
Bomba de Ayuda	680			Atm	10.0		Líquido	3/4
Bomba de Alta Presión	680			50.0	105.4		Líquido	10
Compresor Recíprocante (1)	84,950		2	Atm	10.5	11.2 (3.34)	Gas	15
Compresor Centrífugo	84,950		2	Atm	10.5	11.2 (3.34)	Gas	15
Sopladores	186,890			Atm	1.0	2.02	Gas	5

NOTAS:

- (1) La capacidad es a condiciones estándar, la relación de compresión fuera del paréntesis es la total, dentro del paréntesis es por etapa.

## EQUIPO DE SEPARACION DE POLVO.

SEPARADORES DE POLVO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	LARGO MTS	ANCHO MTS	ALTURA MTS	DIAMETRO MTS	FONDO TIPO	ELEMENTO ACTIVO TIPO	OBSERVACIONES
Ciclones	125	0.305		0.61	0.1524	cónico		
Separador de bolsas	125	0.600	0.80	1.60		cónico	Bolsas Filtrantes	
							Piramidal ( doce )	



EVAPORADORES .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	AREA DE CALENTAMIENTO Mts <sup>2</sup>	DIAMETRO MTS	LONGITUD MTS	T A P A SUPERIOR	T A P A INFERIOR	POTENCIA Hp	OBSERVACIONES
Evaporador	125	0.80	0.60	0.65	Elipsoidal	Cónica	1,5	(1) Circulación Forzada
	125	0.80	0.60	1.00	Elipsoidal	Elipsoidal		(2) Circulación Natural
	125	0.80	0.60	0.30	Elipsoidal	Cónica		(3) Circulación Natural

NOTAS:

- 1.- La calandria tiene 9 tubos de 3/4"  $\emptyset$  y 1.5 mts de longitud, arreglo cuadrado de 1" y coraza de 6" de  $\emptyset$
- 2.- La calandria tiene 27 tubos de 3/4"  $\emptyset$  y 0.5 mts de longitud con tubo central de 3"  $\emptyset$
- 3.- La calandria tiene 5 tubos de 1" de  $\emptyset$  y 2 mts. de longitud en arreglo cuadrado de 1 1/4" y coraza de 6" de  $\emptyset$

EXTRACTOR SOLIDO LIQUIDO

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/hr	LARGO MTS	ANCHO MTS	ALTURA MTS	No. DE ETAPAS CANTIDAD	POTENCIA HPs	OBSE RVACIONES
Extractor	125	4.0	0.32	0.40	10	3	Inclinación variable

F I L T R O S .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	AREA DE FILTRACION M <sup>2</sup>	OPERACION TIPO	TIEMPO DEL CICLO MIN	OBSERVACIONES
Filtro	125	3.0	por lotes	60	45 min. de operación y 15 min. lavado y descarga.
Osmosis inversa	125	0.412	continuo		Con membranas.
Ultrafiltración	125	42.0	continuo		Con membranas
Microfiltración	125	7.40	Continuo		Con membranas
		1.60	Continuo		

F L O T A D O R E S

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	DIAMETRO MTS	ALTURA MTS	TIPO DE FONDO FORMA	INTERNOS	OBSERVACIONES
Flotador	125	0.50	0.50	Cónica	Distribuidor	Con equipo de inducción de aire de 1.5 Hps.
	125	0.61	0.50	Cónica		

F L O C U L A D O R E S

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	DIAMETRO MTS	ALTURA MTS	TIPO DE FONDO FORMA	POTENCIA DE AGITADOR Hp	OBSERVACIONES
Floculador	125	0.90	0.50	Cónico	1.5	

R E A C T O R E S .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	DIAMETRO MTS	LONGITUD MTS	C A B E Z A		AGITACION	POTENCIA Hps	O B S E R V A C I O N E S
				SUPERIOR	INFERIOR			
Reactor	4580 Lts	1.80	1.8	Elipsoidal	Elipsoidal	si	5	Con chaqueta de calentamiento
	550 Lts	0.80	0.90	Elipsoidal	Elipsoidal	si	3	Con chaqueta de calentamiento
	125	0.90	0.90	Elipsoidal	Elipsoidal	si	3	Con chaqueta de calentamiento
	125	0.20	6.50	Elipsoidal	Elipsoidal			Con chaqueta de calentamiento
	125	0.20	2.80	Elipsoidal	Elipsoidal			Catalitico de lecho fijo

S E C A D O R E S .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	DIAMETRO MTS	LONGITUD MTS	ALTO MTS	L/D	ANCHO MTS	CHAROLAS No	POTENCIA H ps	OBSERVACIONES
Secadores	125		5.0	2.0		2.80	110	3	Operación por lotes
	125	0.60	4.5		7.5			3	Operación continua
	125	1.50	0.26	2.0					Spray

TANQUES Y RECIPIENTES.

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Lts	DIAMETRO Pcs	LONGITUD Mts(1)	L/D	% LLENADO %	TAPAS SUPERIOR	TAPAS INFERIOR	FLUIDO FASE	OBSERVACIONES
Tanques de carga	220	0,60	0,75	1,25	57	Plana	Elipsoidal	Líquido	Tapa superior fija
Tanques de carga	220	0,60	0,75	1,25	57	Plana	Elipsoidal	Líquido	Tapa tipo superior móvil
Tanques de carga	220	0,60	0,75	1,25	57	Plana	Elipsoidal	Líquido	Tapa superior seccionada
Recipientes de carga	200	0,60	0,60	1,00	65	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	
Recipientes de recepción	200	0,60	0,60	1,00	65	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	
Recipientes de Reflujo	65	0,40	0,40	1,00	50	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	Recipientes Horizontales y verticales
Recipientes de flashas	92	0,40	0,60	1,50	30	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	
Recipientes de burbujas	312	0,60	0,90	1,50	40	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	Equipada con distribuidor de gas
Recipientes separadores de arrastre	92	0,40	0,60	1,50	34	Elipsoidal	Elipsoidal	Líquido	

NOTAS

1) La longitud es entre límites de tangencia.



T O L V A S .

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	DIAMETRO MTS	ALTURA MTS	INCLINACION GRADOS	FRACCION DE LLENADO %	OBSERVACIONES
TOLVAS	125	1,10	0,94	60	80	

**TRANSPORTADORES.**

EQUIPO NOMBRE	CAPACIDAD Kg/Hr	LONGITUD MTS	RPM	POTENCIA HP <sub>s</sub>	Ø ALIMENTACION MTS	OBSERVACIONES
Transportadores de tornillo	125	9.5	70	0.75	0.15 (6")	

## DIAGRAMAS DE FLUJO

Todos y cada módulo de la planta piloto está representado con su diagrama de flujo correspondiente y se presentan a nivel de esquemas de flujo en los que se muestran los equipos principales y se indican las principales variables a controlar, así como la secuencia de flujo de proceso y los servicios auxiliares que requiere cada módulo, adicionalmente se muestra el esquema de proceso del caso de producción de sulfolano en la que toman parte una mayor cantidad de equipos; los que pueden ser de módulos diferentes pero que pueden integrarse, para así, funcionar dentro de un proceso específico.

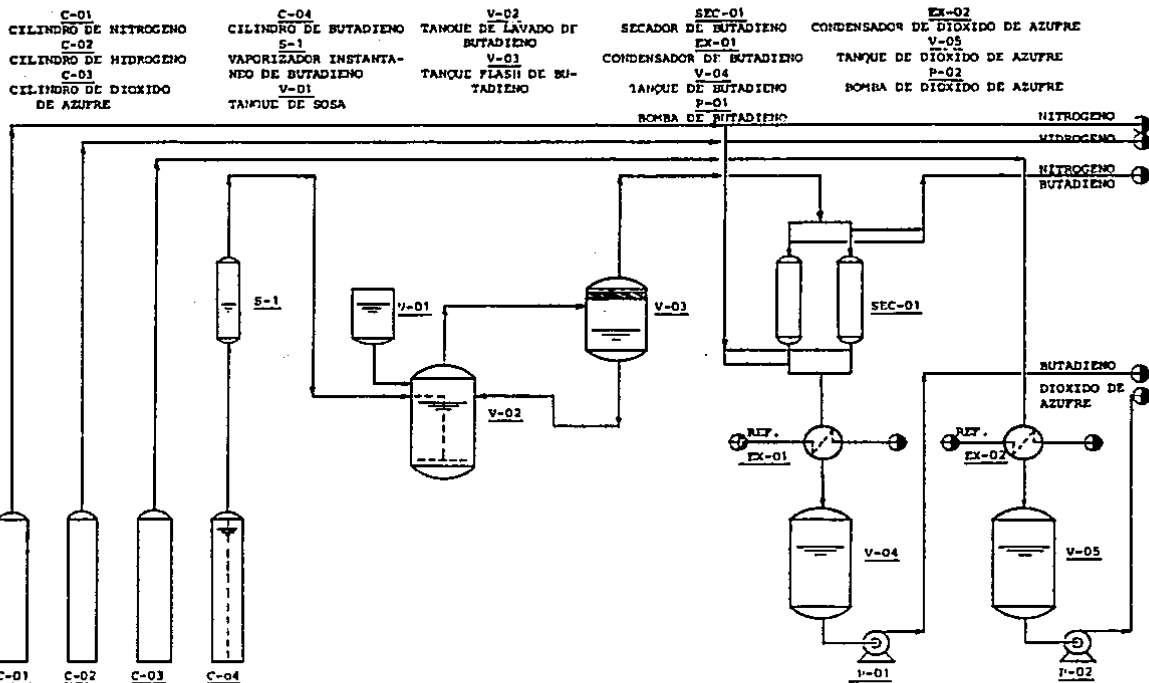


DIAGRAMA DE FLUJO SUL-OPP-001

EX-03  
CONDENSADOR DE SO<sub>2</sub> y C<sub>4</sub><sup>g</sup>  
R-01  
REACTOR DE SULFOLENO

EX-04  
ENFRIADOR DE SO<sub>2</sub> y C<sub>4</sub><sup>g</sup>  
EV-01  
EVAPORADOR DE DIOXIDO DE AZUFRE  
V-06  
TANQUE DE SUCCION DE CO-01

CO-01  
COMPRESOR DE SO<sub>2</sub> y C<sub>4</sub><sup>g</sup>  
TA-01  
TORRE AGOTADORA DE SO<sub>2</sub>  
V-07  
TANQUE DE SUCCION DE CO-02

V-09  
TANQUE DE SOLUCION DE  
SULFOLENO EN SULFOLANO  
P-03  
BOMBA DE SOLUCION

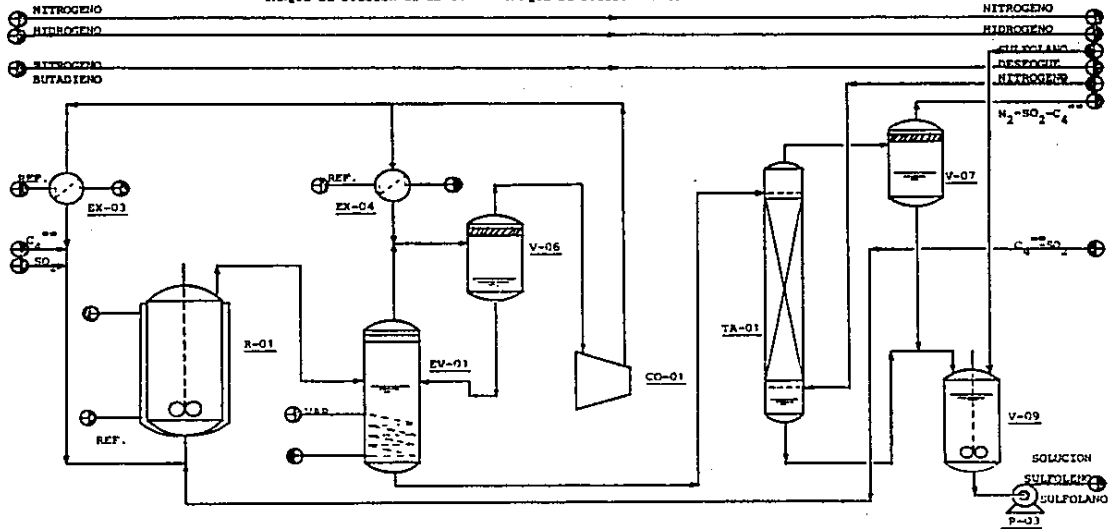


DIAGRAMA DE FLUJO SUL-DPP-002

EX-07  
ENFRIADOR DE NITROGENO  
EX-06  
CONDENSADOR DE  $SO_2, V, C_4$   
EX-05  
ENFRIADOR DE  $N_2, SO_2, C_4$

CO-02  
COMPRESOR DE NITROGENO  
V-08  
TANQUE SEPARADOR DE NITROGENO  
R-02  
REACTOR DE SULFOLANO

EX-08  
ENFRIADOR DE HIDROGENO  
V-10  
TANQUE DE SUCCION DE CO-03  
V-11  
TANQUE SEPARADOR DE HIDROGENO

CO-01  
COMPRESOR DE HIDROGENO  
EX-09  
ENFRIADOR DE SULFOLANO  
V-12  
TANQUE DE SULFOLANO  
P-04  
BORRA DE SULFOLANO

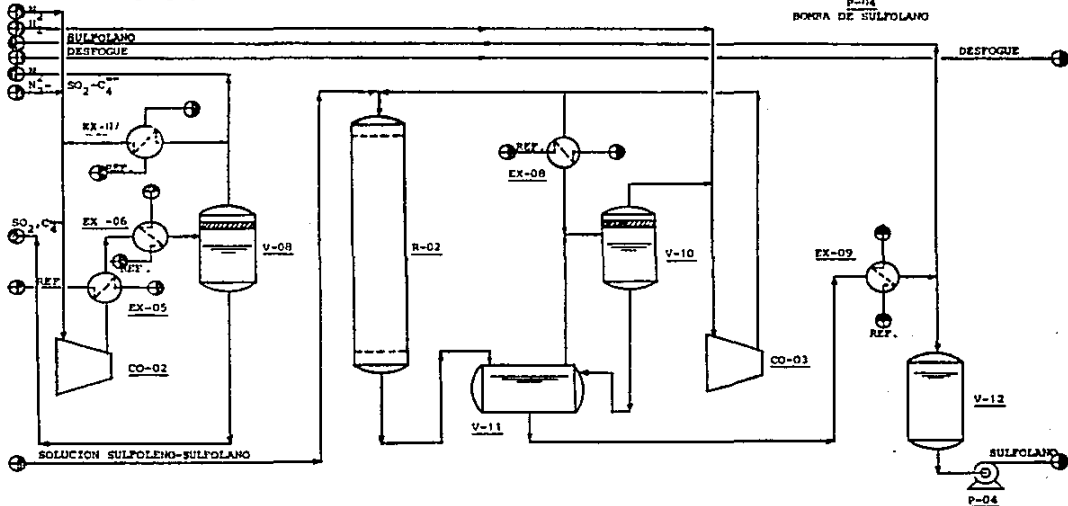
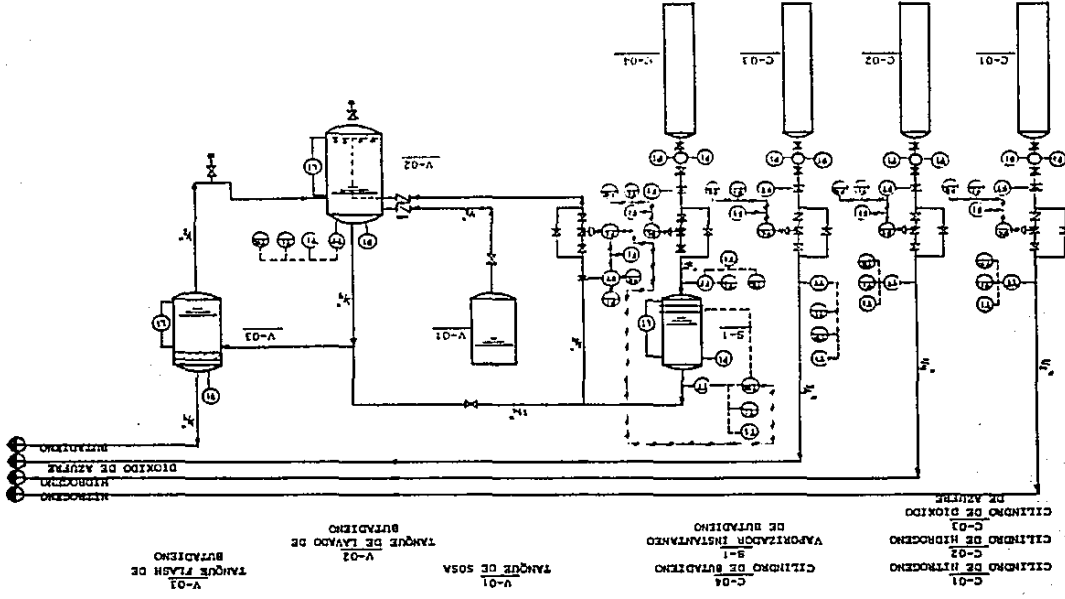


DIAGRAMA DE FLUJO SUL-DFF-003

## DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS

Los diagramas de tuberías e instrumentación que se presentan son los correspondientes al caso de producción de sulfolano, en estos diagramas deben representarse la mayor cantidad de información posible acerca de equipos, instrumentos, tuberías y accesorios que constituyen una planta; en el caso de una planta piloto es deseable que toda la instrumentación sea lo más cercana posible a la que se vaya a utilizar en la planta industrial con el fin de comprobar su funcionalidad, garantizando un buen control de las variables de proceso.

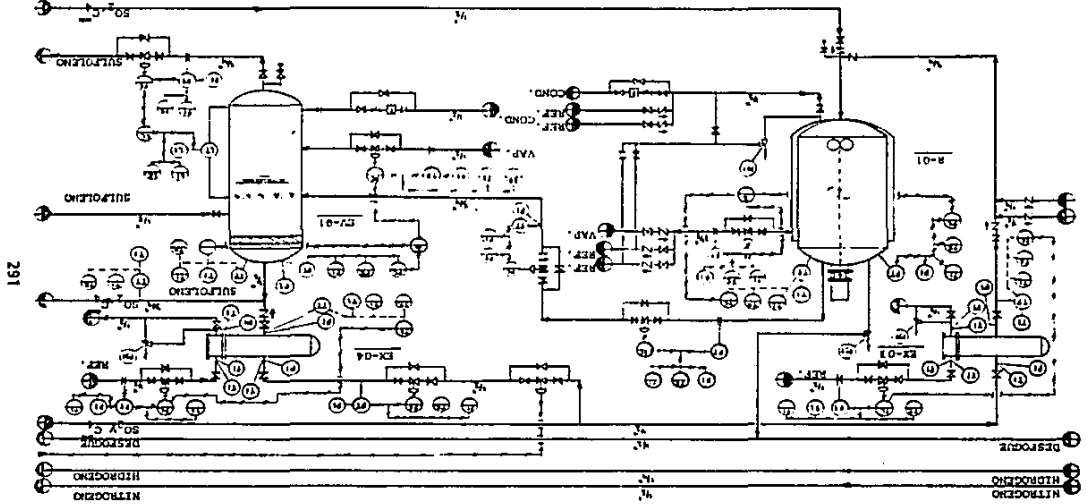


DIMENSIÓN DE TUBERÍAS E INSTRUMENTOS SUL-911-100





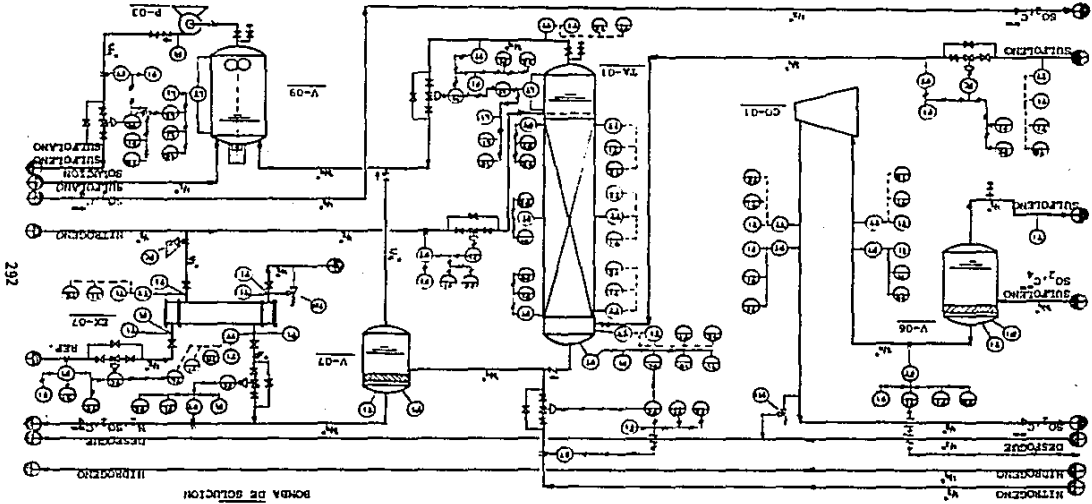
DIAGRAMA DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS SUL-DTI-100



EX-04  
EVAPORADOR DE DIOXIDO DE AZUFRE  
EX-01  
REFRIGERADOR DE SO<sub>2</sub> A 2° C

EX-01  
CONDENSADOR DE SO<sub>2</sub> A 2° C  
R-01  
REACTOR DE SULFOGENIO

DIAGRAMA DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS SUL-DTI-400

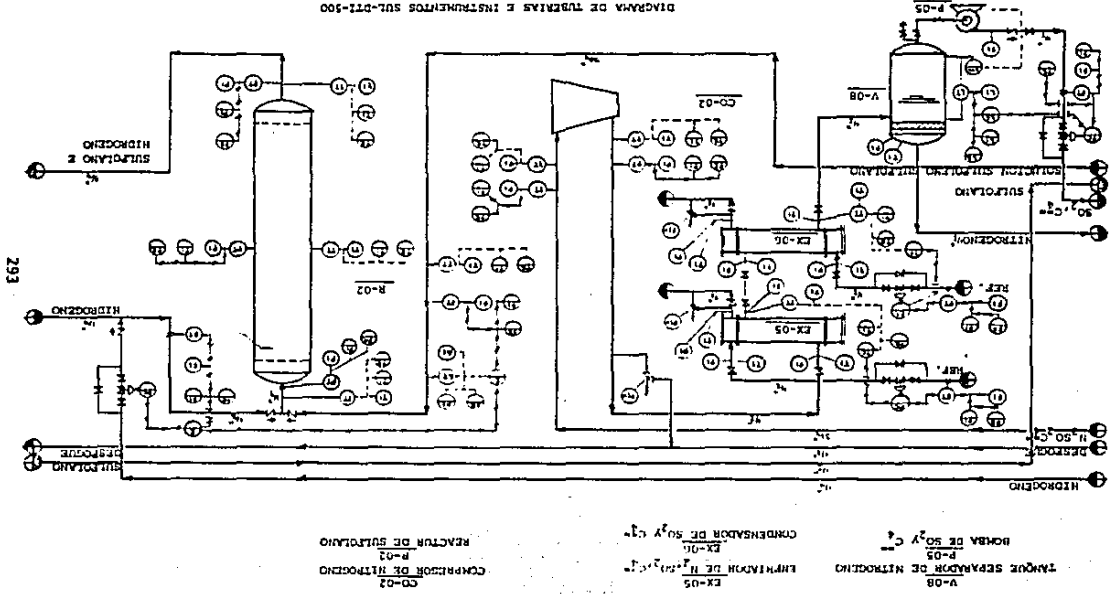


V-06  
TANQUE DE SECCION DE CO-01  
COMPRESOR DE SO<sub>2</sub> Y C<sub>1</sub>

TA-01  
V-07  
TANQUE AGUARRAMA DE SO<sub>2</sub>  
TANQUE DE SUCCION DE CO-02

EX-07  
V-05  
TANQUE DE SUCCION DE NITROGENO  
TANQUE DE SUCCION EN SUFLIADO  
P-03  
BOMBA DE SOLUCION

DIAGRAMA DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS SUL-DTI-500



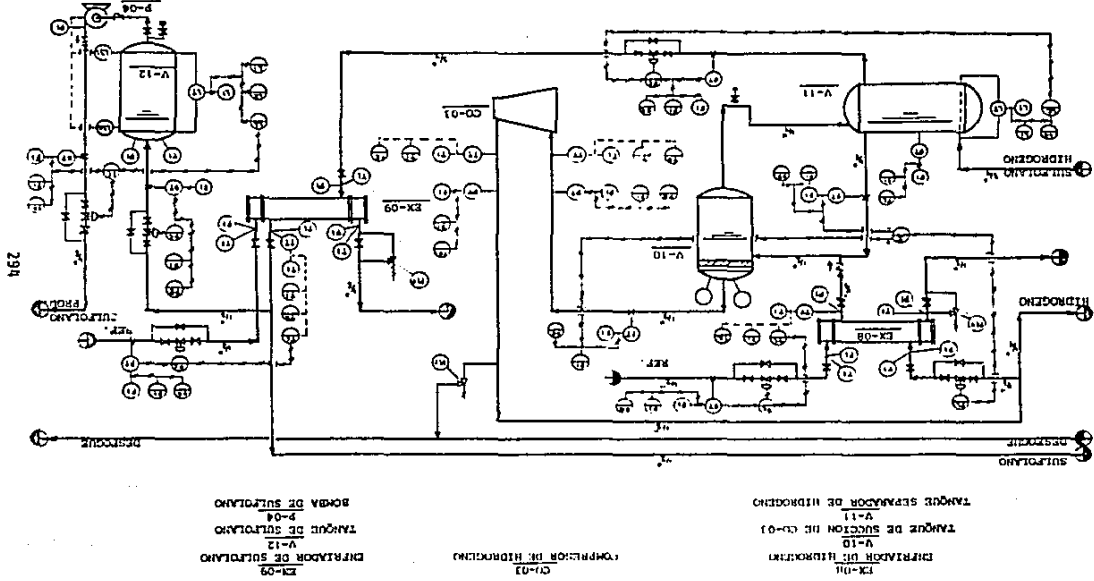
293

CO-02  
CONDENSADOR DE NITROGENIO  
R-02  
REATOR DE SULFURIO

EX-05  
EXCHAMBRADOR DE NITROGENIO  
EX-06  
CONDENSADOR DE SULFURO

V-08  
TANQUE SEPARADOR DE NITROGENIO  
BOMBA DE SO<sub>2</sub>  
P-05

DIAGRAMA DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS SUL-DTI-600



BOMBA DE SULFATO  
V-04  
TANQUE DE SULFATO  
V-12  
REFRIGERADOR DE SULFATO  
CX-03

CX-01  
COMPRESSOR DE HIDROGENIO

CX-02  
SEPARADOR DE HIDROGENIO  
V-11  
TANQUE DE SUCCION DE CX-01  
V-10  
REFRIGERADOR DE HIDROGENIO  
CX-02

Las filosofías de operación de una planta es el documento que descubre los efectos de las variables de operación y control del proceso, condiciones de operación anormales, procedimientos de operación especial y los requerimientos de control analíticos del proceso.

Dependiendo de la complejidad y para facilitar el análisis de las variables de operación y control de la planta es convincente dividir el proceso en secciones y en algunos casos subdividir estas secciones en grupos de equipos, la división debe basarse en la secuencia indicada en los diagramas de flujo de proceso.

### Proceso Para Producir Sulfolano.

La función principal de la planta piloto de este proceso es producir sulfolano que es un solvente utilizado en la extracción de aromáticos, utilizando como materias primas 1,3 butadieno dióxido de azufre e hidrógeno.

La planta se divide en cuatro secciones como se indica en la descripción del proceso.

### Sección de Preparación de Carga.

Esta sección tiene como objetivo acondicionar la carga eliminando materias indeseables como los peróxidos del butadieno, que tendrán

un efecto marcado en el reactor de sulfoleno si no se eliminan previamente. Los principales equipos que constituyen esta sección son:

Cilindros de Inertes y Materias Primas	C-01 a C-04
Condensador de Butadieno	EX-01
Condensador de Dióxido de Azufre	EX-02
Vaporizador Instantáneo de Butadieno	S-1
Secador de Butadieno	SEC-01
Bomba de Butadieno	P-01
Bomba de Dióxido de Azufre	P-02
Tanque de Sosa	V-01
Tanque de Lavado de Butadieno	V-02
Tanque Flash de Butadieno	V-03
Tanque de Butadieno	V-04
Tanque de Dióxido de Azufre	V-05

Esta sección como su nombre lo indica tiene como objetivo acondicionar la carga para la primera etapa del proceso correspondiente a la síntesis de sulfoleno. el acondicionamiento consiste en retirar los componentes indeseables contenidos en el 1,3 butadieno, como son los peróxidos e inhibidores, ya que tienen un efecto negativo sobre la reacción para producir sulfoleno; el proceso de acondicionamiento se lleva a cabo por un lavado con solución caústica, secado para eliminar el agua y una condensación, el dióxido de azufre únicamente se condensa al igual que el 1,3 butadieno a temperatura ambiente.

### Presión

El efecto de la presión sobre el proceso de acondicionamiento se refleja directamente sobre la temperatura de vaporización del 1,3 butadieno y en el consumo de refrigerante para la condensación.

## Temperatura.

La eliminación de los peróxidos se favorece con la temperatura sin embargo, también afecta la presión del sistema y el consumo de refrigerante para la condensación.

## Sección de Reacción y Purificación.

En ésta sección se ponen en contacto las materias primas acondicionadas previamente para hacerlas reaccionar, producir sulfoleno y purificarlo con operaciones de evaporación y desorción con el propósito de eliminar la mayor cantidad posible de materias primas residuales. Los equipos que conforman ésta sección son:

Compresor de $\text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	CO-01
Compresor de Nitrógeno	CO-02
Condensador de $\text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	EX-03
Condensador de $\text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	EX-06
Evaporador de Dióxido de Azufre	EV-01
Enfriador de $\text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	EX-04
Enfriador de $\text{N}_2, \text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	EX-05
Enfriador de Nitrógeno	EX-07
Bomba de $\text{SO}_2$ y $\text{C}_4^{==}$	P-05
Reactor de Sulfoleno	R-01
Torre Agotadora de $\text{SO}_2$	TA-01
Tanque de Succión de CO-01	V-06
Tanque de Succión de CO-02	V-07
Tanque Separador de Nitrógeno	V-08



En esta sección se ponen en contacto el 1,3 butadieno y el dióxido de azufre en una relación determinada con la finalidad de que la reacción se desplace hacia el producto intermedio que es el sulfoleno, una vez que ha reaccionado el producto del reactor se envía al evaporador para separar el dióxido de azufre y 1,3 butadieno residual, el sulfoleno obtenido del evaporador se somete a una operación de desorción con el fin de reducir al máximo los contaminantes a fin de reducir los efectos negativos sobre el catalizador del reactor de hidrogenación.

### Presión

El efecto de la presión sobre la reacción se refleja en el cambio de fases que sufren los reactivos y por ende sobre la eficiencia de reacción de manera que para un sistema líquido, la presión del sistema debe ser mayor que la presión de saturación de las materias primas, para el caso de la evaporación y la desorción, la presión debe ser mucho menor con el fin de facilitar la salida del butadieno y dióxido de azufre del sulfoleno líquido.

### Temperatura

En el reactor la temperatura de reacción debe estar por arriba de la temperatura de fusión del sulfoleno pero no mayor que la temperatura de ebullición del sulfoleno, ya que la reacción de producción de sulfoleno es reversible; es decir, que a temperaturas altas se vuelve a generar dióxido de azufre y 1,3 butadieno, por lo que se debe tener como

máximo 150 °C, lo que hace necesario controlar la temperatura de reacción, retirando el calor generado por medio de un refrigerante y así, se obliga desplazar el equilibrio hacia los productos en las operaciones de purificación como es la evaporación y la desorción; la temperatura debe mantenerse ligeramente arriba del punto de fusión del sulfoleno con el fin de evitar su descomposición.

Relación mol ( Dióxido de azufre/1,3 Butadieno )

En el reactor de sulfoleno es conveniente que la relación mol de ( dióxido de azufre 1,3 butadieno ) sea mayor de 1 con el fin de acelerar la reacción y desplazar el equilibrio hacia el producto principal que es el sulfoleno y evitar polimerización; sin embargo, no se debe tener una relación mol muy grande ya que se diluye el butadieno y el consumo energético en la separación se hace excesivo. La relación mol debe, por lo tanto, mantenerse entre 1 y 10 como máximo.

Sección de Preparación y Reacción de Sulfoleno.

Esta sección tiene como objetivo acondicionar el sulfoleno con el medio de reacción que en este caso se utilizará el mismo sulfoleno y llevar a cabo la reacción de hidrogenación para producir sulfolano. Los equipos que integran esta sección son:

Bomba de Solución	P-03
Reactor de Sulfolano	R-02
Tanque de Solución de Sulfoleno en Sulfolano	V-09

La finalidad de esta sección es diluir en proporción adecuada el sulfoleno en sulfolano con el fin de poder llevar a cabo la hidrogenación del sulfoleno a baja temperatura en un reactor catalítico; la reacción es rápida y exotérmica, por lo que los productos salen del reactor a mayor temperatura que las materias primas.

#### Presión.

El efecto de la presión en la reacción es favorable, ya que desplaza la reacción hacia los productos.

#### Temperatura.

La temperatura de reacción de preferencia debe mantenerse baja, ya que su efecto es negativo sobre la eficacia de la reacción y en la siguiente etapa aumenta el consumo de refrigerante.

#### Relación ( sulfolano sulfoleno )

Esta Relación favorece el control de temperatura del sistema reaccionante y provee un medio de reacción más adecuado; sin embargo, una relación grande hace que el reactor aumente de tamaño.

## Relación (Hidrógeno/Sulfoleno)

Esta variable, debe mantenerse mayor de 1 pero menor de 5 a fin de que la reacción de hidrogenación sea lo mas completa posible pero sin exceder debido a que los equipos auxiliares de separación aumentarían de tamaño en forma considerable.

## Contenido de Impurezas.

En el sulfoleno las cantidades de dióxido de azufre y butadieno deben ser mínimas, ya que el dióxido de azufre es uno de los venenos - mas dañinos para el catalizador y la desactivación del mismo sería sumamente rápida por no decir instantánea

## Sección de Separación de Sulfoleno.

Esta sección tiene como objetivo la separación del sulfolano del hidrógeno residual, que no reacciona en el reactor de sulfolano y - esta compuesta por los siguientes equipos:

Compresor de Hidrógeno	CO-03
Tanque Separador de Hidrógeno	V-11
Tanque de Succión de Co-03	V-10
Enfriador de Hidrógeno	EX-08
Enfriador de Sulfolano	EX-09
Tanque de Sulfolano	V-12
Bomba de Sulfolano	P-04

En ésta sección el sulfolano producto de la reacción de hidrogenación se separa del hidrógeno en exceso, el cual se comprime y se recircula a la alimentación del reactor, el producto líquido se enfría - hasta una temperatura mayor que el punto de fusión del sulfolano.

### Presión.

La presión debe mantenerse baj por reducción de la presión de salida del reactor y así, facilitar la separación del hidrógeno.

### Temperatura.

Esta variable debe reducirse hasta un valor ligeramente mayor que el punto de fusión del sulfolano con el fin de evitar problemas operativos como taponamientos en los conductos.

### Operaciones Anormales.

Siempre que se presenten se debe corregir inmediatamente, ya que es una planta piloto y algunos de sus objetivos es el de corregir los problemas operativos del sistema.

### Requerimientos de Análisis.

Los requerimientos necesarios son de equipo, ya que la mejor manera de caracterización de cargas y productos son por medio de  cromatografía de gases y líquidos y métodos volumétricos químicos.

## SERVICIOS AUXILIARES

Los servicios auxiliares son una parte primordial en todo proceso productivo, ya que sin ellos es, prácticamente imposible operar - cualquier planta de producción de cualquier índole; en planta piloto - también ocupan un lugar primordial, ya que además de proporcionar los medios necesarios para la operación, podrá ser equivalente al de una planta industrial de gran capacidad junto con los problemas que podrían presentarse y que a nivel piloto es factible de resolver.

La planta piloto de propósitos múltiples debe contar con servicios auxiliares tales como:

Vapor de agua en calidad saturado y recalentado y a niveles de presión baja, media y alta con la finalidad de usarse como medio de: calentamiento, diluyente, medio motriz, atemperador, inerte, enfriamiento - incluso entre otros.

Aceite de calentamiento y/o enfriamiento en donde no sea posible utilizar vapor.

Agua, en sus diferentes modalidades como son: de proceso, de enfriamiento, de servicios y contra incendio.

Aire, en modalidades como son: proceso, instrumentos y servi-cios, además de estar libre de aceite.

Inertes, como son Nitrógeno y Helio, siendo éstos los más comunes para barrido y equipos de análisis.

Refrigeración con el fin de alcanzar temperaturas bajas a base

de refrigerantes y salmueras.

Energía eléctrica, que se utiliza para acciones instrumentos, motores y alumbrado.

Combustibles, entre los que se encuentran, combustóleo, diesel y gas natural. Este último, también utilizado como gas de sello o de barrido cuando se requiera.

Almacenamiento, que debe incluir áreas para sólidos y tanque para líquidos y gases capaces de almacenar materias primas, reactivos y productos, para y de la planta de múltiples propósitos.

#### CLASIFICACION DE AREAS

En toda planta de proceso, factoría o lugar en el que se manejen fluidos, polvo, fibras, etc., que representen un cierto riesgo requiere de una clasificación de áreas de acuerdo a la peligrosidad que dichos materiales generan al mezclarse con aire en proporciones tales que originen mezclas explosivas y/o inflamables, la finalidad que se persigue con la clasificación de áreas es el de especificar adecuadamente los equipos y elementos eléctricos requeridos con el fin de evitar fuentes de ignición que originen siniestros que resultarían en pérdidas materiales y de vidas humanas.

Las áreas peligrosas se clasifican en tres clases; clase I, - clase II y clase III, cada una de estas clases está compuesta por dos divisiones 1 y 2 y cada clase maneja ciertos fluidos, polvos y/o fibras suspendidas o no en el aire y de acuerdo a las divisiones son más o --- más o menos peligrosas.

La clase I trata con gases o vapores flamables que están o pueden estar presentes en el aire en cantidades suficientes para producir - mezclas explosivas o inflamables.

La clase II trata con polvos combustibles que están o pueden estar en suspensión en el aire formando mezclas explosivas o inflamables.

La clase III se refiere a áreas peligrosas debido al manejo, - fabricación, uso y/o almacenamiento de fibras fácilmente inflamables y que no necesariamente deben estar mezclados con aire.

Las áreas peligrosas clasificadas como clase I división 1, es una área donde las concentraciones peligrosas de gases o vapores flamables existen continuamente, intermitentemente o periódicamente, bajo indicaciones de operación normal, o en donde las concentraciones peligrosas de dichos gases o vapores flamables pueden existir frecuentemente debido a operaciones de reparación o mantenimiento o debido a derrames o fugas y/o en áreas donde los paros imprevistos u operación defectuosa de equipos o procesos que pueden relevar concentraciones peligrosas de gases o vapores flamables y pueden causar simultáneamente falta de equipo eléctrico.

Las áreas peligrosas clasificadas como clase I, división 2 son áreas donde líquidos volátiles flamables o gases flamables son manejados, procesados o usados, pero en donde los líquidos, vapores o gases peligrosos estarán contenidos en contenedores cerrados o sistemas cerrados y sólo pueden escapar en caso de ruptura accidental o fallas imprevistas de tales contenedores o sistemas o en caso de operación anormal del equipo, áreas donde las concentraciones peligrosas de gases o vapores son normalmente evitadas por ventilación mecánica positiva pero que puede llegar a ser peligrosa por falla u operación anormal del equipo de ventilación o áreas similares a la clasificación 1, división 1 en la que las concentra



ciones peligrosas de gases o vapores pueden comunicarse, a menos que tal comunicación se evite por una adecuada ventilación con presión positiva desde una fuente de aire limpio y que sean previstos guardas de seguridad contra falla de ventilación.

Las áreas peligrosas clasificadas como clase II, división 1 - son áreas donde polvos combustibles están o pueden estar suspendidos en el aire continuamente, intermitentemente o periódicamente, bajo condiciones normales de operación, en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o encendibles o donde una falla mecánica u operación anormal de maquinaria o equipo pueden causar tales mezclas explosivas o encendibles y pueden también proveer una fuente de ignición con falla simultánea de equipo eléctrico, mecanismos de protección, de operación, o de ser otras causas o en áreas donde los polvos combustibles por naturaleza conductora de electricidad pueden estar presentes.

Las áreas clasificadas como clase II, división 2 son áreas en donde los polvos combustibles no están normalmente suspendidos en el aire o no es probable mantenerse en suspensión por la operación normal de equipos o aparatos en cantidades suficientes para producir mezclas explosivas o encendibles pero donde los depósitos o acumulaciones de tal polvo combustible puede ser suficiente para interferir con la disipación segura de calor del equipo o aparatos eléctricos o donde tales depósitos o acumulaciones de polvo combustible sobre, en, o en la vecindad de equipo eléctrico puede ser incendiada por áreas, chispas o por el quemado del material de los equipos eléctricos.

Las áreas con clasificación clase III, división 1 son áreas donde son manejados, fabricados o usados materiales fibrosos fácilmente incendiables pero que no están en cantidad suficiente en el aire para producir mezclas inflamables.

Las áreas con clasificación clase III, división 2 son áreas donde materiales fibrosos fácilmente inflamables son almacenados o mane-

jados.

Para el caso de planta piloto de múltiples propósitos, tendremos áreas de alto riesgo, de tal manera que se consideran áreas riesgo - sas clase I, división I para zonas donde se manejen líquidos o gases y clase II, división I para zonas donde se manejen sólidos secos.

### MATERIALES DE CONSTRUCCION

El material de construcción de los equipos para una planta piloto dependerá grandemente de su aplicación, de manera que, para una aplicación específica el material de construcción de los equipos piloto deberán ser del mismo material a utilizarse en la planta comercial, y se hace necesaria la obtención de muestras para pruebas de corrosión en las áreas críticas con el fin de tener la información adecuada para la etapa de diseño de la planta piloto.

La selección de materiales usados en equipos de pequeña escala es muy grande y existe la posibilidad de que algunas unidades especiales no se encuentren disponibles, como es el caso de metales y aleaciones exóticas, como alternativa a estas restricciones se procederá a seleccionar el siguiente material con demasiada frecuencia, el material que se usa como alternativa para los equipos es: vidrio, acero vidriado, cerámica y acero recubierto con elastomero.

En el caso de plantas piloto de propósitos múltiples la selección del material es muy reducida y normalmente se selecciona acero inoxidable, pero también puede ser acero vidriado y aún vidrio como material único.

## MEDIDAS DE SEGURIDAD

Los aspectos de seguridad en trabajo de planta piloto son de gran importancia y desde la concepción y diseño del proceso, construcción, operación, mantenimiento y escalación de la planta.

Durante el estudio y diseño del proceso la evaluación de los riesgos asociados con los materiales manejados, así como con las reacciones involucradas, son requeridas y permitirán delinear las acciones de seguridad necesarias. Entre los riesgos principales causados por los materiales manejados están la explosividad, la flammabilidad, y la toxicidad.

Los sistemas reaccionantes deben estudiarse cuidadosamente, ya que las condiciones de reacción podrían conferirle características de explosividad, debe también estimarse el efecto de los contaminantes sobre el sistema reaccionante. La corrosividad de los materiales manejados debe ser considerada realizando pruebas a nivel laboratorio y a condiciones iguales o similares a las de la planta piloto.

La información para diseño de la planta debe ser proporcionada por los químicos que laboran durante la investigación básica, ya que sus reportes abarcan los materiales usados, riesgos, condiciones y equipos de seguridad necesarios. El encargado de diseño de la planta deberá por lo tanto, consultar con los químicos desde el momento en que se aprueba el proyecto, durante la revisión del prediseño, diseño preliminar de planta y diseño final.

En la etapa de construcción se debe llevar un control cuidadoso desde la recepción de equipos, en áreas de construcción donde las zo

nas riesgosas se deben marcar y proveer los medios necesarios para sofocación de siniestros.

Las modificaciones deben considerarse con sumo cuidado y debe existir un grupo de seguridad con el fin de llevar a cabo inspecciones periódicas.

En la etapa de pre-arranque las instrucciones deben estar completas, entendibles y fáciles de leer; además, las instrucciones de seguridad deben apegarse a las condiciones de operación de la planta y se debe indicar claramente los riesgos causados por los materiales y sistemas reaccionantes, indicando el tipo de equipo necesario para una operación segura.

Las plantas piloto son arrancadas y paradas frecuentemente, por lo que se deben tener instrucciones claras y precisas para arranque y paro de emergencia. Durante la operación normal se deben tener facilidades para recopilación de información de la planta y/o recolección de muestras con el fin de llevar a cabo una evaluación correcta.

En la etapa de escalación se deben tener guías adecuadas y se deberán considerar factores y regímenes de operación; así como recirculaciones y tipos de equipos utilizados en planta piloto, con el fin de escalarlos a tamaño comercial.

VII.

ASPECTOS ECONOMICOS

## ASPECTOS ECONÓMICOS

### PLANTAS PILOTO Y MICROPLANTAS

La inversión de tiempo y recursos económicos son de gran importancia en el diseño, construcción y arranque de una planta nueva, aunado a los recursos, también se tiene un gran riesgo de falla si la tecnología no está totalmente desarrollada.

Para reducir el grado de riesgo se emprenden con demasiada frecuencia largos y costosos programas de investigación cuya finalidad es el desarrollo de nuevos procesos y el mejoramiento de algunos existentes.

Una de las etapas dentro del programa de investigación es el estudio de planta piloto, el tamaño de la planta piloto puede ir desde una unidad de banco de laboratorio hasta una unidad comercial.

La clasificación de plantas piloto por tamaño es la más uniformemente proporcional con los costos de construcción y operación, hecho que ha propiciado que las unidades demostrativas sean reemplazadas por unidades de banco o micro unidades.

El grado de automatización es otra manera de clasificar las plantas piloto que va desde el control manual a cargo del investigador u operador para determinar las óptimas condiciones de operación, hasta plantas totalmente automatizadas basadas en control y adquisición de datos por computadora, aumentando el costo inicial en forma considerable, pero reduce el número de operadores y mejora la calidad de los datos.

Los costos de diseño, construcción y corrida de una planta piloto son determinados por su naturaleza y complejidad, así, se encuentra que el rango de costos va desde los 10,000 hasta los 10'000,000 de dólares y son típicos entre 50,000 y 200,000 dólares.

La estimación de costos para una planta piloto están basados sobre los siguientes métodos:

- 1) Costo de una unidad similar
- 2) Costo del material
- 3) Estimado de días mecánicos para construcción.
- 4) Estimado detallado de material y mano de obra.

El primer método es el más rápido y sencillo, se requiere de poca información, pero es el menos preciso.

El segundo método es más exacto pero tiene la desventaja de basarse en plantas piloto standard.

El tercer método es similar al segundo método pero es poco usado por la dificultad para obtener un buen estimado de días mecánicos.

El cuarto método es el más preciso, pero requiere de mucho tiempo y una vasta información, incluyendo un diseño semicompleto.

Una vez determinado el tamaño se determinan los costos fijos y los costos de operación que incluyen corrientes de alimentación, disposición de productos, servicios auxiliares, partes de repuesto, mantenimiento, salarios y servicios de soporte, y se mantienen fijos y con ligeros cambios por reducción del número de operadores requeridos por diseño de plantas piloto con mínima atención de operación y que por automatización

puede disminuirse desde tres a un operador o agrupando unidades que permitan al operador atender varias unidades en forma simultánea.

#### COSTOS DE PLANTA PILOTO POR CLASE

C L A S E	RANGO DE COSTO $10^3$ \$ (
Planta de banco y micro unidades	10 - 50
Planta piloto integrado	70 - 250
Unidad demostrativa o prototipo	> 500

#### GASTOS DE INSTRUMENTACION POR GRADO DE AUTOMATIZACION

C O N T R O L	RANGO DE COSTOS DE INSTRUMENTACION (1), (2) $10^3$ \$
Manual	> 2
Automatización limitada, control local únicamente	10 - 50
Automatización elevada, control remoto y local	> 100
(1) No incluye instalación	
(2) Basado sobre un tamaño medio de planta piloto de 4 a 8 Loops de control	



## TECNICAS DE ESTIMACION DE COSTOS

METODO	INFORMACION REQUERIDA	TIEMPO PARA DESARROLLO (a) SEMANAS	RANGO DE PRECISION %
Similitud	Costo de unidad similar	< 1	50 - 100
Materiales	Todos los materiales requeridos, <u>cos</u> tos de equipos	1 - 2	25 - 50
Mano de Obra	Estimado detallado de mano de obra	2 - 3	25 - 50
Materiales y mano de obra	Estimado detallado de materiales Estimado detallado de mano de obra	4 - 6	10 - 15
(a) Después de que el diseño preliminar está concluido			

## ESTIMACION DE COSTOS

La estimación del presupuesto para la compra e instalación - del equipo es siempre necesario y se dispone de un periodo de tiempo muy reducido para su realización.

Los costos de adquisición de equipos se estiman desde información en forma de cartas de costos contra capacidad y por aplicación del factor de Lang conocido como el factor de las seis décimas; aunque el valor puede ser mayor o menor de 0.6, dependiendo del tipo y tamaño del equipo de que se trate.

La actualización de los costos de equipo se realiza por una aplicación juiciosa de los índices de costos como los Marshall & Stevens publicados periódicamente; sin embargo, se deben observar ciertas precauciones en su aplicación, debido a que en muchos casos los precios de ciertos equipos han disminuido con el tiempo como resultado de una gran competencia en el mercado.

Los costos de instalación de equipo de planta piloto presenta problemas adicionales debido a que la mano de obra y partidas auxiliares como, tuberías e instrumentación tienen costos tan altos en proporción al costo de adquisición del equipo principal.

El costo de instalación de equipo de proceso puede exceder el costo del equipo mismo, y ésto ocurre a medida que el tamaño del equipo disminuye, ya que los costos de mano de obra y accesorios permanecen ca si constantes. Los estimados preliminares de costos de instalación se elaboran por la aplicación de una relación al costo del equipo, pero a

nivel piloto se deben hacer cuidadosas consideraciones al usar dichas relaciones.

La primera consideración es aquella que indica lo que está incluido en el costo del equipo, y lo que está incluido en la instalación, evitando serios errores en la estimación.

La segunda consideración es la selección correcta de la relación conforme a la aplicación de la planta piloto, ya que varía ampliamente en función del área industrial de aplicación.

La instalación debe incluir entre otros conceptos las siguientes cimentaciones y soportes individuales, montaje, tubería, conexiones eléctricas, instrumentación, aislamiento y pintura e ingeniería de proyecto.

Para el presente caso la relación de costo instalado a costo de equipo es de 2.46 basado sobre una planta piloto de múltiples propósitos para el área química con los siguientes porcentajes para los conceptos mencionados:

Adquisición de equipo de proceso	100 %
Montaje	10 %
Tuberías ( proceso y servicios )	40 %
Conexiones y accesorios eléctricos	10 %
Instrumentación	50 %
Aislamiento	10 %
Pintura	1 %
Ingeniería de Proyecto	40 %
	<hr/>
	246 %

Los costos de adquisición se basan sobre costos base del primer cuarto de 1969 y del primer cuarto de 1979 y se escalan al primer cuarto de 1988 en base a los índices de Marshall y Stevens.

$$C_2 = \left( \frac{I_2}{I_1} \right) C_1$$

#### INDICES ECONOMICOS

AÑO	CUARTO	I N D I C E	
		TODA INDUSTRIA	INDUSTRIA PROCESO
1969	1ero.	279.1	276.5
1979	1ero.	577.0	585.9
1988	1ero.	835.3	840.0

Para estimar costos con capacidades diferentes se hace uso de la ecuación que relaciona las capacidades, costos y el correspondiente factor de Lang.

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^n$$

El factor de Lang en el mejor de los casos tiene un valor de 0.6; sin embargo, su valor dependerá del tipo de equipo y podrá tener valores desde 0.0 hasta valores mayores de 2.

Los costos estimados por concepto y total son:

Adquisición de equipo de proceso	S 2'004,110.00
Montaje	200,411.00
Tuberías ( proceso y servicios )	801,644.00
Conexiones y accesorios eléctricos	200,411.00
Instrumentación	1'002,055.00
Aislamiento	200,411.00
Pintura	20,041.00
Ingeniería de Proyecto	<u>801,644.00</u>
Costo Estimado Total	S 5'230,727.00 (dolares)

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA No	EQUIPO NOMBRE	TIPO DE EQUIPO NOMBRE	No. CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$ / EQUIPO	COSTO UNITARIO ACTUAL \$ / EQUIPO	DEPRECIACION \$/AÑO EQUIPO	COSTO TOTAL ACTUAL \$	COSTO TOTAL ACTUAL \$ / PARTIDA
1	Centrifugas	C S C C	1	17,000 *	16,370	2,437	26,370	<u>129,120</u>
		Cia S C C	1	18,000 *	23,800	2,580	29,800	
		CSBO	1	19,000 *	27,240	2,724	27,240	
		T S C	1	7,000 *	10,030	1,003	10,030	
		V A B C	1	6,400	19,440	1,944	19,440	
		H A B C	1	6,400	19,440	1,944	19,440	
		2	Clasificadoras	Cilindricas	1	1,680	5,100	
	Cilindricas	1	1,700	5,160	516	5,160		
3	Columnas	Absorbedora	1	6,700	16,280	1,628	16,280	<u>25,820</u>
		Absorbedora	1	6,700	20,350	2,035	20,350	
		Absorbedora	2	5,670	17,230	1,723	34,460	
		Absorbedora	2	2,000	6,000	608	12,160	
		Absorbedora	2	3,700	9,720	972	19,440	
		Agotadora	2	5,200	15,600	1,580	31,600	
		Agotadora	2	3,630	11,030	1,103	22,060	
		Destilador batch	2	300	910	91	1,820	
		Destilador batch	2	3,400	10,330	1,033	20,660	
		Destilador Flash	2	200	610	61	1,220	
		Destilador rectificador	1	4,500	23,820	2,382	25,820	

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA No	EQUIPO NOMBRE	TIPO DE EQUIPO NOMBRE	No CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$/ EQUIPO	COSTO UNITARIO ACTUAL \$/ EQUIPO	DEPRECIACION \$/ARO EQUIPO	COSTO TOTAL ACTUAL \$	COSTO TOTAL ACTUAL \$/ EQUIPO
		Destilador rectificador	1	7,700	23,390	2,319	23,390	
		Destilador rectificador	2	9,670	17,220	1,722	36,640	
		Extractores	1	1,800	5,470	547	5,470	
		Extractores	1	2,020	6,190	616	6,190	
		Extractores	2	5,340	16,990	1,699	33,780	
		Intercambidores de iones	1	1,300	4,360	436	13,680	310,770
4	Cristalizadores	Evaporadores Cristalizadores	1	19,000 =	27,340	2,734	27,340	
		Circulación forzada	1	36,000 =	80,380	8,038	80,380	
		Vac Batch	1	60,000 =	86,020	8,602	86,020	
		Swenson	1	10,000 =	16,340	1,634	16,340	207,880
5	Decantadores	Horizontal	1	600	1,820	182	1,820	
		Cilindrico Vertical	1	300	1,520	152	1,520	3,340
6	Dializadores	Fibra Nueva	2	1,360	4,740	474	9,480	9,480
7	Eq. Int. Calor							
	Calentadores	Tubo y coraza	20	400	2,450	243	48,600	
	Condensadores	Tubo y coraza	15	900	2,730	273	40,950	
		Tubo y coraza	3	2,750	8,350	835	23,050	

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA No	EQUIPO NOMBRE	TIPO DE EQUIPO NOMBRE	No CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$ / EQUIPO	COSTO UNITARIO ACTUAL \$ / EQUIPO	DEPRECIACION \$/ANO EQUIPO	COSTO TOTAL ACTUAL \$	COSTO TOTAL ACTUAL \$ / PARTIDA
	Enfriadores	Tubo y coraza	15	800	2,430	243	36,450	
	Intercambiadores	Destil tubo	2	1,250	3,800	380	7,600	
		Multitubo	1	3,000	9,110	911	9,110	
		Tubo y coraza	2	2,350	8,350	835	16,700	
	Rehervidores	Termosifón vertical	4	1,600	4,860	486	19,440	
		Horizontal	1	850	2,580	258	2,580	
		Termosifón horizontal	1	1,000	3,040	304	3,040	
		Termosifón vertical	1	1,000	3,040	304	3,040	
	Serpentinas	Circulares	2	20	60	6	420	
		Circulares	4	10	30	3	120	195,640
4	Equipo rotativo							
	Agitadores	Propela	7	400	1,210	121	8,470	
		Turbine	4	1,800	5,470	547	21,840	
	Bombas	Centrifugas	60	140	410	42	25,200	
		Centrifugas	20	170	510	51	10,400	
		Centrifugas	2	190	580	58	11,600	
		Centrifugas	2	400	1,210	121	2,420	
		Dosificadoras	6	400	1,210	121	7,260	
	Compresores	Reciprocantes	2	3,700 *	5,300	510	10,600	
		Centrifugas	2	2,900 *	4,160	416	8,320	
	Sopladores	Centrifugos	6	1,700 *	2,440	244	14,620	110,330



COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA No	EQUIPO NOMBRE	TIPO DE EQUIPO NOMBRE	No CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$ / EQUIPO	COSTO UNITARIO ACTUAL \$ / EQUIPO	DEPRECIACION \$/ANO EQUIPO	COSTO TOTAL ACTUAL \$	COSTO TOTAL ACTUAL \$ / PARTIDA
9	Eq. de Sep. Polv.	Cilén	10	380 *	540	54	3,400	<u>8,700</u>
		Secador de bulvas	2	1,150 *	1,650	165	3,300	
10	Evaporadores	Circulación forzada	3	7,500 *	10,750	1,075	32,250	<u>89,250</u>
		Circulación natural	3	6,750 *	9,640	968	19,040	
		Circulación natural	3	6,500 *	9,320	932	27,960	
11	Extractor	Sólido líquido	1	5,000 *	15,190	1,519	15,190	<u>15,190</u>
12	Filtros	A presión hojas verticales	2	7,250 *	10,390	1,039	20,780	<u>124,050</u>
		A presión hojas horizontales	2	14,000 *	15,800	2,380	51,600	
		Tambor rotatorio cont.	1	14,000 *	20,070	2,007	20,070	
		Hojas rotatorio cont.	1	15,500 *	22,220	2,222	22,220	
		Osmosis Inversa	1	2,200 *	3,150	315	3,150	
		Ultrafiltración	1	2,200 *	3,150	315	3,150	
		Microfiltración	1	2,150 *	3,080	308	3,080	
13	Floculadores	Circular	2	4,400	13,400	1,340	26,800	<u>26,800</u>
14	Flotadores	Por inyección	1	520	1,580	158	1,580	

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA No.	EQUIPO NOMBRE	TIPO DE EQUIPO NOMBRE	No CANTIDAD	COSTO UNITARIO \$ / EQUIPO	COSTO UNITARIO ACTUAL \$ / EQUIPO	DEPRECIACION \$/AÑO EQUIPO	COSTO ACTUAL	COSTO TOTAL ACTUAL \$ / PARTIDA
		Mr Inducción	1	2,200	6,680	668	6,680	6,260
15	Reactores	Agitado, encaquetado y vidrio	1	34,000 *	48,750	4,875	48,750	
		Agitado y encaquetado	1	50,000 *	71,680	7,168	71,680	
		Agitado, encaquetado y vidrio	2	6,600	70,050	2,005	40,100	
		Agitado y encaquetado	2	3,700	9,720	972	19,440	
		Autoclaves	3	16,000	48,610	4,861	145,830	
		Tubular	1	6,000	12,150	1,215	12,150	
		Lecho fijo	1	2,350	7,750	775	7,750	345,700
16	Secadores	Cherolas	1	9,700	36,500	2,450	36,500	
		Rotatorio	1	15,000	39,500	3,950	39,500	
		Espresso	1	19,000	57,700	5,770	57,700	122,700
17	Tanques	Carga y recepción	8	800	2,430	243	19,440	
		Carga y recepción	8	810	2,460	246	19,680	
		Carga y recepción	10	745	740	74	7,400	
	Recipientes	Carga y recepción	70	760	2,310	231	161,700	
		Reflujo	6	500	1,510	152	9,110	
		Flashers	10	350	1,670	167	16,700	
		Autoclaves	4	900	2,710	273	10,320	

COSTOS DE ADQUISICION DE EQUIPOS

PARTIDA	NO	TIPO DE EQUIPO	NOMBRE	NO	COSTO UNITARIO	COSTO UNITARIO	COSTO UNITARIO ACTUAL	DEPRECIACION	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL	ACTUAL	3 / PARTIDA
---------	----	----------------	--------	----	----------------	----------------	-----------------------	--------------	-------------	-------------	--------	-------------

	4	Superadores		550	1,570	1,570	167	6,580	251,640			
	10	Cónica		310	300	300	30	3,000	3,000			
	3	Transformadores	Tornillo	2,900	4,160	4,160	416	20,800	20,800			

COSTO TOTAL DE EQUIPO

325

COSTO BASE UNITARIO DUEÑO 1975

COSTOS BASE UNITARIOS DE ENERO 1969

LA ESCALACION DE PRECIOS SE REALIZA UTILIZANDO LOS INDICES DE COSTOS DE MARSHALL Y SVEINIS

## ESTIMACION DE COSTO DE PRODUCTO

La estimación de costo de producto requiere de la consideración de varios conceptos, como son:

a) Depreciación de Equipo.

Este concepto requiere del conocimiento de la vida útil del equipo que se considera de diez años, y de un valor de salvamento que se considera igual a cero; ya que se trata de equipos piloto que difícilmente podrán venderse al final del período de diez años.

b) Costos de Mantenimiento.

Para una buena operación los equipos requieren de mantenimiento preventivo y correctivo, en la planta piloto el mantenimiento debiera ser preventivo aunque se da más correctivo y los costos por este concepto alcanzan hasta un 5 % anual.

c) Costos de Operación.

Este concepto está compuesto por las necesidades energéticas del proceso, y son suministradas por los servicios auxiliares que van desde energía eléctrica, refrigerantes, agua, vapor, aire, inertes, eliminación de desechos sólidos, líquidos y gaseosos.

d) Costos de Materias Primas y Reactivos.

Que toman lugar en el proceso, son de importancia primordial y se debe cuidar de no omitir ninguno: entre éstos se cuentan,

las materias primas principales, inertes, reactantes químicos, catalizadores, solventes, etc.

e) **Mano de Obra y Supervisión.**

Este es otro concepto de suma importancia, ya que se toma en cuenta el costo de la mano de obra calificada y la supervisión requerida.

## COSTOS DE DEPRECIACION

PARTIDA No.	EQUIPO NOMBRE	No. CANTIDAD	DEPRECIACION UNITARIA S / AÑO EQUIPO	DEPRECIACION TOTAL S / PARTIDA
1	Agitador	1	121	121
2	Bombas	4	42	168
3	Compresores Centrifugas	2	416	832
4	Compresor Reciprocante	1	530	530
5	Condensadores	4	273	1,092
6	Enfriadores	4	243	972
7	Evaporador	1	932	932
8	Agotador	1	1,580	1,580
9	Reactor Agitador	1	4,875	4,875
10	Reactor Empacado	1	775	775
11	Recipientes	4	231	924
12	Separadores	5	167	835
13	Burbujeadores	4	273	1,092
14	Flash	1	167	167
15	Desecadores	2	608	1,216
<b>COSTOS DE DEPRECIACION TOTAL ANUAL</b>				<b>16,111 S/AÑO</b>

## COSTOS DE MANTENIMIENTO

Se considera el necesario para el equipo en movimiento como son bombas y compresores.

PARTIDA No.	EQUIPO NOMBRE	No. CANTIDAD	MANTENIMIENTO UNITARIO \$/ EQUIPO	MANTENIMIENTO TOTAL \$/ PARTIDA
1	Agitadores	1	60.5	60.5
2	Bombas	4	21.0	84.0
3	Compresores Cent.	2	208.0	416.0
4	Compresores Recip.	1	265.0	265.0
<b>COSTOS DE MANTENIMIENTO TOTAL</b>				<b>825.50 \$/AÑO</b>

## COSTOS DE OPERACION

Para este concepto se estiman costos de energía eléctrica, agua, refrigerantes.

PARTIDA No.	SERVICIO NOMBRE	CANTIDAD TON/AÑO	REQUERIDA KWH/AÑO	COSTO UNITARIO \$/TON \$ / KWH.	COSTO TOTAL \$/PARTIDA AÑO
1	Energía Eléctrica		362,000	0.0087	3,147.83
2	Refrigerante	11,536.600		0.016	186.12
3	Agua de Enfío.	8,309.736		0.012	100.55
<b>COSTOS DE OPERACION TOTAL</b>					<b>3,434.50 \$/AÑO</b>

Costos estimados a partir de datos de PEMEX de mayo de 1984.

## COSTOS DE MATERIAS PRIMAS Y REACTIVOS

Producción Anual =  $125 \times 24 \times 365 \times 0.9 = 985,500$  Kgr/año.

PARTIDA No.	MATERIA PRIMA O REACTIVO N O M B R E	CANTIDAD Kg/ANO	COSTO UNITARIO S/Kg.	COSTO TOTAL S / PARTIDA AÑO
1	1,3 Butadieno	444,090	0.40	177,636.00
2	Dióxido de Azufre	525,051	0.23	120,761.73
3	Hidrógeno	16,367	0.80	13,093.60
4	Hidróxido de Sodio	150	0.22	33.00
5	Hidróxido de Potasio	25	0.40	10.00
6	Acido Acético	130	0.60	78.00
7	Hidroquinona	500	5.60	28.00
8	Desecante	750	1.65	1,237.50
9	Catalizador	220	23.33	5,132.60
<b>COSTOS DE MP y R TOTAL</b>				<b>318,010.43 S/ANO</b>



## COSTOS DE MANO DE OBRA Y SUPERVISION

PARTIDA No.	CONCEPTO	CANTIDAD No	SUELDO ANUAL UNITARIO S / PERSONA	SUELDO ANUAL TOTAL S/PARTIDA
1	Operadores	6	4,000	23,700
2	Supervisores	3	5,160	15,480
3	Analistas	3	4,000	23,700
4	Directos de Proyecto	1	11,400	11,400
<b>COSTOS DE H O y S</b>				<b>74,280 S/AÑO</b>

El costo del producto antes de venta es la suma de estos conceptos más un porcentaje de sobre costo para prestaciones y personal administrativo, el cual, en nuestro país alcanza alrededor del 180 %, en este porcentaje. También se incluyen los beneficios de la empresa.

Costo del producto	=	412,661.43	S/año	
Sobre costo	=	742,790.57	S/año	
<b>COSTO TOTAL</b>		<b>1'155,452.00</b>	<b>S/año</b>	

A partir de este costo y la producción anual se obtiene el costo unitario.

$$(\text{Costo/Kg}) = \frac{1'155,452.00}{985,500} = 1.172 \text{ S/kg.}$$

VIII. ASPECTOS DE CONTROL.

## ASPECTOS DE CONTROL

### PROCEDIMIENTOS PARA APROBACION DISEÑO Y OPERACION

El diseño, construcción y operación de plantas piloto a fin de que estas resulten funcionales y seguras, requiere de procedimientos formalizados que conduzcan a resultados satisfactorios.

Los procedimientos formalizados son necesarios, ya que las plantas piloto deberán cumplir con requisitos de seguridad en todos los aspectos; así como protección de sanidad y ambiental, las que deben ser debidamente especificadas y sometidas a aprobación antes del diseño detallado y antes del inicio de operación.

En el desarrollo de un proyecto piloto se requiere de información y documentación confiables en la que se dé la debida atención a todos los conceptos involucrados, evitando así, discrepancias por documentación deficiente, cambios en personal durante el curso del proyecto o porque grupos aislados dan sus propios diseños y aún la construcción de sus propias plantas, por otro lado, estos procedimientos facilitan la comunicación entre grupos involucrados en diseño, construcción y operación de plantas piloto.

La razón de este tipo de procedimientos es la seguridad de que el resultado sea una planta operable y segura y no una trampa mortal por que se probarán nuevas tecnologías con química novedosa y en áreas nuevas, es decir, se trabajará con algo desconocido.

Los procedimientos se constituyen por cuestionarios que abarcan puntos a cumplir y van desde procedimientos de aprobación, de transferencia de fondos, estandares de diseño, permisos de construcción, permisos de operación, estandares de diseño, y estudios de química de los procesos propuestos.

APROBACION PARA TRABAJO DE DISERO

AUTORIZACION DE PLANTA PILOTO

VP/Director \_\_\_\_\_

Cerente \_\_\_\_\_

Investigación Representativa \_\_\_\_\_

Ingeniero de Proyecto \_\_\_\_\_

APP No. \_\_\_\_\_

Cuenta No. \_\_\_\_\_

No. de Proyecto \_\_\_\_\_

Nombre del Proyecto: \_\_\_\_\_

Alcance del Proyecto \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Adjuntar díagramas de flujo y condiciones de operación de los equipos, si es tan disponibles.

Aprobación por necesidad y/o modificación de esta unidad piloto

\_\_\_\_\_ si es nueva \_\_\_\_\_

VP / DIRECTOR

PRESIDENTE o VP

APROBACION DE COSTOS Y PROGRAMACION

AUTORIZACION DE PLANTA PILOTO

VP/Director \_\_\_\_\_  
 Gerente \_\_\_\_\_  
 Investigacion Representativa \_\_\_\_\_  
 Ingenieria de Proyecto \_\_\_\_\_

APP No. \_\_\_\_\_  
 CUENTA No. \_\_\_\_\_  
 No. DE PROYECTO \_\_\_\_\_

Nombre del Proyecto \_\_\_\_\_  
 Alcance del Proyecto \_\_\_\_\_

Adjuntar diagramas de flujo y condiciones de operacion de los equipos, si eston disponibles.

Aprobacion por necesidad y/o modificacion \_\_\_\_\_ si es nueva \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ de esta unidad piloto VP/Director Presi -  
 dente o VP

Costo para estimacion preliminar \$ \_\_\_\_\_  
 Gerente Fecha

Costo estimado de Ingenieria de Diseo \$ \_\_\_\_\_ Fecha de Ter  
 minacion. \_\_\_\_\_

Costos para compras con tiempo de Entrega Cargos \$ \_\_\_\_\_

Costo estimado preliminar y total \$ \_\_\_\_\_  
 del Proyecto. Cte. Estimaciones Fecha

Autorizacion para realizar la ingenieria de diseo y ordenar las partidas con tiempos de entrega largo .

\_\_\_\_\_ si es nueva \_\_\_\_\_  
 VP / Director Presidente o VP

**TRANSFERENCIA DE FONDOS**

**AUTORIZACION DE PLANTA PILOTO**

VP/Director \_\_\_\_\_

Gerente \_\_\_\_\_

Investigación Representativa \_\_\_\_\_

Ingeniero de Proyecto \_\_\_\_\_

APP No. \_\_\_\_\_

CUENTA No. \_\_\_\_\_

PROYECTO No. \_\_\_\_\_

Nombre del Proyecto \_\_\_\_\_

Localización de Fondos.

Fuente de Financiamiento \_\_\_\_\_ Presupuesto \$ \_\_\_\_\_

Aprobación para Elaboración.

DFP, DT & I y especificaciones de equipos de proceso principales son revisados para aprobación, junto con un estimado de costos presupuestado, junto con un programa antes del diseño detallado.

Estimado de costos presupuestado \$ \_\_\_\_\_

Fecha de Terminación del Estimado \_\_\_\_\_

Gerente \_\_\_\_\_

Proceder con diseño detallado y procuración con reportes de avance mensual.

VP / Director \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Localización de Fondos Adicionales.

Fuente de Financiamiento \_\_\_\_\_ Presupuesto \$ \_\_\_\_\_

Permiso de Construcción obtenido \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Investigación Representativa  
Ingeniería de Proyecto

Permiso de Operación Obtenido \_\_\_\_\_

Fecha \_\_\_\_\_

Investigación Representativa  
Ingeniería de Proyecto

Se autoriza la realización del proyecto.

\_\_\_\_\_  
VP / Director

\_\_\_\_\_  
Presidente B V P

**PERMISO PARA CONSTRUCCION DE PLANTA PILOTO**

**SECCION A**

Proyecto No. \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_ Presentado por \_\_\_\_\_

Permiso de Construcción No. \_\_\_\_\_ Departamento \_\_\_\_\_

Nombre del Proyecto \_\_\_\_\_

Localización del Equipo \_\_\_\_\_

( Indicar el área )

Equipo a instalarse o modificarse \_\_\_\_\_

Se afectan servicios auxiliares Si \_\_\_\_\_ No \_\_\_\_\_ cuales \_\_\_\_\_

Justificación del equipo:

**NOTA:**

Para la justificación de escala mayor que escala banco se deben indicar los datos siguientes:

Tamaño de muestra de material \_\_\_\_\_

Disponibilidad de alimentación \_\_\_\_\_

Capital y costos de operación \_\_\_\_\_

Fiabilidad de los datos de escalación \_\_\_\_\_

Tamaño de desechos a eliminar \_\_\_\_\_

Tiempo y experiencia en escala pequeña \_\_\_\_\_

TIEMPO ESTIMADO DE PROGRAMA	CONSTRUCCION	CAPACITACION DE OPERADORES	PRUEBAS DE EQUIPOS	OPERACION	REMOCCION DE EQUIPO
INICIO					
TERMINACION					

La remoción de equipo después de concluir con la etapa de planta piloto se indicará en una Lista de Equipo.

Valor estimado de proyecto ( incluir mano de obra y materiales ) \_\_\_\_\_





ESTANDARES DE DISEÑO PARA PLANTA PILOTO		Hoja 1 de 2
Presión _____ ( Kg/Cm <sup>2</sup> abs ) Min. _____	Clasificación Eléctrica _____	
Temperatura _____ °C Min _____ °C Max	Ventilación _____ Cambios/Hora _____	
MATERIALES DE CONSTRUCCION		INSTRUMENTACION
Recipientes Columnas e Internos Tuberias Bombas Válvulas	Intercambiadores de Color Empaques Empaques de Bombas y Válvulas Fluidos de sello Lubrificantes	Local / Remota Neumática / Electrónica Indicación / Registro Alarmas / Interlocks Falla - Segura / Potencia de Emergencia Sistema Redundantes
RIESCOS POTENCIALES CONSIDERADO EN DISEÑO		
	SEVERIDAD	COMENTARIOS
<b>Sustancias Riesgosas.</b>  Flammabilidad A la Salud Estabilidad Otros ( especificar )		
<b>Reacciones Peligrosas</b>  Exotérmica Auto Catalítica Iniciada Inhibida Periodo de Inducción Aumento de Volumen Otros ( Especificar )		
<b>Sistemas Riesgosos.</b>  Presión Alta/Baja Temperatura Alta/Baja Equipo en movimiento Equipo de Alta Velocidad Corrosión Falta Mecánica Otros ( especificar )		

FUNCIONAMIENTO DEFECTUOSO CONSIDERADO		LISTA DE CONFRONTACIONES	
POSIBILIDAD		ELIMINACION POR DISEÑO	
Variación de Temperatura Variación de Presión Variación de Alimentación de Reactantes Choque Mecánico Chispas Eléctricas Generación Estática Taponamiento Derrames Fuego Externo Contraflujo Contaminación Introducción de Aire Introducción de Agua Generación de Ruido Congelación Falla de Servicios Falla de Agitación Falla de Bombas Falla de Gas de Purga Falla de Instrumentos Inundación del Sistema Espumación Incrustación de Area			Discos de Ruptura Válvulas de Relevo Trampe de Retención Venteos Válvulas Check Guardas Apoyado Purgado Blanketing Escudado / Obstruido Aislamiento Limpieza de Puertas Cuenches Monitoreo Atmosférico Purificadores de Vapor Colectores de Polvo Muestreo Cargado de Piso Accesibilidad de Operación Accesibilidad de Mantenimiento Funcionamiento defectuoso de alarmas Arrestadores de Flama Mirillas Protección Contra Fuego

**PERMISO PARA OPERACION O MODIFICACION DE PLANTA PILOTO**

Hoja 1 de 2

Proyecto No. \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_ Presentada por \_\_\_\_\_  
 Permiso para Operación Piloto No. \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_  
 Permiso para Construcción Piloto No. \_\_\_\_\_ Departamento \_\_\_\_\_

**SECCION A**

Nombre del Proyecto \_\_\_\_\_  
 Naturaleza de Operación ( Inicial/modificación ) \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

LOCALIZACION DE EQUIPO	LABORATORIO	I P P	O P P	HPTF	OBSERVACIONES
TIEMPO ESTIMADO DE PROGRAMA	PRUEBAS	OPERACION	EQUIPO	REMOCION	
I N I C I O					
T E R M I N A C I O N					

Tipo de operacion ( continua, intermitente, periodos ) \_\_\_\_\_  
 Escala de operacion ( tamaño, rapidez ) \_\_\_\_\_  
 Factor de escalación basado sobre trabajo experimental \_\_\_\_\_  
 Experiencia a escala pequeña ( adjuntar reportes técnicos o diagramas de flujo ) \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Organización de Operación ( Nombres y Números telefónicos para casos de emergencia )  
 Jefe de Proyecto \_\_\_\_\_  
 Personal Técnico \_\_\_\_\_  
 Técnicos \_\_\_\_\_

Adjuntar diagramas de flujo, diagramas de tuberías e instrumentos, balances de materia y energía, especificaciones de equipo e instrumentos, Filosofías de Operación y el manual de operación.

PERMISO PARA OPERACION O MODIFICACION DE PLANTA PILOTO

HOJA 2 DE 2

SECCION B

CONDICION	OPERACION	DISEÑO	PREPARADO	(NOTA)	CHECADO POR	FECHA
Limitación de Prestión Limitación de Temperatura Hojas de Datos de Seguridad y riesgos Instrucciones de Antecedentes y Primeros Auxilios Métodos Contra Incendio Evaluación de Riesgos Cálculos de Temperaturas Adiabáticas y Elevación de Prestión Descripción de Proceso Procedimiento de Arranque Procedimiento de Paro Procedimiento de Paro de Emergencia Procedimiento de Interrupción de Servicios Dibujos de Equipo Inspección de Equipos en campo Equipo, Tuberia, Eléctrico Instrumentos, otros Lista de Chequeo de Pre-arranque Adiestramiento de Personal Técnico Adiestramiento de Operadores Hojas de Datos Protección de Personal Procedimiento de Mantenimiento Preventivo Eliminación de Deshechos.						
REVISADO POR Director de Seguridad _____ Gerente de Depto. Patrocinador _____ Supervisor de Servicios _____ Supervisor de Seguridad _____ Coordinador de Planta Piloto _____	FECHA _____ _____ _____ _____	APROBADO POR Director/VP Depto. Patrocinador _____ VP / Ingeniería _____ Director de Servicios de Proyecto _____	FECHA _____ _____ _____			

**DATOS QUÍMICOS DE PLANTA PILOTO**

HOJA 1 DE 2

Etapa No. \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ etapa.

Nombre Químico \_\_\_\_\_

Referencia No. \_\_\_\_\_

Procedimiento: Hoja de uso separado y describe.

- |                       |                                    |   |
|-----------------------|------------------------------------|---|
| a) Materias Primas    | g) Tiempo de Reacción              | n) Precipitación                            |
| b) Pesos de Carga     | h) Solventes y Alternativas        | c) Cambio en viscosidad                     |
| c) Orden de Adición   | i) Subproductos, pesos, comp. etc. | p) Límite de Separación                     |
| d) Rapidez de Adición | j) Evolución de gas-toxicidad      | q) Cambio de Calor                          |
| e) Temperaturas       | k) Exotermicidad                   | r) Riesgo Potencial                         |
| f) Presiones          | l) Espumación                      | s) Estabilidad                              |
|                       | m) Análisis durante Reacción       | t) Dificultad de aislamiento de intermedios |

Propiedades Físicas y Analíticas.

Forme \_\_\_\_\_ Sp. Gr. \_\_\_\_\_ °C  
 Color \_\_\_\_\_ S. P. \_\_\_\_\_ mm Hg  
 H.P. °C \_\_\_\_\_ Viscosidad \_\_\_\_\_ °C  
 Soluble en \_\_\_\_\_

**MÉTODOS ANALÍTICOS**

IR     CC     LC     NMR     Método Húmedo     Otros \_\_\_\_\_

Suministrar condiciones de análisis instrumental, así como un cromatograma o espectro muestra para comparación.

Describir cualquier otro procedimiento analítico en forma completa o suministrar el número del procedimiento analítico.

**RIESGOS, TOXICIDAD Y MANEJO ESPECIAL**

Junto a cada condición enlistada anotar cualquier corriente de material o intermedio que pueda exhibir aquella condición particular similarmente en la parte inferior, colocar una marca junto a las condiciones enlistadas que servirá como un aviso de alerta.

DATOS QUIMICOS DE PLANTA PILOTO

HOJA 2 DE 2

Corriente de Materiales e Intermedios.

CONDICION	CORRIENTE DE MATERIALES, ETC.	CONDICION	CORRIENTES DE MATERIALES, ETC.
Lagrimal		Releva Vapores	
Venoso		Hidrosópico	
Irritante al Tacto		Descompone	
Irritante inhalante		Sensible a luz	
Flamable		Polidimeriza	
Explosivo		Otros ( describir )	
Pirofórico			

Reacción Química.

Condición	SI	NO	Condición	SI	NO
Exotérmica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Releva Vapores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Espuma	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Reacción Violenta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tiende a solidificarse	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Forma productos tóxicos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
			Otros ( Especificar )		

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## FORMATOS VARIOS

Como complemento a los procedimientos para aprobación, diseño y operación de plantas piloto se adjuntan los formatos para la elaboración de : Diagramas de flujo, diagramas de tuberías e instrumentos, balances de materia y energía; así como formatos para recopilación de datos operativos, análisis de carga y producto y evaluación de actividad catalítica.

Los formatos pueden aplicarse a todo tipo de plantas piloto y aún plantas industriales y a todo tipo de equipo que requiera evaluación a nivel piloto.

FORMATO PARA ELABORACION DE DIAGRAMAS DE FLUJO Y DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTOS

447

										NOMBRE DEL PROYECTO			
										NOMBRE DEL CLIENTE			
										FECHA			
										LUGAR			
										AUTOR			
										REVISOR			
										APROBADO			
										Escala			
										Hoja			
										Total			





DATOS OPERATIVOS											
ESTADO FISICO											
EQUIPO _____			No. REPORTE _____								
LHSV _____			CARCA _____		DOMO _____		No. PLANTA _____				
REL.MOL. _____			PRODUCTO _____		FONDO _____		TURNO _____				
CONDICIONES DE OPERACION											
		CARGA			PRODUCTOS						OBSERVACIONES
FECHA	HORA	T O C	P KG/CH <sup>2</sup>	FLUJO LT/ MIN	T O C	P KG/CH <sup>2</sup>	FLUJO LT/ MIN	T O C	P KG/CH <sup>2</sup>	FLUJO LT/ MIN	

**ANÁLISIS DE PRODUCTOS**

EQUIPO \_\_\_\_\_ ESTADO FÍSICO \_\_\_\_\_ No. REPORTE \_\_\_\_\_  
 LHSV \_\_\_\_\_ DOMO \_\_\_\_\_ No. PLANTA \_\_\_\_\_  
 REL. MOL. CARGA \_\_\_\_\_ FONDOS \_\_\_\_\_ TURNO \_\_\_\_\_

**TIPO DE ANÁLISIS**

FECHA/HORA												
COMPONENTE												
	mol	peso	mol	peso	mol	peso	mol	peso	mol	peso	mol	peso

EVALUACION DE ACTIVIDAD CATALITICA

REACTOR \_\_\_\_\_ ESTADO FISICO \_\_\_\_\_ No. REPORTE \_\_\_\_\_  
 LASV \_\_\_\_\_ CARCA \_\_\_\_\_ No. PLANTA \_\_\_\_\_  
 REL. MOL. \_\_\_\_\_ PRODUCTOS \_\_\_\_\_ TURNO \_\_\_\_\_

CONDICIONES DE OPERACION

REACTOR						PRODUCTOS		ACTIVIDAD CATALITICA			FECHA H O R A
P <sub>1</sub> KG/CM <sup>2</sup>	P <sub>2</sub> KG/CM <sup>2</sup>	T <sub>1</sub> °C	T <sub>2</sub> °C	T <sub>3</sub> °C	T <sub>4</sub> °C	FLUJO LT/MIN.	VOL. LIQ. LTS.	CONV. %	SELECT. %	REND. %	

IX.

CONTROL DE PROYECTO

## CONTROL DE PROYECTO

En base a estimaciones preliminares de tiempo y las actividades a realizar, así como la prioridad de estas, se presentan programas de barras, curva de avance y estimado de horas para la realización del presente trabajo.

### PROGRAMA DE BARRAS.

Este programa determina el periodo de tiempo que tomará realizar cada una de las actividades en base a su prioridad y estimado de tiempo requerido con sus correspondientes reprogramaciones.

### CURVA DE AVANCE.

La curva de avance marca el avance alcanzado con el periodo de tiempo determinado, así como las modificaciones de avance por reprogramación y la curva de avance real.

### ESTIMADO DE HORAS.

La base del programa de barras y curva de avance es el estimado de horas requerido para la elaboración de cada actividad, junto con el estimado se presenta al tiempo real invertido en la realización del proyecto.

PROGRAMA DE BARRAS

HOJA 1 DE 3

552

MESES	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ACTIVIDAD									
Investigación Bibliográfica.	----								
Índice.	----								
Resumen.	----	----							
Introducción.	----	----							
CAPITULO I.	-----	-----							
Generalidades.	-----	-----							
Etapas de un Programa de Investigación.	-----	-----							
Investigación Necesaria Antes de Comercialización.	-----	-----							
Importancia de una Planta Piloto.	-----	-----							
Necesidad de una Planta Piloto.	-----	-----							
CAPITULO II.	-----	-----	-----						
Plantas Piloto y Microplantas.	-----	-----	-----						
Tipos de Plantas Piloto.	-----	-----	-----						
Clasificación de Plantas Piloto.	-----	-----	-----						
Concepto de Modularidad.	-----	-----	-----						
Planta Piloto de Múltiples Propósitos.	-----	-----	-----						
Capacidad de Plantas Piloto.	-----	-----	-----						
CAPITULO III.	-----	-----	-----	-----					
Escalación.	-----	-----	-----	-----					
Métodos de Escalación.	-----	-----	-----	-----					
Principio de Similitud.	-----	-----	-----	-----					
Análisis Dimensional.	-----	-----	-----	-----					
Ecuaciones Diferenciales.	-----	-----	-----	-----					
El Régimen.	-----	-----	-----	-----					
Criterios de Similitud y Ecuaciones de Escalación.	-----	-----	-----	-----					
Extrapolación.	-----	-----	-----	-----					
Efectos de Límite.	-----	-----	-----	-----					
Teoría de Modelos.	-----	-----	-----	-----					





PROGRAMA DE BARRAS

HOJA 3 DE 3

357

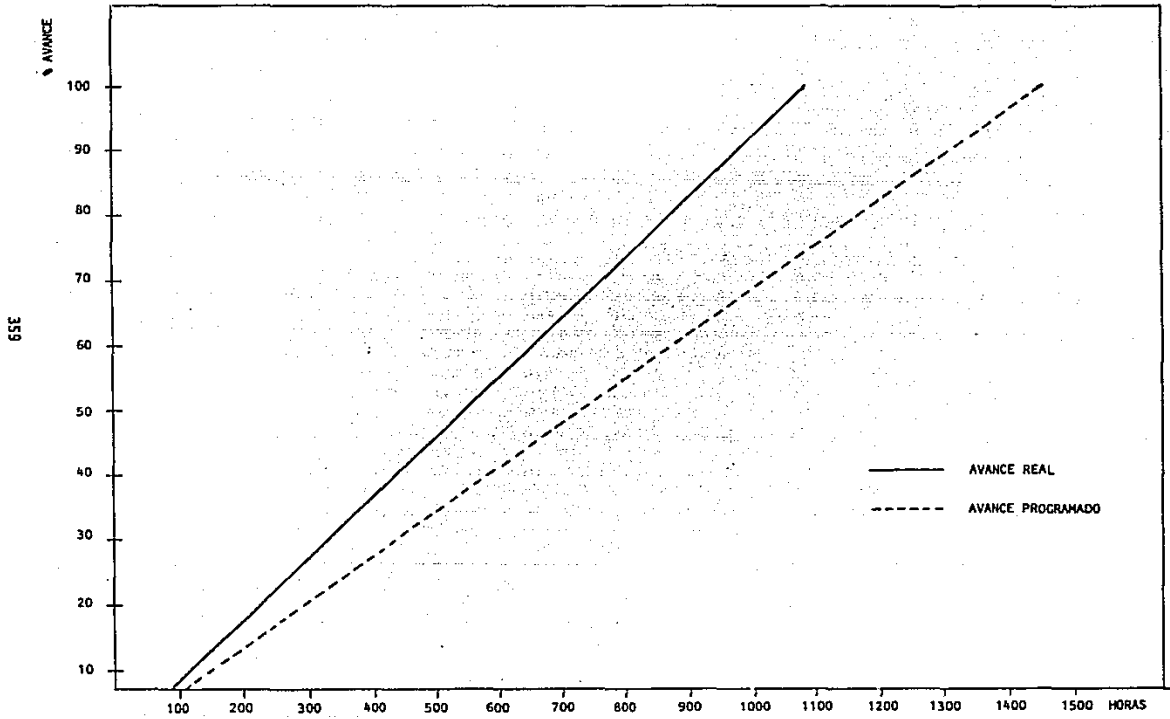
MESES	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ACTIVIDAD									
Estimación de Costos. * Costo del Producto.				-----	-----				
CAPITULO VIII. Aspectos de Control Procedimientos para Aprobación Diseño. Construcción y Operación. Formatos Varios.				-----	-----				
CAPITULO IX. Control de Proyecto. Programa de Barras. Curvas de Avance. Estimado de Horas.				-----	-----	-----			
CAPITULO X. Conclusiones y Recomendaciones. Bibliografía. Apéndice.  Otras Actividades.						-----			
Mecanografía y Revisión Revisión Ascensor. Correcciones Ascensor. Revisión Jurado. Correcciones Jurado. Impresión.							-----	-----	-----
NOTAS	<p>● Para el caso ejemplo ( Producción de Sulfolano ).</p> <p>----- Periodos Programados.</p> <p>----- Periodos Reales.</p> <p>No se incluyen tiempos muertos por diferentes causas. Únicamente el tiempo efectivo.</p>								

PROGRAMA DE AVANCE

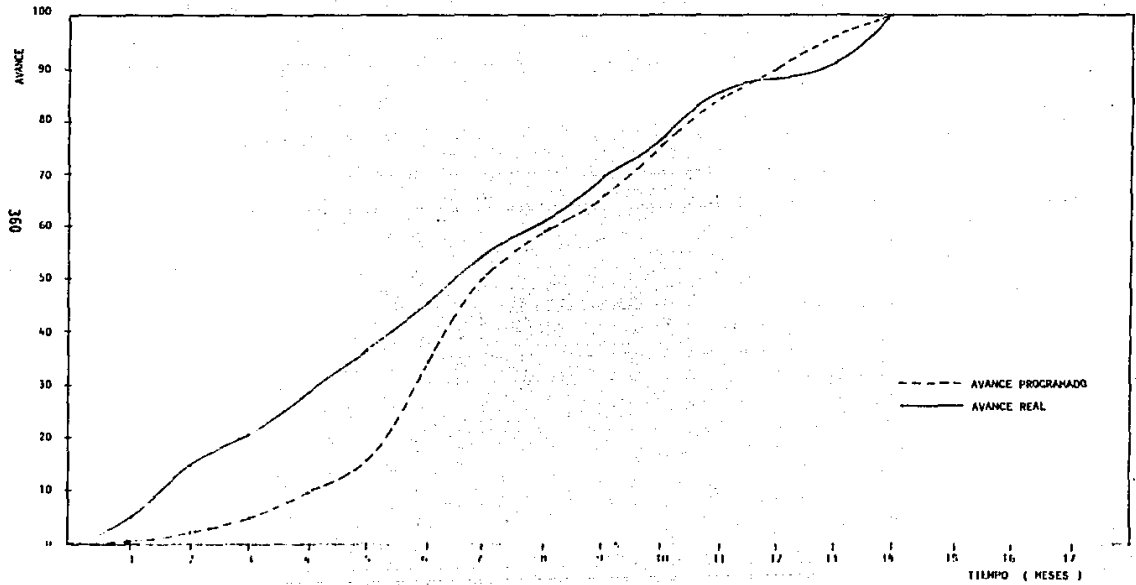
TIEMPO MESES	HORAS CONSUMIDAS		HORAS ACUMULADAS		HORAS POR EJERCER		% DE AVANCE		OBSERVACIONES
	PROGRAMADAS	REALES	PROGRAMADAS	REALES	PROGRAMADAS	REALES	PROGRAMADO	REAL	
1	10.00	50.00	10.00	50.00	1,438.00	1,398.00	0.69	4.62	
2	27.50	93.00	37.50	143.00	1,410.50	1,305.00	2.59	13.23	
3	38.00	83.00	75.50	226.00	1,372.50	1,272.00	5.21	20.90	
4	75.00	85.00	150.00	311.00	1,297.50	1,137.00	10.39	28.76	
5	87.00	90.00	237.50	401.00	1,210.50	1,047.00	16.40	37.09	
6	252.54	90.00	490.04	491.00	957.96	957.00	33.84	45.42	
7	227.73	90.00	717.77	581.00	730.23	867.00	49.57	53.74	
8	127.73	85.00	845.50	666.00	602.50	782.00	58.39	61.61	
9	96.50	81.00	942.00	747.00	506.00	701.00	65.05	69.10	
10	148.00	92.50	1,090.00	839.50	358.00	608.50	75.27	77.61	
11	130.00	83.50	1,220.00	923.00	228.00	525.00	84.25	85.38	
12	95.00	23.00	1,315.00	946.00	133.00	502.00	90.81	87.51	
13	83.00	42.50	1,398.00	988.50	50.00	459.50	96.55	91.44	
14	50.00	92.50	1,448.00	1,081.00	0.00	367.00	100.00	100.00	

El trabajo se realizó en menos horas de las estimadas.  
 Las horas que no se ejercieron fueron 367,00

# CURVA DE AVANCE DE PROYECTO



### CURVA DE AVANCE DE PROYECTO



## ESTIMADO DE HORAS

HOJA 1 DE 3

A C T I V I D A D E S	HORAS ESTIMADAS	HORAS REALES	% DE MAS	% DE MENOS
Investigación Bibliográfica	50.0	100.0	50.00	
Índice	5.0	5.0	66.66	
Resumen	5.0	2.0	33.33	
Introducción	1.0	1.5	50.00	
CAPITULO I				
Generalidades	3.0	3.0	33.33	
Etapas de un Programa de Investigación	2.0	2.0	0.00	0.00
Investigación Necesaria Antes de Comercialización	5.0	5.0	66.66	
Importancia de una Planta Piloto	3.0	3.0	0.00	0.00
Necesidad de una Planta Piloto	3.0	3.0	0.00	0.00
CAPITULO II				
Plantas Piloto y Microplantas	3.0	3.0	50.00	
Clasificación de Plantas Piloto	1.0	1.5		50.00
Concepto de Modularidad	2.0	2.0	0.00	0.00
Planta Piloto de Múltiples Propósitos	3.0	3.0	50.00	
Capacidad de Plantas Piloto	3.0	3.0		50.00
CAPITULO III				
Escalación	1.0	1.0	0.00	0.00
Métodos de Escalación	1.0	1.5		50.00
Principio de Similitud	3.0	3.0		40.00
Análisis Dimensional	5.0	4.0		20.00
Ecuaciones Diferenciales	5.0	6.0	40.00	
El Régimen	4.0	6.0	50.00	
Criterios de Similitud y Ecuaciones de Escalación	9.0	8.0		20.00
Extrapolación	5.0	4.0		20.00
Efectos de Límite	4.0	4.0	0.00	0.00
Teoría de Modelos	5.0	5.0	16.66	

# ESTIMADO DE HORAS

HOJA 2 DE 3

A C T I V I D A D E S	HORAS ESTIMADAS	HORAS REALES	% DE MAS	% DE MENOS
<b>CAPITULO IV</b>				
Diseño de Experimentos	2.0	4.0	100.00	
Variables	2.0	1.0	50.00	
Ambiente Experimental y sus Limitaciones	3.0	1.5	50.00	
Experimentación en Etapas	2.0	3.0	50.00	
Consideraciones Varias	2.0	1.0		50.00
Experimentación Formal	4.0	5.0	25.00	
Experimentación al Azar	4.0	5.0	25.00	
Diseños de Calsificación NGItip	6.0	10.0	66.66	
<b>CAPITULO V</b>				
Sistemas de Adquisición de Datos y Control de Plantas Piloto	40.0	25.0		37.50
<b>CAPITULO VI</b>				
Diseño Básico de Plantas Piloto de Múltiples Propósitos	3.0	1.0		66.66
Propósitos	3.0	1.0		66.66
Objetivo	1.0	1.0	0.00	0.00
Bases de Diseño	40.0	30.0		25.00
Sistemas Considerados	15.0	10.0		33.33
Descripción de Proceso	3.0	10.0	233.33	
Balace de Materia y Energía	40.0	15.0		62.50
Dimensionamiento de Equipo	100.0	180.0		40.00
Diagramas de Flujo	200.0	160.0		20.00
Diagramas de Tuberias e Instrumentos				
Filosooffas de Operación	10.0	10.0	0.00	0.00
Servicios Auxiliares	10.0	1.0		10.00
Clasificación de Areas	30.0	10.0		66.66
Materiales de Construcción	20.0	5.0		75.00
Medidas de Seguridad	10.0	10.0	0.00	0.00
<b>CAPITULO VII</b>				
Aspectos Económicos	10.0	5.0		50.00

# ESTIMADO DE HORAS

HOJA 3 DE 3

A C T I V I D A D E S	HORAS ESTIMADAS	HORAS REALES	% DE MAS	% DE MENOS
Piñantas Piloto y Microplantas	10.0	5.0		50.00
Estimación de Costos	100.0	40.0		60.00
Costo del Producto	51.0	10.0		82.00
<b>CAPITULO VIII</b>				
Aspectos de Control	5.0	5.0		0.00
Procedimientos para Aprobación, Diseño, Construcción y Operación.	30.0	20.0		33.33
Formatos Varios	20.0	20.0	0.00	
<b>CAPITULO IX</b>				
Control de Proyecto	1.0	1.0	0.00	0.00
Programa de Barras	10.0	25.0	150.00	
Estimado de horas	3.0	10.0	233.33	
<b>CAPITULO X</b>				
Conclusiones y Recomendaciones	5.0	5.0	0.00	0.00
Bibliografía	5.0	3.0		40.00
Apendice	20.0	10.0		50.00
Mecanografía	60.0	50.0	16.66	
Revisión Asesor	20.0	20.0	0.00	0.00
Correcciones Asesor	20.0	20.0	0.00	0.00
Revisión Jurado	20.0	20.0	0.00	0.00
Correcciones Jurado	20.0	20.0	0.00	0.00
Impresión	50.0	50.0	0.00	0.00
<b>T O T A L    T I E N P O</b>	<b>1,448.0</b>	<b>1,081.0</b>		<b>25.34</b>

X.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo tecnológico requiere de una planeación adecuada de las actividades y etapas necesarias con el fin de llegar a los resultados adecuados que se buscan en el proceso de investigación y desarrollo de procesos industriales.

Los programas de investigación y desarrollo requieren de un conocimiento adecuado del por qué del camino a seguir, así como de la intensidad, lugar y necesidad de cada una de las etapas que conforman dichos programas.

Las plantas piloto forman parte de estos programas y tienen por objeto proporcionar la información necesaria que difícilmente puede obtenerse por otro camino, estas plantas pueden tener diferentes conformaciones, tamaños y objetivos, dependiendo del tipo de información que se busca, y abarca desde estudio, modificación y desarrollo de proceso; así como la obtención de datos adecuados y confiables para llevar a cabo el escalamiento hasta nivel industrial.

La escalación de planta piloto a planta industrial requiere de técnicas adecuadas a fin de obtener resultados correctos y van desde los principios de similitud en sus varias facetas, hasta teorías de modelos, así como técnicas matemáticas que permiten un tratamiento adecuado de los resultados y una escalación confiable.

Los resultados piloto se obtienen al operar las plantas piloto en base a programas experimentales diseñados en forma adecuada minimizando la cantidad de experimentación pero no la calidad de la información obtenida.

Con el fin de evitar errores de tipo humano o de paralaje, bastante frecuentes a nivel experimental ( laboratorio y planta piloto ) es conveniente que estas plantas experimentales se les adecuen e instruyan con sistemas de control, sistemas de análisis en línea, así como los sistemas de recopilación de datos, a fin de aumentar su confiabilidad y funcionamiento, además de hacerlas más seguras.

En todo proyecto se lleva una secuencia de actividades básicas y se abarcan desde los objetivos que se persiguen hasta aspectos de control y aprobaciones necesarias para el caso, en el desarrollo tecnológico se hace énfasis en cuestiones de seguridad y protección ambiental, - debido al riesgo potencial existente en estas actividades.

Las plantas piloto de propósitos múltiples se deberán integrar por módulos independientes, pero también deberán tener la capacidad y flexibilidad necesarias para poder integrarse con otros módulos a fin de poder operar como una unidad de proceso.

Llevar una secuencia adecuada en el proceso de desarrollo tecnológico es netamente necesario, ya que de esta forma se llega a resultados adecuados y confiables que al final permitan obtener unidades funcionales en las que se reflejen la adecuada realización de la investigación y desarrollo.

## BIBLIOGRAFIA

## BIBLIOGRAFIA

### a) LIBROS.

- |      |   |                                    |  |
|------|---|------------------------------------|--|
| 1.-  | Liquid - Liquid Equilibria                      | J.P. Novak                         | USA Elsevier, 1987                       |
| 2.-  | Distillation                                    | Van Winkle                         | USA Mc Graw - Hill, 1967                 |
| 3.-  | Scaleup of Chemical Processes                   | Atilio Bisio & Robert L. Kobel     | USA John Wiley, 1985.                    |
| 4.-  | Separation of Particles Vol. I y Vol.II         | Akira O. Gawa                      | USA, CRC PRESS, 1984                     |
| 5.-  | Corrosion handbook                              | Uhlig                              | USA, John Wiley                          |
| 6.-  | Carbon Adsorption Handbook                      | Paul K. Chermisinoff               | USA, Ann - Arbor Science, 1980.          |
| 7.-  | The Design & Analysis of Industrial Experiments | Owen L. Davies                     | London Imperial Chemica, 1967            |
| 8.-  | Cost Estimating For Engineering & Management    | Ostnald                            | USA, Prentice - Hall, 1974               |
| 9.-  | Chemical Engineers Handbook                     | Robert H. Perry & Cecil H. Chilton | USA, Mac Graw - Hill, 1973               |
| 10.- | Centrifugal Pumps & Blowers                     | Austin H. Church                   | USA, Robert E. Krieger Publishing, 1972. |
| 11.- | Process Flow Sheeting                           | Westerberg A.W.H.                  | USA, Cambridge University Press, 1979.   |
| 12.- | Handbook of Separation Technique                | Schweitzer                         | USA, Mac Graw Hill, 1979.                |
| 13.- | Heat Exchanger Design                           | Fraes And Ozisk                    | USA, John Willen, 1965.                  |
| 14.- | Manual For Process Engineers Calculations       | Clarke & Davidson                  | USA, Mac Graw - Hill, 1975.              |
| 15.- | Toxic Cases, First, Aid in Medical Treatment    | Matheson Gas Products              | USA, Matheson Gas Products, 1983         |
| 16.- | Guide To Safe Handling                          | Matheson Gas Products              | USA, Matheson Gas Products, 1983.        |
| 17.- | Chemical Process Development Part 1 & 2         | Jordan                             | USA, John Willen, 1979.                  |
| 18.- | Introduction to Safety Engineering              | Gloss Wardle                       | USA, John Wiley, 1984                    |
| 19.- | Distillation Engineering                        | Billyety Reinhard                  | USA, Chemical Publishing, Co. 1979.      |
| 20.- | Catalysis of Organic Reaction                   | Moser                              | USA, Marcel Dekker, 1981.                |

- |      |   |  |   |
|------|---|--|---|
| 21.- | Cost Control Handbook, Second Edition                                 | R.M.S. Wilson                          | London, Cower Press Limited, 1983.        |
| 22.- | Dimensional Analysis And Dynamical Similarity For Hydraulic Engineers | I. Blench                              | USA, National Technical Information 1969  |
| 23.- | Plant Design And Economics For Chemical Engineers, Third Edition      | Max. S. Peter & Klaus D. D. Timmerhaus | USA, Mc Graw - Hill, 1981.                |
| 24.- | Dimensional Analysis And The Concept of Natural Units In Engineering  | J.H. Gowain D. Sc.                     | ISA, National Technical Information 1972. |
| 25.- | Dimensional Analysis And Theory of Models                             | Henry L. Langhear                      | USA, John Wiley, 1967.                    |
| 26.- | Design of Fixed Bed Catalytic Reactors                                | R. Richardson, Raymond Charles         | USA, University Microfilms, 1963.         |
| 27.- | Design And Analysis of Experiments, Second Edition                    | Montgomery, Douglas                    | USA, John Wiley, 1976.                    |
| 28.- | The Design & Analysis of Scientific Experiments                       | Deng, K.C.                             | Addison Werley Publishing Co., 1967.      |
| 29.- | Chemical Process Economics  | Happel                                 | USA, Marcel Dekker, 1975                  |

## BIBLIOGRAFIA

### b) REVISTAS.

#### b.1).- Chemical Engineering.

- |      |  |   |                        |
|------|--|---|------------------------|
| 1.-  | The Pilot Plant  | Kack G. Lowenstein                                | Diciembre 9/23 - 1985. |
| 2.-  | Process Equipment  | R.S. Hall, J. Matley &<br>Kenneth J. Kee Houghton | Abril 5, 1982          |
| 3.-  | Isotlmeral Temperatures for<br>Reversible Reactions        | Charles D. Jounies And<br>Frank R. Groves Jr.     | febrero 9, 1970        |
| 4.-  | Improving Pilot - Plant Reactors<br>For Organic Synthesis. | J. Derland Johnston                               | Diciembre 2, 1968.     |
| 5.-  | Process Evaluation in Computer-Run<br>Microplant           | C.W. Dowling & F.R. Russel                        | Octubre 30, 1961.      |
| 6.-  | Automated Your Pilot Plants                                | Leslie C. Hardison & Robert<br>A. Lengemann       | Junio 22, 1964.        |
| 7.-  | Miniplant Design & Use                                     | B.F. Cinadr., J.K. Curley &<br>A.T. Schooley      | Enero 25, 1971.        |
| 8.-  | The design of Interlocks and<br>Alarms                     | Donald Kohen                                      | Febrero 20, 1984.      |
| 9.-  | When is the Pilot Plant Necessary?                         | Rafhael Katzen                                    | Marzo 25, 1968.        |
| 10.- | How to Estimate the Cost of Pilot-<br>Plant Equipment      | J.W. Drew & F. Ginder                             | Febrero 9, 1970        |
| 11.- | Modularized Plants.  |   |                        |
|      | Onshore Modular Construction                               | Roy Whittaker                                     | Mayo 28, 1984.         |
|      | Modular Design & Construction                              | M.A. Tan R.P. Kumar & G.<br>Kullanoft             | Mayo 28, 1984.         |

b.2) American Institute of Chemical Engineers.

- |     |  |                                      |                                    |
|-----|--|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1.- | Seventy - Sixth National Meeting.                                |                                      |                                    |
|     | Flow Sheet For The Chemist Preferred Process - Control Practices | Richard W. Prugh<br>Richard W. Prugh | Marzo 11, 1974.<br>Marzo 11, 1974. |
| 2.- | 71st Annual Meeting  |                                      |                                    |
|     | The Strategy of Miniplant Design and Operation                   | Lanny A. Rubbins                     | Noviembre 12 - 16, 1978.           |
| 3.- | Sixty - Third Annual Meeting                                     |                                      |                                    |
|     | How Much Experimentation Before Commercialization                | A.L. Conn                            | Noviembre 29, Diciembre 3, 1970    |
| 4.- | 71st Annual Meeting  |                                      |                                    |
|     | A New Purpose For Pilot Plant                                    | J.H. Berty                           | Noviembre 12 - 16, 1978.           |
| 5.- | Seventy - Sixth National Meeting                                 |                                      |                                    |
|     | Dedicated Computer for Pilot Plant Analyzers.                    | J.E. Osborne                         | Marzo 10 - 13, 1974.               |
| 6.- | Seventy - Sixth National Meeting                                 |                                      |                                    |
|     | Computer Generated Real - Time Pilot Plant Material Balances     | D.J. Mc Cracken                      | Marzo 10 - 13, 1974.               |

b.3).- Industrial & Engineering Chemistry.

- |     |   |                                 |                                  |
|-----|---|---------------------------------|----------------------------------|
| 1.- | Planning Experiments to Increase Research Efficiency        | W.G. Hunter, & M.E. Hoff        | Vol 59, No. 3, March, 1967.      |
| 2.- | Evaluation of Laboratory Distillation Apparatus             | Frank C. Collins & Vernon Lantz | Vol. 18, No. 11, November, 1946. |
| 3.- | Basic Factors in Piloto Plant Work                          | A.L. Conn                       | Vol. 45, No. 8, August, 1953.    |
| 4.- | Perforated Plate Columns for Analytical Batch Distillations | C.F. Older Shaw                 | Vol. 13, No. 4, April 15, 1946.  |



## b.4) Chemical Engineering Progress.

1.-	How Much Experimentation Before Commercialization	A. L. Conn	Vol. 67, No. 6, Junio, 1971.
2.-	The Effects And Benefits of Pilot Plant Automation	C.D. Ackerman, G.P. Huling & R. J. Metzger	Vol. 67, No. 6, Abril, 1971.
3.-	Engineering Control in Pilot Plants	C. H. Powell And	Vol. 67, No. 6, Abril, 1971.
4.-	Disposal of Low - Level Radioactive Wastes from Pilot Plants.	M. W. Hoback, J. O. Davis,	Vol. 67, No. 6, Abril, 1971.
5.-	Pilot Plants for Medium - Sized Companies	G. I. Constan	Febrero, 1984.
6.-	The Miniplant Concept	L. A. Robbins	Septiembre, 1979.
7.-	The Changing Role of the Pilot Plant,	J. M. Berty	Septiembre, 1979.
8.-	A Pilot Plant Safety Program	J.C. Lowenstein	Septiembre, 1979.
9.-	Distillation Columns with Vapor Recompression	R. Danziger	Septiembre, 1979.
10.-	Standardizer pilot Plants Procedures	Richard M. Gundzik	Agosto, 1983.
11.-	Wiped Film Evaporators as Pilot Plants	Dean B. Arlidge	Agosto, 1983.
12.-	High - Accuracy Mass Balancing in Catalyst Screening	Richard P. Palluzi And Louis Matty Jr.	Agosto, 1983.
13.-	Bench - Top Data Acquisition And Control System	W. M. Herring	Agosto, 1983.
14.-	Solving Pilot Plants Problems	J. G. Kunesch And W. R. Hollanck	Agosto, 1983.
15.-	Advanced Distributed Computer System for Pilot Plants	R. K. Wang, R. A. Wister R. A. Van Sweringen J. M. Taylor & Y. M. Tseng	Agosto, 1983
16.-	Cost Benefits of Sulfuric Acid Alkylation	D.W. Meyer, L.E. Chapin & R. F. Muir	Agosto, 1983.
17.-	Mini - Computer For Gathering Pilot Plant Data	R.C. Beecher, J.W. Carr J.E. Hartgerink, & W. H. Padgett	Agosto, 1983.
18.-	Preferred Pilot Plant Control Practices	R. W. Prugh	Noviembre, 1974.
19.-	Computer - Generated Material Balances	D. J. Mc Cracken	Noviembre, 1974.

20.-	Computer - Assisted Control System Design	J. O. Haughen	Noviembre, 1974.
21.-	Practical Flowsheets for Pilot Plants	R. W. Prugh	Noviembre, 1974.
22.-	Automated Data Handling for Analyzers	J. E. Osborne	Noviembre, 1974.
23.-	Multi - purpose System for Pilot Plants	R. D. Deam & N. B. Angelo	Octubre, 1971.
24.-	Development of the COED Process	R.T. Eddinger, J.F. Jones, R. F. E. Blanc	Octubre, 1968.
25.-	Pilot Plant Cost Control	W. G. Hudson	Octubre, 1968.
26.-	Radioactive Materials in Pilot Plants	D.E. Black & S. J. Hurn	Octubre, 1968.
27.-	Unattended Pilot Plants	C.E. Ellis	Octubre, 1968.
28.-	Maintaining a Nuclear Research Laboratory	J. L. Boyd & P.F.X. Dunigan	Octubre, 1968.

b.5) V a r i o s . .

- |      |   |  |   |
|------|---|--|---|
| 1.-  | Modular Pilot Plant Technology  | Robert N. Lo.<br>Ravi Randhava<br>John G. Kronseider | Xyntel Corp.<br>Xyntel Corp.<br>Fluor Engineering & Construccions |
| 2.-  | Experiences in Transition From<br>Lab to Plant                                    | Arthur L. Conn                                       | Amoco Oil Co.   |
| 3.-  | Dow Really Need Pilot Plants ?  | Ernest D. Ohsol                                      | Research & Development,<br>March, 1972.                           |
| 4.-  | A Chemical Engineer Comments<br>on Pilot Plants & Models                          | O. P. Sud  | Chemical Edngineering World,<br>Vol. 11, No. 3, March, 1972.      |
| 5.-  | Operating a Pilot Plant Circuit For<br>Energy Transport With Hydrogen<br>Rich Gas | H. Fedders, B. Hählein                               | Advances in Hydrogen Energy                                       |
| 6.-  | Full - blown Pilots Yielding to<br>Microunits                                     |  | C. & EN. Dec. 18, 1967.   |
| 7.-  | The Case For The Automated<br>Miniature Plant                                     | A. L. Mensley, Jr. &<br>S. E. Shields                | 7th World Petroleum Congress,<br>April 2 to 8, 1967.              |
| 8.-  | Apparatus for Countercurrent<br>Liquid - Liquid Extraction                        | Lenny A. Robbins                                     | United States Patent, 3, 988, 116<br>Oct. 26, 1976.               |
| 9.-  | Chemical Marketing Reporter   |  | Enero a Agosto, 1988.   |
| 10.- | Información de Pemex.   |  | Mayo, 1984.   |

## APENDICE

## CRITERIOS GENERALES PARA ESCALACION DE EQUIPO

Para definir los cambios en condiciones de operación o dimensiones al pasar de un equipo pequeño a uno industrial, es necesario establecer criterios que definan éstos cambios en base a información obtenida en escala pequeña, esto hace que el objetivo de la escalación sea la selección de condiciones de operación y dimensiones de los equipos, en forma tal que reproduzcan las variables del proceso en relación a los valores obtenidos a nivel experimental y/o piloto.

Para establecer la relación entre las diferentes variables con el propósito de escalación se hace uso de técnicas tales como : similitud y modelado matemático.

La similitud se basa en grupos adimensionales que deben mantener su valor a nivel piloto e industrial, esto define la relación que debe mantenerse entre las diversas variables para ambas escalas.

Para el caso de un reactor químico, los grupos adimensionales utilizados son: el Damkohler (Da), el Reynolds (Re), el Peclet (Pe), y se aplica la similitud química aunque es prácticamente imposible por lo que debe aplicarse con precaución.

La escalación de un reactor en donde se sucede una reacción homogénea de primer orden puede definirse de la manera siguiente.

$$R^* = \lambda R$$

$$L^* = \lambda L$$

Donde:

R = radio del reactor

L = longitud del reactor

Las variables se escalarán conforme a las expresiones.

$$V^* = \lambda^{-1} V$$

$$T^* = \lambda^{-2/3} T$$

$$r^* = \lambda^{-2} r$$

Donde :

V = velocidad de flujo

T = temperatura

r = velocidad de reacción

\* = equipo piloto

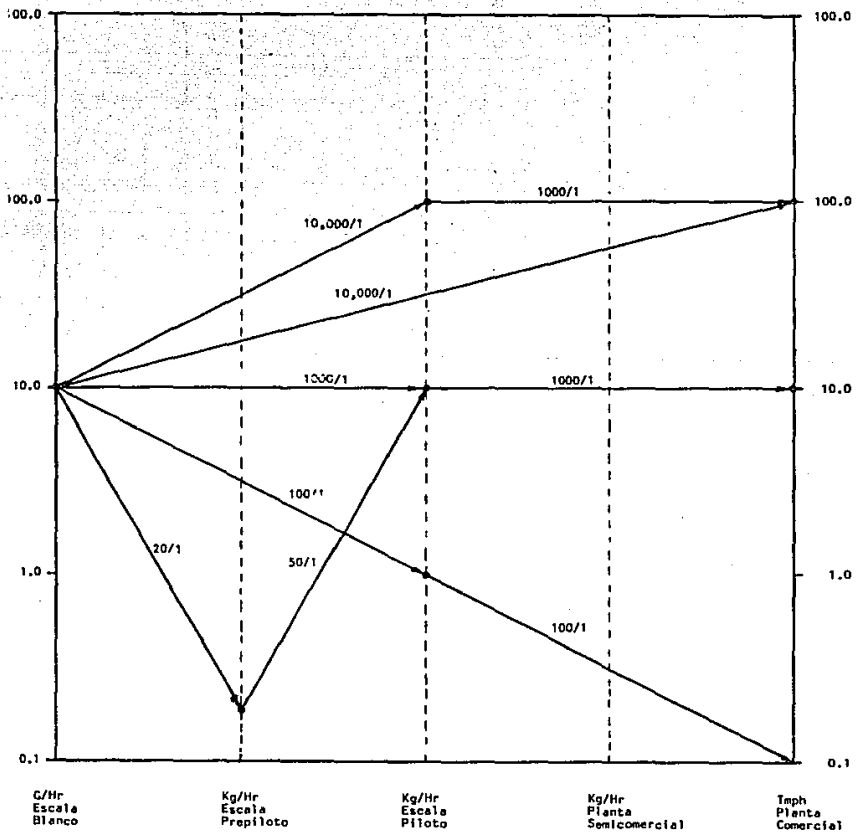
Se debe tomar en cuenta un análisis de escalación en forma paralela a la definición del equipo experimental debido al posible cambio significativo de algunas dimensiones en el cambio de escala.

El modelado matemático consiste en elaborar modelos matemáticos de los equipos, a fin de cuantificar el efecto causado por el cambio de dimensiones sobre el proceso, sin embargo las ecuaciones diferenciales que se obtienen son de carácter complejo y de difícil solución.

Esto hace que las técnicas de similitud sean más sencillas y deben usarse siempre que sea posible.

### RAZONES TÍPICAS DE ESCALACION

S I S T E M A	ESCALA DE OPERACION Kg / Hr		. RAZON DE ESCALACION	
	LABORATORIO	PLANTA PILOTO	PLANTA PILOTO	PLANTA COMERCIAL
Sustancialmente Gaseos	0,01-0,10	10-100	500 - 1000	200 - 1500
Reactantes Caseosos y Productos Líquidos o Sólidos	0,01-0,20	10-100	200 - 500	100 - 500
Reactantes Líquidos y Caseosos	0,01-0,20	1-30	100 - 500	100 - 500
Productos Líquidos				
Reactantes Líquidos, Productos Sólidos o Líquidos viscosos	0,005-0,20	1-20	20 - 200	20 - 250
Reactantes Sólidos, Productos Sólidos	0,10-1,00	10-200	10 - 100	10 - 200





TECNICAS DE ESCALACION DE REACTORES

	GAS O LIQUIDO			GAS Y LIQUIDO		CATALITICO			
	BATCH	TUBULAR	ACITADO CONTINUO	FASE CONTROLANTE		CAMA LIJA GAS	CAMA FIJA GAS/LIQUIDO	CAMA FLUIDIZADA O EN MOVIMIENTO	
				LIQUIDO	GAS				
<b>FENOMENO BAJO ESTUDIO</b>									
Cinética Química	2	3	1	3	1	1	1	1	
Transferencia de Masa	4	4	4	1	3	4	1	1	
Transferencia de Calor	1	1	2	4	3	3	2	3	
<b>METODOS DE ESCALACION</b>									
Estudios de Laboratorio	1	4	1	3	2	3	2	1	
Plantas Piloto	4	1	3	3	1	1	1	3	
Maquetas	4	4	3	1	1	4	1	1	
Modelado	2	2	1	1	2	2	3	3	
<b>GRADO DE IMPORTANCIA</b>									
	1	Crítica / Muy importante							
	2	Necesaria / importante							
	3	Deseable / Alguna importancia							
	4	Valor Pequeño / Irrelevante							

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

Un proceso a nivel piloto que trata gases residuales y cuya finalidad es eliminar los componentes ácidos de la mezcla gaseosa, posee un reactor catalítico, el catalizador se alimenta disuelto en un solvente y el área de contacto se da por medio de un paquete.

El proceso esta sujeto a las siguientes variables:

Presión  
Temperatura  
Concentración de catalizador  
Tiempo de residencia  
Área de contacto

La presión es una condición que se mantiene constante, la temperatura se mantiene en un valor tal que el producto se mantenga líquido, por lo tanto las variables a manejar son:

Concentración de catalizador  
Tiempo de residencia  
Área de contacto

La concentración de catalizador se variará en tres niveles, 1.0, 1.5 y 2.0% en peso basado en la masa del solvente

El tiempo de residencia en base al flujo volumétrico del gas residual y al volumen del lecho empacado también tendrá una variación en tres niveles - 0.5, 1.0 y 1.5 minutos

El área de contacto se moverá en seis niveles usando paquetes diferentes

Sillets Intalox de 1"	SI-1"
Sillets Intalox de 2"	SI-2"
Anillos Pall de 1"	AP-1"
Anillos Pall de 2"	AP-2"
Tri-Packs de 1"	TP-1"
Tri-Packs de 2"	TP-2"

El programa experimental se basa en corridas de una a dos semanas de operación continua mas los tiempos muertos por: cambio de empaque, cambio y ajuste de concentración de solución catalítica y paros de la planta generados de los gases residuales.

El programa se llevará a cabo de la manera siguiente:

1.- Se evaluará el efecto de la concentración del catalizador con empaque SI-1" y 1 minuto de tiempo de residencia, éstas corridas duraran un periodo de tiempo de dos semanas.

2.- Con la concentración de catalizador óptimo, cada tipo de empaque y variando el tiempo de residencia se realizaran corridas con duración de una semana.

3.- La solución catalítica se deberá filtrar y ajustar su concentración en cada cambio de empaque.

4.- Los datos que se deberán obtener para poder llevar a cabo la evaluación son:

- Flujo y composición del gas de carga
- Presión de operación
- Temperatura de operación
- Concentración de la solución catalítica
- Tiempo de residencia
- Tipo de empaque
- Composición del gas tratado
- Flujo de solución catalítica
- Caida de presión del lecho empacado
- Reposición de solvente
- Reposición de catalizador
- Flujo de producto líquido

El tiempo requerido para llevar a cabo este programa experimental es de 24 semanas sin considerar los tiempos muertos

En base a lo anterior se propone el siguiente programa.

**PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Area de contacto	concentración de catalizador (% peso)								
	1.0			1.5			2.0		
	tiempo de residencia (minutos)								
	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5	0.5	1.0	1.5
SI-1"		*			*				*
SI-1"	*	*	*						
SI-2"	*	*	*						
AP-1"	*	*	*						
AP-2"	*	*	*						
TP-1"	*	*	*						
TP-2"	*	*	*						

No.de pruebas =  $3 + 6 \times 3 = 21$

Tiempo requerido =  $2 \times 3 + 18 \times 1 = 24$  semanas, equivalen a 1/2 año

La evaluación no necesariamente se realizará a la concentración de 1.0% ya que primero se debe determinar la concentración óptima, lo anterior se hizo con fines ilustrativos.

DISEÑO FACTORIAL

2<sup>3</sup>

TRES DIFERENTES NOTACIONES

CORRIDA No.	FACTORES			FACTORES			FACTORES		
	A	B	C	1	2	3	1	2	3
1		1		0	0	0	-	-	-
2		a		1	0	0	+	-	-
3		b		0	1	0	-	+	-
4		ab		1	1	0	+	+	-
5		c		0	0	1	-	-	+
6		ac		1	0	1	+	-	+
7		bc		0	1	1	-	+	+
8		abc		1	1	1	+	+	+

DISEÑO FACTORIAL  $2^K$

K = 2, 3, 4

K = 2		K = 3			K = 4			
$X_1$	$X_2$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	-	+	-	-	+	-	-	-
-	+	-	+	-	-	+	-	-
+	+	+	+	-	+	+	-	-
		-	-	+	-	-	+	-
		+	-	+	+	-	-	-
		-	+	+	-	+	+	-
		+	+	+	+	+	+	-
					-	-	-	+
					+	-	-	+
					-	+	-	+
					+	+	-	+
					-	-	+	+
					+	-	+	+
					-	+	+	+
					+	+	+	+

GRUPOS ADIMENSIONALES EN EL SISTEMA DE INGENIERIA

N O M B R E	SIMBOLO	F O R M U L A
Número de Biot	Nbi	$hL/k$
Número de Condensación	Nco	$(h/k) (\mu^2 / \rho^2 g)^{1/3}$
Número en Condensación de Vapores	Ncv	$L^3 \rho^2 g \lambda / k \mu \Delta t$
Número de Euler	Nev	$g c (-dp / \rho v^2)$
Número de Fourier	Nfo	$k \theta / \rho c L^2$
Número de Froude	Nfr <sup>ere</sup>	$v^2 / L g$
Número de Graetz	NGz	$w c / KL$
Número de Grashof	NGr <sup>ere</sup>	$L^3 \rho^2 \beta \theta \Delta t / \mu^2$
Número de Mach	NMa	$v / V_a$
Número de Mussett	Nnv	$h D / k$
Número de Peclet	Npe	$D v \rho c / k$
Número de Prandtl	Npr <sup>ere</sup>	$c \mu / k$
Número de Reynolds	NRe	$D v \rho / \mu$
Número de Schmidt	Nsc	$\mu / \rho D_v$
Número de Stanton	Nst	$h / c v \rho$
Número de Weber	Nwe	$L v^2 \rho / \sigma g c$

---

FABRICANTES DE EQUIPOS PILOTO  
( algunos )

---

Abbe, Paul O., Inc.	Lapp Process Equipment
Airetron Engineering Div.	Lwa Corp.
Slick Industrial Co.	Milton Roy Co.
American Standard Corp.	National Drying Machinery Co.
Heat Transfer Products Div.	Norton Co.
Ametek Inc.	Chemical Process Products Div.
Autoclave Engineers, Inc.	Patterson Industries Inc.
Bell & Cosssett Co. III	Peabody Engineering Co.
Blaw Knox. Co., Bufllovak Div.	Pennwalt Corp. Equipment Div.
Bowen Engineering, Inc	Pfautler
Chem - Pro Equipment Corp.	Pressure Products Industries
Croll - Reynolds Co.	Div. of Duriron Co.
Dean Bros Pumps, Inc.	Process Engineering And
J. P. Devine Mfg, Co.	Machine Co.
Doyle & Roth Mfg.	Proctor & Schwartz Inc.
Durco Pump Div.	Pulverizing Machinery Div.
Eastern Industries	Slick Industrial Co.
Eco Pump Corp.	T. Shriver & Co.
Fitzpatrick Co.	Sparkler Mfg. Co.
Graham Mfg.	Viking Pump Co.
Glitch, Ing.	
Kontro Co.	
Kotch Engineering Company, Inct.	