



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CIRCULACION DE ELEC-  
TROLITO EN UNA PLANTA REFINADORA DE COBRE.**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**INGENIERO QUIMICO**  
**P R E S E N T A N:**  
**FRANCISCO DE PAULA IBARROLA COLLANTES**  
**MARIO AMILCAR LOPEZ ARAUJO**



**DEPTO. DE PLANEO Y  
EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA 1981**

**MEXICO, D. F.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## INDICE

### PREFACIO

### PAGINA

CAPITULO I. INTRODUCCION	1
CAPITULO II. DESCRIPCION DEL PROCESO DE LA REFINACION ELECTROLITICA DEL COBRE	3
II.1.    GENERALIDADES	3
II.2.    TRATAMIENTO PRELIMINAR	6
II.3.    SISTEMAS DE REFINADO	7
II.3.1.  SISTEMA MULTIPLE	7
II.3.2.  SISTEMA PARALELO	10
II.4.    COMPARACION DE LOS SISTEMAS MULTIPLE Y SERIE	11
II.5.    CELDAS ELECTROLITICAS	12
II.6.    CONDICIONES DE OPERACION	13
II.7.    IMPUREZAS EN LOS ANODOS	15
II.8.    CATODOS DE COBRE RESULTANTES	17
II.9.    TRATAMIENTO DE LOS LODOS ANODICOS	17
CAPITULO III. NATURALEZA DEL ELECTROLITO	20
III.1.   GENERALIDADES	20
III.2.   PREPARACION DEL ELECTROLITO	20
III.3.   COMPOSICION TIPICA	21
III.4.   IMPORTANCIA DEL CONTROL DE LAS VARIABLES	22
III.5.   CORROSIVIDAD DEL ELECTROLITO	25
CAPITULO IV. ESTUDIO Y SELECCION DE MATERIALES.	27
IV.1.   GENERALIDADES	27
IV.2.   ANALISIS DE RESISTENCIA A LA CORROSION Y VELOCIDAD DE CORROSION	28
IV.3.   MATERIALES FERROSOS Y SUS ALEACIONES	28
IV.3.1.  ACERO	28
IV.3.2.  HIERRO FORJADO	29
IV.3.3.  ACEROS DE BAJA ALEACION	30

	PAGINA
IV.3.4. HIERROS DE MOLDEO	31
IV.3.5. HIERRO AL ALTO SILICIO	32
IV.3.6. ALEACIONES DE NIQUEL	33
IV.3.7. ACEROS INOXIDABLES	33
IV.3.8. ALEACIONES MEDIAS	35
IV.4. ALEACIONES NO FERROSAS	36
IV.4.1. NIQUEL Y SUS ALEACIONES	36
IV.4.2. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES	37
IV.4.3. COBRE Y SUS ALEACIONES	37
IV.4.4. PLOMO Y SUS ALEACIONES	38
IV.4.5. TITANIO	39
IV.4.6. ZIRCONIO	39
IV.4.7. TANTALIO	39
IV.5. MATERIALES NO METALICOS	40
IV.5.1. VIDRIO	40
IV.5.2. MATERIALES PLASTICOS	40
IV.5.2.1. CLORURO DE POLIVINILO	42
IV.5.2.2. POLIETILENO	43
IV.5.2.3. ACRILONITRILU-BUTADIENO-ESTIRENO	44
IV.5.2.4. CELULOSA-ACETATO-BUTIRATO	44
IV.5.3. TERMOFIJOS	44
IV.5.3.1. RESINA EPOXICA	45
IV.5.3.2. RESINA POLIESTER	46
IV.5.3.3. RESINAS DE FORMALDEHIDO	47
IV.5.3.4. RESINA VINIL-ESTER	47
IV.5.6. LISTA DE MATERIALES RECOMENDABLES	48
 CAPITULO V. DISEÑO DEL SISTEMA DE CIRCULACION DE ELECTROLITO	 50
V.1. GENERALIDADES	50
V.2. COSTOS DE AMORTIZACION	52
V.3. COSTOS DE OPERACION	52
V.4. METODO DE LA SECCION DORADA	54
V.5. SELECCION DE LAS VARIABLES DE DISEÑO	58
V.5.1. VARIABLES ECONOMICAS	58
V.5.2. VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CALCULO DEL DIAMETRO	62

	PAGINA
Y.6. PROCEDIMIENTO DE CALCULO	65
Y.7. DATOS DEL PROBLEMA	67
Y.8.1. CALCULO DE LAS PERDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERIAS Y ACCESORIOS	74
Y.8. PROGRAMA DE COMPUTADORA	75
Y.9. RESULTADOS	76
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	92
BIBLIOGRAFIA	94
APENDICE A	100

## PREFACIO

La industria del refinado electrolítico es importante en el mundo actual ya que produce cobre de alta pureza (99.98%), el cual se destina en un alto porcentaje a cubrir la demanda de la industria de los conductores eléctricos. Esta demanda y el proceso en sí, ocasionan una continuidad necesaria en la operación de la planta refinadora de cobre. El proceso, que es de naturaleza electroquímica, requiere de la circulación constante del electrolito (ácido sulfúrico-sulfato de cobre) para evitar dos fenómenos indeseables: la polarización y el enfriamiento de la solución, los cuales incrementan los costos de producción. El electrolito es sumamente corrosivo por las propiedades del ácido sulfúrico, el ión cúprico y por la temperatura a que se maneja (50-60°C).

La necesidad de optimizar tanto el diámetro de la tubería conductora de electrolito, como el material de la misma, es objetivo en las plantas refinadoras de cobre para tener un sistema funcional, eficiente, seguro y costeable. El presente trabajo hace suyo ese objetivo y estudiará y propondrá el sistema de circulación de electrolito más adecuado para una planta refinadora de cobre.

## CAPITULO I.

## INTRODUCCION.

El refinado electrolítico del cobre, no sólo produce el metal de tan extraordinario grado de pureza que requiere la industria -- eléctrica, sino que así mismo recupera las pequeñas cantidades de metales preciosos que contiene el mineral beneficiado y que no podrían ser recuperados por otros procedimientos.

El cobre en bruto contiene metales preciosos tales como oro, plata y platino; pequeñas cantidades de níquel, arsénico, antimonio, selenio, telurio y otros metales e impurezas.

Se puede considerar que fue en 1800 cuando Cruikshank demostró que el cobre podía ser precipitado de sus soluciones por medio de la corriente de una pila voltaica. Las leyes de Faraday sobre -- electrólisis, publicadas en 1831 empezaron a establecer los cimientos de la electroquímica moderna. Más tarde, P. Jacobin da a conocer en 1838 su sistema de galvanoplastia como una aplicación práctica de todas las tesis y leyes expuestas a la fecha. James Elkington, en 1840 abre una pequeña planta de plateado electrolítico en Birmingham y con el invento del generador publica su patente para la refinación electrolítica del cobre en los años 1865-1870, y su obra fue tan detallada y completa, que muchos de sus principios -- siguen vigentes en todas las refinerías de cobre del mundo. Con -- viene destacar que así como el invento del generador hizo posible el refinado electrolítico del cobre, a su vez, el cobre puro fue -- la base del desarrollo de la industria química moderna, con un -- ritmo que año con año se incrementa considerablemente. La primera -- refinería fue establecida en los Estados Unidos por Edward Balbach en Newark, en el año de 1883, cuya operación aportó un extraordinario cúmulo de experiencia para la posteridad.

En 1921, Laurence Addicks estudió en forma definitiva el refinado del cobre como un proceso integrado con sus diferentes variables: pérdidas de metal, cubas y su resistencia, sección económica de los conductores de cobre, densidad de corriente y su relación --

con la temperatura, costo de la energía, rendimiento de corriente, además un importante balance económico considerando productos secundarios, costos de operación, rentabilidad y amortización. En este estudio ya presenta como un factor de importancia el deterioro que sufren las partes del equipo que tienen contacto con el electrolito y afronta por primera vez el efecto de la corrosión y su repercusión en la operación de la planta.

Addicks hizo hincapié en la repercusión económica que tiene la corrosión, y en base a esto será necesario escoger de entre los materiales que existen actualmente el que presente mejores propiedades químicas, físicas y desde luego económicas para la conducción del electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre, así como proponer los diámetros óptimos de tubería que hagan del sistema de flujo del electrolito un sistema funcional, duradero y que represente la mejor inversión.

## CAPITULO II

### DESCRIPCION DEL PROCESO DE LA REFINACION ELECTROLITICA DEL COBRE.

#### II.1. GENERALIDADES

Dentro de la industria electroquímica, existen dos procesos que dan como resultado metales de alta pureza, los cuales son el electrorefinado y el electrobeneficio.

El primero de ellos se muestra en la figura II.1, y puede definirse de la siguiente forma:

Electrorefinado o refinado electroquímico (ambos términos se usan indistintamente) es el depósito de un metal puro en el cátodo, a partir de un ánodo de metal impuro a través de un electrolito y por acción de un potencial eléctrico.

El segundo de los procesos se puede definir como sigue:

Electrobeneficio o beneficio electrolítico (ambos términos se usan indistintamente) es el depósito de metal puro de un cátodo, a partir de una solución que tenga el metal deseado, teniendo la presencia de un ánodo inerte todo sumergido en el electrolito y por acción de un potencial eléctrico.

El electrorefinado en general, no solo produce metales de alta pureza sino que también hace posible la recuperación de metales preciosos que están presentes en los minerales en tan pequeñas cantidades que prácticamente no podrían ser recuperados por ningún otro método. Del cobre se recuperan cantidades considerables de oro y plata. Alrededor del 80% de la producción de plata y del 15% de la producción de oro, se obtienen como subproductos de la refinación del cobre, níquel y cobalto.

El electrorefinado de cobre también produce níquel como subproducto, y prácticamente todo el selenio y el telurio que demandan distintas industrias.

DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO DE  
ELECTRO-REFINADO DE COBRE

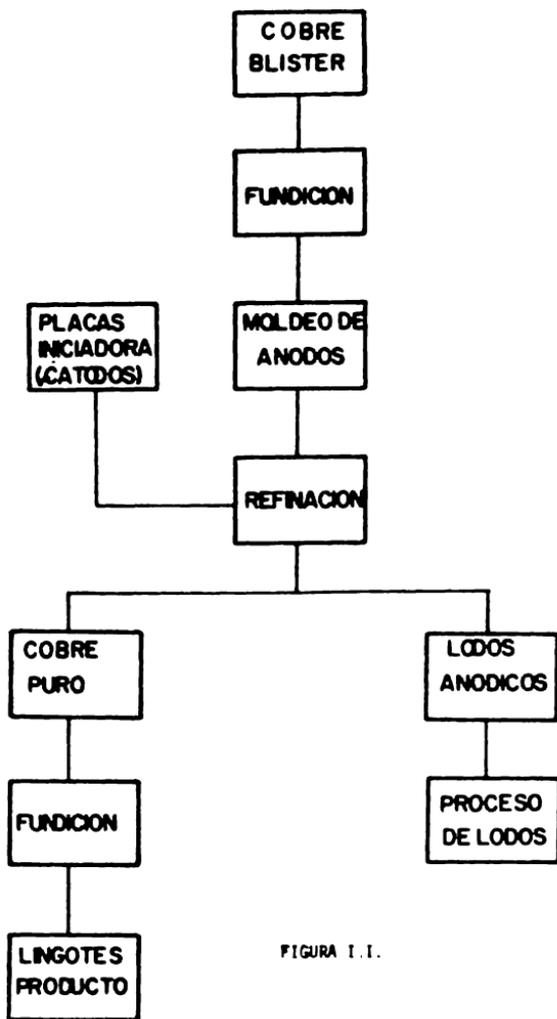


FIGURA I. I.

DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO DE  
ELECTRO-REFINADO DE COBRE

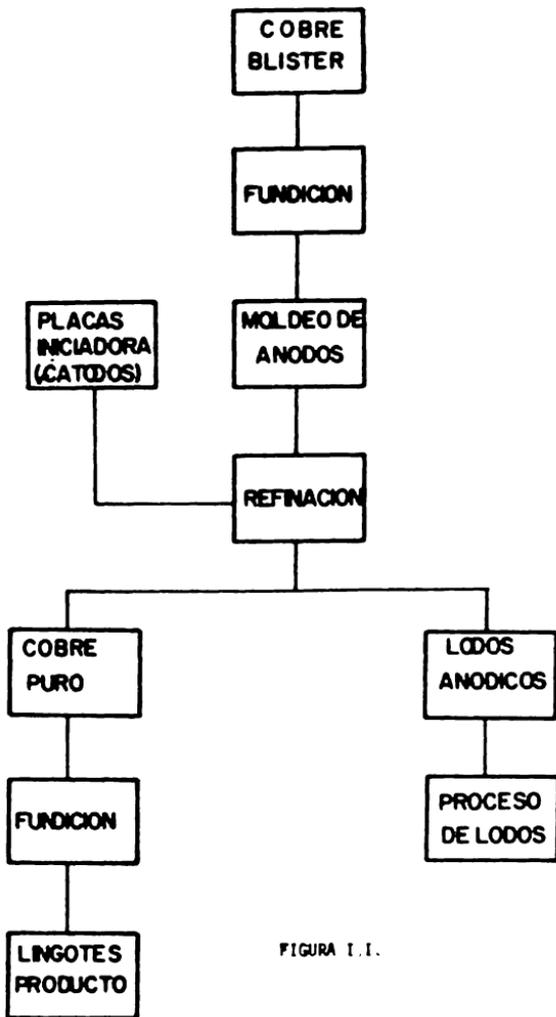


FIGURA I. I.

En los procesos de electrorefinado, el metal a procesar se funde y moldea para formar un ánodo que posteriormente se coloca en un electrolito adecuado. Es depositado sobre un cátodo -- que puede estar hecho de una placa delgada del metal que está siendo refinado, o menos comunmente, de algún otro material del cual el depósito puede ser desprendido posteriormente.

Las condiciones de operación son de tal manera ajustadas, que el metal a refinar es depositado con un alto grado de pureza. Los metales más electropositivos generalmente no se disuelven en el electrolito, sino que permanecen adheridos al ánodo o finalmente se desprenden y forman el lodo anódico. El lodo anódico por lo tanto, está constituido en su gran mayoría por los metales más nobles. Si alguno de los metales electropositivos -- están en el ánodo en porcentajes relativamente grandes o si la densidad de corriente es alta, algunos de estos metales pueden pasar a la solución, y si permanecen en solución, eventualmente se depositarán en el cátodo. Para prevenir la contaminación del metal que está siendo refinado, se agregan compuestos adecuados que precipitarán los metales más nobles; por ejemplo, un cloruro soluble añadido a la solución de cobre precipitará toda la plata.

Los metales más electronegativos rápidamente se disuelven electrofíticamente y se acumularán en la solución a menos que sean químicamente precipitados. Por ejemplo, en el refinado de cobre, cualquier cantidad de plomo en el ánodo es precipitada -- como sulfato de plomo, y el estaño precipitará lentamente como sulfato básico insoluble. De esta manera, se puede observar que los metales más electronegativos también se pueden encontrar en el lodo anódico.

Algunas de las impurezas permanecen en solución en el electrolito, y su acumulación gradual lo contaminará o lo hechará a perder. Si su concentración eventualmente llegara a ser alta, -- se depositarían en el cátodo. Es por lo tanto necesario purificar el electrolito, el cual se extrae continuamente de los tanques y se reemplaza por electrolito nuevo.

## II.2. TRATAMIENTO PRELIMINAR.

El cobre, así como también la plata y el oro, existen en la naturaleza en estado nativo, pero los minerales de sulfuro son la fuente más importante de cobre. Se pueden obtener grandes cantidades de cobre a partir de óxidos, silicatos y carbonatos. Los minerales contienen en promedio menos del 2% de cobre, por lo que usualmente tienen que ser concentrados por flotación o por otros métodos, en los cuales se remueven grandes cantidades de ganga inútil, produciendo un concentrado del 15 al 20% de cobre. El concentrado o mineral crudo, si es un mineral de alto grado, es tostado en un horno para reducir pero no eliminar el contenido de azufre. El mineral tostado pasa a un horno de reverbero donde una parte remanente de la ganga es eliminada produciendo una mata en la cual el cobre existe como  $Cu_2S$ ; esta mata consiste de una mezcla de sulfuros de cobre y fierro. La ganga y algo del fierro se remueven como escoria. La mata se pone en un convertidor en el cual se sopla aire a través de la mezcla fundida. El aire oxida al fierro a  $FeO$ , el cual va a una escoria de silice y se remueve con ella, el soplado continúa para eliminar el azufre como óxido de azufre. El horno se vacía, produciendo cobre amollado (blister), así llamado porque al escapar el dióxido de azufre del metal, le da esta apariencia; la pureza de este cobre es cercana al 99% conteniendo impurezas como níquel, arsénico, telurio, plata, oro, platino y azufre.

Las refineras generalmente adquieren el cobre en planchas de aproximadamente  $11 \times 7 \times 1.2$  cm. Un análisis del cobre que se maneja en la refineras indica que por término medio, el total de oro es del orden de 23.4 gr/ton. de cobre; de plata de 1560 gr/ton de cobre; de platino de 50 a 100 gr/ton de cobre y el de paladio, algo superior al del platino.

Las planchas de cobre se funden y refinan en el horno de ánodos que es un horno de reverbero. Las cantidades reales de impurezas que se remueven en este horno de refinación son pequeñas, ya que los ánodos producidos contienen del 99 al 99.4% de

cobre, pero las impurezas que pudieran ocasionar excesiva contaminación al electrolito se reducen a cantidades apreciablemente pequeñas. La carga fundida se somete a una inyección de aire, - después de lo cual la escoria producida es desnatada de la superficie. El soplado deja al cobre saturado con óxido cuproso - en cantidades del 6% aproximadamente.

Este contenido de óxido de cobre se reduce introduciendo - grandes troncos de madera resinosa verde en el seno de la masa fundida. En este proceso se reduce el contenido de azufre a un 0.005% y se reduce el contenido de óxido cuproso hasta el 2.5%, cantidad conveniente para poder obtener los ánodos. Los hornos de ánodos tienen capacidades variables de 100 a 400 toneladas - de cobre por carga. La carga, refinación a fuego y vaciado del horno se hace en forma cíclica cada 24 horas,

Los moldes para los ánodos están localizados en el borde - de una rueda conocida como rueda de Walker que gira continuamente en un plano horizontal. Los ánodos solidificados se extraen de los moldes y estos se preparan para recibir otra carga de metal fundido, en un proceso continuo.

### II.3. SISTEMAS DE REFINADO.

Industrialmente, se usan dos sistemas de refinado electro-  
lítico conocidos como sistema en serie y sistema múltiple o pa-  
ralelo. Cada sistema tiene sus ventajas sobre el otro; sin --  
embargo, el sistema múltiple es más usado ya que presenta mayor  
flexibilidad de operación.

#### II.3.1. SISTEMA MULTIPLE.

En el sistema múltiple de refinado, los ánodos y los cátodos se conectan eléctricamente en paralelo en las celdas alter-  
nando uno con otro, y en su forma más simple, todos los ánodos  
se conectan en la barra gufa positiva. Los cátodos en su inicio  
consisten de láminas delgadas de cobre llamadas hojas iniciado-

ras, obtenidas por depósito sobre matrices de cobre engrasadas pero que debido a los problemas para su preparación de pulido y engrasado, se han sustituido por placas de titanio que no necesitan de ninguna preparación previa.

Las hojas iniciadoras pasan posteriormente al proceso de colocación de orejas de soporte para que puedan ser suspendidas dentro de las celdas de producción comercial de cátodos.

En la figura II.2, se muestra el arreglo del sistema múltiple en su forma más simple. Toda la corriente requerida para cada celda se conduce por medio de barras de cobre conocidas como barras bus, positivas y negativas.

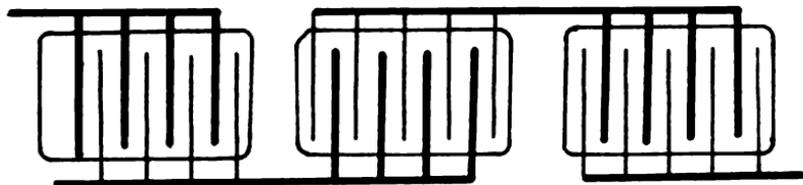


FIGURA II.2. Arreglo del sistema múltiple.

Como una mejora que permitió ahorro de barras bus, se hizo un arreglo donde las celdas se colocaron frente a frente en lugar de lado a lado y usando entre ellas un conductor rectangular de sección pequeña que permitió que los ánodos de una celda y los cátodos de la siguiente descansarán sobre este. Se debe hacer notar que la corriente llevada a cualquier parte de la barra intermedia no es sino sólo una pequeña parte de la corriente total. En las instalaciones antiguas, esta barra bus consistió de una tira de cobre, pero se encontró el problema de mantener limpios los contactos. Entonces, A.L. Walker, tuvo la idea de cambiar la tira plana por una sección triangular, con el resultado de que se obtuvo un mejor contacto.

Este sistema de conexión, desde entonces conocido como sistema Walker se muestra en la figura II.3.

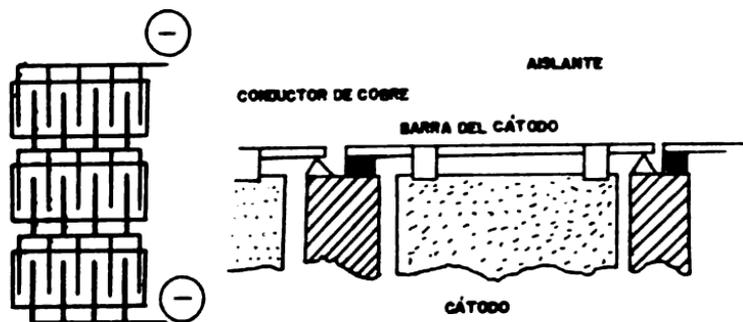


FIGURA II.3. Sistema Walker

Sin embargo, hay una pérdida por resistencia de los cáto - dos a la gufa triangular y de ésta a los ánodos. Para evitar es ta resistencia, Whitehead, desarrolló lo que se conoce como --- "contacto simple". El triángulo se vacfa sobre una saliente del ánodo y la gufa del cátodo descansa sobre de él, eliminado así el contacto entre el cátodo de un tanque y el ánodo del siguien te. Es todavfa costumbre descansar el ánodo sobre una gufa tri - angular dentro de la celda. Posteriormente, AubeI, modificó el contacto de Whitehead vaciando una estrfa sobre la saliente del ánodo y descansando una orilla puntiaguda de la barra del cáto - do sobre la estrfa, como se muestra en la figura II.4.

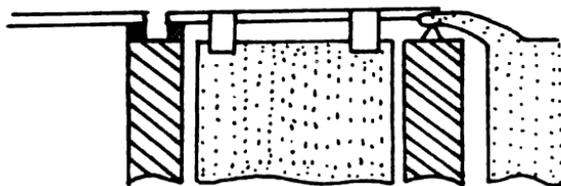
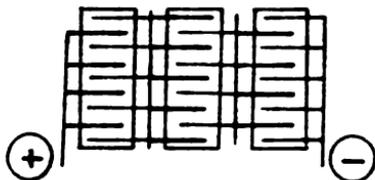


FIGURA II.4. Modificación de Aibel para la conexión de las barras gúfas.

### II.3.2. SISTEMA EN SERIE.

En este sistema, sólo los ánodos son puestos en el electrolito; no se usan placas de inicio y sólo los electrodos extremos se conectan uno al conductor positivo, y el otro al conductor negativo, quedando sin conexión eléctrica los intermedios. Cuando la corriente entra a la celda a través del primer electrodo, el electrodo se disuelve en la solución y el cobre puro se deposita en la parte que queda frente a él, del siguiente electrodo, de forma tal que la cara posterior de este segundo electrodo funciona como ánodo disolviéndose y así sucesivamente dando origen a lo que se conoce como electrodos bipolares. Por lo tanto, cada electrodo intermedio se hace más delgado de un -

lado engrasando en el contrario por el depósito de cobre puro en su parte posterior. Los electrodos excepto los de los extremos, que uno es cátodo y otro ánodo, son electrodos bipolares o intermedios. No es recomendable continuar la electrólisis hasta que todo el cobre original se haya disuelto, ya que las últimas trazas del electrodo inicial pueden quitarse del cobre puro depositado sobre las caras catódicas. En la figura II.5, se muestra esquemáticamente el sistema en serie

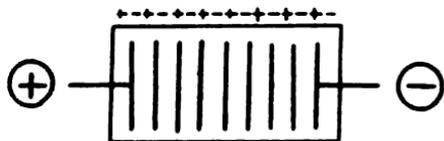


FIGURA II.5. Sistema en serie.

#### II.4. COMPARACION DE LOS SISTEMAS MULTIPLE Y EN SERIE.

El sistema múltiple, puede procesar un cobre blister relativamente más impuro que el sistema en serie y también se adapta mejor al manejo mecánico-operacional de los electrodos y rindiendo por lo tanto una operación más flexible durante el refinado del cobre.

Para el sistema en serie, la cantidad de cobre usado para las barras bus es menor debido al menor número de barras gafa - requeridas. Se producen menos desechos, se necesita menos espacio pero da más problemas de operación. La comparación de los - dos sistemas se muestra en la tabla II.1, basada en los datos - dados por Corwin y Harloff.

TABLA II.1.  
COMPARACION DE LOS SISTEMAS MULTIPLE Y EN SERIE.

	<u>SERIE</u>	<u>MULTIPLE</u>
Volumen por cuba . . . . .	12 m <sup>3</sup>	5 m <sup>3</sup>
Cobre usado en barras gafa, conductores y placas de inicio por tonelada diaria de producto . . . . .	233 Kg	2216 Kg
Consumo de ánodos y cátodos en la casa de cubas por tonelada diaria de pro - ducción . . . . .	19029 Kg	24082 Kg
Consumo de electrolito incluyendo alma cenamiento y calentamiento por tonela - da diaria de producción . . . . .	10431 Kg	14014 Kg
Espacio de piso por tonelada diaria de producción . . . . .	18 m <sup>2</sup>	41 m <sup>2</sup>
Densidad de corriente en el cátodo (amperes/m <sup>2</sup> ) . . . . .	194-291	151-355
Eficiencia de corriente(%) . . . . .	70-75	90-98
Cobre depositado por Kw-dfa . . . . .	113 Kg. max.	45-171 Kg
Volts por celda . . . . .	17	0.2-0.8
Amperes por celda . . . . .	76	7000-10000

II.5. CELDAS ELECTROLITICAS.

Sin importar el tipo de sistema empleado, las celdas para la electrólisis se han hecho de muchos materiales como concreto con fondo de plomo, pero la tendencia actual es hacerlos de --- poliéster reforzado con fibra de vidrio soportados en un arma - zón de fierro con soporte de madera para sostener la celda inte - gral de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Los soportes - usados en el sistema múltiple, ya sean de madera o de concreto - fijan celdas con una capa de aproximadamente 1/8" de espesor de

plomo antimoniado al 6%; y como ya se dijo anteriormente, la --- tendencia actual es hacer moldes de fibra de vidrio que son desmontables y más fáciles para su mantenimiento.

Las celdas deben de ser lo suficientemente resistentes para soportar el peso de los electrodos, el cual es alrededor de diez toneladas por celda. Cada tanque contendrá aproximadamente tres toneladas de electrolito.

Las celdas generalmente tienen las siguientes dimensiones: de 2.2-4 m de longitud, 1.2 m de profundidad y 1 m de ancho.

Las celdas, se ponen preferiblemente sobre pilares de con - creto o de ladrillo de suficiente altura para que estas queden a 1.75-2 m de altura, dando suficiente espacio para supervisar si no hay fugas de solución en los tanques y la instalación de to - das las tuberías de circulación de electrolito y de descarga y - movimiento de los lodos anódicos que se acumulan en el fondo de las celdas.

Los voltajes de operación generalmente son inferiores a medio volt por celda, pero como se conectan suficientes celdas en serie, el voltaje total de la fuente de corriente directa es de 100 a 200 volts.

## II.6. CONDICIONES DE OPERACION.

Todos los ánodos de cobre usados en la refinación electro - lítica son fundidos. Para el sistema múltiple tienen un peso pro - medio de 350 kg., y cada conductor bus tiene dimensiones aproxima - das de 5-8 m de largo y sección para manejar un ampere por ca - da milímetro cuadrado de sección. Para el sistema en serie se -- usan electrodos de menor peso con las mismas dimensiones de lar - go y ancho lo que implica menor espesor. Los tanques en el siste - ma múltiple usan de 20 a 40 ánodos por celda, con un cátodo más que el total de ánodos. En el sistema en serie, el número de --- ánodos es del orden de 135 por celda. En ninguno de los dos siste - mas se lleva a cabo la electrólisis hasta que todo el material anódico se haya disuelto, y las cantidades de material de desper -

dicio representan del 10 al 15% del peso original del ánodo, que se vuelve a fundir para hacer ánodos nuevos.

En el sistema múltiple de refinado, los ánodos permanecen en las celdas de 40 a 50 días, obteniéndose tres cosechas de cátodos por cada carga de ánodos, de modo que cada cátodo pesa 100 kg cada uno para un total de 300 kg en las tres cosechas y la diferencia de 50 kg representa el desperdicio de ánodos que se refunden. Hay aproximadamente 10 cm de separación entre centros de ánodo-ánodo. En el sistema en serie, donde el cobre refinado se deposita en la parte posterior de los ánodos, los electrodos permanecen en los tanques durante 17 días.

La casa de tanques tiene grúas viajeras que sirven para colocar y hacer movimientos con los ánodos y cátodos según se requiera en las celdas electrolíticas. Estas grúas también colocan las placas iniciadoras y remueven los cátodos terminados. El tipo de grúas para la primera operación es manual ya que las hojas o cátodos iniciadores son delgados y tienen poco peso en comparación con los ánodos y cátodos finales.

La densidad de corriente varía de 1 a 2 amp/dm<sup>2</sup>. La eficiencia de la refinación decrece linealmente con el incremento en la densidad de corriente.

Una densidad de corriente alta, decrementa la cantidad de equipo usado y el consumo de metal, pero incrementa las pérdidas de oro y de plata de los ánodos, aparte de que hay un gran consumo de potencia. Bajo estas condiciones, se ha visto que una densidad de corriente de 1.50 amp/dm<sup>2</sup> es la óptima para establecer un balance económico adecuado. Las refineras operan a una eficiencia de corriente del 90 al 95% y se desea operar una eficiencia de corriente no menor al 90% para el sistema múltiple. La corriente entregada a las celdas en el sistema múltiple varía de 5000 a 10000 amp/celda. Generalmente están conectadas en serie de 400 a 800 celdas.

dicio representan del 10 al 15% del peso original del ánodo, que se vuelve a fundir para hacer ánodos nuevos.

En el sistema múltiple de refinado, los ánodos permanecen en las celdas de 40 a 50 días, obteniéndose tres cosechas de cátodos por cada carga de ánodos, de modo que cada cátodo pesa 100 kg cada uno para un total de 300 kg en las tres cosechas y la diferencia de 50 kg representa el desperdicio de ánodos que se refunden. Hay aproximadamente 10 cm de separación entre centros de ánodo-ánodo. En el sistema en serie, donde el cobre refinado se deposita en la parte posterior de los ánodos, los electrodos permanecen en los tanques durante 17 días.

La casa de tanques tiene grúas viajeras que sirven para colocar y hacer movimientos con los ánodos y cátodos según se requiera en las celdas electrolíticas. Estas grúas también colocan las placas iniciadoras y remueven los cátodos terminados. El tipo de grúas para la primera operación es manual ya que las hojas o cátodos iniciadores son delgados y tienen poco peso en comparación con los ánodos y cátodos finales.

La densidad de corriente varía de 1 a 2 amp/dm<sup>2</sup>. La eficiencia de la refinación decrece linealmente con el incremento en la densidad de corriente.

Una densidad de corriente alta, decrementa la cantidad del equipo usado y el consumo de metal, pero incrementa las pérdidas de oro y de plata de los ánodos, aparte de que hay un gran consumo de potencia. Bajo estas condiciones, se ha visto que una densidad de corriente de 1.50 amp/dm<sup>2</sup> es la óptima para establecer un balance económico adecuado. Las refineras operan a una eficiencia de corriente del 90 al 95% y se desea operar una eficiencia de corriente no menor al 90% para el sistema múltiple. La corriente entregada a las celdas en el sistema múltiple varía de 5000 a 10000 amp/celda. Generalmente están conectadas en serie de 400 a 800 celdas.

## II.7. IMPUREZAS DE LOS ANODOS.

Las impurezas de los ánodos de cobre se encuentran distribuidas en tres lugares posibles: 1) en el lodo anódico, 2) en el electrolito y, 3) en los cátodos. Todas las impurezas insolubles son las que forman el lodo anódico. Las impurezas solubles se mantienen a un máximo total de todas ellas de 20 g/l.

Si no se cuida la operación de las celdas, algo del lodo anódico puede quedar ocluido en el cátodo de cobre. El selenio y el telurio aparecen el ánodo combinados con la plata en primer término y si no existe plata en cantidad suficiente para combinar con estos dos elementos, el sobrante se combina con el cobre. Estos compuestos son insolubles y van en el lodo anódico. El plomo se disuelve en el ánodo pero es precipitado por el ácido del electrolito como sulfato de plomo,  $PbSO_4$ . Los dos se combinarán formando un precipitado básico ligero, denominado "lodos flotantes". Todos los ánodos contienen algo de azufre y también algo de oxígeno combinados con cobre; estos compuestos insolubles se sedimentan en el fondo de las celdas junto con los lodos anódicos. Por añadidura, algo de cobre se separa mecánicamente y se deposita en el lodo y algo de cobre se disuelve electrolíticamente como iones univalentes, los cuales forman iones de cobre divalentes así como también, cobre atómico de acuerdo a la reacción



Este cobre precipitado también se sedimenta y mezcla en el fondo de las celdas con los lodos anódicos.

El lodo anódico representa del 0.5 al 3% del peso de los ánodos. Los lodos suministran una gran parte de la producción mundial de oro y de plata, así como también de selenio y de telurio. La tabla II.2 muestra los límites de composición del lodo anódico.

TABLA II.2.

LIMITES DE COMPOSICION DE LOS LODOS ANODICOS.

<u>MATERIAL</u>	<u>LIMITES (%)</u>
Oro . . . . .	0.0548- 0.06855
Plata . . . . .	10.28 -15.07
Cobre . . . . .	16.0 -24.0
Níquel . . . . .	0.05 - 5.25
Plomo . . . . .	1.0 -16.0
Antimonio . . . . .	2.3 - 8.0
Teluro . . . . .	0.8 - 6.0
Selenio . . . . .	1.5 - 9.0
Arsénico . . . . .	2.7 - 3.9
Bismuto . . . . .	0.25 - 0.46
Hierro . . . . .	0.17 - 0.27

Los lodos se remueven de las celdas antes que un nuevo conjunto de ánodos vuelva a ser introducido a las mismas. Al electrolito se le deja asentar durante una hora y a continuación se filtra. Posteriormente, los lodos anódicos se extraen de las celdas por medio de una bomba; después de filtrado, el electrolito es almacenado para su tratamiento posterior.

El antimonio se disuelve en el electrolito en una concentración de aproximadamente 0.35 g/l, pero la solubilidad del antimonio se controla con la adición de un cloruro soluble que causa su precipitación como oxiclورو. Si el contenido de antimonio no se limita, causa el mayor problema de todas las impurezas, pero afortunadamente esta cantidad se controla fácilmente. Las impurezas que mayor problema causan en el electrolito son el arsénico y el níquel y algunas veces el bismuto, y es por estas impurezas que electrolito debe de ser purificado en forma continua. Mientras mayor sea la concentración de las impurezas, será mayor la densidad de corriente y por lo tanto se tendrán mayor cantidad de impurezas en los cátodos. Se recomienda mantener la suma

de todas las impurezas solubles a una concentración inferior a los 20 g/l de impurezas solubles totales.

#### II.8. CÁTODOS DE COBRE RESULTANTES.

Los cátodos de cobre puro resultantes se venden en esta -- forma o se funden en hornos de reverbero, donde se lleva a cabo un proceso de fundición similar al de los ánodos. Debido a que el cobre fundido se cuela para obtener barras listas para el ro lado y estirado en alambres, los hornos reciben la denominación "hornos de barras", también conocidos como "hornos de refinado" pero estos son nombres inapropiados que se les han dado en el - argot común de las plantas. El proceso de inyección de aire en el cobre fundido se lleva a cabo cuidadosamente con el objeto - de ajustar el contenido de oxígeno en el punto adecuado, el -- cual se determina con exámenes microscópicos y macroscópicos de muestras solidificadas antes de obtener las barras por cola- do del cobre fundido.

En la actualidad las compañías fabricantes de latón y bron ce usan hornos eléctricos y como consecuencia la fabricación de latones y bronces se hace casi exclusivamente con cátodos como carga a sus hornos, ahorrándose el costo de fundición que --- tienen las refinerías. El cátodo del proceso en serie es de ta- maño más adecuado para su uso directo en los hornos; mientras - que el cátodo del sistema múltiple generalmente se corta en --- seis piezas antes de cargarlo a dichos hornos.

#### II.9. TRATAMIENTO DE LOS LUDOS ANÓDICOS.

Los lodos anódicos, son un producto concentrado de las im- purezas insolubles presentes en los ánodos, conteniendo algo de cobre como ya se explicó anteriormente y estos lodos anódicos - son valiosos por su contenido en metales nobles.

Los lodos filtrados en los filtros prensa forman una torta densa conteniendo alrededor del 35% de humedad. El cobre se elimina convirtiéndolo primero a óxido tostando los lodos a -- 300°C y luego lixiviándolos con una solución de ácido sulfúrico al 10%. Actualmente, en lugar de tostarlos, se sopla aire - caliente para oxidarlos. Cualquiera de los dos tratamientos reduce el contenido de cobre a menos del 1%. Los lodos lixiviados, son filtrados nuevamente, lavados, secados, tamizados y luego fundidos en un horno de reverbero pequeño donde los metales no nobles se eliminan como escoria. Si hay plomo presente, forma una escoria de plomo que se desnata. El antimonio se oxida y también se disuelve en la escoria de plomo, aunque una pequeña cantidad se va con los pulvos de la chimenea. Estas escorias se envían a una refinería de plomo donde se tratan para recuperar el plomo y el antimonio y algo de plata que se queda en ellos. El selenio y el telurio son parcialmente volatilizados, pero la mayor parte queda en un flujo alcalino que consiste de nitrato de sodio, carbonato de sodio y de hidróxido de - sodio. Las escorias alcalinas se tratan para recuperar la plata, el oro y pequeñas cantidades de arsénico. Este tratamiento usualmente se lleva a cabo dentro de la refinería de cobre. Este horno produce esencialmente placas con oro y plata que también pueden contener platino y paladio. A estas placas se les da el nombre de metal "Doré" y sirven para la recuperación de oro y plata.

El Doré puede tratarse con ácido sulfúrico o con un método electrolítico. En el método de apartado con ácido, el Doré se hierve con ácido sulfúrico de 66°Bé (96-98%) en recipientes de fierro fundido. El sulfato de plata en solución se sifonea dentro de un tanque con agua y la solución se lleva a - ebullición introduciéndole placas de cobre que cuelgan en el tanque para cementar la plata en solución. La plata precipita se lava, seca y funde y luego se vacía en moldes para obtener la plata refinada.

Los lodos filtrados en los filtros prensa forman una torta densa conteniendo alrededor del 35% de humedad. El cobre se elimina convirtiéndolo primero a óxido tostando los lodos a -- 300°C y luego lixiviándolos con una solución de ácido sulfúrico al 10%. Actualmente, en lugar de tostarlos, se sopla aire caliente para oxidarlos. Cualquiera de los dos tratamientos reduce el contenido de cobre a menos del 1%. Los lodos lixiviados, son filtrados nuevamente, lavados, secados, tamizados y luego fundidos en un horno de reverbero pequeño donde los metales no nobles se eliminan como escoria. Si hay plomo presente, forma una escoria de plomo que se desnata. El antimonio se oxida y también se disuelve en la escoria de plomo, aunque una pequeña cantidad se va con los pulvos de la chimenea. Estas escorias se envían a una refinería de plomo donde se tratan para recuperar el plomo y el antimonio y algo de plata que se queda en ellos. El selenio y el telurio son parcialmente volatilizados, pero la mayor parte queda en un flujo alcalino que consiste de nitrato de sodio, carbonato de sodio y de hidróxido de sodio. Las escorias alcalinas se tratan para recuperar la plata, el oro y pequeñas cantidades de arsénico. Este tratamiento usualmente se lleva a cabo dentro de la refinería de cobre. Este horno produce esencialmente placas con oro y plata que también pueden contener platino y paladio. A estas placas se les da el nombre de metal "Doré" y sirven para la recuperación de oro y plata.

El Doré puede tratarse con ácido sulfúrico o con un método electrolítico. En el método de apartado con ácido, el Doré se hierve con ácido sulfúrico de 66°Bé (96-98%) en recipientes de fierro fundido. El sulfato de plata en solución se sifonea dentro de un tanque con agua y la solución se lleva a ebullición introduciéndole placas de cobre que cuelgan en el tanque para cementar la plata en solución. La plata precipitada se lava, seca y funde y luego se vacía en moldes para obtener la plata refinada.

Los metales nobles quedan formando un lodo que servirá como materia prima para su recuperación.

A continuación, se presenta una tabla con la composición -- promedio de diferentes tipos de cobre.

TABLA II.3

<u>COMPONENTE</u>	<u>% EN BLISTER</u>	<u>% EN ANODOS</u>	<u>% EN CATODOS</u>
Cobre	99.014	99.422	99.98
Oxígeno	0.691	0.154	---
Azufre	0.0185	0.0026	---
Arsénico	0.0464	0.0435	0.001
Plomo	0.0039	0.0042	---
Selenio	0.0184	0.0176	0.0003
Teluro	0.0122	0.0122	0.0002
Níquel	0.014	0.0144	0.001
Plata	1980 g/ton	1950 g/ton	---
Oro	9.25g/ton	9.25g/ton	---

## CAPITULO III.

### NATURALEZA DEL ELECTROLITO

#### III.1. GENERALIDADES.

El electrolito es el componente imprescindible que determina la naturaleza del depósito catódico en cuanto a pureza y economía en la operación. Por lo tanto, las variables que lo afectan deberán controlarse estrictamente para obtener un cobre con pureza y costo óptimos.

Las principales variables a controlar en el electrolito son: concentración de ácido sulfúrico y ión cúprico, temperatura y velocidad de circulación dentro de las celdas. Con la descripción de las propiedades del electrolito llegaremos a la conclusión de que se trata de un fluido sumamente agresivo, de tal forma que el material de construcción para tuberías y recipientes, tendrá que ser resistente a la corrosión causada por el ácido y el ión cúprico.

#### III.2. PREPARACION DEL ELECTROLITO.

El electrolito usado en las refinerías de cobre de todo el mundo, es muy semejante en su composición independientemente de si se usa en el sistema múltiple o en serie.

La preparación del electrolito se lleva a cabo disolviendo sulfato de cobre pentahidratado ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), para obtener una concentración del orden del 3 al 4% de ión cúprico que corresponde a aproximadamente a un valor de 35 a 45 g/l de este ión, correspondiente a 137-139 g/l de sulfato de cobre pentahidratado.

La concentración del ácido sulfúrico varía desde 120-180 g/l, y es necesario agregar una cantidad diaria de ácido nuevo para compensar la pérdida de ácido utilizado en la formación de los sulfatos solubles. Una pequeña cantidad de ión cloruro de --

0.02 a 0.03 g/l, se adiciona para precipitar el antimonio, el bismuto y la plata.

La experiencia ha demostrado que ciertos compuestos orgánicos añadidos al electrolito mejoran la calidad del depósito pues actúan como agentes de superficie. Es por esto que al electrolito se le añaden pequeñas cantidades de cola, sulfonatos derivados del petróleo o aceites emulsificantes.

### III.3. COMPOSICION TIPICA.

La formación de las impurezas solubles, dentro de la operación cotidiana, provocan una degradación constante del electrolito, el cual va perdiendo sus características iniciales. A partir de las impurezas solubles de los ánodos, la composición se vuelve compleja por la presencia de éstas. Al cabo de cierto tiempo, será necesario eliminar impurezas que abaten la eficiencia de la operación.

La tabla III.1, muestra los límites de composición del electrolito bajo una operación normal.

TABLA III.1

#### LIMITES DE COMPOSICION DEL ELECTROLITO EN LA REFINACION DEL COBRE

<u>COMPONENTE</u>	<u>CONCENTRACION (g/l)</u>
Acido libre, $H_2SO_4$ . . . . .	180 - 220
Cobre . . . . .	38 - 45
Mfquel . . . . .	6 - 10
Arsénico . . . . .	4 - 12
Antimonio . . . . .	0.4 - 0.6
Fierro . . . . .	0.2 - 1.2
Cloro (como cloruro) . . . . .	0.02- 0.053

#### ELEMENTOS DE ADICION

Cola . . . . .	0.0570 kg/ton
Goulac . . . . .	0.0283 kg/ton
HCl . . . . .	0.2250 kg/ton

El fluido con estas características tiene un peso específico que varía entre 1.24 y 1.28.

El resultado de la disolución del ánodo en el proceso electro-lítico acarrea dos tipos de impurezas: las solubles que como ya se mencionó forman parte del electrolito y las insolubles que forman lo que se conoce como lodo anódico, de alto valor ya que está formado de oro y plata principalmente. En la tabla III.2, se presenta una relación de impurezas para mostrar, en porcentaje relativo, el contenido de estos contaminantes.

TABLA III.2.

DISTRIBUCION APROXIMADA DE LAS IMPUREZAS EN LOS ANODOS DE COBRE.

<u>IMPUREZA</u>	<u>LODO ANODICO %</u>	<u>ELECTROLITO %</u>
Oro . . . . .	100	-----
Plata . . . . .	100	-----
Plomo . . . . .	100	-----
Níquel. . . . .	5	95
Hierro. . . . .	----	100
Arsénico. . . . .	40	60

Pequeñas cantidades de selenio y telurio también forman parte del lodo anódico.

III.4. IMPORTANCIA DEL CONTROL DE VARIABLES.

El electrolito se calienta y se circula en las celdas, lo cual tiene ciertas ventajas. Elevando la temperatura, se disminuye la resistencia eléctrica del electrolito, con un coeficiente de resistencia que disminuye 0.9% por grado centígrado de elevación de temperatura.

Más importante aún, es el hecho de que se mejoran las condiciones de las celdas, ya que el depósito catódico es más firme y denso, y el consumo de los ánodos es más uniforme. La temperatura ideal comprobada es de  $55 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

El electrolito caliente, sin embargo, aumenta la corrosión química de los ánodos, de tal forma que el sulfato de cobre del electrolito aumenta su concentración con el tiempo. El cobre no es soluble en ácido sulfúrico diluido, pero cuando la solución tiene disuelto oxígeno, como ocurre con la circulación de electrolito necesario para el proceso, el oxígeno disuelto causa disolución de cobre tanto catódico como anódico, la cual aumenta a temperaturas mayores. El ácido disuelve al cátodo tanto como al ánodo de tal forma que se puede llegar a disolver hasta el 2% del depósito, lo cual disminuye la eficiencia de depósito catódico.

Al elevar la concentración del ácido, disminuye la resistencia de la solución y así mismo, la solubilidad del sulfato de cobre, por efecto de ión común los sulfatos de cobre, níquel y ferroso, aumentan la resistividad de la solución. Sin embargo el éxito de la operación depende de la aportación constante de iones cúpricos a los cátodos, ya que de otro modo se generará hidrógeno y disminuirá la eficiencia de depósito catódico. Por otra parte, el cobre se disuelve en los ánodos de tal forma que la solución que hay en sus proximidades se encuentra más concentrada y el sulfato de cobre podría cristalizar en los ánodos si la proporción de ácido se eleva demasiado y consecuentemente el ánodo dejará de funcionar como soluble para hacerlo como insoluble elevando el voltaje de operación. Este fenómeno permite hacer notar la importancia de que la solución circule constantemente para asegurar una concentración uniforme de iones cúpricos en el electrolito y la presencia de iones cúpricos en el cátodo.

Hay que evitar al mismo tiempo, una circulación excesiva, ya que se impedirá el asentamiento de los áodos anódicos en el fondo de las celdas y su depósito mecánico en los cátodos. En la mayoría de las refinerías del mundo, se acostumbra ajustar la velocidad de flujo en las celdas electrolíticas a un promedio de 12 a 16 lpm.

Por medio de bombas centrífugas, la solución se envía a las celdas de operación, aunque en otras refineras el bombeo se hace a un tanque elevado que distribuye el electrolito a las celdas por gravedad. Esta práctica se ha generalizado para introducir la solución por el fondo de las celdas y verter la solución que se enfrió parcialmente por la parte superior. En esta forma, el flujo del electrolito está en contracorriente con el asentamiento del lodo anódico. Si el flujo es suficientemente alto, se originará una flotación de los lodos de tal forma que se considera conveniente no sobrepasar una velocidad de circulación de --- 19 lpm.

Kern y Chang (1922), en sus estudios, observaron que el --- arsénico, el níquel y el hierro en el electrolito de sulfato de cobre-ácido sulfúrico, disminuyen el valor de la conductividad - por lo que recomendaron un electrolito con valores de 30 a 35 -- g de Cu/l y hasta 175 g de  $H_2SO_4$ /l, conservando la concentración de níquel y hierro lo más baja posible.

Fink y Philipp (1926), observaron que una temperatura elevada y una concentración hasta de 200 g de  $H_2SO_4$ /l, reducen la polarización anódica así como la caída de voltaje en el electrolito, en tanto que el contenido de sulfato de cobre, disminuye la polarización de los electrodos, pero eleva la caída de voltaje. Si a la solución se le añade una pequeña cantidad de agente de superficie, aumenta enormemente la polarización catódica, pero no afecta a la anódica ni a la caída de potencial.

Rouse y Aubel (1927), analizaron las tensiones en las pilas de refinado para los sistemas múltiple y en serie. Skowronski (1927), al igual que Rouse, no encontró indicios de disminución de potencial por la adición de cantidades variables de --- níquel al electrolito.

El cloro como cloruro, es un elemento de importancia, ya - que actúa como despolarizador del cátodo y sirve tanto como --- agente eléctrico como químico. Rouse señala que el cloro actúa sobre la superficie de los electrodos, en vista de que 5 mg/l, producen un depósito de excelente calidad.

Para un electrolito específico que contenga sulfato de níquel, hierro férrico o ferroso, arsénico, cloruro y otras sustancias, la adición de sustancias que aumentan la resistividad, disminuye también la polarización hasta un punto límite, a partir del cual, nuevos aumentos de concentración aumentan la polarización.

La cola o los agentes de superficie tienden a formar películas coloidales en la superficie de los electrodos. En el cátodo, el cobre se deposita sobre la película formada lo que genera un gran aumento de la polarización catódica, disminuyendo el tamaño de los cristales. En el ánodo la disolución del cobre elimina la capa coloidal eliminando así la polarización anódica.

### III.5. CORROSIVIDAD DEL ELECTROLITO.

Los tres componentes presentes en el electrolito que lo hacen extremadamente agresivo ante cualquier material de construcción, especialmente metálico son:

- Ácido sulfúrico libre, cuya corrosividad hacia los metales es conocida y sólo la soportan el plomo, algunos aceros inoxidables, el vidrio y los materiales plásticos.

- Ión cúprico, que es un ión oxidante muy activo que al tratar de obtener los electrones que requiere para pasar al estado de cobre elemental, oxida a algunos componentes metálicos de las aleaciones.

- Oxígeno disuelto en el electrolito por saturación a partir de oxígeno atmosférico y por posibles entradas de aire a través de los estoperos de las bombas que hacen circular el electrolito en las celdas, volviéndolo muy oxidante.

Estos tres componentes aunados a la temperatura 50-60°C y al flujo de electrolito de 13-15 lpm, exigen que los materiales de la tubería y recipientes posean una adecuada resistencia a la corrosión.

En un principio, se utilizaron cubas, tubería y recipientes

de plomo dulce. En la actualidad se utiliza plomo antimoniado al 6%, el cual tiende a ser substituído por materiales plásticos -- por ser más baratos y brindar el mismo servicio.

En el siguiente capítulo, se tratará con detalle a los materiales de construcción para el equipo de la refinería existentes en el mercado y su resistencia a la corrosión

## CAPITULO IV

### ESTUDIO Y SELECCION DE MATERIALES.

#### IV.1. GENERALIDADES

El estudio y evaluación de materiales es un paso importante hacia el diseño de un sistema y cuando se realiza sistemáticamente, evita errores y propicia ahorros de tiempo y dinero.

El análisis se inicia al definir el funcionamiento básico del sistema a diseñar, conducción del electrolito, pero deben de tomarse en cuenta ciertas variables que escapan al resultado estricto de los números y que deben garantizar la seguridad del -- proceso y sus operadores así como la integridad física y química del fluido. Resulta obvio que se tienen que integrar la funcionalidad del sistema con un estricto análisis que conduzca a la selección del material que brinde seguridad de operación y la durabilidad razonable que se traduce en rentabilidad económica.

El diseño y estudio de materiales son dos factores inseparables que si se les brinda la atención adecuada darán un excelente resultado pues la experiencia ha mostrado que cuando hay --- buenos materiales pero mal diseño, el proceso sufrirá daños considerables tanto en producto como en equipo. El caso inverso, en el que el diseño es bueno pero los materiales no se escogen adecuadamente, acarrea consigo altos riesgos de trabajo, contaminación del fluido, mantenimiento frecuente y sustitución de piezas lo cual implica altos costos de mantenimiento y a corto plazo, - la inversión inicial "aparentemente económica" habrá ocasionado gastos considerables.

En la actualidad, se fabrican tuberías y accesorios de los más diversos materiales, teniéndose una amplia gama dentro de la cual podrá encontrarse el material adecuado para cualquier proceso.

Las características que se requieren del material para la tubería que conducirá el electrolito serán principalmente de resistencia química, ya que la agresividad de la solución ácido -- sulfúrico-sulfato de cobre es elevada. Por lo que respecta a propiedades mecánicas, no se requieren características especiales, ya que se trata de un fluido a baja presión, alto gasto y a una temperatura que no afecta las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de construcción, pero que si aumenta la velocidad de corrosión.

Se pueden hacer dos grandes grupos para estudiar los distintos materiales que se emplean para la fabricación de tubería: -- los metálicos y los no metálicos. A continuación se hace un breve análisis de los materiales para fabricación de tubería más comunes en el mercado.

#### IV.2. ANALISIS DE RESISTENCIA A LA CORROSION Y VELOCIDAD DE CORROSION.

Dentro del análisis de materiales de construcción que a continuación se presenta, se exponen sus principales características físicas y químicas.

Los valores de resistencia a la corrosión que se presentan, son solamente para estrechar el rango de selección. Es por ello, que en algunos casos sólo se expresará si el material se recomienda o no para la conducción del electrolito, de acuerdo a los criterios tomados del Chemical Engineers Handbook, Perry, capítulo 23, 5ª. edición.

#### IV.3. MATERIALES FERROSOS Y SUS ALEACIONES.

##### IV.3.1. ACERO.

El acero al carbón es el material más barato, común y versátil usado en la industria; presenta una extraordinaria ductibilidad

dad que le permite ser trabajado en frío. Es un material que puede ser soldado con facilidad y con bajo porcentaje de defectos de soldadura. Su densidad es aproximadamente de dos tercios de la del plomo, pero es tres veces más denso que el aluminio. Para aceros templados de bajo contenido de carbón (0.2% en C), el esfuerzo a la tensión tiene valores de aproximadamente ---- 3900 kg/cm<sup>2</sup>. Para aceros templados con alto contenido de carbono (0.4% en C), el esfuerzo a la tensión alcanza valores de --- 7030 kg/cm<sup>2</sup>. El acero trabajado en frío resiste una fuerza de empuje superior a los 12650 kg/cm<sup>2</sup>.

A través de los años, se han desarrollado varios tipos de aceros al carbón, como por ejemplo, los aceros para recipientes a presión.

Existe un gran número de estándares y especificaciones para acero al carbón en todas sus presentaciones. La ASTM, publica especificaciones de diversos materiales de construcción expresando con detalle los valores de las propiedades que se deben cumplir, así como su composición química. El AISI, también publica especificaciones sobre aceros al carbón así como otros institutos como la ASME, AINSI y el API.

La resistencia a la corrosión de los aceros, depende de la formación de una película superficial de óxido; sin embargo, dicha resistencia es limitada ya que no resiste el contacto con -- ácidos diluidos, pero sí resiste al ácido sulfúrico concentrado (98%) a temperaturas superiores a 60°C. Para concentraciones entre el 80 y el 90% da un servicio aceptable a temperaturas iguales o menores a 25°C. Por abajo del 80% no se recomienda a ninguna temperatura.

El acero al carbón no resiste la solución de ácido sulfúrico-sulfato de cobre a 60°C por su agresividad.

#### IV.3.2. HIERRO FORJADO.

Es un tipo de aleación que contiene pequeñas cantidades de

silicato de fierro, que se encuentra en fase heterogénea formando fibras que le dan ductilidad y buena resistencia a la fatiga y al impacto. El hierro forjado tiene cerca de 3% de silicato de fierro, 0.02% de carbono, 0.12% de sílice, 0.03% de manganeso, 0.12% de fósforo y 0.02% de azufre. El contenido de manganeso puede llegar hasta el 0.06% y se puede modificar con un 3.25% de níquel y en otro caso hasta con 1% de manganeso.

Su resistencia a la corrosión es un poco mayor que la del acero al carbón, y se comporta aceptablemente contra la corrosión atmosférica y subterránea por lo que se usa en líneas de agua. Una teoría propone que las fibras de silicato frenan la corrosión y evitan que se pique el material. Puede manejar soluciones alcalinas, pero en soluciones se corroe muy fácilmente. Los valores reportados de velocidad de corrosión son similares al de acero al carbón, por lo tanto no se recomienda para el manejo del electrolito.

#### IV.3.3. ACEROS DE BAJA ALEACION.

Son aceros a los que se les adicionan pequeñas cantidades de agentes de aleación para mejorar sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión. Presentan mayor resistencia a la corrosión que los aceros al carbón y su composición típica es: 0.4% de carbono, 0.7% de manganeso, 1.85% de níquel, 0.8% de cromo y 0.25% de molibdeno. Se emplean otros agentes de aleación para producir de aceros de baja aleación como lo indican las normas del AISI. El níquel aumenta su tenacidad y le imparte propiedades de resistencia a bajas temperaturas y al ataque corrosivo. El cromo y el silicio le suministran dureza, resistencia a la abrasión, resistencia a la corrosión y a la oxidación. El molibdeno le da resistencia a altas temperaturas.

La tensión que pueden resistir estos materiales, es del orden de 5300 a 8800 kg/cm<sup>2</sup>, pero con tratamiento térmico se les puede dar una resistencia hasta de 15800 kg/cm<sup>2</sup>. La forma de trabajarlo, soldarlo y maquinarlo, es semejante a la utilizada con

los aceros al carbón.

La adición de pequeñas cantidades de otros metales mejora notablemente su resistencia a la corrosión ambiental. A pesar de lo anterior, su resistencia a fluidos corrosivos es sólo ligeramente mayor que la del acero al carbón. Su gran ventaja está basada exclusivamente en su resistencia mecánica, ya que permiten espesores de tubería sensiblemente menores.

El ácido sulfúrico lo ataca severamente, con velocidades de corrosión semejantes a las del acero al carbón frente a la solución de ácido sulfúrico-sulfato de cobre.

#### IV.3.4. HIERROS DE MOLDEO.

Este tipo de aleaciones no son las más fuertes ni las más resistentes tanto física como químicamente, pero sí son las más usadas en la industria.

Existen varios tipos, entre los cuales se cuenta al hierro gris que es una combinación de carbono, sílice, magnesio y --- fierro. El carbono en forma de grafito, es un elemento indispensable para determinar su resistencia física a la tensión; además tiene la capacidad de absorber vibraciones, pero su resistencia al impacto es muy baja. Se le ha clasificado como un material -- sin resistencia a la corrosión atmosférica y con mayor razón, a la ocasionada por fluidos ácidos o alcalinos de baja concentración; pero en altas concentraciones resiste estos fluidos satisfactoriamente.

No se recomienda para la conducción del electrolito, pues éste lo atacaría severamente.

Otra variedad es el hierro de moldeo blanco, que es quebradizo y difícil de maquinarse. Se fabrica controlando la velocidad de solidificación del hierro fundido y su valor de velocidad de corrosión es el mismo que el del hierro gris.

El hierro maleable tiene una disposición especial de carbono que le da la ductibilidad que lo caracteriza. Su resistencia a la corrosión del electrolito es igual a la del hierro gris.

El hierro dúctil tiene una buena resistencia física, tenacidad y maquinabilidad. Contiene carbono disperso y en nódulos de 3.7%, razón por la cual es distinto al hierro gris. Hay muchos grados de hierro dúctil; unos son de buena ductibilidad y tenacidad, y otros de buena resistencia a la oxidación. Su resistencia a la corrosión del electrolito es sólo ligeramente superior a la del hierro gris, pues su resistencia a la temperatura es mayor.

Un buen grupo de hierros moldeables pueden quedar dentro de la clasificación de hierros aleados, los cuales pueden ver aumentada su resistencia a la corrosión del electrolito hasta en un 20%.

#### IV.3.5. HIERRO AL ALTO SILICIO.

Es un material de elevada resistencia a la corrosión. Su contenido de silicio es de 14.5% y sus nombres comerciales son Duriron y Corrosiron. Si se le agrega un 4% de cromo, se obtiene el material llamado Durichlor.

A pesar de su extraordinaria resistencia química, es un material con poca resistencia mecánica ya que es duro y quebradizo y por lo tanto su resistencia al impacto es baja, además es un material difícil de maquinar, y para la fabricación de tubería se debe vaciar directamente en moldes ya que es difícil soldarlo, sobre todo si contiene cromo, en cuyo caso requiere de un tratamiento térmico.

Presenta un excelente servicio y ambientes y fluidos oxidantes y reductores. Resiste al ácido sulfúrico en todas las concentraciones y aún a la temperatura de ebullición. Los que contienen cromo se recomiendan especialmente para ácido clorhídrico y otros fluido sumamente agresivos.

Resiste satisfactoriamente el electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre con velocidades de corrosión que oscilan entre 0.0025 y 0.005 cm/año. Tiene la ventaja de dar un buen servicio en procesos que requieren resistencia a la corrosión y a la erosión.

#### IV.3.6. ALEACIONES DE NIQUEL.

Usando una composición de 82% de níquel, 3% de cobre, 9% de silicio y 2% de hierro, se obtienen una aleación que recibe el nombre de Hastelloy D que tienen mayor resistencia mecánica que el hierro al alto silicio y mejor estabilidad ante el shock térmico. Su maquinado es más fácil que el del hierro al alto silicio y se recomienda para todas las concentraciones de ácido sulfúrico, aún a la temperatura de ebullición; pero para fluidos que contengan ión cúprico como en el caso del electrolito, no se recomienda.

El Hastelloy C, con 5% de níquel, 28% de molibdeno y 6% de hierro, no se recomienda por su baja resistencia ante el ataque del ión cúprico. Su valor de velocidad de corrosión ante el electrolito es sensiblemente igual al del Hastelloy D.

Una aleación con níquel entre 13.5 y 36%, 6.5% de cobre, 3% de carbono y grafito y el resto de hierro, recibe el nombre de níquel resistente, que se recomienda para altas temperaturas y para el manejo del ácido sulfúrico frío, pero no es adecuado para el manejo del electrolito a 60°C pues sufre corrosión severa.

#### IV.3.7. ACEROS INOXIDABLES.

Existen más de setenta tipos de aceros inoxidable y otros tantos tipos de distintas aleaciones que se producen en forma templada (tipos A.I.S.I.) y las aleaciones de vaciado (tipos A.C.I.). Generalmente tienen al hierro como base, con cromo entre el 12 y el 30%, 22% de níquel y bajas cantidades de carbono, cobre, molibdeno, columbio, selenio, tantalio y titanio.

Estas aleaciones son conocidas y se utilizan en la industria por su elevada resistencia a la corrosión y a la temperatura, con pequeña contaminación al fluido y de fácil fabricación. Los aceros inoxidable se clasifican en tres tipos: martensíticos, ferríticos y austeníticos; a continuación se les describe brevemente.

Las aleaciones martensíticas contienen entre el 12 y 20% de cromo con cantidades precisas de carbono y otros aditivos. El SS-410, es un miembro típico de este grupo. Sus propiedades físicas se pueden mejorar por tratamiento térmico con un incremento en su resistencia a la tensión de 5600 a 14000 kg/cm<sup>2</sup>. Su resistencia química es menor que la de los austeníticos y se usa para manejar fluidos y ambientes poco corrosivos, como intemperismo de corrosividad mediana, agua y fluidos orgánicos, pero no son recomendables para el manejo de la solución electrolítica a 60°C.

Las aleaciones ferríticas, contienen de un 15 a un 30% de cromo y bajo contenido de carbono (0.1%). Su más alto contenido en cromo, le da alta resistencia a la corrosión. El tipo 430 es un ejemplo típico de este tipo de aleaciones que mejoran sus propiedades físicas trabajándolas en frío. Es sumamente dúctil en distintos grados dependiendo del tipo de aleación, lo cual determina su facilidad para maquinarlo a velocidades altas. La soldadura no presenta problemas cuando se trata de un operador experimentado. En general, se considera que su resistencia química es buena a pesar de que no se recomienda para ácidos reductores como el ácido clorhídrico. Para sustancias moderadamente corrosivas y medio oxidantes se puede usar sin problemas de corrosión. El tipo 430 se usa frecuentemente en plantas de ácido nítrico, pues resiste fluidos oxidantes a la ebullición. El ión cúprico lo puede atacar por lo que no se recomienda su uso para el manejo del electrolito.

Entre los aceros inoxidable, las aleaciones austeníticas son las más resistentes a la corrosión. Contienen de 16 a 26% de cromo y de 6 a 22% de níquel. La cantidad de carbono debe de mantenerse baja (0.08%) con objeto de minimizar la precipitación de carburos. Sus propiedades físicas se pueden mejorar mediante el trabajo en frío hasta un 350%, lo cual le da buenas propiedades de ductilidad. Se pueden fabricar bajo todas las normas establecidas, pero no son fáciles de maquinar ya que se requiere maquinaria muy especial, cortadores muy fuertes y altas velocidades.

Cuando se suelda, se presenta el problema de la precipitación -- del carburo de cromo, con lo que disminuye su resistencia a la -- corrosión. Esto se puede evitar mediante adiciones de titanio, -- columbio y tantalio como en los aceros 321, 347 y 348 respectiva -- mente. Un contenido bajo de carbono, también resuelve el proble -- ma como en los tipos 304L y 316L (la L significa low, bajo en -- carbono), cuyo contenido de carbono es de 0.03%.

Los tipos 316, 316L y 317 con un contenido de molibdeno en -- tre 2.5 y 3.5% son los que más resisten a la corrosión.

El tipo 18-8 es un acero austenítico que contiene cromo y -- níquel. Este acero resiste condiciones oxidantes debido a una pe -- lícula superficial de óxido que lo protege. Las condiciones re -- ductoras, destruyen la película y lo atacan rápidamente. Puede -- manejar ácido sulfúrico abajo del 5% y arriba del 85% de concen -- tración a temperaturas inferiores al punto de ebullición del áci -- do.

Para el manejo del electrolito, la resistencia a la corro -- sión del SS18-8 es muy semejante a la del SS316.

#### IV.3.8. ALEACIONES MEDIAS.

Son un grupo de aleaciones con mayor resistencia a la co -- rrosión que los aceros inoxidable. El miembro más popular de es -- te grupo es el "20 Alloy", producido por varias compañías con -- distintos nombres comerciales. Como ejemplo de este caso, tene -- mos el Durimet 20 que contiene 0.07% de carbono, 29% de níquel, -- 20% de cromo, 2% de molibdeno y 3% de cobre. Un tipo forjado ca -- si idéntico es el Worthite con una composición de 24% de níquel -- y 20% de cromo. Originalmente, estas aleaciones se desarrollaron -- con el objeto de encontrar materiales más resistentes en toda la -- gama de concentraciones del ácido sulfúrico a temperaturas infe -- riores a 79°C. Además, resisten ácido nítrico frío hasta un 60% -- y 96°C, ácido fluorhídrico frío hasta un 20%, pero el clorhídri -- co lo ataca. El Incoloy 825, contiene 40% de níquel, 21% de cro --

mo, 3% de molibdeno y 2.25% de cobre; es muy resistente a los ambientes oxidantes o reductores. Es resistente a cualquier concentración de ácido sulfúrico a temperatura ambiente y arriba del 75% de concentración, lo resiste hasta 79°C. Como ejemplo de este grupo está el Worthite, que puede usarse para el electrolito, con un valor de velocidad de corrosión del orden de 0.012 cm/año. El Chlorimet 2, contiene 63% de níquel, 32% de molibdeno y 3% de cobre; tiene buena resistencia mecánica y térmica, pero falla ante medios oxidantes como en el caso del electrolito. El Chlorimet 3, es una variación del Chlorimet 2, contiene 18% de cromo, lo que lo hace muy resistente a los medios oxidantes y reductores.

El Chlorimet 2, se recomienda para manejar el electrolito porque la acción del ión cúprico ocasiona un considerable deterioro. El Chlorimet 3, soporta medianamente la acción corrosiva del electrolito, pues da valores de corrosión un poco inferiores al Chlorimet 2. El Inconel 600 con 80% de níquel, 16% de cromo y 7% de hierro, se usa para la conducción de gases corrosivos y resiste al ácido sulfúrico en todas las concentraciones y a altas temperaturas. Sus valores de corrosión frente al electrolito son muy semejantes a las del Chlorimet 3.

#### IV.4. ALEACIONES NO FERROSAS

##### IV.4.1. NIQUEL Y SUS ALEACIONES.

El níquel es uno de los metales de mayor ductibilidad ya que se puede maquina y vaciar para producir cualquier pieza de equipo de proceso. Resiste muy bien los medios alcalinos como la sosa caústica en altas concentraciones. Así mismo, presenta buena resistencia a los solventes clorados, pero falla ante medios oxidantes como es el caso del electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre dando valores de velocidad de corrosión muy altos, por lo cual no es recomendable.

El Monel 400 es una aleación con 67% de níquel y 30% de cobre que supera a cada uno de sus semejantes en cuanto resistencia a la corrosión. Sin embargo, frente al electrolito, presenta valores no recomendables de velocidad de corrosión, principalmente -- ante la solución resultante del ácido sulfúrico saturado con el oxígeno de la atmósfera.

#### IV.4.2. ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio puro tiene una resistencia a la tensión de ---- 700 kg/cm<sup>2</sup>, pero se puede mejorar si se le trabaja en frío. A muy bajas temperaturas tiene excelentes propiedades físicas, pero su resistencia disminuye a partir de los 150°C. Resiste al ácido sulfúrico a concentraciones superiores al 99% pero no se recomienda para el manejo del electrolito.

Sus aleaciones se usan frecuentemente en piezas de maquinaria debido a sus excelentes propiedades mecánicas, pero carece de resistencia química, lo que lo hace inadecuado para manejar el -- electrolito.

#### IV.4.3. COBRE Y SUS ALEACIONES.

Son bien conocidas las propiedades de conductividad térmica y eléctrica que presentan el cobre y sus aleaciones. El cobre puro, tiene buenas propiedades físicas a temperaturas próximas a -200°C. No resiste sustancias oxidantes por lo que no se recomienda para el manejo del electrolito.

Los latones, son aleaciones de cobre y zinc con un contenido de este último que varía entre el 15 y el 40%. Su resistencia a la corrosión es baja.

Los bronce aventajan un poco las propiedades del latón, ya que al ser modificados con aluminio o silice, mejoran su resistencia a la corrosión pero no se recomiendan para soluciones tan oxidantes como el electrolito.

Los cuproníquelos con un contenido de níquel del 10 al 30%, son las aleaciones de cobre más resistentes a la corrosión. Se emplean principalmente en tubería para cambiadores de calor, pero es severamente atacado por fluidos oxidantes y por lo tanto no se recomiendan para el manejo del electrolito.

#### IV.4.4. PLOMO Y SUS ALEACIONES.

Existen tres grados principales para la especificación de plomo usado en la construcción de equipos y son: plomo químico, plomo ácido y cobre-plomo. La práctica metalúrgica ha demostrado que pequeñas cantidades de cobre y/o plata, mejoran sus propiedades físicas y químicas.

La aleación con antimonio produce un material con mejores características físicas y mecánicas que el mismo plomo, pues incrementa su dureza. Sin embargo, se disminuye su punto de fusión y no aventaja notablemente al plomo puro en cuanto a su resistencia química. Este material se usó y se sigue usando en las refinerías de cobre, tanto en las tuberías como en las cubas electrolíticas, pero su uso es cada vez menor debido a sus problemas de mantenimiento y costo. Es resistente al ácido sulfúrico diluido a temperaturas elevadas y su resistencia ante el ión cúprico es mediana. Por lo tanto, se trata de un material que brinda un servicio regular dentro de un periodo de tiempo aceptable.

La aleación con telurio se usa principalmente para moldeo y su resistencia a la corrosión se compara con la del plomo químico.

Los productos revestidos de plomo, se usan mucho ya que se combinan, por ejemplo, su resistencia química con la resistencia física del acero o la conductividad térmica del cobre. La combinación acero-plomo es muy usada en la industria química tanto en tanques como en tuberías y válvulas. Se recomienda para la conducción del electrolito, pero presenta el problema de que las fallas en la soldadura producen derrames de solución que producirán una corrosión rápida en el resto de las instalaciones.

El plomo químico, tiene una composición de 99.9% de plomo, - 0.06% de cobre y 0.006% de bismuto. El plomo antimoniado tiene -- 94% de plomo y 6% de antimonio. El plomo telurado se compone de - 99.85% de plomo, 0.04% de telurio y 0.06% de cobre.

#### IV.4.5. TITANIO.

Se ha convertido en un importante material de construcción, pues es fuerte y de densidad baja. Su resistencia a la corrosión es excelente en medios oxidantes y moderadamente reductores. La - aleación titanio-paladio, tiene una resistencia superior en me -- dios reductores; su resistencia a la corrosión del electrolito es buena. La dificultad para trabajarlo, su vulnerabilidad ante las fatigas, los problemas que representa el soldarlo y su alto costo lo hacen poco recomendable para el manejo del electrolito.

#### IV.4.6. ZIRCONIO.

Es un material que se desarrolló para aplicaciones en pla<sub>n</sub> - tas nucleares. Para esos fines se requiere un zirconio de alta pu - reza por la importancia que representa la absorción neutrónica, - pero para fines industriales, tiene normalmente un contenido de cadmio del 2.5%. Tiene inconvenientes de manejo como el titanio - incluyend<sup>o</sup> un costo elevado, pero su resistencia al electrolito - es buena ya que los valores de velocidad de corrosión reportados están próximos a 0.005 cm/año; sus aleaciones se conocen como --- "Zircaloyds".

#### IV.4.7. TANTALIO.

Sus propiedades físicas son semejantes a las de los aceros medianos o de aleación media a excepción del punto de fusión que es mayor en el tantalio. Es dúctil y fácil de trabajar, y por -- consiguiente, se puede usar para fabricar cualquier parte de un

equipo. Su soldadura no presenta problemas y es prácticamente --- inerte ante ácidos oxidantes y reductores, a excepción del ácido sulfúrico fumante. Su alto costo hace que su uso sea muy limi --- tado. Es resistente al electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre.

#### IV.5. MATERIALES NO METALICOS.

##### IV.5.1. VIDRIO.

El vidrio presenta excelente resistencia a todos los ácidos a excepción del fluorhídrico, pero está sujeto a ataques de álcalis calientes. Se aplica con frecuencia en procesos donde la --- transparencia es imprtante para realizar inspecciones. Sus princi --- pales defectos son tanto su poca resistencia al impacto como su - susceptibilidad al shock térmico. Sin embargo, cuando se trabaja como fibra reforzada con resina, compensa ampliamente estos defec --- tos Las líneas de tubería de vidrio puro resisten soluciones del tipo del electrolito a la temperatura de ebullición. Combinado -- con acero, acero vidriado, presenta la resistencia a la corrosión del vidrio y la resistencia física del acero, aunque sigue siendo vulnerable al shock térmico. Los valores de velocidad de corrosi --- ón reportados para líneas de vidrio, reafirman su resistencia, ya que son muy inferiores a los 0.002cm/año.

##### IV.5.2. MATERIALES PLASTICOS.

Una de las aplicaciones más comunes de los plásticos, es la fabricación de equipo de proceso y de tubería. debido a su buena resistencia a la corrosión frente a soluciones de sales inorgánicas. Sin embargo, no soportan adecuadamente el contacto con algunos solventes orgánicos como lo hacen los materiales metálicos. - Para servicios de alta presión y/o temperatura, tampoco compiten con el acero, pero estos inconvenientes se compensan por su faci ---

lidad de fabricación, instalación, ligereza, fácil mantenimiento y reemplazo además de ser buenos aislantes del calor y de la electricidad y tener una baja rugosidad. Generalmente son resistentes a soluciones de ácidos y/o sales inorgánicas, campo en el cual fallan la generalidad de los materiales metálicos. Además, éstos últimos se ven afectados por ligeros cambios de pH, mientras que los plásticos permanecen estables ante estos.

Los materiales plásticos se pueden dividir en dos grandes grupos: termoplásticos y termofijos. Los termoplásticos son aquellos que se pueden moldear y trabajar varias veces aplicando calor. Los plásticos termofijos son aquellos que bajo la acción del calor presentan degradación y es imposible trabajarlos una vez que curan o solidifican.

Para que los plásticos adquieran ciertas propiedades deseadas, se combinan con fibras que mejoran tanto su resistencia física como química.

El mecanismo de corrosión a que se ven sujetos los materiales plásticos es diferente al mecanismo electroquímico que sufren los metales, ya que se trata de una degradación por disolución o por reacción. El mecanismo de disolución se presenta cuando el fluido, orgánico generalmente, causa ablandamiento en la superficie de contacto y desprende el material, debilitando las paredes y ocasionando fallas. El mecanismo de ataque por reacción, se presenta cuando un fluido altera la estructura química del polímero lo que ocasiona un debilitamiento de la pared provocando fallas.

Ambos mecanismos se ven alterados por condiciones de presión y de temperatura; cabe hacer hincapié en que los plásticos son más sensibles que los metales ante un cambio en las condiciones de operación (presión, temperatura). Sin embargo, poseen cualidades amplias que los convierten en el competidor número uno de la industria siderúrgica y química.

#### IV.5.2.1. CLORURO DE POLIVINILO (PVC).

El cloruro de polivinilo rígido y no plastificado es un termoplástico de extraordinaria resistencia al ataque químico. La tubería que se fabrica con este material es extruída y los accesorios como codos, nipples, coples, bridas, etc., se fabrican por inyección en moldes, lo cual da como resultado que la densidad y la homogeneidad del material, tengan las características adecuadas para usarlo en tuberías.

En el mercado se encuentran disponibles tres tipos de tubería de PVC:

El tipo I (rígido), conocido también con el nombre de PVC -- Grado Impacto Normal con una resistencia máxima de  $140 \text{ kg/cm}^2$  para agua a temperatura ambiente. Dentro de esta clasificación se tienen dos grados conocidos como PVC 1120 y PVC 1220. Ambos grados tienen buenas características físicas hasta los  $72^\circ\text{C}$  y por su resistencia química se recomienda para usarlo con soluciones inorgánicas agresivas, como el caso del electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre.

El tipo II (flexible) es también conocido como PVC Grado Impacto Alto con tres grados principales: PVC 2110, PVC 2112 y PVC 2116. Sus propiedades de resistencia a la tensión, a la corrosión y a temperaturas altas, se ven afectadas en pro de la resistencia al impacto que proporciona un copolímero. De cualquier manera sus propiedades son aceptables y se recomienda cuando las condiciones de operación son poco severas y se requiere de un material resistente al manejo constante.

El tipo IV es el PVC de más reciente producción y se designa como PVC 4116. Sus propiedades de resistencia son semejantes al tipo II, y brinda una buena resistencia química.

Las normas que lo controlan están en el código ASTM standard D1785 y otros códigos como el de Departamento de Comercio de los Estados Unidos.

Para las condiciones del proceso de refinación de cobre, el PVC en general, es completamente resistente a la corrosión, lo cual lo hace un material viable de ser usado para manejar el electrolito. Su única limitante es el coeficiente de expansión térmica que es de  $0.0015 \text{ cm}^3/\text{C}$ , y la deformación que sufre a la larga cuando está expuesto a ciertas temperaturas, lo cual provoca un "colgamiento".

#### IV.5.2.2. POLIETILENO.

La tubería de polietileno se produce a temperaturas y presiones extremadamente altas. Se trata de un material termoplástico - que se produce en tres grados dependiendo principalmente de la presión y temperatura de polimerización, siendo:

Polietileno de baja densidad (PE I), que tiene un valor de densidad que varía entre  $0.91$  y  $0.925 \text{ g/cm}^3$  y presenta buena flexibilidad pero poca resistencia física. Se recomienda para la fabricación de mangueras.

Polietileno de densidad media (PE II), que tiene un valor de densidad de  $0.926$  a  $0.94 \text{ g/cm}^3$ . Es menos flexible que el de baja densidad, pero más resistente mecánicamente. Se recomienda para trabajos ligeros.

Polietileno de alta densidad (PE III), que tiene valores de  $0.941$  a  $0.965 \text{ g/cm}^3$ . No es tan flexible como los grados anteriores, pero su resistencia física es superior. Se recomienda principalmente para sistemas neumáticos y líquidos a presiones medias.

Los polietilenos pueden adquirirse en su forma transparente o con negro de humo que aumenta en un 2% su resistencia al intemperismo. No se recomienda para temperaturas superiores a los  $120^\circ\text{C}$ . Por su flexibilidad y su avizamiento ante ciertas temperaturas, la tubería de polietileno requiere que se soporte a todo lo largo, lo cual representa un gasto considerable.

No se recomienda para el manejo del electrolito, ya que aunque su resistencia química es mediana, presenta problemas de ----

ablandamiento a la temperatura del fluido que es de 60°C, y su alto coeficiente de expansión térmica, que es del orden de 0.0041 a 0.0076 cm/°C.

#### IV.5.2.3. ACRILONITRILLO-BUTADIENO-ESTIRENO (ABS).

La tubería que se fabrica de este material, se hace por inyección, moldeo a presión o extrusión, ya que se trata de un termoplástico obtenido por la combinación de los monómeros de acrilonitrilo, butadieno y estireno, dando un material color marfil que puede pigmentarse con colores especiales o con negro de humo --- (2%) para protegerlo contra los rayos ultravioleta que degradan el material.

Sus propiedades físicas son buenas ya que presenta tenacidad y resistencia a la presión. Su resistencia ante el electrolito es buena, pero como todos los termoplásticos, presenta problemas de expansión y ablandamiento ante la temperatura de operación.

#### IV.5.2.4. CELULOSA-ACETATO-BUTIRATO (CAB).

La celulosa obtenida por procesamiento de fibras de algodón y el acetato y butirato que son derivados petroquímicos, se unen para formar un terpolímero que se emplea en la fabricación de tuberías para albañales y conducción de crudos y gases de baja presión en la industria del petróleo. Se puede encontrar en el color natural o con negro de humo para protección contra los rayos ultravioletas.

Presenta buena resistencia química ante el electrolito aun - que, con el conocido problema del ablandamiento, que haría que -- los costos de soportaría fueran elevados.

#### IV.5.3. TERMOFIJOS.

Las resinas de más uso para fabricación de tubería termofija

son la epóxica y la poliéster. Este tipo de tuberfa generalmente se refuerza con fibra de vidrio o con fibra de asbesto azul y su fabricación puede hacerse bajo dos sistemas: moldeo centrífugo o embobinado que puede ser manual o automático.

En el moldeo centrífugo, las fibras desmenuzadas ya sean de vidrio o asbesto, se introducen en un molde cilíndrico que gira a alta velocidad. Una vez que se ha distribuido homogéneamente la fibra, se aplica la resina en suficiente cantidad para que impregne las paredes cubiertas de fibra y posteriormente se deja - endurecer (curar).

Para aumentar la resistencia de las fibras con resina se -- pueden aplicar capas de fibra de vidrio tejida denominada petatillo.

En el moldeo manual, se aplican múltiples capas de fibra impregnadas con resina a lo largo de un mandril rotatorio conocido como matriz de tubo.

El embobinado automático se lleva a cabo mediante un carro móvil que aplica las fibras impregnadas de resina con un movi -- miento de ida y vuelta sobre un mandril rotatorio.

La mayoría de estas resinas requieren de agentes curantes - (endurecedores), y una serie de aditivos que regulan el tiempo - de vida útil e imparten propiedades que mejoran la resistencia - de la tuberfa.

#### IV.5.3.1. RESINA EPOXICA.

Se fabrica a partir de epíclorhidrina y bisfenol-A, que al endurecer (curar) por la acción de un agente que normalmente es una poliamina, produce un material rígido y resistente. Se trata de una resina termofija que al combinarse con fibra de vidrio o asbesto, produce un material de excelente resistencia química y buena resistencia mecánica.

El desarrollo de las resinas epóxicas ha sido muy acelerado a partir de su descubrimiento en los años 30, y han encontrado -

un amplio campo de aplicación dentro de las más diversas áreas - de la industria, una de las cuales, es la fabricación de equipo de proceso, tubería y accesorios de fibra de vidrio-resina epóxi ca. La combinación de fibra y resina produce un material resis - tente a los ácidos no oxidantes, aunque su eficiencia disminuye ante ácidos fuertes u oxidantes.

Se recomienda para el manejo del electrolito ácido sulfúrico-sulfato de cobre siempre y cuando la temperatura no exceda a 90°C.

Su facilidad de instalación es una gran ventaja por la cono cida ligereza de los materiales plásticos y por su fácil ensag - blado que puede hacerse por medio de bridas del mismo material o mediante adhesivos.

#### IV.5.3.2. RESINA POLIESTER.

Posiblemente es la resina más usada para la fabricación de tubería, accesorios y equipos reforzados con fibra de vidrio por sus propiedades químicas y físicas y por su bajo costo.

La resina poliéster se obtiene por una polimerización de -- adición-condensación donde toman parte el estireno, el anhídrido maléico y un diol.

A su alrededor se ha desarrollado una amplia industria debi do principalmente a la facilidad con que se trabaja, a sus pro - piedades físicas y químicas y a su versatilidad, que permite fa - bricar desde utensilios para el hogar, hasta embarcaciones, ca - rrocerías de automóviles y equipo de proceso para la industria - química.

El manejo de la tubería poliéster-fibra de vidrio, es sencí llo debido a varios factores tales como: bajo peso en compara -- ción con las tuberías metálicas, fácil instalación, mantenimien - to y reemplazo, su disponibilidad en el mercado y bajo costo. Ca - be mencionar que existen varios grados de tubería de poliéster - dependiendo de las propiedades de la resina y los aditivos que -

se le agreguen, pero en general se puede establecer que dará un excelente servicio ante el electrolito a la presión y temperatura e operación.

#### IV.5.3.3. RESINAS DE FORMALDEHIDO.

Los materiales de fenol-formaldehído o alcohol furfurflico-formaldehído, son copolímeros que han dado buen servicio en la fabricación de equipo de proceso reforzado con fibra de vidrio.

La tubería que se obtiene de estos materiales es semejante en apariencia y resistencia a la epoxi y poliéster, variando sólo en algunos rangos de presión y temperatura y dependiendo desde luego, del fluido a manejar.

La tubería de fenol-formaldehído, tiene un comportamiento excelente ante soluciones de diversas concentraciones de ión cúprico y ácido sulfúrico a presión moderada y a una temperatura máxima de 150°C.

La tubería de alcohol furfurflico-formaldehído, se recomienda para el manejo del electrolito, pero su eficiencia y duración disminuyen a temperaturas mayores de 100°C, pero por las condiciones de operación que se tienen en el proceso de refinación, dará un buen servicio.

#### IV.5.3.4. RESINA VINIL-ESTER.

Esta resina termofija ha empezado a manejarse en los mercados de equipo de proceso por sus propiedades ante el ataque de la corrosión.

Se obtiene por la reacción que consiste en la modificación de las resinas epóxicas con ácido acrílico glacial para formar lo que se conoce como resina epoxi-ácrica o vinil éster.

Dará un buen servicio en el manejo de la solución electrolítica a su temperatura de operación, ya que se recomienda aún a temperaturas de 105°C para dicha solución.

#### IV.6. LISTA DE MATERIALES RECOMENDABLES.

En base a todo lo dicho anteriormente, se elaboró una tabla en la que se muestran los materiales recomendables para el manejo de electrolito y en la que se toma en cuenta como puntos básicos de selección la disponibilidad, el costo y el costo de instalación del material.

Estos puntos se califican de la siguiente manera:

A = Adecuado

NA = No adecuado.

Se puede entender por disponibilidad adecuada, la de aquellos materiales no escasos o raros que puedan ser surtidos oportunamente a lo largo de una instalación ( seis meses) y que se cuenta con facilidades para su reposición.

Referente a los costos, se puede entender por costo adecuado el que no rebase en un 20% el costo del material más barato.

TABLA IV.1  
SELECCION DE MATERIALES PARA LA TUBERIA DE CONDUCCION DEL  
ELECTROLITO

MATERIAL	DISPONIBILIDAD	COSTO DEL MATERIAL	COSTO DE INSTALACION
Hierro al alto silicio .	NA	NA	A
Hastelloy C. . . . .	A	NA	NA
Worthite . . . . .	NA	NA	A
Plomo. . . . .	A	A	A
Plomo antimoniado. . . .	NA	A	A
Titanio. . . . .	NA	NA	NA
Zirconio . . . . .	NA	NA	NA
Tantalio . . . . .	NA	NA	NA
SS316. . . . .	A	NA	A
Vidrio . . . . .	A	NA	NA
PVC. . . . .	A	A	A
Epoxi. . . . .	NA	A	NA

TABLA IV.1 (CONTINUACION)

MATERIAL	DISPONIBILIDAD	COSTO DEL MATERIAL	COSTO DE INSTALACION
Poliéster . . . . .	A	A	A
Fenol-formaldehído . .	NA	NA	A
Vinil-éster . . . . .	NA	NA	A

De esta tabla, se puede observar que el plomo, el PVC y el políéster fibra de vidrio, cumplen con los requerimientos necesarios para el manejo del electrolito y que el SS-316 y el plomo -- antimonioado cumplen con dos de los requerimientos.

Para la selección final del material, se considerarán los -- tres primeros materiales y el SS-316 ya que como se dijo anteriormente presenta características físicas que lo hacen un material viable para manejar el electrolito a pesar de su costo; en cuanto al plomo antimonioado no se considerará por ser de características semejantes al plomo y no tener una disponibilidad segura.

La selección final dependerá de factores tanto de diseño como económicos y es el objeto del siguiente capítulo.

## CAPITULO V.

### DISENO DEL SISTEMA DE CIRCULACION.

#### V.1. GENERALIDADES.

El diseño del sistema de circulación de electrolito ácido - sulfúrico-sulfato de cobre, se circunscribirá a calcular el diámetro de la tubería y a seleccionar el material más adecuado para el manejo del electrolito. Lo anterior se hará resolviendo la ecuación de costo total por medio de una técnica de optimización.

En casi todos los casos, las condiciones óptimas pueden en última instancia, ser reducidas a consideraciones de tipo económico. El diseño óptimo está basado en las condiciones que den el menor costo por unidad de tiempo, o la máxima utilidad por unidad de producción. Cuando se cambia una variable de diseño, se encuentra que algunos costos disminuyen mientras que otros aumentan. Bajo esta base, el costo total se hace mínimo para algún valor de la variable de diseño y este valor puede ser considerado como el óptimo.

Lo anterior se puede aplicar al presente trabajo ya que --- cuando aumenta el valor del diámetro, los costos de inversión -- aumentan mientras que los costos de operación disminuyen, de tal manera que para algún valor del diámetro la suma de estos dos -- costos se hace mínima y este valor es el que corresponde al diámetro óptimo.

En el capítulo anterior, se revisó una lista de materiales para fabricación de tubería seleccionándose el plomo, el cloruro de polivinilo (PVC), el poliéster fibra de vidrio (Bonstrand) y el acero inoxidable 316 (SS 316). Dicha revisión abarcó el aspecto técnico cuya principal consideración fue la resistencia a la corrosión del material, y el aspecto económico que abarcó la disponibilidad, el costo y el costo de instalación del material. En este capítulo se hará un estudio más estricto de ambos aspectos.

Sobre las bases anteriores, el procedimiento de cálculo de costos se llevará a cabo mediante los siguientes pasos:

- 1.- Para un material dado, se calcularán los costos de operación y de inversión obteniéndose un diámetro óptimo.
- 2.- El material que tenga el costo total mínimo será el que finalmente se seleccione.

El diámetro óptimo se define como aquel cuya suma de los -- costos anuales que importa la energía consumida (costos de operación), más el valor de la inversión efectuada es un mínimo; es decir, el diámetro óptimo debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$C_{am} + C_{oper} = C_{min} \quad (V.1)$$

en donde:

$C_{am}$  = Costos de amortización ( \$/año)

$C_{oper}$  = Costos de operación ( \$/año)

$C_{min}$  = Costo mínimo ( \$/año)

En la figura V.1, se representa gráficamente todo lo dicho anteriormente.

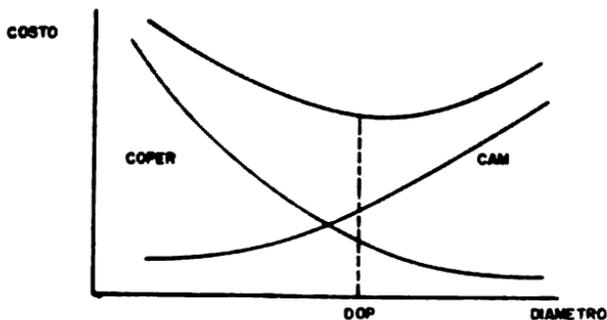


FIGURA V.1. Representación gráfica de la variación de costos y determinación del diámetro óptimo

En seguida, se desglosa cada uno de los sumandos en los distintos factores que los componen y el modo de calcularlos.

## V.2. COSTOS DE AMORTIZACION.

Los costos de amortización se calculan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C_{am} = C_d \cdot a \cdot L \quad (V.2)$$

en donde:

$C_d$  = Costo de la tubería instalada por metro lineal de tubería (\$/m lin.).

$a$  = Factor de amortización.

$L$  = Longitud de la tubería (m).

El factor de amortización ( $a$ ), al actuar sobre los costos de inversión nos da la anualidad. El caso más frecuente, es aquel en que se amortiza la inversión y sus intereses compuestos durante un periodo de años igual al tiempo previsto para la instalación. La expresión del factor de amortización es:

$$a = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (V.3)$$

en donde:

$i$  = interés

$t$  = tiempo de amortización (años)

## V.3. COSTOS DE OPERACION.

Los costos de operación son los debidos a la energía disipada al transportar el fluido de un punto a otro de la tubería. Esta pérdida se debe a la fricción del fluido con la tubería.

La expresión mediante la cual se calcula la energía requerida para transportar el fluido, se deduce del balance de energía - mecánica o ecuación de Bernoulli que expresada en Kwh es:

$$E = \frac{99.4283 Q h_f s_{gr}}{\eta} \quad (V.4)$$

en donde

E = Energía necesaria para vencer los rozamientos (Kwh)

Q = Flujo volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

h<sub>f</sub> = Pérdidas por fricción (m)

s<sub>gr</sub> = densidad relativa del electrolito

η = Eficiencia del sistema

Los costos de operación vienen dados por la siguiente expresión:

$$C_{op} = E C_{kw} n \quad (V.5)$$

en donde

C<sub>kw</sub> = Costo del kilowatt-hora (\$)

n = Factor de servicio (h/año)

El cálculo de las pérdidas por fricción (h<sub>f</sub>), se realiza -- por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = (f L/D + \sum K) \frac{0.08265 Q^2}{D^5} \quad (V.6)$$

El factor de fricción (f), se calcula con la ecuación de --- Churchill:

$$f = \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (V.7)$$

El Número de Reynolds y las constantes A y B se calculan de la siguiente manera:

$$Re = \frac{1.273 Q \rho}{D \mu} \quad (V.7a)$$

$$A = \left[ 2.457 \ln \frac{1}{(7/Re)^{0.9} + 0.37 \rho/D} \right]^{16} \quad (V.7b)$$

$$B = (37530/Re)^{16} \quad (V.7c)$$

El valor obtenido en la ecuación V.7, se debe de multiplicar por ocho para obtener el factor de fricción de Darcy que es el que se utiliza en los cálculos.

en donde:

D = Diámetro de la tuberfa (m)

K = Suma de las pérdidas por fricción debidas a accesorios (codos, tes, reducciones, etc.)

$\rho$  = Densidad del electrolito (Kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = Viscosidad del electrolito (Pa-s)

$\epsilon$  = Rugosidad del material (m)

Sustituyendo las ecuaciones V.2, V.4, V.5, V.6 y V.7 en la ecuación V.2, se obtiene la ecuación del costo total en función del diámetro. La expresión de esta ecuación es:

$$C_d a L + (f L/D + \sum K) \frac{0.08265 Q^3 s_{gr}}{D_{op}^5} n C_{kw} = C_{min} \quad (V.8)$$

en donde:

$D_{op}$  = Diámetro óptimo (m)

La ecuación V.8 se designa como función objetivo y como se puede observar, el diámetro está implícito. Este tipo de funciones son llamadas "funciones unimodales" ya que sólo se tiene que resolver la ecuación para una sola variable. Existen varios métodos para resolver este tipo de funciones siendo el Método de la Sección Dorada el más eficiente.

#### V.4. METODO DE LA SECCION DORADA.

Consideremos el problema de localizar un mínimo dentro de una tolerancia fija ( $\epsilon$ ), dado el intervalo,  $a \leq x \leq b$ , dentro del cual se sabe que existe al menos un mínimo local, esto es, que existe algún punto interior cuyo valor es menor que cualquiera de los extremos del intervalo; esta conclusión es independiente de cualquier propiedad especial que pueda tener la función. Una sólo evaluación de la función en algún punto interior, no nos permite estrechar el intervalo debido a que el mínimo puede estar localizado en cualquier lugar del intervalo,

Hagamos ahora una segunda evaluación en otro punto interior  $x_2$ ; esto puede dar lugar a tres situaciones:

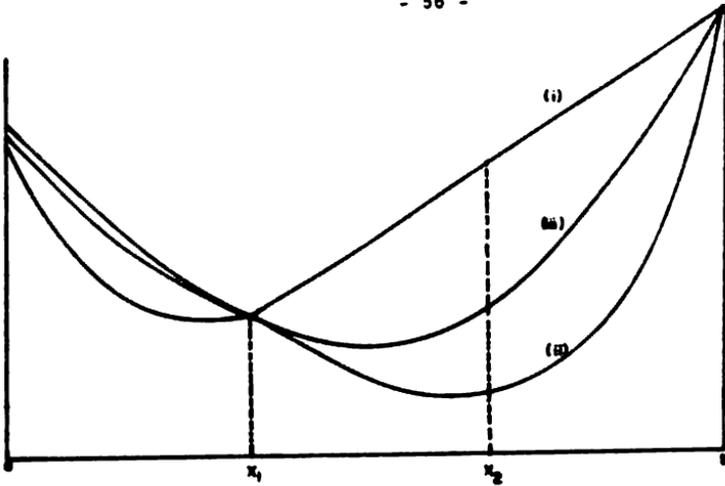
i.-  $f(x_2) > f(x_1)$ , en cuyo caso el intervalo  $[a, x_2]$  contiene el punto interior  $x_1$  con un valor de la función menor que en cualquier otro límite.

ii.-  $f(x_2) < f(x_1)$ , en cuyo caso el intervalo  $[x_2, b]$  contiene el punto interior  $x_2$  con la misma propiedad.

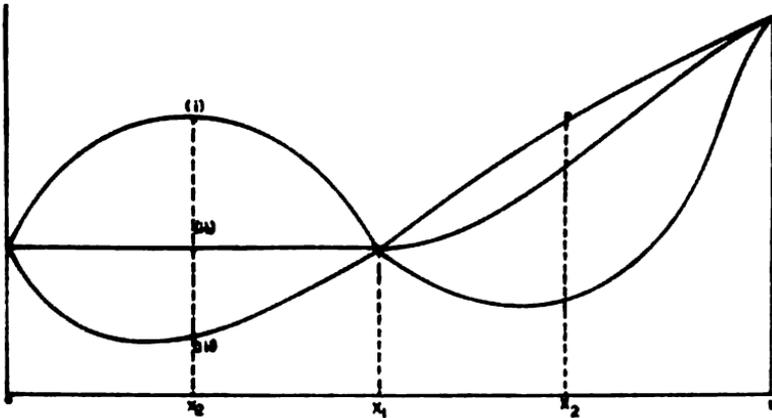
iii.-  $f(x_2) = f(x_1)$ , en cuyo caso el intervalo  $[x_1, b]$  conduce a la situación ilustrada en la figura V.2b, mientras que el intervalo  $[a, x_2]$  produce la imagen en el espejo de esta situación.

Para el caso mostrado en la figura V.2b, con  $f(x_1) = f(a)$ . la evaluación en  $x_2$  produce el intervalo  $[x_1, b]$  con las propiedades como en la figura V.2b. Para la evaluación en  $x_2$ , los casos (i) y (iii) dan como resultado un intervalo reducido similar al de la figura V.2a. En el caso de (ii), el intervalo  $[x_2, b]$  es de nuevo parecido al de la figura V.2b, pero el intervalo  $[a, x_1]$  -- conduce a una nueva situación en la cual los tres valores de la función son iguales.

Claramente, al hacer interpolaciones posteriores, se permitirá siempre la selección de subintervalos de uno de estos tres tipos: figura V.2a, figura V.2b o tres valores iguales de la función; por eso siempre será posible evitar la selección de un subintervalo en el cual, el punto interior tenga un valor de la función más grande que cualquiera de los puntos límite. De esta manera, se puede reducir el intervalo sistemáticamente a cualquier longitud deseada, simplemente con la comparación de los valores de la función.



(a) CASO NORMAL



(b) CASO DE IGUALDAD

FIGURA V.2. Representación gráfica de los casos que pueden resultar al hacer una segunda evaluación de la función

Hay varias maneras de seleccionar el segundo punto de interpolación en cada subintervalo siendo el Método de la Sección Dorada el más eficiente.

Este método, consiste en dividir la región de incertidumbre  $L_j$  (intervalo en el cual se encuentra la solución) en dos segmentos,  $L_{j+1}$  y  $L_{j+2}$  tales que

$$\frac{L_j}{L_{j+1}} = \frac{L_{j+1}}{L_{j+2}} = r \quad (V.9)$$

La relación  $r$ , se mantiene en todos los subsecuentes pasos de búsqueda de la solución. De la figura V.3, se observa que:

$$L_j = L_{j+1} + L_{j+2} \quad (V.10)$$

y de la ecuación V.9:

$$\begin{aligned} L_{j+1} &= r L_{j+2} \\ L_j &= r L_{j+1} = r^2 L_{j+2} \end{aligned} \quad (V.11)$$

simplificando se obtiene:

$$r^2 = r + 1 \quad (V.12)$$

que al resolverse, da una raíz positiva cuyo valor es:

$$r = 0.618$$

que nos indica donde poner el primer punto dentro de la región de incertidumbre

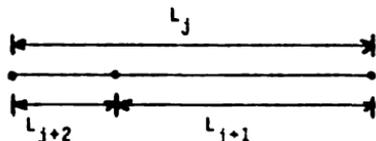


FIGURA V.3. Sección Dorada, primer paso.

Habiendo dividido  $L_j$  en dos segmentos y usando el valor de  $r$ , se puede dividir  $L_{j+1}$  en dos segmentos usando también  $r$  como se muestra en la figura V.4, de donde se puede ver que los dos puntos en la región de incertidumbre están colocados simétricamente, y esto será siempre lo mismo. Por lo tanto, una vez que el proceso de búsqueda ha comenzado, el segundo punto puede ser puesto siempre en la región de incertidumbre por simetría, lo cual hace innecesario el subsecuente uso del valor de  $r$ ; este proceso se continúa hasta que la región de incertidumbre se reduzca a un valor  $\delta$  (tolerancia).

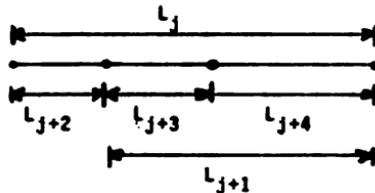


FIGURA V.4. Sección Dorada, segundo paso.

Este método fue programado en el Departamento de Ingeniería Básica del IMP y el diagrama de flujo se puede ver en el Apéndice A.

#### V.5. SELECCION DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.

Variables de diseño, son aquellas que determinan el criterio a seguir en el planteamiento del sistema físico resultante y se requiere una ponderación adecuada de cada una de ellas y de todas ellas en conjunto para llegar a un diseño óptimo.

##### V.5.1. VARIABLES ECONOMICAS.

Se refieren a todas aquellas que sumadas nos darán el costo de la inversión, estas son:

- a) Material de la tuberfa.
  - b) Costo de los materiales.
  - c) Longitud de la tuberfa.
  - d) Peso o cédula de la tuberfa.
  - e) Complejidad del sistema.
  - f) Método usado para unir la tuberfa.
  - g) Técnicas disponibles de fabricación y de montaje.
- A continuación se describen brevemente estas variables.
- a) Material de la tuberfa.

Como ya se mencionó en párrafos -  
anteriores el material seleccionado estará entre los siguientes:

- Plomo
  - Cloruro de Polivinilo (PVC)
  - Poliéster Fibra de Vidrio (Bonstrand).
  - Acero Inoxidable 316 (SS 316).
- b) Costo de materiales.

Debido a que el método de la -----  
sección dorada maneja valores no discretos del diámetro y a que  
los costos de los materiales se dan para valores discretos del -  
diámetro, es necesario contar con expresiones que sean capaces -  
de manejar los valores no discretos. Con este fin, se usó la téc  
nica de mínimos cuadrados para obtener dichas expresiones que se  
obtuvieron mediante el siguiente procedimiento:

b.1) Los costos tanto de tuberfa y de accesorios del plomo, PVC  
y SS 316 se obtuvieron de gráficas de costo contra diámetro ----  
(Guthrie y Peters & Timerhause). Los costos del poliéster fibra  
de vidrio se obtuvieron del fabricante (Amercoat de México S.A.)  
y los costos de la bomba que maneja el electrolito se obtuvieron  
también de una gráfica de costo contra potencia.

b.2) A los datos obtenidos en el inciso (b.1), se les aplicó la  
técnica de mínimos cuadrados para obtener la expresión que "me -  
jor" representara estos datos, obteniéndose los siguientes resul  
tados:

Para tuberfa, codos, tes y reducciones de plomo, PVC y ----  
SS 316 la ecuación que mejor ajusto los datos es:

$$\ln C = a + b \ln D + c/D + e D + f D^2 \quad (V.13)$$

Para poliéster fibra de vidrio las ecuaciones son:

Para tuberfa:

$$C = a + b D + c D^2 + d D^3 \quad (V.13a)$$

Para codos y reducciones:

$$C = a + b D + c D^2 + d D^3 + e D^4 + f \ln D \quad (V.13b)$$

Para tes:

$$C = a + b D + c D^2 + d D^3 + e D^4 + f D^5 + g \ln D \quad (V.13c)$$

en donde:

a,b,c,d,e,f,g = constantes de las ecuaciones cuyo valor varfa pa  
ra cada caso.

C = Costo de tuberfa o accesorios (dólares)

D = Diámetro de la tuberfa (pulgadas).

Los valores de las constantes se presentarán en unas tablas  
más adelante cuando se den todos los datos necesarios para resol  
ver el problema.

De la lista de los factores que influyen en el costo de in-  
versión, los incisos c,d,f,g se consideraron como un porcentaje  
del costo del material debido al impacto que producen. Estos por  
centajes son:

Para plomo y SS316 30%

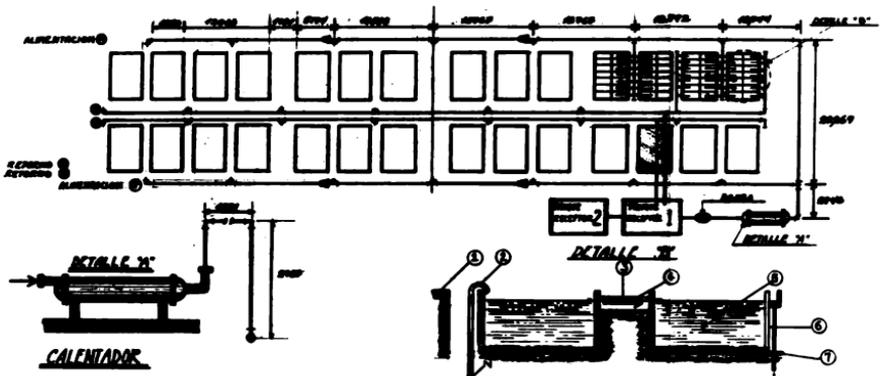
Para PVC 50%

Para poliéster fibra de vidrio 100%

e) Complejidad del sistema.

El sistema de flujo de electrolito -  
se muestra en la figura V.5.

El electrolito es succionado del tanque mediante una bomba  
centrfuga para su distribución a las cubas electrolfticas, pa  
sando antes por un cambiador de calor que elevará la temperatura  
del electrolito a 60°C. Del cambiador el electrolito se distribu-



**NOTA:**  
 LOS DETALLES DEL CALENTADOR, Y EL TANK  
 SON A ESCALAS REPRESENTATIVAS.

1 PLANCHA DE CEMENTO  
 2 TUBO ALIMENTADOR  
 3 TUBO CULMINANTE  
 4 TUBO DEL LIQUIDO  
 5 SALIDA DE LA SOLUCION  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$   
 6 SALA ELECTROLITICA  
 7 SODALITA DE FUNDIDA  
 8 ENTRADA DEL LIQUIDO  
 9 DERRAME

FACULTAD DE QUIMICA  
 PLANO GENERAL  
 ACOTACIONES EN  
 PROYECTOS

ye en dos secciones iguales pasando posteriormente a las cubas -- electrolíticas a razón de 12 lpm.

De las cubas, el electrolito regresa por gravedad al tanque y de ahí se vuelve a recircular.

#### V.5.2. VARIABLES DE DISEÑO QUE INTERVIENEN EN EL CALCULO DEL DIAMETRO.

Cuando se dimensiona una tubería se deben de tomar en cuenta variables limitantes que al analizarlas, nos determinarán los aspectos de diseño y nos darán criterios valiosos para un dimensionamiento adecuado. Estas variables son:

- a) Caída de presión disponible.
- b) Patrones de flujo a dos fases.
- c) Diseño de tuberías de drenaje.
- d) Fenómenos transientes y de vibración.
- e) Expansión y soporte de la tubería.
- f) Ruido y cavitación,
- g) Distribución del flujo.
- h) Corrosión y erosión.

A continuación se describen brevemente en que consisten es - tas variables.

- a) Caída de presión disponible.

Los cambios de presión deben tener límites permisibles con objeto de especificar otros equipos adicionales al sistema, conocer y prever las pérdidas por fricción en la tubería que se traducen en caídas de presión, debiendo - tener estas un límite no más allá del cual se considere que el -- costo de la tubería no sea económico o que cause serios problemas en la operación del sistema.

- b) Patrones de flujo a dos fases.

Cuando se presentan y no se diseña con cuidado la línea, puede ocasionar serios problemas; en el presente trabajo, sólo se va a presentar flujo en una sola

fase por lo que no es determinante en el sistema de conducción de electrolito.

c) Diseño de tubería de drenaje.

Esta tubería se toma en consideración cuando se diseñan recipientes, lo que tampoco se pre-senta en este trabajo.

d) Ruido y cavitación.

En contraste con las tuberías para -- gas, el manejo de líquidos raramente crea problemas de ruido. --- Cuando esto sucede, el ruido a menudo se origina en descenso con grandes caídas de presión, cavitación o flujo en dos fases. Velocidades de 6 a 9 m/s también producen problemas de ruido, pero -- muy raramente se diseña con tales velocidades. Sobre el aspecto - de la velocidad se hablará más adelante.

La cavitación ocurre frecuentemente en el manejo de fluidos. El colapso repentino de las burbujas de vapor, con las presiones asociadas a la pulsación, puede causar la cavitación en bombas, - válvulas, etc. Debido a que puede provocar la destrucción de la - tubería o de otros equipos, se debe de diseñar para evitarla.

e) Distribución del flujo.

Cuando una corriente de fluido se divide en corrientes paralelas, se requieren precauciones especiales para asegurar que cada una de las líneas paralelas lleve una porción igual del flujo. La distribución del flujo está relacionada con los cambios de presión y a las resistencias al flujo de -- las tuberías paralelas.

Los cambios de presión en un cabezal repercuten en efectos - de fricción y de momentum por la resistencia al flujo (viscosi-dad).

Las pérdidas por fricción son de aproximadamente un tercio - del valor que se obtendría calculando las pérdidas sobre la supo-sición de que el flujo total fluye a través del cabezal.

f) Erosión y corrosión.

De los muchos factores que afectan

el dimensionamiento de tuberías, probablemente los que causan mayor incertidumbre son la erosión y la corrosión. Con la escasez de información disponible para este aspecto, de entre las muchas variables que influyen en las velocidades de corrosión y de erosión, las velocidades permisibles indudablemente llegan a ser un aspecto importante a la hora de decidir el tamaño de la línea.

Las variables que influyen en las velocidades de corrosión y de erosión son:

-Química de la superficie. Una interfase fluido-tubería altamente activa, generalmente tiene valores grandes de velocidad de erosión.

-Velocidad y turbulencia. Velocidades altas del fluido y -- por lo tanto turbulencia asociada, particularmente en entradas, codos, tes, agravan la erosión.

-Cavitación. Durante el colapso de una burbuja cerca de una superficie metálica, se desarrolla una velocidad tal, que el líquido golpea la pared causando erosión, independientemente de -- las propiedades de la superficie.

-Efecto galvánico. Las velocidades altas incrementarán el -- ataque galvánico.

En los incisos anteriores, la velocidad del fluido ha surgido en general, como un factor común a los aspectos antes mencionados. En efecto, se debe de seleccionar una velocidad adecuada para evitar los problemas de erosión, corrosión, cavitación, ruido, etc.

Basados en su experiencia, muchos autores han hecho tablas de velocidades recomendadas. Kent, correlacionó la tabla de velocidades recomendadas de Kern dando el siguiente resultado:

$$u = 48 / \rho^{1/3} \quad (V.14)$$

donde  $u$  es la velocidad del fluido y su densidad está en  $\text{lb/ft}^3$ .

Esta ecuación se modifica cuando se tienen fluidos corrosivos o erosivos cual es el caso del electrolito. La ecuación modificada es:

$$u = 24 / \rho^{1/3} \quad (V.14a)$$

A continuación, se describira el procedimiento de cálculo para obtener el diámetro.

#### V.6. PROCEDIMIENTO DE CALCULO.

Para calcular el diámetro de una tuberfa se pueden usar dos criterios:

- a) Criterio de velocidad.
- b) Criterio de caída de presión.

Aunque los dos criterios son equivalentes, se diseñará con el de velocidad ya que como se vió anteriormente esta variables - representa un factor importante.

El procedimiento a seguir es entonces:

- 1) Con la ecuación V.14a se calcula la velocidad.
- 2) Con esta velocidad se calcula un diámetro preliminar:

$$D = ( 1.273 Q / u )^{1/2} \quad (V.15)$$

- 3) Con este diámetro se calculan:

- 1) El Número de Reynolds, el factor de fricción y las - pérdidas por fricción.

- ii) Con las pérdidas por fricción se calcula los costos de operación con la ecuación V.5.

- iii) Con la longitud del tramo y sus correspondientes --- accesorios se calcula el costo de inversión.

- iv) Con el costo de inversión y el porcentaje correspondiente sobre los costos de inversión, se calcula el costo de instalación.

- v) Sumando los incisos (iii) y (iv), se obtienen los - costos fijos. Observando el isométrico del sistema, figuras --- V.6a-b, la tuberfa de retorno de los tanques electrolfticos es - exactamente igual a la tuberfa de distribución sólo que no existen los costos de operación debido a que el flujo es por gravedad, por lo que, los costos fijos totales obtenidos se calculan sumando los tramos de retorno a los de alimentación.

vi) Multiplicando el inciso (v) por el factor de amortización (ecuación V.3), se obtiene el costo de amortización.

vii) Sumando los incisos (ii) y (vi), se obtiene el costo total.

viii) Se aplica el método de la sección dorada hasta obtener el costo mínimo

4) Una vez obtenido el costo mínimo, se selecciona el diámetro comercial superior que será el diámetro óptimo y se vuelven a calcular los costos para este diámetro.

5) Se selecciona otro material y se repiten los cálculos.

6) Cuando se hayan analizado todos los materiales, se selecciona aquel que tenga el costo mínimo finalizando así el cálculo del diámetro y la selección del material.

7) Una vez hecho lo anterior, se calculan las características de la bomba de acuerdo a los cálculos hechos para la tubería.

Estas características son:

a) Condiciones en la succión:

$$NPSH = \frac{(P_1 - P_V) 10}{s_{gr}} \pm Z_1 - \frac{(\Delta PS) 10}{s_{gr}} \quad (V.16)$$

en donde:

$P_1$  = Presión atmosférica ( $\text{kg/cm}^2 \text{ man.}$ )

$P_V$  = Presión de vapor del electrolito ( $\text{kg/cm}^2 \text{ man.}$ )

$\Delta PS$  = Caída de presión por tubería y accesorios hasta la succión de la bomba ( $\text{kg/cm}^2$ ).

$Z_1$  = Altura desde el nivel del líquido hasta el centro de línea de la bomba (m).

Cabeza de succión:

$$H_s = P_1/s_{gr} \pm Z_1 - (\Delta PS) 10/s_{gr} \quad (V.16a)$$

Presión de succión:

$$P_s = (H_s)(s_{gr})/10 \quad (V.16b)$$

b) Condiciones en la descarga:

Presión de descarga:

$$P_d = \Delta P_D + \Delta P_{eq} + \Delta P_{alt} + P_{llegada} \quad (V.16c)$$

en donde:

$\Delta P_D$  = Caída de presión por tubería y accesorios ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\Delta P_{eq}$  = Caída de presión por equipos ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\Delta P_{alt}$  = Caída de presión equivalente a la cabeza del líquido ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_{llegada}$  = Presión atmosférica ( $\text{kg/cm}^2 \text{ man}$ )

Cabeza de descarga:

$$H_d = P_d \cdot 10 / s_{gr} \quad (V.16d)$$

Carga dinámica:

$$HT = H_d - H_s \quad (V.16e)$$

c) Potencia al freno

$$BHP = 133.33 Q HT s_{gr} / \eta \quad (V.16f)$$

## V.7 . DATOS DEL PROBLEMA.

Para una mejor ordenación y visualización de los datos, los vamos a dividir en tres grupos:

- a) Datos de la línea.
- b) Datos del fluido.
- c) Datos económicos.
- a) Datos de la línea.

Los datos para el diseño de flujo de fluidos de la línea son:

- Gasto volumétrico del electrolito.
- Longitud y accesorios de la tubería
- Altura a la que hay que desplazar el electrolito.
- Caída de presión en equipos.
- Eficiencia del sistema motor-bomba.

Para el cálculo del diámetro es necesario dividir el sistema en varias secciones ya que se si se observa la distribución del flujo, antes de llegar a las cubas electrolíticas, el fluido pasa por un cambiador que al elevar la temperatura modifica las propiedades físicas del fluido; posteriormente, el electrolito se distribuye en dos cabezales y finalmente pasa a las cubas electrolíticas. La división del sistema en secciones se hizo considerando dos casos de diseño;

i) Se diseñó todo el sistema para un gasto fijo de  $0.056675 \text{ m}^3/\text{s}$  considerándose cuatro secciones, que con sus respectivos datos se muestran en la tabla V.1A.

ii) Se diseñó el sistema considerando disminuciones del diámetro conforme el flujo se va distribuyendo en las cubas electrolíticas. Conforme este criterio, el sistema se dividió en siete secciones, que con sus respectivos datos se muestran en la tabla V.1B.

En las figuras V.6a y V.6b, se ilustra de una manera esquemática cada caso.

TABLA V.1A

DATOS DE LA LINEA PARA EL CASO DE DISEÑO CON GASTO CONSTANTE.

SECCION DE-A	GASTO ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	LONGITUD (m)	ACCESORIOS	
			TES	CODOS
Tanque de almacenamiento a succión de bomba	0.056675	2.2	0	1
Descarga de bomba a cambiador de calor	0.056675	3.7	0	2
Cambiador de calor a bifurcación	0.056675	28.9	1	4
Bifurcación a final del cabezal	0.056675	78.2	6	1

TABLA V.1B

DATOS DE LA LINEA PARA EL CASO DE DISEÑO CON GASTO VARIABLE

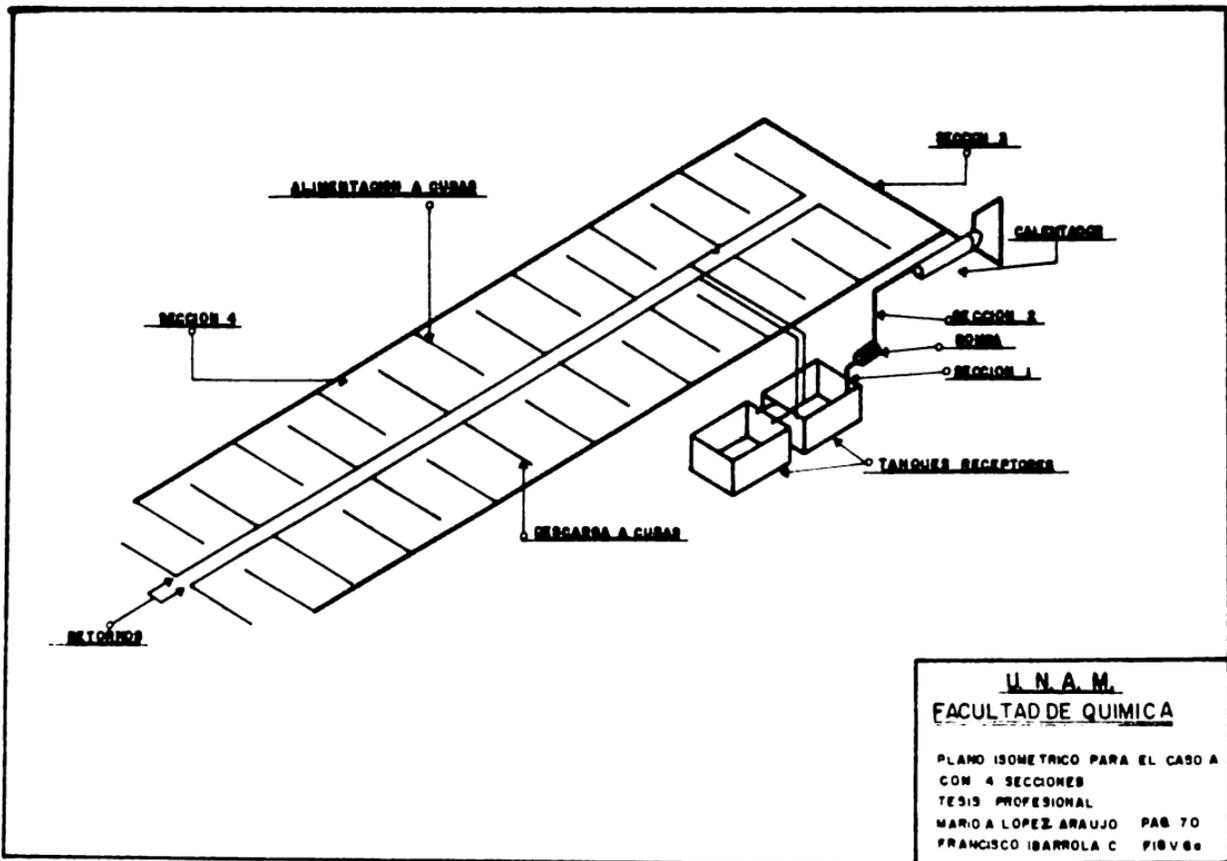
SECCION DE - A	GASTO (m <sup>3</sup> /s)	LONGITUD (m)	ACCESORIOS	
			TES	CODOS
Tanque de almacenamiento a succión de bomba	0.056675	2.2	0	1
Descarga de bomba a cambiador de calor	0.056675	3.7	0	2
Cambiador de calor a bifurcación	0.056675	8.5	0	3
Bifurcación a cabezal - distal	0.028388	20.4	1	1
Cabezal distal a primera reducción	0.028388	30.2	3	0
Primera reducción a segunda reducción	0.016465	24.0	2	0
Segunda reducción a final del cabezal	0.008516	24.0	1	1

Las alturas correspondientes desde el nivel del electrolito en el tanque hasta las cubas electrolíticas son:

TABLA V.1C

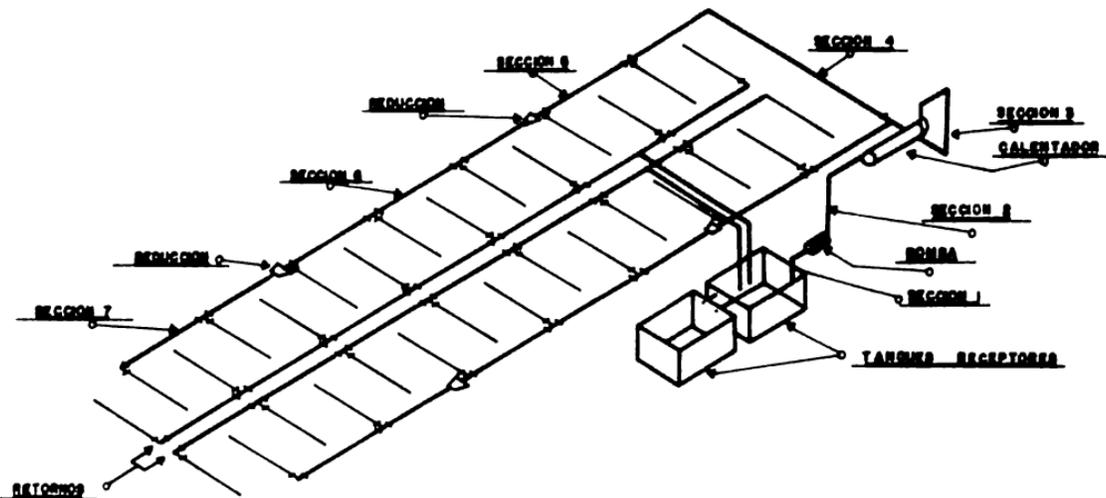
SECCION DE - A	ALTURA (m)
Nivel de líquido en el tanque de almacenamiento a centro de línea de la bomba	2.2
Centro de línea de la bomba a cambiador de calor	0.5
Cambiador de calor a cuba electrolítica	0.5
Caída de presión en el cambiador de calor: 0.7 kg/cm <sup>2</sup>	

Eficiencia del sistema motor-bomba: 70%



U.N.A.M.  
FACULTAD DE QUIMICA

PLANO ISOMETRICO PARA EL CASO A  
 CON 4 SECCIONES  
 TESIS PROFESIONAL  
 MARIA LOPEZ ARAUJO PAG 70  
 FRANCISCO IBARROLA C FIG 6a



UNAM  
FACULTAD DE QUIMICA

PLANO ISOMETRICO PARA EL  
CASO B CON 7 SECCIONES

- O TERN PROFESIONAL
- O MARIO A LOPEZ ARAUJO
- O FRANCISCO IBARROLA C.

F. & V. 68 PAG 71

b) Datos del fluido.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el electrolito pasa de la temperatura ambiente a 60°C lo que ocasionará una alteración tanto de sus propiedades físicas como de las de transporte. En la tabla V.2, se muestran estas propiedades.

TABLA V.2  
PROPIEDADES FÍSICAS Y DE TRANSPORTE DEL ELECTROLITO.

SECCION DE - A	TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VISCOSIDAD (Pa-s)
Tanque de almacenamiento a cambiador de calor	25	1494	0.00475
Cambiador de calor a cubas electrolíticas	60	1464.8	0.0024

c) Datos económicos.

Los datos económicos incluyen los costos de tubería y accesorios, el costo del kilowatt-hora, los índices de actualización de costos, el interés que se le aplicará a la inversión y el tiempo de vida del equipo.

Como se mencionó en el inciso V.5.1b, para calcular los costos de la tubería y accesorios, se usarán ecuaciones que representen el costo contra el diámetro. Cabe hacer notar que los datos que se obtuvieron de dichas gráficas correspondían a los años de 1967 y 1970, por lo que para obtener el costo actual, hay que --- aplicar los valores de los índices de actualización que se dan -- más adelante. En la tabla V.3A-D, se dan los valores de los coeficientes de las ecuaciones para cada caso.

TABLA V.3A  
COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DE COSTO PARA TUBERIA

MATERIAL	a	b	c	d	e
Plomo	9.0624	-6.982	-11.56	1.4696	-0.0396
PVC	-1.4506	0.929	0.2633	0.2955	-0.01338
Bonstrand	8.7187	48.093	8.466	-0.3099	-----
SS 316	0.9351	1.892	-0.453	-0.1533	0.0031

TABLA V.3B

COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DE COSTO PARA CODOS.

MATERIAL	a	b	c	d	e	f
Plomo	53.2066	-54.046	-71.348	12.116	-0.3878	----
PVC	- 0.614	1.685	0.879	0.139	-0.0069	----
Bonstrand	- 8.7	15.961	- 2.791	0.255	-0.00897	-12.99812
SS 316	0.0226	1.558	0.8331	0.148	-0.0028	----

TABLA V.3C

COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DE COSTOS PARA TES

MATERIAL	a	b	c	d	e	f	g
Plomo	11.057	-6.994	-11.577	1.472	-0.0393	---	---
PVC	- 0.171	0.163	0.079	0.859	-0.0412	---	---
Bonstrand	-2434	3016	-286.873	-11.88	5.0124	-0.2603	-3216.6
SS 316	1.518	1.389	0.669	0.101	-0.000752	---	---

TABLA V.3D

COEFICIENTES DE LAS ECUACIONES DE COSTOS PARA REDUCCIONES

MATERIAL	a	b	c	d	e	f
Plomo	5.0726	2.664	6.668	----	----	----
PVC	-0.5495	-4.922	-1.7763	4.3364	-0.3384	----
Bonstrand	-2651.6	2622.1	332.201	-299.88	42.1942	-2929.629
SS 316	1.285	0.987	0.4131	0.0909	0.0029	----

Estas ecuaciones abarcan valores de diámetros de uno a diez pulgadas.

Para el costo de la bomba se obtuvo la siguiente ecuación:

$$CB = -1128.245 + 42140.75/FCH + 238.7267 \ln FCH + 0.0312351 FCH - 0.0307583 10^{-7} FCH^2 \quad (V.17)$$

en donde:

CB = Costo de la bomba (dólares)

FCH =  $Q \Delta P_{s1s}$

Q = Gasto total (gpm)

$\Delta P_{s1s}$  = Caída de presión del sistema (psi)

El costo del kilowatt-hora fue suministrado por una compañía que tiene este proceso y es de 0.8\$/Kwh.

Como ya se mencionó anteriormente, los costos de tubería y - accesorios, así como también el de la bomba, estaban referidos a 1967 (plomo y PVC) y 1970 (ss 316 y bomba), por lo que a los va - lores que resulten de aplicar las ecuaciones de costo, hay que -- aplicarles los índices respectivos de actualización de costos. -- Los valores de estos índices fueron tomados de la revista Chemi - cal Engineering y son respectivamente:

2.8014 para 1967  
2.3877 para 1970

Se consideró que la inversión es rentable y que produce al - menos el interés que daría este dinero en inversión bancaria cuyo valor es del 30%.

La vida útil de la tubería se estimó en 8 años, considerando que el electrolito es un fluido corrosivo.

Para calcular los costos de instalación, se consideró un por - centaje sobre los costos de inversión; estos porcentajes fueron:

Plomo	30%
PVC	50%
Bonstrand	100%
SS 316	15%

#### V. 7.1. CALCULO DE LAS PERDIDAS POR FRICCION EN TUBERIAS Y ACCESO - RIOS Y RUGOSIDAD DE LOS MATERIALES.

Las pérdidas por fricción en accesorios se calculan de la si - guiente manera:

$$K = f_t (L/D) \quad (V.18)$$

$$f_t = \frac{1}{(2 \ln \epsilon / 3.7 D)} \quad (V.18a)$$

La relación L/D, es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta y varía según el accesorio. Para codos, el valor de L/D es de 30 mientras que para tees es de 60.

Para reducciones las pérdidas por fricción se calculan de la siguiente manera:

$$K = \frac{6.5 (1 - \rho^2)}{4} \quad (V.18b)$$

$$\rho = D_1 / D_2 \quad (V.18c)$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

en donde:

$D_1$  = Diámetro menor (m)

$D_2$  = Diámetro mayor (m)

La rugosidad de los materiales se obtuvo para plomo, PVC y -- SS 316 de la tabla 5.7 pág. 5-21 del Chemical Engineers Handbook, 5<sup>a</sup>. ed., mientras que para Bonstrand se obtuvo del fabricante. -- Los valores respectivos se muestran en la tabla V.4:

TABLA V.4  
RUGOSIDADES DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS.

MATERIAL	RUGOSIDAD (m)
Plomo	$1.8288 \times 10^{-5}$
PVC	$1.8288 \times 10^{-5}$
Bonstrand	$1.8288 \times 10^{-5}$
SS 316	0.0003048

V.g. PROGRAMA DE COMPUTADORA.

En base a la secuencia de cálculo antes descrita, se ha elaborado un programa de computadora que tiene como objetivos:

- 1.- Simplificar el tiempo de cálculo.
- 2.- Obtener una solución matemáticamente óptima.

Dicho programa consta de un programa principal en donde se encuentra la secuencia de cálculo antes descrita y una subrutina en donde se encuentra programado el método de la sección dorada. El programa funciona de la siguiente manera:

a) Como primer paso selecciona un material y de acuerdo a la densidad del fluido se calcula una velocidad con la cual se calcula un diámetro preliminar.

b) Con este diámetro se lee el número de secciones según corresponda el caso, y los datos correspondientes a dicha sección.

c) Con este diámetro se calculan los límites que son necesarios para poder aplicar el método de la sección dorada.

d) Se aplica dicho método hasta que se obtiene el costo mínimo para dicha sección; costo que corresponde al diámetro óptimo.

e) Se selecciona otra sección y así hasta finalizar con todas las secciones, hecho lo cual, se pasa al siguiente material y se repiten los pasos anteriores.

f) Una vez analizados todos los materiales, se comparan costos y aquel que tenga el mínimo es el material seleccionado al cual le corresponden los diámetros calculados por el método de la sección dorada.

g) Se calcula el costo y las características de la bomba finalizando de esta manera los cálculos.

En el apéndice A, se pueden ver los diagramas de flujo correspondientes a las dos partes de que consta el programa, así como también los listados correspondientes.

#### V.9. RESULTADOS.

Los resultados del programa se muestran en la tabla V.5. Esta tabla consta de varias partes:

- 1) La primera parte consta de los resultados obtenidos para cada material en la que se muestra el diámetro óptimo de cada sección, la velocidad y los costos correspondientes.
- 2) La segunda parte consta de los costos óptimos por material de tal manera que se pueda tener una comparación rápida entre ellos.
- 3) La tercera parte consta del material seleccionado que es como ya se dijo, aquel que tiene el costo menor de los valores óptimos de cada sección y del costo de la tubería.
- 4) La cuarta parte muestra las características de la bomba, su costo, y el costo total del sistema que es la suma del costo de la tubería más el costo de la bomba.

En ambos casos, el material seleccionado fue el poliéster -- fibra de vidrio, conocido comercialmente como Bonstrand, cuyo costo no difiere mucho del plomo y del PVC, aún teniendo un costo de instalación del 100% del costo de inversión. Se puede decir, que este resultado confirma lo que de éste material se había dicho en el capítulo anterior.

De los dos casos estudiados, el caso A es el que resulta más económico, con un costo total de \$28025 \$/año, en comparación con 648015 \$/año del caso B. La diferencia está en que en el caso de diámetros variables (B), se tomaron en cuenta las reducciones de diámetro ocasionadas por las disminuciones del gasto, lo que --aumenta los costos de inversión por las reducciones, la caída de presión que repercute en los costos de operación y en el costo de la bomba.

El costo de la bomba, representa un porcentaje muy alto del costo total del sistema (71%), esto se debe a que además de ser -- de acero inoxidable, es de un diseño especial, ya que debe de ser capaz de manejar sólidos en suspensión aparte de ser resistente a la corrosión.

El diámetro óptimo de la tubería es de 203.2 mm, con una velocidad de 1.747 m/s; que es una velocidad adecuada ya que no es tan alta como para no dejar sedimentar los lodos anódicos.

**TABLA V.5.**  
**RESULTADOS FINALES**  
**CASO "A"**

		MATERIAL	PLOMO				
C.A.P.M)	VIM/S)	C.CPER.(PESOS)	C.INV.(PESOS)	C.INST.(PESOS)	C.FIJOS(PESOS)	C.AMORT.(PESOS)	C.TOTAL(PESOS)
2 3.2	1.741	7257.92	5137.63	6156.76	23574.87	7719.69	9976.51
2 3.2	1.747	4227.16	9145.34	12974.40	42359.48	13758.49	17995.65
2 3.2	1.797	16239.38	52646.60	63175.92	231645.24	79202.96	95412.34
2 3.2	1.747	72629.72	166400.18	179685.02	366265.20	125171.46	147871.18

TABLE 5. (CONT.)

CASE "B"

MATERIAL

PLUMBO

DIAM(MM)	V(M/S)	C. OPER. (PESOS)	C. INV. (PESOS)	C. INST. (PESOS)	C. FIJOS (PESOS)	C. AMORT. (PESOS)	C. TOTAL (PESOS)
203.2	1.747	2257.82	5130.65	6156.73	22574.87	7718.69	9976.51
203.2	1.747	4227.15	9145.34	10974.40	40239.48	13758.49	17985.65
203.2	1.747	7263.17	18580.44	22296.55	81753.95	27952.92	35216.08
152.4	1.556	5753.63	30263.52	36316.22	133150.47	45529.25	51281.62
152.4	1.556	5777.31	51043.34	61252.01	112295.35	38395.49	44172.27
152.4	.902	3373.41	42013.57	50416.29	369719.43	126412.69	105562.82
76.2	1.867	11266.70	54022.23	64826.68	475395.63	162544.99	173811.60

TABLE Y.5. (CONT.)

CASO "A"

MATERIAL CLOPURA DE POLIVINILDO (PVC)

CAPEX (M)	VM (S)	C.OPER. (PESOS)	C.INV. (PESOS)	C.INST. (PESOS)	C.FIJO (PESOS)	C.AMORT. (PESOS)	C.TOTAL (PESOS)
213.2	1.747	2257.32	3695.85	5503.78	10479.28	6318.34	8576.16
213.2	1.747	4227.16	6591.55	10037.12	33457.75	11439.71	15666.87
213.2	1.747	16205.58	34737.31	52476.71	170689.34	59728.43	75938.21
213.2	1.747	26935.60	113116.30	173724.45	284540.75	97288.81	124219.40

TABLA N. 5. (CONT.)

CASO "B"

MATERIAL CLORURO DE POLIVINILO (PVC)

DIAM (MM)	V (M/S)	C. OPER. (PESOS)	C. INV. (PESOS)	C. INST. (PESOS)	C. FIJOS (PESOS)	C. AMORT. (PESOS)	C. TOTAL (PESOS)
203.2	1.747	2257.82	3695.85	5543.78	18479.26	6318.34	8576.16
203.2	1.747	4227.16	6691.55	10037.32	33457.75	11439.71	15666.87
203.2	1.747	7263.17	13087.99	19631.99	65439.96	22374.91	29638.08
152.4	1.556	8369.70	21048.80	31573.20	105244.01	35984.53	44351.76
152.4	1.556	8404.55	30218.93	45328.40	75547.33	25830.78	34234.55
101.6	2.030	12170.20	12379.22	18568.83	123792.18	42326.43	54495.56
76.2	1.867	6633.08	31874.90	47812.34	318748.96	108985.11	115613.63

TABLA V. S. (CONT.)

CASO "A"

MATERIAL POLIESTER FIBRA DE VIDRIO (CONSTRAND)

LIAM (M)	VIM (S)	C. OPER. (PESOS)	C. INV. (PESOS)	C. INST. (PESOS)	C. FIJOS (PESOS)	C. AMORT. (PESOS)	C. TOTAL (PESOS)
2 3.2	1.747	1395.71	2354.10	4734.61	14125.81	4829.43	6229.43
2 3.2	1.747	2045.97	4265.69	8531.37	75594.12	8751.02	11470.61
2 3.2	1.747	11495.79	27937.35	41472.71	125637.11	42957.92	54457.35
2 3.2	1.747	15285.74	79415.37	45211.34	238216.71	81449.01	96834.43

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "A"

MATERIAL POLIESTER FIBRA DE VIDRIO (CONSTRAND)

DIAM (M)	V (M/S)	C. CPER. (PESOS)	C. INV. (PESOS)	C. INST. (PESOS)	C. FIJOS (PESOS)	C. AMOPT. (PESOS)	C. TOTAL (PESOS)
2.3.2	1.747	1395.71	2354.15	4739.61	14125.84	4829.43	6229.43
2.3.2	1.747	2040.97	4265.49	8531.37	75594.12	8751.02	11470.61
2.3.2	1.747	11495.79	27937.35	41372.71	125637.11	42957.92	54457.35
2.3.2	1.711	15381.30	79415.37	15111.34	238216.71	81449.91	96814.43

TABLA V.5. (CONT.)

CASO: 081

MATERIAL POLIESTER FIBRA DE VIDRIO (NONSTRAND)

DIAM(MM)	V(M/S)	C. OPER. (PESOS)	C. INV. (PESOS)	C. INST. (PESOS)	C. FIJOS (PESOS)	C. AMORT. (PESOS)	C. TOTAL (PESOS)
203.2	1.747	1399.71	2354.730	4708.60	14125.80	4829.83	6220.43
203.2	1.747	2649.97	4265.69	8531.37	25594.12	8751.02	11400.61
203.2	1.747	4784.65	8143.28	16286.55	48594.65	16705.86	21490.26
152.4	1.556	5232.60	9664.00	19327.00	67983.90	19825.61	25058.20
152.4	1.556	4954.65	17147.55	34295.10	51442.64	17589.02	22543.59
101.6	2.030	7469.23	8149.71	16299.41	97796.48	33438.10	40905.35
76.2	1.867	4770.81	29609.39	59218.79	355312.73	121486.82	126257.31

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "A"

MATERIAL

ACERO INOXIDABLE 316 (SS316)

DIAM (MM)	VIM (S)	C.OPER. (PESOS)	C.INV. (PESOS)	C.INST. (PESOS)	C.FIJOS (PESOS)	C.AMORT. (PESOS)	C.TOTAL (PESOS)
213.2	1.747	3904.73	14758.17	16983.39	63503.13	21712.68	29557.41
213.2	1.747	9734.24	27984.43	72182.15	120333.06	41143.70	50877.94
213.2	1.747	9287.96	175436.51	291717.49	754298.00	257888.85	287169.87
213.2	1.747	15022.93	460264.71	552104.41	1032569.12	353051.07	408074.00

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "B"

MATERIAL ACERO INOXIDABLE 316 (SS316)

DIAM(MM)	V(M/S)	C.OPER.(PESOS)	C.INV.(PESOS)	C.INST.(PESOS)	C.FIJOS(PESOS)	C.AMORT.(PESOS)	C.TOTAL(PESOS)
203.2	1.747	3844.73	14768.17	16983.39	63503.13	21712.68	25557.41
203.2	1.747	9734.24	27984.43	32182.10	120333.06	41143.70	50877.94
203.2	1.747	15045.37	58018.58	66721.14	249479.04	85300.67	100346.04
152.4	1.556	25358.14	74926.54	86165.52	322184.12	110159.65	135517.78
152.4	1.556	23833.50	117750.12	135412.63	253162.75	86560.19	110890.33
101.6	2.030	26080.39	54383.37	62540.88	467697.02	159912.72	185893.10
76.2	1.867	22809.95	54188.80	62317.12	466023.70	159340.58	182136.75

**TABLA V.5. (CONT.)**

**CASO "A"**

**COSTOS OPTIMOS POR MATERIAL**

MATERIAL	COSTO DE LA TUBERIA (PESOS)
ALUMINO	317680.43
TUBERIA DE POLIVINILO (PVC)	274451.95
FOLIO DE FIBRA DE VIDRIO (CONSTRAND)	182344.29
ACERO INOXIDABLE 316 (SS316)	976337.66

**TABLA Y 5 (CONT.)**  
**CASO D**  
**COSTOS OPTIMOS POR MATERIAL**

MATERIAL

COSTO DE LA TUBERIA (PESOS)

PLOMO	504688.42
CLORURO DE POLIVINILO (PVC)	348763.57
POLIESTER FIBRA DE VIDRIO (BONSTRAND)	270581.14
ACERO INOXIDABLE 316 (SS316)	1048510.20

TABLE Y.5. (CONT.)  
CASO "A"

RESULTADOS.

EL MATERIAL SELECCIONADO ES POLIESTER FIBRA DE VIDRIO (BONSTRAND)

LOS VALORES OPTIMOS DE CADA SECCION SON:

	DIAMETRO OPTIMO (MM)	COSTO OPTIMO (PESOS)
SECCION 1	20320	7039.24
SECCION 2	20320	12890.83
SECCION 3	20320	62075.12
SECCION 4	20320	107089.10

COSTO DE LA TUBERIA = 132499.79 PESOS

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "B"

RESULTADOS

EL MATERIAL SELECCIONADO ES "POLIESTER FIBRA-DE-VIDRIO (BONSFRAND)

LOS VALORES OPTIMOS DE CADA SECCION SON

	DIAMETRO OPTIMO (MM)	CDSTO OPTIMO (PESOS)
SECCION 1	20320	7039.24
SECCION 2	20320	12890.83
SECCION 3	20320	24416.21
SECCION 4	15240	28863.65
SECCION 5	15240	23767.52
SECCION 6	10160	44802.86
SECCION 7	07620	129300.84

CDSTO DE LA TUBERIA = 270581.14 PESOS

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "A"

CARACTERÍSTICAS DE LA OJERA

PRESIÓN DE SUCCIÓN = -0.74 KG/CM<sup>2</sup>

PRESIÓN DE DESCARGA = 1.83 KG/CM<sup>2</sup>

WIND = 1.04 P

CARGA DINÁMICA = 14.51 M

POTENCIA AL FRENO = 25.0 HP

COSTO DE LA OJERA = 346716 PESOS

COSTO DEL SISTEMA DE = 501874.578 PESOS

TABLA V.5. (CONT.)

CASO "B"

CARACTERÍSTICAS DE LA BOMBA

PRESION DE SUCCION = -0.34 KG/CM2

PRESION DE DESCARGA = 2.23 KG/CM2

NPSH = 2.94 M

CARGA DINAMICA = 19.19 M

POTENCIA AL FRENO = 27.2 HP

COSTO DE LA BOMBA = 377434. PESOS

EL COSTO DEL SISTEMA ES = 648015.211 PESOS

## CAPITULO VI.

### CONCLUSIONES.

En muchos casos y especialmente en el diseño de tuberías, sucede que la solución matemática no concuerda con la solución real. Este hecho es mencionado por Simpson y Weirick, para quienes el uso en el diseño de reglas de dedo como velocidad recomendada, caída de presión disponible, etc., se han vuelto obsoletas ya que pueden conducir a resultados erróneos sobre todo en los casos en que las condiciones de diseño son extremas.

Sin embargo, en el presente trabajo se puede asegurar que aunque se usó el método tradicional de diseño de tuberías, el resultado que se obtuvo es el óptimo. Lo anterior se basa en las siguientes razones:

a) La única condición extrema de diseño es la corrosión y la erosión que puede causar el electrolito sobre el material; estos factores se controlan con el material de diseño seleccionado ya que sus características físico-químicas y económicas lo hacen el más adecuado para manejar la solución electrolítica ácido sulfúrico-sulfato de cobre, además de que la velocidad del fluido es lo suficientemente baja como para no ayudar al efecto corrosivo sobre el material.

b) El valor del diámetro obtenido concuerda con el gasto de fluido manejado, además de que la caída de presión en el sistema tiene un valor razonable.

c) Desde el punto de vista matemático, la función no presenta comportamientos extraños, lo que hace que el método de optimización usado, además de ser el más adecuado para manejar este tipo de funciones, no tenga ningún problema al encontrar la solución.

En resumen, podemos decir que hemos cumplido con los objetivos del trabajo, obteniendo resultados satisfactorios.

**BIBLIOGRAFIA**

**LIBROS**

**Brady, G.S.**

**Materials Handbook**

**9a. Edición**

**Mc Graw Hill Book Co.**

**New York, 1963**

**Evans, V. R.**

**The Corrosion and Oxidation of Metals**

**2a. Edición**

**Edward Arnold Publishers, LTD**

**London, 1960**

**Foust, A.S. & L.A. Menzel**

**Principios de Operaciones Unitarias**

**4a. Edición (versión española)**

**Cia, Editorial Continental, S.A.**

**México, 1975**

**Kohler, W.A.**

**Principles and Applications of Electrochemistry (Vol II)**

**2a. Edición**

**John Wiley & Sons, Inc.**

**New York, 1944**

**Mantel C.L.**

**Ingeniería Electroquímica**

**4a. Edición (versión española)**

**Editorial Reverté**

**Barcelona, 1962**

**Mc Craken, Daniel D.**  
**Programación Fortran IV**  
**Editorial Limusa, S.A.**  
**México, 1976**

**Perry & Chilton**  
**Chemical Engineers' Handbook**  
**5a. Edición**  
**Mc Graw Hill Co. (Kogakusha, LTD)**  
**Tokio, 1973**

**Peters, Max S. & Klaus D. Thimmerhaus**  
**Plant Design and Economics for Chemical Engineers**  
**2a. Edición**  
**Mc Graw Hill Kogakusha, LTD**  
**Tokio, 1968**

**Pludek, C.L.**  
**Design and Corrosion Control**  
**1a. Edición**  
**John Willey & Sons Inc.**  
**New York, 1977**

Chemical Engineering  
Mc Graw Hill  
Pags. 91 - 92, Noviembre 7, 1977

Gómez, D.C.  
Gráficas de Precios Comparativos de Tuberías  
Amercoat Mexicana, S.A.  
México, 1978

Haveg Inc.  
Chemical Equipment Division  
Product Information  
California, 1976

Ici United States Inc.  
A Guide to Corrosion Control with Atlac Resin  
New York, 1975

Kent, G.R.  
Preliminary Pipeline Sizing  
Chemical Engineering  
Mc Graw Hill  
Pags. 119 - 120, Septiembre 25, 1978

Kern, R.  
How to Compute Pipe Size  
Chemical Engineering  
Mc Graw Hill  
Pags. 115 - 120, Enero 6, 1975

Kern, R.  
Useful Properties of Fluids for Piping Design  
Chemical Engineering  
Mc Graw Hill  
Pags. 58 - 66, Diciembre 23, 1974

**ARTICULOS Y REPORTES**

**Ameron Co.**

**Corrosion Resistant Piping Division**

**Bonstrand Chemical Resistant Chart**

**Brea, Ca. 1976**

**Bauman & Overstreet**

**Corrosion and Piping Materials in the CPI**

**Chemical Engineering (Desk Book)**

**Mc Graw Hill**

**Pags. 59 - 68, Abril 3, 1978**

**Cabrera, E.M. y F. Martínez**

**Cálculo del Diámetro más económico en tuberías de presión**

**Ingeniería Química**

**Pags. 61 - 69, Marzo 1978**

**Churchill, S.W.**

**A General Expression for the Correlation of Rates of Transfer -  
and other Phenomena**

**Aiche Journal**

**Pags 1121 - 1126, 18 (6), 1972**

**Churchill, S.W.**

**Empirical Expressions for the Shear Stress in Turbulent  
Flow in Commercial Pipe**

**Aiche Journal**

**Pags. 375 - 376, 19 (2), 1973**

**Churchill, S.W.**

**Friction Factor Equation Spans All**

**Fluid Flow Regimes**

**LaBour Pumps**  
**Catálogo de Bombas**  
**Boletín SP - 2**

**Woody, I.F.**  
**Friction Factor for Pipe Flow**  
**Transactions of A. S. M. E.**  
**Pags. 671 - 684, Noviembre 1944**

**NBS Voluntary Product Standard**  
**Custom Contact-Molded Reinforced Polyester**  
**Chemical Resistant Process Equipment**  
**A.U.S.A. Department of Commerce Publication**  
**USA, 1970**

**Neerken, A.F.**  
**Selecting the Right Pump**  
**Chemical Engineering (Desk Book)**  
**Pags. 97 - 98, Abril 3, 1978**

**Quickfit Co.**  
**Tubería y Accesorios de Vidrio**  
**1877**

**Scholen & Elkin**  
**Canadian and Metallurgical Bulletin**  
**No. 408 Copper Refiners**  
**Montreal, East Plant**

**Shell Chemical Co.**  
**Corrosion Guide (Epocryl Resins)**  
**New York, 1976**

Simpson, L.L.  
Designing Plant Piping  
Chemical Engineering (Desk Book)  
Mc Graw Hill  
Pags. 35 - 48. Abril 3, 1978

Swame, K.P. & A.K.Jain  
Explicit Equations for Pipe Flow Problems  
Journal of the Hydraulics Division  
HY5, Pags. 657 - 664, Mayo 1976

Marshall S.P. & Brandt J.L.  
Installed Cost of Chemical Engineering  
Mc Graw Hill  
Pags. 68 - 82, Agosto 23, 1971

Zisselmar R. & Molerus O.  
Investigation of Solid - Liquid with Regard to Turbulance Mo -  
dification  
Chemical Engineering  
Pags. 233 - 239, 18 (1979)

**APENDICE "A"**

**DIAGRAMA DE FLUJO Y LISTADOS DEL  
PROGRAMA DE CALCULO DE DIAMETRO  
OPTIMO.**



```

2 150 CO TO 119
4 160 115 DN24L1014
2 170 2452L0227
4 180 CO TO 119
4 190 116 DN24L0762
2 200 2452L0114
2 210 CO TO 119
2 220 117 DN24L0724
2 230 2452L0114
2 240 119 TGLF=DN24L0701
2 250 IFJ=L1011 GO TO 120
2 260 132 PL21.2730C1J10PHO/(DPMIN00J)
2 270 A=(2.457*ALCG(117/117)/AC1000.9*0.27*EPS111/DPMIN110016
2 280 B=13755P/PI10016
2 290 FC=118.77/PI*0.12+117/(A*PI*0.15110083.333333C-308.
2 300 FT=1/12*ALCG11/EP111/13.70DPMIN11002
2 310 CO 127 P=133
2 320 CO TO 119 IF J, I, C, 1, 4
3 330 104 ACC=30.47T0L01J1
3 340 CO TO 107
3 350 105 ATLS=6.47T0TES1J1
3 360 CO TO 107
3 370 106 P=CCG.
3 380 ALCG1211.
3 390 IFPI=ALCG11/DPIN05T.L1316) GO TO 108
3 400 IFPI=ALCG11/DPIN05T.L1524) GO TO 108
3 410 IFPI=ALCG11/DPIN05T.L1316) GO TO 108
3 420 IFPI=ALCG11/GO TO 106
3 430 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 440 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 450 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 460 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 470 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 480 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 490 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 500 IFPI=ALCG11/GO TO 108
3 510 IFPI=ALCG11/GO TO 108
2 520 107 CO TO 107
2 530 108 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 540 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 550 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 560 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 570 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 580 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 590 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 600 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 610 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 620 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 630 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 640 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 650 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 660 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 670 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 680 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 690 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 700 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 710 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 720 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 730 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 740 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 750 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 760 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 770 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 780 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 790 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 800 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 810 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 820 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 830 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 840 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 850 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 860 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 870 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 880 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 890 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 900 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 910 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 920 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 930 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 940 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 950 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 960 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 970 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 980 ALCG1211/COPIATES+MEC
2 990 ALCG1211/COPIATES+MEC
1000 ALCG1211/COPIATES+MEC

```



```

175. DP(I,J,II) = H*(10**II)
180. IF(J,PC,II) GO TO 175
181. H=(H+DP(I,J,II)-H*(10**II))/SGP - 21
182. H=(H+DP(I,J,II)-H*(10**II))/SGP + 211
183. PS(I) = H*(II) + SGP / II.
184. MCL
185. GO TO 180
186. 131 CPD(II) = DP(I,J,II) + SPD(II)
187. MCL
188. 110 CONT.PUF
189. GO 140 211.4
190. IF(I,PG,II) GO TO 140
191. IF(CLP(I) * (II - LT) * COPTOT(I-1)) GO TO 139
192. GO TO 140
193. 139 CCF(I,II) = CCFITOT(II)
194. MCL
195. 140 CONT.MLT
196. GO 141 211.4
197. IF(I,PL,II) GO TO (6,10)133
198. 141 CCF(I,II,II) = CCF(I,II), COPTOT(II)
199. CCF = 220 * SGP / II.
200. PD(I,J) = CCF(I,J) + SPD + DFEQ + P
201. H*(I,J) = PL(I,J) + 13. / SGP
202. HT = H*(I,J) * H(I,J)
203. HAP = CT + 11 * SGP + 13.300 / HU
204. CFS(1) = H*(I,J) - 15*(I,J)
205. CFS(2) = H*(I,J) + 15*(I,J)
206. CFI(1) = 11 * CCF(I,II) * (13.75 / CFI) + (238.726 * ALOC(I,CFI)) + (.3312381 * CFI)
207. CFI(2) = 11 * CCF(I,II) * (13.75 / CFI) + (238.726 * ALOC(I,CFI)) + (.3312381 * CFI)
208. CPO(I) = CCF(I,II) * (9 * H * H)
209. CCFM(I) = (CFS(I,II) * 30 + CBO(I) * CBO(I)) * 23.
210. CS(I) = CCF(I,II) * (10 * H * H)
211. CCF(I,J,II) = CCF(I,J,II) * 10 * 23.
212. A = 11 * CCF(I,II) * (10 * H * H)
213. A = 11 * CCF(I,II) * (10 * H * H)
214. A = 11 * CCF(I,II) * (10 * H * H)
215. WRITE(LIN,16) CS(1)
216. 1000 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
217.
218. 1001 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
219.
220. 1002 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
221.
222. 1003 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
223.
224. 1004 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
225.
226. 1005 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
227.
228. 1006 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
229.
230. 1007 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
231.
232. 1008 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
233.
234. 1009 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
235.
236. 1010 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
237.
238. 1011 FORMAT(11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)

```

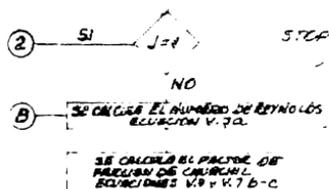
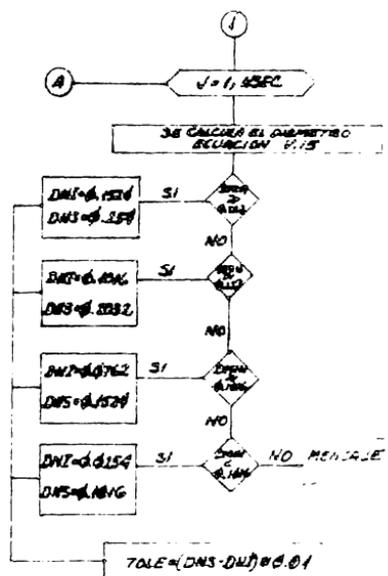
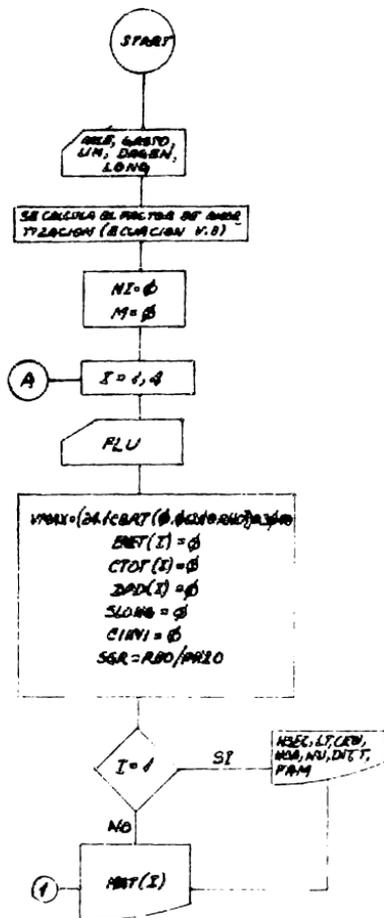
```

234. 1010 FORMAT(//,117,'E I A I P M I',2X,'V I P / S I',5X,'C. O P P O. (P E S O S)',3X,'C. T M V
240.   . (P E S O S)',1X,'L. U. I S T. (P E S O S)',1X,'C. F I J O S (P E S O S)',1X,'C. A M O P T. (P E S
241.   O S)',1X,'C. T O T A L (P E S O S)')
242. 1011 FORMAT(//,13),F5.1,4X,F2.3,4X,F10.2,4X,F10.2,314X,F10.2),7X,F10.2)
243. 1013 FORMAT(11H,10(1/),2CX,'C O S T O S O P T I M O S P O R M A T E R I A L',10(1/),3CX,'M A T E
244.   R I A L',4FX,'C O S T O D E L A T U B E R I A (P E S O S)')
245. 1014 FORMAT(//,30),A37,10X,F12.2)
246.      STOP
247.      END

```

END FTI: 992 IFANK 1300 DEAPK 1 COPPON

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA PARA EL  
CALCULO DEL DIAMETRO OPTIMO DE LA  
SECCION DORADA



3

