

UNIVERSIDAD IBERO AMERICANA
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA BERZELIUS

ESTUDIO ECONOMICO DE DIFERENTES SISTEMAS DE RECOCIDO
PARA ALAMBRE DE COBRE ELECTROLITICO

TESIS PROFESIONAL

MARCOS PEREZ ARENAS

MEXICO, D. F.

1959



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
INCORPORADA A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA BERZELIUS

- Estudio Económico de Diferentes Sistemas de Recocido para Alambre de Cobre Electrolítico.

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a :

M A R C O S P E R E Z A R E N A S

MEXICO, D. F.

1959

A mis padres y hermanos

A mis compañeros y amigos.

Para Angeles.

A mis maestros, en especial al Sr. Ing. Salvador Cardona, director de este trabajo.

H D. Luis M. Verea, director de la F. Q. B.

Deseo expresar mi agradecimiento al Personal técnico y administrativo de Anaconda Pirelli Conductores Eléctricos, S. A., por la colaboración prestada al desarrollo de este trabajo.

I N D I C E

- I - Generalidades

- II - Descripción de los Diferentes Sistemas de Recocido Empleados en Anaconda - Pirelli, Conductores Eléctricos, S. A.

- III - Estudio Térmico de Cada Sistema

- IV - Estudio Económico de los Diversos Sistemas

- V - Conclusiones

- VI - Bibliografía

I - GENERALIDADES

- A) Preliminares
- B) Descripción del proceso de manufactura de conductores eléctricos
- C) Finalidad del recocido
- D) Especificaciones y calibres

I - GENERALIDADES

A) Preliminares.

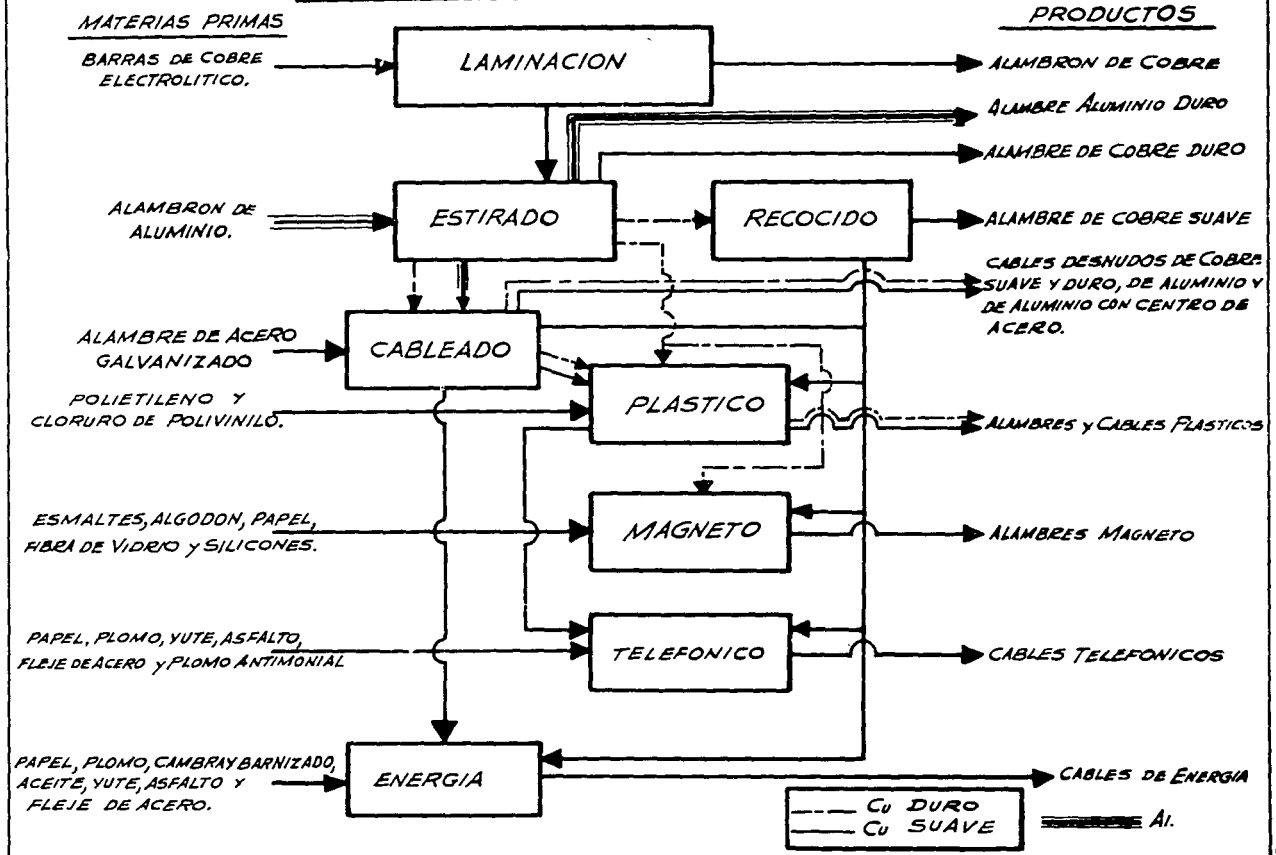
Es de todos conocido que en las industrias desde sus inicios se ha tratado de poder obtener los productos elaborados en ellas al menor costo posible, siendo éste un factor que en la actualidad ocupa un lugar esencial en cualquier empresa industrial organizada, ya que el desarrollo de estas empresas depende en gran parte de que los costos de fabricación esten en un mínimo.

Como es sabido, el costo cargado a un producto al ser sometido a un determinado proceso depende de factores tales como valor del - equipo empleado, capacidad del mismo, mano de obra de operación necesaria, costo del mantenimiento del equipo, energía consumida, etc. Todos estos factores son específicos para cada tipo de equipo empleable. En el presente trabajo se establecera cual de cuatro sistemas para recocido a estudiar, representa un costo de operación menor siendo, por lo tanto, el mas económico.

B) Descripción del proceso de manufactura de conductores eléctricos.

En la manufactura de conductores de energía eléctrica intervienen un gran número de procesos y operaciones mediante los cuales se transforman las materias primas en un conductor de energía eléctrica. Como el presente estudio abarca exclusivamente uno de dichos procesos, haremos sólo una somera descripción de las operaciones que tienen influencia sobre este, ya que el describir todas las etapas de manufactura de cada tipo de conductor constituiría un trabajo que esta fuera del fin

**DIAGRAMA DEL PROCESO DE MANUFACTURA
DE CONDUCTORES ELECTRICOS.**



de la presente relacion. Con objeto de poder tener una ligera idea de los procesos posteriores al recocido se puede consultar el diagrama en flujo del proceso en general.

1. - Laminacion.

El cobre refinado electroliticamente se recibe en lingotes, los que se almacenan en forma adecuada, de tal manera que se facilite su introduccion al horno de calentamiento. De ahí se van introduciendo a un horno continuo por medio de un empujador hidraulico; al entrar los lingotes al horno empiezan a calentarse y, a medida que van avanzando a traves de el, se va aumentando la temperatura hasta que al llegar al final alcanzan la adecuada para pasar al proceso de laminacion. Este horno de calentamiento tiene como fuente de calor aquella que le proporciona la ignicion del combustible Diesel con aire. Esta mezcla es impulsada al seno del horno por medio de tres quemadores principales y dos auxiliares, los cuales trabajan mediante un sistema electronico automatico con el fin de lograr que la temperatura de las barras al salir del horno sea lo mas constante posible y alcance el valor optimo que facilita el proceso de laminacion. Asi mismo, este regulador proporciona constantemente una relacion fija de aire a Diesel con el objeto de eliminar en lo que sea posible la presencia de oxigeno en la camara de calentamiento, inhibiendose asi la posible oxidacion del cobre. La barra ya caliente es extraida del horno accionando una puerta automatica y tomandola con unas tenazas que se sostienen por medio de una cadena fijada a un carro deslizando soportado por un riel. Se introduce la barra en el primer paso de laminacion y se continua el proceso disminuyendose consecutivamente el area transversal de la misma barra hasta obtenerse el alambreon de la me-

dida deseada. En los pasos nones de laminación se obtienen secciones transversales de forma cuadrada, y en los pasos pares de forma ovalada. En el ultimo paso se le da la figura circular del alambreon terminado. Este sistema se sigue con el objeto de que se efectue la reduccion lo mas homoganeamente posible, evitando la formacion de estratos perifericos con una estructura cristalina diferente a la estructura de las capas centricas del alambreon. Por ultimo, el alambreon se recoge en unos enrolladores automaticos y se enfria en agua.

Como este proceso se ha llevado a una alta temperatura y en presencia de aire, en el exterior del alambreon se forma una cuticula negra de oxido cuprico que por la parte interior es roja de oxido cuproso.

En el caso de que se desee almacenar el alambreon por tiempo indefinido se pasa inmediatamente a estibarse; pero como normalmente va a seguir el proceso, es necesario remover la pelicula antes mencionada. Para este fin se disuelve el oxido de cobre en un baño de acido sulfurico en caliente, despues, se elimina el exceso de acido asi como el oxido que no se haya desprendido completamente con un chorro de agua a presion. De ahi pasan los rollos de alambreon a un baño de bitartrato de potasio que neutraliza el acido remanente y le proporciona a la superficie exterior del cobre una cubierta protectora que impide la oxidacion momentaneamente.

Hasta este momento se ha estado maquilando el cobre a temperaturas elevadas, obteniendose por consecuencia cobre suave. Esto se debe a que se le permite al material un arreglo cristalino ordenado ya que se deforma a una temperatura superior a la temperatura de cristalización del cobre.

Para comprobar si el alambrcn est realmente suave se somete a un esfuerzo de tensi3n alargándolo hasta que se rompa. La especificaci3n aplicable a esta prueba dice que el alambrcn debe de soportar un - alargamiento m3nimo antes de romperse equivalente a un 30% de la longitud inicial de la muestra de prueba. Asf mismo, se le hace tambi3n una prueba con el fin de verificar la homogeneidad del cobre en el interior del alambrcn. Esta prueba consiste en fijar un extremo de la muestra por probar en un mandril est3tico y el otro extremo en un mandril accionado por un motor. Se hace girar el segundo hasta completar 10 revoluciones torci3ndose el alambrcn y en seguida se vuelve a girar en sentido contrario otras 10 vueltas. En el caso de que en el material haya imperfecciones interiores, 3stas se notar3n rechaz3ndose el material defectuoso.

2. - Estirado o trefilado.

El alambrcn ya limpio se coloca en unas vagonetas que tienen un poste central. Ahf se van acomodando sucesivamente los rollos uniendo uno a otro por sus extremos con el fin de tener una longitud continua. Esta union se hace por medio de una soldadura de arco limandose las rebabas con el fin de no alterar el diametro en la union. A continuacion se introduce la punta superior de los rollos en el primer dado haciendose pasar por el una longitud suficiente para poder colocar toda la linea de dados en la maquina. En el caso de que se haga esta operacion con alambrcn de diametro mayor a 15 mm., se requiere una fuerza considerable por lo que se tira de el con un aditamento hidraulico.

Esta operacion se repite con cada dado hasta dejar completa la linea deseada. Los dados de estirado para calibres gruesos son de acero al tungsteno ya que deben tener una alta dureza y una considerable

resistencia al calor y a la fricción. Básicamente consisten en un cono pulido al que se le dan unos ángulos que la práctica ha demostrado son los más adecuados; este cono termina en un cilindro o chumacera con el que se finaliza la reducción, y el diámetro del cual es el diámetro del alambre al salir del dado. En el caso de que se trate de alambre de diámetro menor a 1.3 mm. se emplean conos similares, pero que son de diamante en lugar de acero. Como el objeto del estirado es el de reducir el diámetro del alambro en pasos sucesivos hasta obtener el alambre deseado, en cada etapa de trefilado se usa un dado con un diámetro menor al anterior. Tomando como base que el volumen de cobre que pasa a través de cada dado es constante, nos encontramos que la velocidad de las poleas de tiro deberá ser aumentada proporcionalmente a la reducción en área que se efectúe en cada dado. Según este principio se calculan los diámetros de los dados que se colocarán en cada paso de estirado, tomando en cuenta una corrección por resbalamiento del alambre en cada polea. La operación de estirado es ayudada por medio de una solución lubricante que a la vez disipa el calor producido por la fricción del cobre con el dado. Esta solución está formada por un compuesto que contiene grasas animales y jabones disueltos en agua. Es muy importante mantener un pH alcalino en la solución con el fin de que ésta no ataque al cobre formando estearato; así mismo, esta solución se calienta bastante al pasar por la máquina, por lo que de ahí se le hace circular a un sistema de cambiadores de calor para enfriarla.

Durante el proceso de trefilado se modifica notoriamente la estructura del cobre obteniéndose éste como cobre duro. La explicación que se ha dado a esto es que al trabajar el cobre a temperaturas bajas y

siguiendo siempre el mismo sentido se disminuye el tamaño de los granos cristalinos orientándolos en relación a un mismo eje, obteniéndose así una formación fibrosa que comunica al material una alta tenacidad y aumenta su dureza, la que es proporcional al porcentaje de reducción en área que se haya efectuado en todo el proceso de estirado.

Los dos procesos descritos anteriormente son los que preceden al recocido y son los que tienen influencia directa sobre él. Los procesos que siguen al recocido consisten en la reunión de un grupo de alambres o en la aplicación de cubiertas aislantes en las cuales no se modifica la estructura del cobre más que en una pequeña proporción que es insignificante.

C) Finalidad del recocido.

Dentro de la rama de conductores de energía eléctrica debemos establecer las siguientes consideraciones para conductores de cobre:

1. - El metal que se usa es cobre refinado electrolíticamente con una pureza mínima de 99.9% (tomando plata como cobre).

2. - Podemos hacer una división atendiendo al temple del material, o sea temples:

a - duro

b - semiduro

c - suave

El primero se emplea para alambres o cables desnudos que se usarán como líneas primarias de transmisión en las que se requiere una alta resistencia a la tracción y no importa su flexibilidad. El temple semiduro se usa para productos en los que se requiere una cierta flexibi-

lidad y además van a estar sujetos a un esfuerzo mecánico de tracción. Por último, los conductores de cobre suave tienen las aplicaciones más generales y su uso se extiende a cualquier conductor aislado o no, en el cual es de primordial importancia su alta conductividad eléctrica sin tener importancia su resistencia mecánica.

Como se ha expuesto antes, el cobre al ser sometido a la operación de trefilado cambia sus propiedades endureciéndose; este endurecimiento es acompañado de un aumento en su resistividad eléctrica, lo cual, si bien ocupa un lugar secundario en su aplicación en conductores duros, es la primera cualidad a considerar para conductores de cobre suave, por lo que hay que restaurar esta condición al material estirado. Para esto se lleva a cabo el proceso de recocido. También en el caso de que el alambre que se va a estirar sea de un diámetro muy pequeño, se recomienda hacer la operación de trefilado en dos etapas efectuando entre ellas un recocido. Con esto se facilita la segunda etapa evitándose roturas de alambre durante la operación y sobreendurecimiento.

D) Especificaciones y calibres.

Con el fin de definir las propiedades mecánicas y eléctricas de cada temple existen diferentes normas o especificaciones industriales. Para el presente trabajo tomaremos en cuenta la norma nacional J-2, editada por la Dirección General de Normas y en la que quedan definidas las características de cada temple.

Con el fin de hacernos de una idea cuantitativa de las cualidades de cada temple a continuación tabulamos las características que debe satisfacer un alambre calibre 10 AWG para cada temple:

	Carga de ruptura Kg/mm ²	Alargamiento a rotura % min.	Resistividad ohm/mm ² x mt	Conductividad IACS %
Duro	45.63 mínimo	1.00	.017930	96.16
Semiduro	35.39 a 40.31	1.04	.017837	96.66
Suave	27.07 máximo	25	.017241	100

Normalmente y con el fin de facilitar los cálculos la resistividad eléctrica se expresa como su inverso, o sea conductividad. Para esto se ha tomado como base un valor internacional adoptado que es conocido por las iniciales IACS (International Annealed Copper Standard), el cual es equivalente a una resistencia de $1/58$ de ohm para un alambre de cobre recocido con una longitud de 1 metro y una área transversal de 1 mm². Con esto conocemos el límite que se ha de satisfacer en el recocido para obtener cobre suave. Como en la práctica industrial el probar a cada muestra esta propiedad es muy delicado y toma mucho tiempo, en lugar de ello se prueba la carga de ruptura y elongación a ruptura comprobándose la conductividad únicamente a cada lote de cobre recibido, quedando implícitamente aceptado que el alambre que satisfaga las propiedades mecánicas también cubrirá las eléctricas.

En México los calibres fabricados usualmente son los AWG - (American Wire Gauge), los que han sido aprobados por la Dirección General de Normas. Estos calibres se encuentran en una proporción geométrica y abarcan del 4/0 al 40 AWG. Para el establecimiento de esta proporción se tomaron arbitrariamente dos diámetros: 11.68 mm. (0.460") para el 4/0 y 0.127 mm. (0.005") para el 36, o sea que la relación fija entre dos diámetros consecutivos se tendrá por la fórmula:

$$f = \sqrt[39]{\frac{11.68}{0.127}} = \sqrt[39]{\frac{0.460}{0.0050}} = 1.1229322$$

II - DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE RECOCIDO
EMPLEADOS POR
"ANACONDA-PIRELLI - CONDUCTORES ELECTRICOS, S. A."

- A) General
- B) Horno de vapor
- C) Horno de vacio
- D) Horno de atmósfera inerte
- E) Recocido eléctrico continuo

II - DESCRIPCION DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE RECOCIDO EMPLEADOS POR
"ANACONDA-PIRELLI - CONDUCTORES ELECTRICOS, S. A."

A) General.

Entre los variados métodos de recocido podemos hacer una primera clasificación básica: sistemas en que se emplea calor exterior con el fin de calentar el alambre, en los cuales se coloca el cobre en campanas y se calientan éstas por medio de gases de combustión, resistencias eléctricas o tubos radiantes, y sistemas en los que se utiliza la propia resistencia eléctrica del alambre por recocer como fuente de calor para el recocido.

En el proceso de recocido debemos de considerar los siguientes factores que se deben de tomar en cuenta para cualquier sistema de que se trate:

1. - Al calentar el material se necesita tener una atmósfera protectora que lo prevenga contra la oxidación.

2. - El recocido siempre se efectúa en tres pasos, a saber:

a - Elevación de la temperatura hasta alcanzar el nivel deseado.

b - Mantención de esa temperatura por un cierto tiempo con el fin de que todo el material por procesar alcance la suavidad indicada.

c - Enfriamiento del material hasta alcanzar la temperatura ambiente.

Cada equipo de los usados para los fines de recocido está provisto de los aditamentos para llevar a cabo la operación de acuerdo con lo anteriormente expuesto.

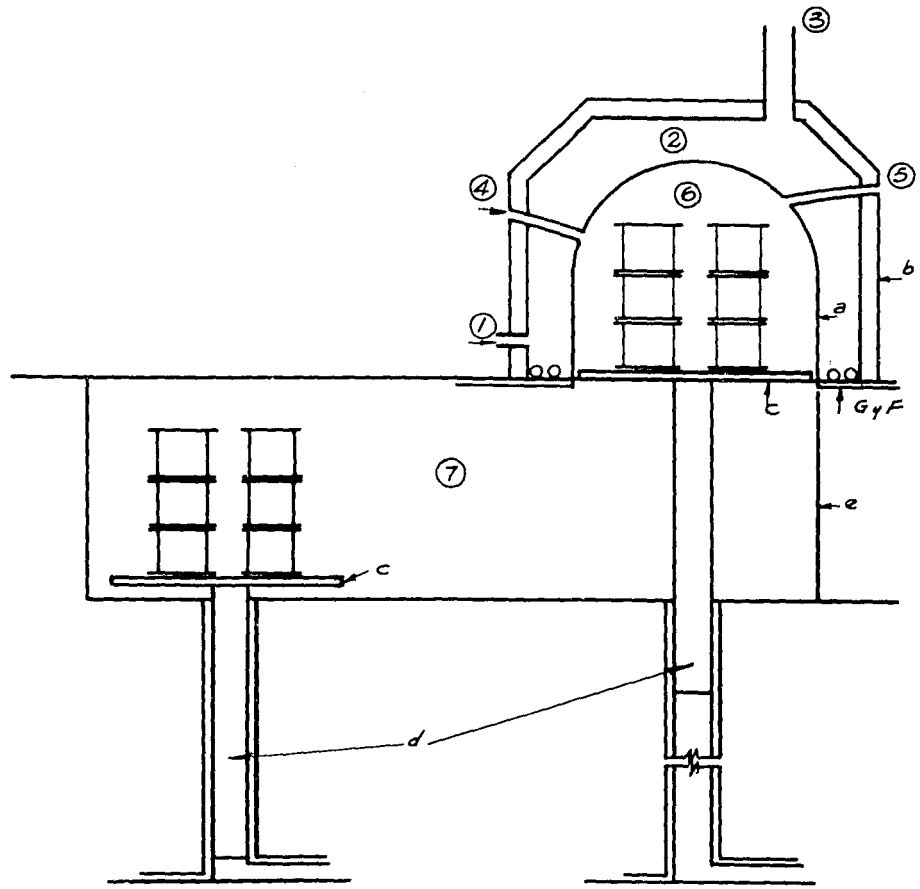


FIG. I HORNO DE VAPOR

B) Horno de vapor.

Se conoce como horno de vapor el equipo de recocido que consta de una campana en el interior de la cual existe una atmósfera protectora contra la oxidación que está formada por vapor de agua.

Para describir este equipo nos ayudaremos con la Fig. # 1. Consta esencialmente de una campana de acero "a", la que se encuentra recubierta por la cámara de combustión "b"; las bobinas conteniendo cobre se encuentran soportadas por las rejillas "c", las que pueden ser elevadas o bajadas por los émbolos "d"; en la parte inferior de las rejillas se encuentra un tanque de agua "e"; la campana y la cámara de combustión forman una unidad que puede ser corrida hacia los lados por medio de unas ruedas apoyadas en unos rieles "f" y "g".

En este equipo el calor necesario para elevar la temperatura del cobre es proporcionado por la combustión de la mezcla aire-Diesel. Una vez encendido y ya que ha alcanzado la temperatura indicada se comienza a cargar el cobre, el que se encuentra en bobinas de fierro. Para esto se hace subir uno de los émbolos y se van colocando las bobinas ordenadamente. En seguida se baja el émbolo hasta que libre la campana al colocarla sobre él; después, se desliza el conjunto formado por la campana y la cámara de combustión hasta que quede en la posición exacta, de tal manera que se pueda subir la rejilla con las bobinas. En este momento se introduce el vapor a la campana por el ducto "4" hasta eliminar completamente el aire del espacio "6"; el exceso de vapor sale por el ducto "5". Una vez que el horno está en condiciones se hace subir el émbolo de manera que sobrepase el nivel de agua del tanque. A partir de este momento se efectúa el recocido por el tiempo indicado. Al terminar

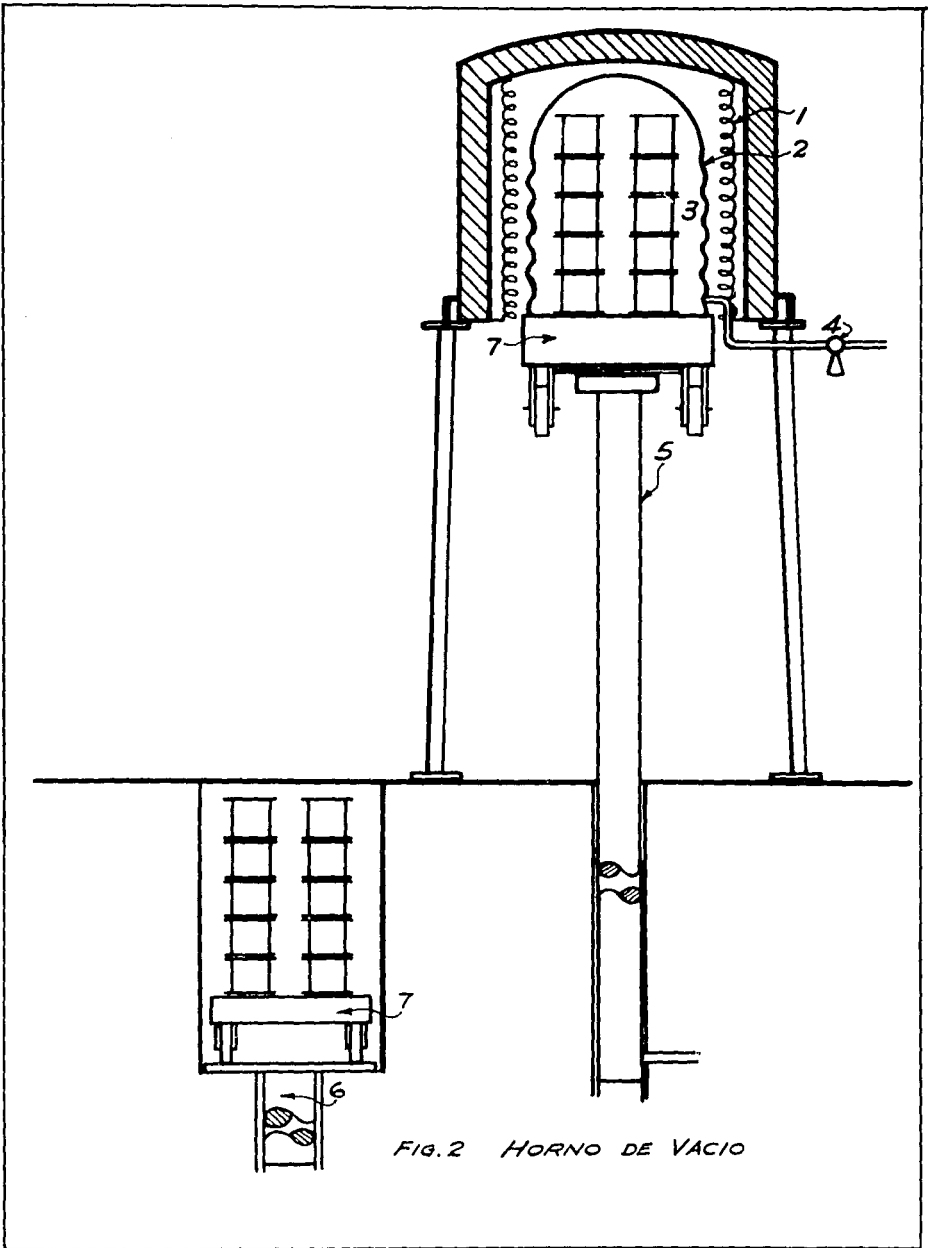


FIG. 2 HORNO DE VACIO

este lapso se desciende el émbolo bajando las bobinas con cobre para que sean enfriadas en el agua. Mientras tanto, se ha hecho una operación similar de carga en el otro émbolo, volviéndose a repetir el ciclo consecutivamente al correr la campana hacia el otro lado y meter el otro émbolo. Después que se ha dejado enfriar el cobre que estaba sumergido en el agua se hace subir el émbolo y se sacan las bobinas terminando así la operación de recocido por este sistema.

La mezcla combustible entra por el quemador "1", se quema y se difunde a través de la cámara de combustión "2" cediendo el calor que contiene a la campana "a"; después, sale por la chimenea "3" hacia el exterior.

C) Horno de vacío.

Se llama horno de vacío al horno recocedor que tiene como atmósfera protectora al vacío que se hace en la campana de recocido empleándose en él como medio de calentamiento un conjunto de resistencias eléctricas níquel-cromo.

Con el fin de hacer más clara la descripción nos referimos a la Fig. # 2. Las bobinas conteniendo cobre se colocan en las vagonetas "7", las que después de cargadas se cubren con sus respectivas campanas "2"; el medio de calentamiento es el horno de resistencias "1". El aire de la campana es extraído por el vacío producido por la bomba "4". Se tienen dos émbolos hidráulicos "5" y "6"; el primero para elevar las vagonetas con su campana hasta el horno, y el segundo para facilitar las operaciones de carga y descarga de bobinas colocando las vagonetas a una altura que haga más manuable dichas operaciones.

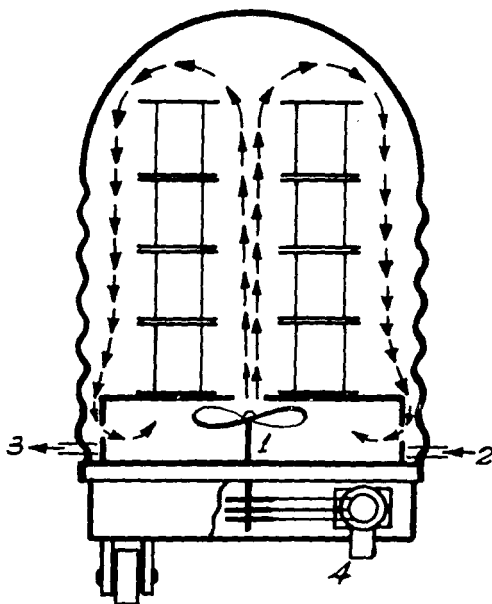


FIG. 3 HORNO DE ATMOSFERA INERTE

Al empezar la operación se hace descender el émbolo "6" a medida que se van colocando las bobinas, habiéndose ya completado la cantidad por recocer se cubre con la campana afirmando los empaques por medio de unos pernos de ajuste. Se traslada entonces la vagoneta hasta la base del horno en donde antes de ser subida se le extrae el aire por medio de la bomba de vacío "4". En seguida se sube por medio del émbolo "5" hasta el horno en donde se comienza el ciclo de recocido. Una vez estando a la temperatura adecuada se le vuelve a hacer el vacío; después se le deja a esta temperatura por el tiempo indicado y se baja repitiendo por última vez la operación de hacer vacío con el fin de asegurar la ausencia de oxígeno durante el tiempo de enfriado. A continuación se le deja enfriar hasta que alcanza una temperatura de unos 40 a 50°C destapándose. Con el fin de que los empaques de neopreno no sufran la acción prolongada del calor durante el recocido y enfriado se tiene en la parte superior de la vagoneta una circulación de agua que los enfría continuamente.

D) Horno de atmósfera inerte.

Se le da este nombre a un horno que es muy similar al de vacío, pero que en lugar de usar vacío como atmósfera protectora emplea un gas inerte producido por combustión de aire con butano que es sometido a un tratamiento catalítico con el fin de eliminar el oxígeno.

Acudiendo a la Fig. # " 3 vamos a conocer las diferencias de este sistema con el de vacío. Básicamente es muy similar, pero en las vagonetas de las campanas se encuentra un ventilador "1" que hace circular el gas a través de la campana. El gas entra por el ducto "2" y sale

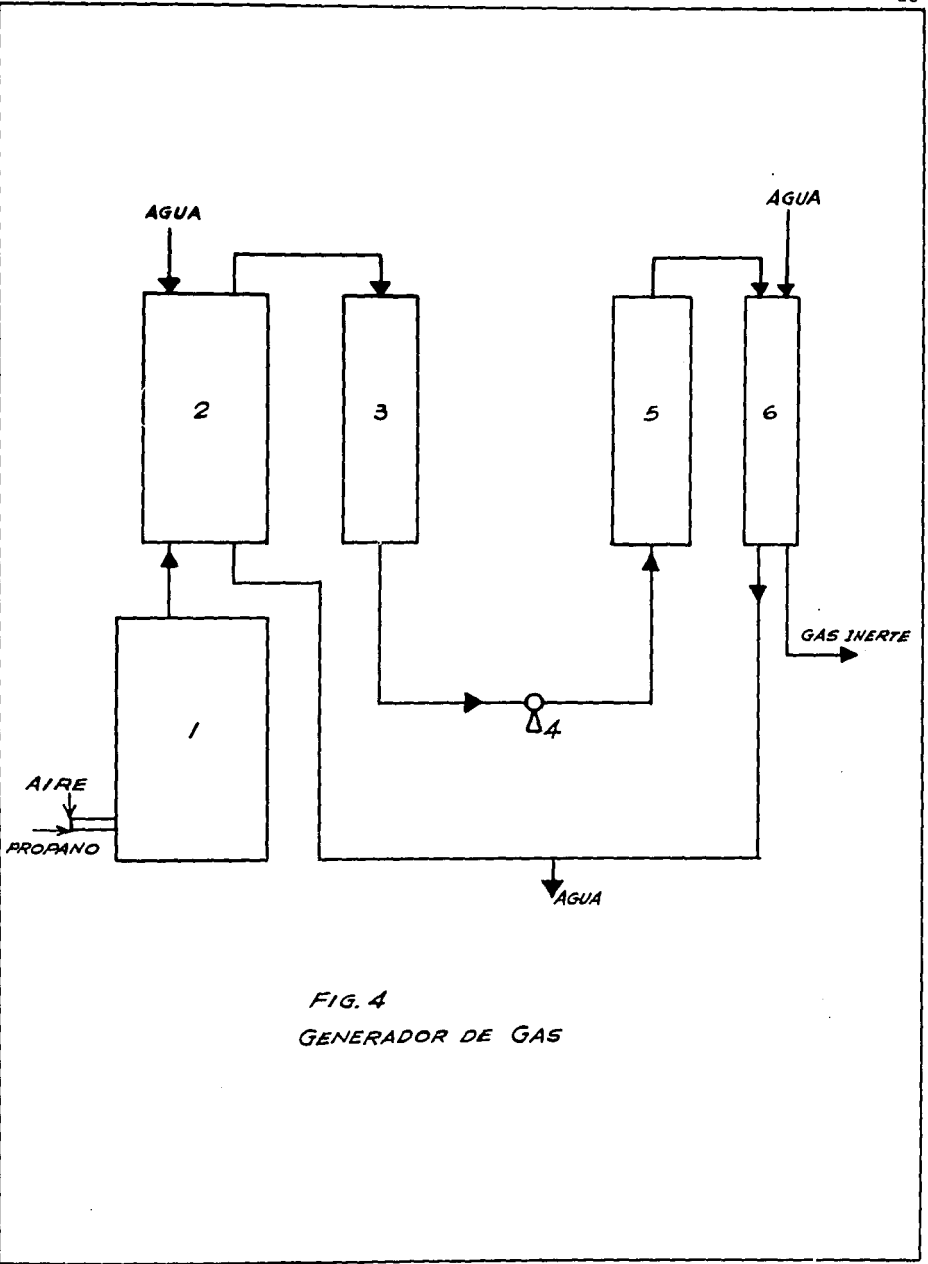


FIG. 4
GENERADOR DE GAS

por el "3"; el ventilador es accionado por el motor "4".

Tomando en cuenta la Fig. # 4, vamos a describir el proceso que se efectúa para obtener el gas inerte que se emplea como atmósfera protectora: la mezcla aire-butano se quema en la cámara de combustión "1", de donde el gas de combustión pasa a la torre empacada "2" en donde es lavado y enfriado pasando posteriormente a un filtro "3" en donde se elimina el agua posiblemente arrastrada y las impurezas. De ahí pasa a una bomba "4" donde se impulsa a la cámara catalítica "5" en donde es eliminado el oxígeno; en seguida es transportado a un enfriador "6" pasando por último al horno como gas inerte.

Por lo demás, el proceso se efectúa en la misma forma que el de vacío, pero suprimiendo éste y teniendo conectado el gas generado a la campana durante las operaciones de recocido y enfriado.

E) Recocido eléctrico continuo.

Se conoce como recocido eléctrico continuo el sistema que recuece el alambre aprovechando el calor que genera la propia resistencia del conductor al hacerle pasar una corriente eléctrica. Este método se lleva como se ve en la Fig. # 5, haciendo pasar el alambre por unas poleas de bronce que están conectadas a una fuente de corriente alterna. El alambre, al pasar entre las poleas "1" y "2" sufre el primer calentamiento, siguiendo su camino hasta llegar a las poleas "4" y "5", en donde sufre su último calentamiento. Como éste lo lleva a alcanzar una alta temperatura a la cual es atacable por el oxígeno, se previene esto por medio de una chaqueta de vapor, en la que el vapor entra por "a" y sale por la parte superior haciendo un sello. Es necesario que el alambre

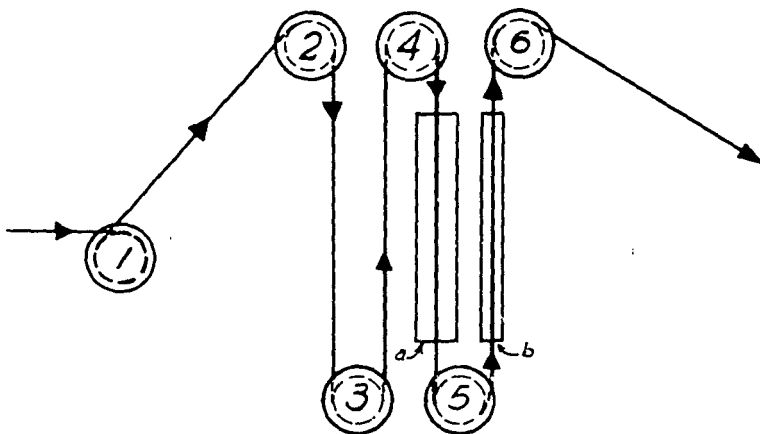


FIG. -5 RECOCIDO ELECTRICO CONTINUO

sea enfriado después de esto, para lo que se usa un tubo por el que circula la agua que entra por "b". Este tubo está colocado entre las poleas "5" y "6". Después de la polea "6" el alambre sale al exterior ya recocado.

III - ESTUDIO TERMICO DE CADA SISTEMA

- A) Horno de vapor
- B) Horno de vacío
- C) Horno de atmósfera inerte
- D) Recocido eléctrico continuo

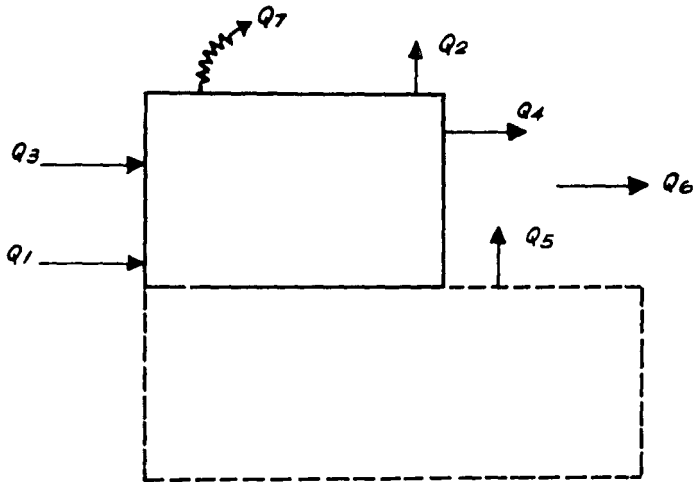


FIG. 6 HORNO DE VAPOR
(DIAGRAMA EN FLUJO DE CALOR)

III - ESTUDIO TERMICO DE CADA SISTEMA.

Los estudios térmicos de cada uno de los sistemas descritos anteriormente se harán con el fin de determinar las cantidades de energía demandadas para el recocido de los calibres normales de manufactura, la cantidad de combustibles necesario para cada sistema y con el fin de obtener las eficiencias térmicas de los sistemas.

Para esto nos valdremos de balances de materiales y calor. Aunque las operaciones son intermitentes se pueden considerar como continuas, ya que en conjunto forman ciclos continuos.

A) Horno de vapor.

En el diagrama de flujo de la Fig. # 6 tenemos:

Q_1 = Poder calorífico bajo de combustión del Diesel.

Q_2 = Calor que sale con los gases de combustión.

Q_3 = Calor que entra con el vapor.

Q_4 = Calor que sale con el vapor.

Q_5 = Calor necesario para evaporar el agua que se repone en el tanque.

Q_6 = Calor sensible que sale con el cobre después del ciclo de enfriado y con las bobinas de hierro.

Q_7 = Pérdidas térmicas por radiación.

Q_8 = Calor necesario para elevar el cobre de la temperatura ambiente a la de recocido.

Pérdidas térmicas = $(Q_1 + Q_3) - (Q_2 + Q_4 + Q_5 + Q_6)$

Eficiencia térmica en % = $\frac{Q_8}{Q_1 + Q_3} \times 100$

Datos:

Diesel

Análisis químico (peso en %):

C 84.3 %

Peso específico 0.853 gr/cm³H₂ 14.4 %

Poder calorífico alto 10,790 Kcal/Kg

S 1.3 %

Consumo promedio 250 lts/turno

100.0 %

Aire

Análisis químico (volumen en %):

N₂ 79.0 %O₂ 21.0 %

100.0 %

Análisis Orsat:

N₂ 83.0 %

Temperatura de salida

O₂ 4.6 %

(gases de combustión) 425°C

CO₂ 12.4 %

Temperatura ambiente 23°C

Fuentes de datos:

La composición, gravedad específica, calor de combustión del Diesel, etc., son datos para el Diesel N° 2 de Petróleos Mexicanos, siendo éste el que se consume en este horno.

La temperatura de salida de los gases de combustión, así como la temperatura ambiente, se tomó por medio de determinaciones termométricas, estableciéndose promedios.

Así mismo, el análisis Orsat proviene de un promedio de las lecturas que se llevaron a cabo periódicamente: se observará en este análisis que la combustión es completa (conversión total a CO₂ y H₂O).

Se reveló únicamente la presencia de CO como trazas, siendo el contenido notado indeterminable en un análisis Orsat normal. El SO₂ formado en la combustión se determinó al hacer el análisis de CO₂.

1. - Cálculo estequiométrico Aire-Diesel.

Composición molar del Diesel - base 100 Kgs. de Diesel.

1	2	3	4
Elemento	% en peso	Moles por 100 Kgs.	% en moles
C	84.3	$84.3/12 = 7.0250$	$7.0250/14.2656 \times 100 = 49.24$
H ₂	14.4	$14.4/2 = 7.2000$	$7.2000/14.2656 \times 100 = 50.48$
S	<u>1.3</u>	$1.3/32 = \underline{0.0406}$	$0.0406/14.2656 \times 100 = \underline{00.28}$
Tot:	100.0	14.2656	100.00

En la tabla anterior aparece en las columnas 1 y 2 el contenido de los diversos componentes del Diesel, expresado como por ciento en peso. En la columna siguiente, al dividir el contenido porcentual entre el peso molecular de cada uno de los componentes, se tiene el contenido en Moles-Kg. por 100 Kgs. de Diesel, y en la columna 4 se obtiene el contenido de cada compuesto en por ciento molar al dividir los moles por 100 Kgs. de cada componente entre el número total de moles. Con estos datos podemos obtener la cantidad de aire necesario, y, calculando el exceso de aire, podemos determinar la cantidad total de gases de combustión que se tienen por 100 Kgs. de Diesel.

Aire necesario para 100 Kgs. de Diesel:

$$(49.24 + 25.24 + 0.28) / 100 \times 100/21 \times 14.2656 = 50.9 \frac{\text{Moles Kg. de Aire}}{100 \text{ Kgs. de Diesel}}$$

$$\frac{\text{Moles de O}_2}{\text{Mol de Diesel}} \times \frac{\text{Moles de Aire}}{\text{Moles de O}_2} \times \frac{\text{Moles de Diesel}}{100 \text{ Kg. de Diesel}} = \frac{\text{Moles de Aire}}{100 \text{ Kgs. de Diesel}}$$

Exceso de aire - base 100 moles de gases de combustión.

	Componente	% en moles	Átomos de C	Moles de O ₂
	N ₂	83.0		
	O ₂	4.6		4.6
	CO ₂	<u>12.4</u>	<u>12.4</u>	<u>12.4</u>
Total:		100.0	12.4	17.0

$$\text{Oxígeno del aire} \quad 83 \times 21/79 \quad = \quad 22.1$$

$$\text{Oxígeno desaparecido} \quad 22.1 - 17.0 \quad = \quad 5.1$$

$$\text{Oxígeno necesario} \quad 5.1 + 12.4 \quad = \quad 17.5$$

$$\text{Exceso de aire} \quad \frac{4.6}{5.1 + 12.4} \times 100 \quad = \quad 26.3\%$$

Aire total = 1.263 x 50.9 = 64.9 Mol-Kg. de aire / 100 Kgs. de Diesel

Moles de gases de combustión:

$$64.9 \times \frac{79}{100} \times \frac{100}{83} = 61.4 \text{ Mol Kg. de gases / 100 Kgs. de Diesel}$$

$$\frac{\text{Mol aire}}{100 \text{ Kg. Diesel}} \times \frac{\text{Mol N}_2}{\text{Mol aire}} \times \frac{\text{Mol gases}}{\text{Mol N}_2} = \frac{\text{Mol gases}}{100 \text{ Kgs. Diesel}}$$

2. - Cálculo de Q₁ - base 1 hora.

$$Q_1 = 250/8 \times 0.853 \quad 10,790 - \frac{600 \left(\frac{18}{2} \times 14.4 \right)}{100} = 266,820 \text{ Kcal/hora}$$

$$\text{lbs/hora} \times \text{Kgs./lb} \quad \text{Kcal/Kg.} \quad = \quad \text{Kcal/hora}$$

El valor de 600 representa en números redondos el calor latente de evaporación del agua en Kcal/Kg. de agua evaporada.

3. - Cálculo de Q₂ - base 1 hora.

$$Q_2 = \dots C_p \cdot t$$

$$\frac{\text{Kg}}{\text{hr}} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \times ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$CO_2 = 250/8 \times 0.853 \times 0.614 \times 0.124 \times 44 \times 0.21 \times (425-23) = 7,540$$

$$O_2 = 250/8 \times 0.853 \times 0.614 \times 0.046 \times 32 \times 0.22 \times (425-23) = 2,130$$

$$N_2 = 250/8 \times 0.853 \times 0.614 \times 0.830 \times 28 \times 0.25 \times (425-23) = \underline{38,230}$$

$$47,900 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr}}$$

$$\frac{\text{lt}}{\text{hr}} \times \frac{\text{Kg}}{\text{lt}} \times \frac{\text{Mol}}{\text{Kg}} \times \frac{\text{Mol}}{\text{Mol}} \times \frac{\text{Kg}}{\text{Mol}} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal/hora}$$

4. - Cálculo de $Q_3 - Q_4$ (base 1 hora).

Cantidad de vapor por turno = 220 Kgs. desde 7.03 Kg/cm² a 1.00 Kg/cm²

$$Q = W \times H_2 - H_1$$

$$Q_3 - Q_4 = \frac{220}{8} \times (659.4 - 638.5) = 570 \text{ Kcal / hora}$$

$$\text{Kgs/hora} \times (\text{Kcal/kg}) = \text{Kcal/hora}$$

5. - Cálculo de Q_5 - base 1 hora.

Cantidad de agua evaporada por día = 6,000 lts.

$$Q_5 = 6,000 / 24 \times 551.7 = 137,920 \text{ Kcal/hora}$$

6. - Cálculo de Q_6 - base 1 hora.

4,320 Kgs. de cobre / turno y bobinas de hierro con 650 Kgs/turno

$$\text{Para el cobre: } 4,320 / 8 \times 0.093 \times (80 - 23) = 2,860 \text{ Kcal / hr.}$$

$$\text{Para bobinas: } 650 / 8 \times 0.113 \times (80 - 23) = 520 \text{ Kcal / hr.}$$

$$\text{Kgs/hora} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C}$$

7. - Cálculo de Q_7 - base 1 hora.

Pérdidas térmicas por radiación en %, por diferencia.

$$Q_7 = \frac{(266,820 + 570) - (47,900 + 137,920 + 2,860 + 520)}{266,820 + 570} \times 100 = 29.24\%$$

8. - Cálculo de Q_8 (base 1 hora).

$$Q_8 = 4,320/8 \times 0.096 \times (500 - 22) = 24,780 \text{ Kcal/hr.}$$

$$\text{Kgs/hora} \times \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C}$$

9. - Eficiencia térmica en por ciento.

$$\frac{Q_8}{Q_1 + Q_3} = \frac{24,780}{267,390} = 9.27\%$$

B) Horno de vacfo.

Según el diagrama de la Fig. # 7:

- Q_1 = Calor que producen las resistencias,
- Q_2 = Calor que sale con el agua de enfriamiento del empaque,
- Q_3 = Calor disipado durante el ciclo de enfriamiento,
- Q_4 = Calor sensible necesario para calentar el cobre desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de recocido.

Cálculo de los diferentes calores.

Los diferentes calores son variables en función del calibre del alambre por recocer. Se harán los cálculos ayudándonos de las siguientes tablas de operación, (base 600 Kgs. de cobre / carga).

TABLAS DE OPERACION
PARA UNA CARGA

Calibre	Recocido			
	1	2	3	4
AWG	t _r °C	hrs.	KWH/hr	
34 - 31	460	3	60	
30 - 27	470	3-1/2	64	
26 - 23	480	4	67	
22 - 19	490	4-1/4	70	
18 - 15	500	4-1/2	72	
14 - 11	510	5	73	

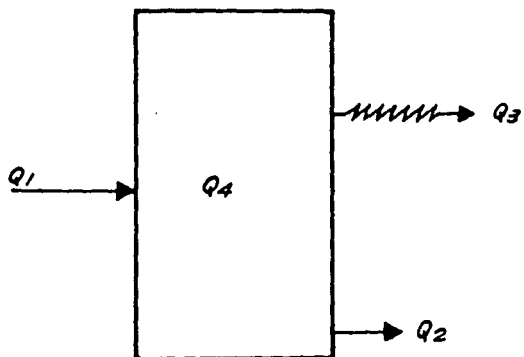


FIG.-7 HORNO DE VACIO.
(DIAGRAMA EN FLUJO DE CALOR)

Calibre	Enfriado		
	5	6	7
AWG	hrs.	lts/hr.	t_m °C
34 - 31	18	120	30
30 - 27	20	120	32
26 - 23	23	120	34
22 - 19	26	120	34
18 - 15	30	120	35
14 - 11	35	120	35

En las tablas anteriores aparecen las condiciones actuales de operación para los ciclos de recocido y enfriado en el horno de vacío. En la columna 1 aparecen los calibres de alambres que se recuecen de acuerdo a un determinado ciclo; en una misma carga se pueden recocer varios calibres que estén dentro del mismo rango, (esto no es muy recomendable y es preferible que se procese un solo calibre), obteniéndose propiedades que cubren las especificaciones. En las columnas 2 y 3 aparecen las condiciones de recocido necesarias (temperatura y tiempo) para obtener cobre suave a partir de material duro. Estos valores se han determinado prácticamente y contienen un margen de seguridad previniendo el endurecimiento posible en procesos posteriores. En la columna 4 se encuentra el valor de la energía consumida en cada ciclo por hora. Este valor proviene de la medición directa que se ha efectuado en un wattmetro estando el proceso en operación.

En la tabla del ciclo de enfriado se tienen anotados los siguientes valores; en la columna 5 se encuentra el tiempo en horas en que

se efectúa el enfriamiento; en la columna 6 se tienen los litros de agua de enfriamiento para el empaque que se consumen en 1 hora, y en la columna 7 están las temperaturas medias que se han calculado para el agua de enfriamiento de los empaques.

Con estos datos calculamos los calores según las siguientes fórmulas, (base 1,000 Kgs.):

$$Q_1 = \text{KWH/hr} \times \text{hrs} \times 860 \times \frac{1,000}{600} = \text{Kcal/Ton.}$$

$$\text{KWH/hr} \times \text{hrs} \times \text{Kcal/KWH} = \text{Kcal}$$

$$Q_2 = \text{lbs/hr} \times \text{hrs} \times 1 \times (t_m - t_a) \times \frac{1,000}{600} = \text{Kcal/Ton.}$$

$$\text{Kgs/hr} \times \text{hrs} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal}$$

$$Q_3 = Q_1 - Q_2 = \text{Kcal/Ton.}$$

$$Q_4 = 1,000 \times c_p (t_r - t_a) = \text{Kcal/Ton.}$$

$$\text{Kgs} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal}$$

$$\eta = \frac{Q_4}{Q_1} \times 100 = \% \text{ eficiencia termica}$$

obteniendo la siguiente tabla:

Calibre	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	η
AWG	Kcal/Ton	Kcal/Ton	Kcal/Ton	Kcal/Ton	%
34 - 31	258,000	28,800	229,200	42,200	16.4
30 - 27	321,050	40,000	281,050	43,100	13.4
26 - 23	384,100	55,200	328,900	44,100	11.5
22 - 19	426,400	62,400	362,200	45,100	10.6
18 - 15	464,400	78,000	386,400	46,000	9.9
14 - 11	523,000	91,000	432,000	47,000	9.0

C) Horno de atmósfera inerte.

1. - Estudio estequiométrico del generador de gas.

El generador de gas quema una mezcla de butano con aire con el fin de producir un gas que proporcione una atmósfera inerte, la cual protege al cobre de oxidación al ser calentado éste. Al quemarse el butano en la cámara de combustión se tienen como productos CO_2 , CO , N_2 , H_2O , y O_2 ; este último es necesario eliminarlo, ya que su presencia causaría la oxidación del cobre. Para esto se le hace pasar por una cámara catalítica en la que se combina con otros componentes de la combustión obteniéndose un gas con los siguientes componentes: CO_2 , CO , N_2 , y H_2O . El agua se elimina condensándola en la última cámara, con lo que se tiene el gas seco listo para usarse en el horno.

Datos:

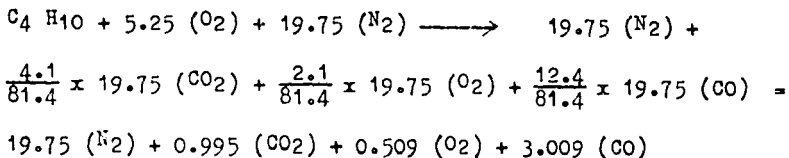
Relación de aire a gas = 25 / 1

Análisis Orsat (volumen en %)

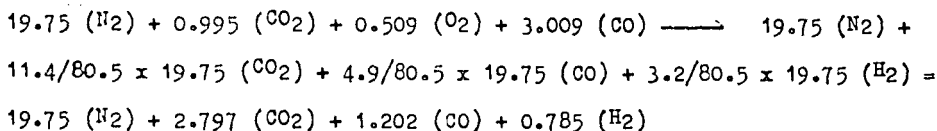
	Componente	Antes de la Catálisis	Después de la Catálisis
	CO_2	4.1 %	11.4 %
	O_2	2.1 %	-- %
	CO	12.4 %	4.9 %
	H_2	-- %	3.2 %
	N_2	<u>81.4 %</u>	<u>80.5 %</u>
Total:		100.0 %	100.0 %

de donde podemos deducir las siguientes reacciones estequiométricas:

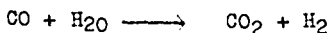
En la cámara de combustión:



y en la cámara catalítica:



Las reacciones probables que se llevan a cabo en la cámara catalítica serán:



La cantidad de butano alimentado es de 0.93 m³/hr., o sea en moles:

$$0.93 \times 1,000/22.4 = 41.52 \text{ moles de butano / hr.,}$$

y los moles de gas producido por hora serán:

$$41.52 \times 25 \times 0.79 \times 100/80.5 = 1,018.6 \text{ moles de gas / hr.}$$

2. - Balance de calor del horno.

Procediendo de una manera similar a como se hizo con el horno de vacío, tenemos en la Fig. # 8:

- Q₁ = Calor que producen las resistencias,
- Q₂ = Calor que sale con el agua de enfriamiento del empaque,
- Q₃ = Calor que sale con el gas que circula en la atmósfera inerte,
- Q₄ = Calor disipado durante el ciclo de enfriamiento,
- Q₅ = Calor necesario para calentar el cobre hasta la temperatura de

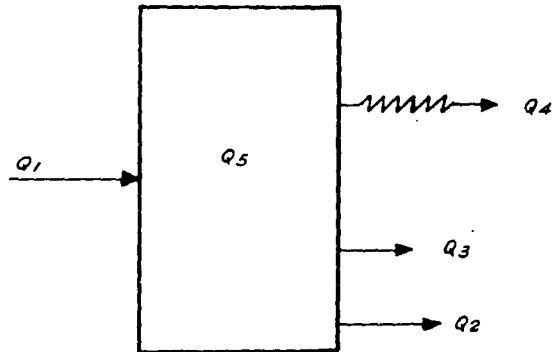


FIG.-8 HORNO DE ATMOSFERA INERTE
(DIAGRAMA EN FLUJO DE CALOR)

recocido.

Se tomaran como base las tablas de operacion que aparecen en seguida - (base 4,000 Kgs. de cobre / carga).

TABLAS DE OPERACION
PARA UNA CARGA

Calibre	Recocido			
	1	2	3	4
AWG	tR °C	hrs.	KWH/hr.	
14 - 11	490	6-1/2	63	
10 - 7	500	6-3/4	67	
6 - 3	515	7	72	
2 - 2/0	525	7.20	77	
3/0 y 4/0	540	7.40	83	

Calibre		Agua		Gas	
1	5	6	7	8	9
AWG	hrs.	lts/hr.	t _m °C	m ³ /hr.	t _m °C
14 - 11	12	150	32	22.8	130
10 - 7	13	150	33	22.8	138
6 - 3	14-1/2	150	35	22.8	148
2 - 2/0	16	150	37	22.8	161
3/0 y 4/0	18	150	40	22.8	176

En las tablas anteriores se encuentran los datos de operacion con los que se trabaja en el horno de gas inerte: en la columna # 1 aparecen los rangos de manufactura limites de condiciones de operacion; en la columna # 2 aparece la temperatura de recocido a la que se debe elevar

el alambre correspondiente a la columna # 1; en las columnas 3 y 4 se tienen los tiempos de ciclo de recocido y el consumo promedio en KWH por hora durante el calentamiento. Los valores de consumo de energía se han obtenido por medición directa en un wattmetro.

En lo que respecta al ciclo de enfriado tenemos en la columna # 5 el tiempo que dilata el enfriamiento, en la columna # 6 se tiene el consumo promedio de agua para el enfriamiento de los empaques, y en la 7 la temperatura media de salida de dicha agua, por último, en las columnas 8 y 9 nos encontramos con el consumo de gas en m³ / hora y la temperatura media de salida de dicho gas.

Cálculo de los calores:

$$Q_1 = \text{KWH/hr} \times \text{hrs} \times 860 \times 1/4 = \text{Kcal/Ton}$$

$$\text{KWH/hr} \times \text{hrs} \times \text{Kcal/KWH} = \text{Kcal}$$

$$Q_2 = \text{lbs/hr} \times \text{hrs} \times 1 (t_m - t_a) \times 1/4 = \text{Kcal/Ton}$$

$$\text{Kgs/hr} \times \text{hrs} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal}$$

$$Q_3 = \text{m}^3/\text{hr} \times \text{hrs} \times C_{pm} \times 1/4 = \text{Kcal/Ton } (^{\circ})$$

$$\text{m}^3/\text{hr} \times \text{hrs} \times \text{Kcal/m}^3 = \text{Kcal}$$

$$Q_4 = Q_1 = (Q_2 + Q_3) = \text{Kcal/Ton}$$

$$Q_5 = 1,000 \times C_p (t_R - t_a) = \text{Kcal/Ton}$$

$$\text{Kgs} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal}$$

$$\eta = \frac{Q_5}{Q_1} \times 100 = \% \text{ de eficiencia térmica}$$

(^o) Para el cálculo de calor sensible que sale con el gas inerte se ha dispuesto de valores medios en Kcal/m³ debido a que se disponía de tablas calculadas para esas unidades. En dicha tabla se encontraban valores para cada gas, pero, con el fin de simplificar los cálculos, se tomó el calor medio para cada gas y se multiplicó por la fracción mol

correspondiente, teniéndose así el valor para la mezcla.

Calibre	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	
AWG	Kilocalorías por Tonelada					%
14 - 11	88,040	18,000	88	69,910	45,070	51.2
10 - 7	97,220	21,450	96	75,670	46,030	47.3
6 - 3	108,360	28,270	107	79,980	47,480	43.8
2 - 2/0	119,200	36,000	118	83,080	48,440	40.6
3/0 y 4/0	132,000	48,600	133	83,270	49,880	37.8

D) Recocido eléctrico continuo.

La energía generada por un conductor al pasar una corriente eléctrica a través de él se expresa por la fórmula:

$$WH = I^2 R \times t$$

en donde:

WH = energía en watts-hora

I = intensidad en amperes

R = resistencia en ohms

t = tiempo en horas

La intensidad se mide directamente en un galvanometro. La resistencia eléctrica se calcula para una temperatura media entre la temperatura de entrada del alambre y la de recocido del mismo. Para esto usamos la siguiente ecuación:

$$R_t = R_{20} \left[1 + \alpha (t - 20) \right]$$

en donde:

R_t = resistencia a la temperatura deseada en ohms

- R_{20} = resistencia a 20°C en ohms
 α = coeficiente de resistencia para cobre duro por °C
 t = temperatura media en °C

Con fines de cálculo se consideró la temperatura de recocido como 500°C, los siguientes valores de resistencia a 20°C y factor de corrección por temperatura, siendo estos valores para el cobre duro.

$$R_{20} = \frac{0.017930}{S} \times l$$

en donde:

- R_{20} = resistencia en ohms a 20°C
 S = sección del alambre en mm²
 l = longitud del alambre en mts.
 0.017930 = resistividad volumétrica del cobre duro a 20°C
 El valor de α (corrección por temperatura °C) es de 0.00378.

Tomaremos como base la energía obtenible en una hora, por lo tanto:

1. - Al ser la velocidad de la maquina de 800 mts/min., la cantidad de alambre que pasa en 1 hora será = $800 \times 60 = 48,000$ mts.
2. - La resistencia eléctrica a substituir en la fórmula será la que tenga el material por recocer con una longitud de 48 Kms.
3. - La cantidad de cobre recocido que se obtiene será la contenida en 48 Kms. de alambre.
4. - El flujo de agua de enfriamiento es el mismo para todos los calibres (2,340 lts/hr), variando únicamente la temperatura de salida.

Por lo antes expuesto, tenemos la siguiente tabla:

Q1 = Energía producida por el paso de la corriente a través del con-

ductor por recocer ($I^2R \times 860/1,000 = \text{Kcal/hr.}$)

$WH \times \text{Kcal/KWH} \times 1/1,000 = \text{Kcal/hr.}$

$Q_2 = \text{Calor disipado por el agua } (2,340 \times 1 \text{ (t)} = \text{Kcal/hr.})$

$\text{Kgr/hr} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} = \text{Kcal/hr.}$

$Q_3 = \text{P\u00e9rdidas t\u00e9rmicas } (Q_1 - Q_2 = \text{Kcal/hr.})$

$Q_4 = \text{Calor necesario para recocer el cobre (v. Cp } (500 - 22) = \text{cal/seg)}$

$\text{Kgs} \times \text{Kcal/Kg } ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C}$

$= \text{Eficiencia t\u00e9rmica en por ciento} = (Q_4 / Q_1 \times 100 = \%)$

Calibre	KE/hr	Rt	I	Q1		t	Q2	Q3	Q4	%
AWG	Kg.	ohms	Amperes	KWH	Kcal/hr	°C	Kcal/hr	Kcal/hr	Kcal/hr	%
24	87.36	8,316	0.92	7.038	6,053	2.5	5,850	203	4,018	66.4
22	138.24	5,256	1.47	11.358	9,768	2.6	6,084	3,684	6,359	65.1
20	221.28	3,280	2.38	18.579	15,978	2.7	6,318	9,660	10,179	63.7
19	278.88	2,607	3.03	23.935	20,584	3.0	7,020	13,564	12,828	62.3
18	351.36	2,074	3.85	30.741	26,437	3.4	7,956	18,481	16,163	61.1

IV - ESTUDIO ECONOMICO DE LOS DIVERSOS SISTEMAS

- A) Introducción
- B) Estudio de cada sistema
- C) Programación lineal

IV - ESTUDIO ECONOMICO DE LOS DIVERSOS SISTEMAS.

A) Introducci3n.

Entre los distintos factores que afectan el costo total de un producto se encuentran los gastos de administraci3n, ventas y distribuci3n, supervisi3n indirecta, impuestos, etc.; pero 3nicamente intervienen en el costo de manufactura los siguientes:

1. - Materia prima,
2. - Mano de obra de operaci3n,
3. - Supervisi3n directa y auxiliar de mano de obra,
4. - Mantenimiento y reparaci3n,
5. - Suministro de operaci3n, (agua, etc.) y
6. - Energfa.

En el presente trabajo no consideramos los puntos 1 y 3 debido a que son factores que afectan en comun a estos equipos. Es importante adem3s considerar la depreciaci3n de equipos y edificios, los cuales, si bien no son gastos directos de fabricaci3n, nos pueden ayudar a hacer una comparaci3n econ3mica de los sistemas entre s3.

Para la maquinaria se considerar3 una depreciaci3n a 15 a3os, en cambio para los edificios se tomar3n 20 a3os.

Los valores de costo de mano de obra, mantenimiento, suministros y consumo de energfa son datos reales obtenidos de la pr3ctica.

B) Estudio de cada sistema.

1. - Horno de vapor.

El horno de vapor tiene como caracterfstica especial la rapidez del ciclo de recocido y enfriado, lo que hace que se emplee b3sicamente

camente para recocer soleras de cobre. En la obtención de dichas soleras se emplea una serie de rodillos con los que se va aplanando un alambre redondo en pasos consecutivos hasta obtener el perfil deseado. Al irse efectuando las operaciones de aplanado se endurece el material en proceso dificultándose los aplanados subsecuentes, por lo que es necesario recocer entre los pasos de aplanado. Para este recocido el sistema mas recomendable es el horno de vapor.

El manejo de este sistema es muy sencillo y no requiere cuidado especial, necesitándose únicamente 2-2/3 horas-hombre de operación por turno.

El costo de mantenimiento por año es muy bajo, ya que su mecanismo es sencillo y no es necesario tener un mantenimiento preventivo continuo en la mayoría de sus partes.

A continuación aparecen los datos de los que se ha partido para obtener el costo unitario por tonelada de cobre recocido:

Producción en toneladas / año	3,890	tons/año
Costo de adquisición en pesos	\$ 240,000.00	
Espacio ocupado en m ²	45	m ²
Costo de mano de obra por mes en pesos	\$ 870.00	
Costo de mantenimiento por año	\$ 1,820.00	
Consumo de agua en m ³ /mes	150	m ³
Consumo de Diesel por mes en lts.	18,750	lts.
Consumo de energía para accionar motores por mes	7.46	KWH

(base - 1 tonelada recocida).

Fuentes de datos:

La producción anual se ha calculado para 300 días de trabajo.

jo al año, considerando que se labora continuamente a razón de 3 turnos diarios de 8 horas durante 25 días al mes.

El costo de adquisición se ha considerado para el equipo ya instalado y puesto en operación.

El espacio que ocupa en m² se calcula tomando en cuenta aparte del necesario para el equipo, la superficie adicional que se tiene que tener para efectuar los movimientos de carga y descarga del material por recoger.

El costo de mano de obra se ha considerado para un obrero especializado con la experiencia adecuada.

El mantenimiento ha sido calculado de datos reales de operación y el consumo de agua se determino por medición directa.

El consumo de Diesel se obtuvo de un rotámetro que está instalado en el equipo.

La energía para accionar los motores se tiene de la siguiente fórmula:

$$\text{KWH} = \text{HP} \times 0.746 \times \text{hrs.}$$

$$\text{Energía} = \text{Potencia (HP)} \times \frac{\text{KWH}}{\text{HP}} \times \text{Tiempo (horas)}$$

Este consumo es muy pequeño y únicamente se emplea para proporcionar la potencia hidráulica a los equipos de elevación.

Depreciación maquinaria	240,000 - 15 x 3,890	Pesos \$	4.113
Depreciación edificios	45 x 480 - 20 x 3,890		0.278
Mano de obra	870 x 12 / 3,890		2.683
Mantenimiento	1,820 / 3,890		0.468
Agua	0.039 x 150 x 12 / 3,890		0.018
Diesel	0.34 x 18,750 x 12 / 3,890		19.666

Energía eléctrica	$0.17 \times 7.46 \times 12 / 3,890$	<u>Pesos</u>	\$	0.004
Costo total por tonelada		Pesos	\$	27.230

2. - Horno de vacío.

Para este horno, así como para el de atmósfera inerte y el sistema de recocido eléctrico continuo, se calcularán datos de producción anual y consumos de energía promedios, ya que dichos factores varían en función del calibre del producto por recocer.

Dependiendo del sistema empleado al recocer el alambre de cobre se puede obtener un acabado brillante o no brillante de los sistemas estudiados en el horno de vapor. Es en la única parte donde no se obtiene acabado brillante. La superficie más brillante se tiene al recocer en el horno de vacío, teniéndose así mismo la superficie más limpia. Esta característica hace que el alambre así obtenido tenga un aspecto exterior excelente; además, en conductores para ciertas aplicaciones eléctricas es necesaria una superficie en el cobre lo más limpia posible, ya que las impurezas al estar en operación el cable pueden causar deterioros en el aislamiento.

Este sistema tiene el inconveniente de tener ciclos de recocido y enfriado considerablemente largos y no poder ser empleados en una emergencia cuando el producto es requerido con gran prontitud. Por lo mismo el sistema requiere de una cantidad mayor de bobinas con el fin de que no se tengan paradas las máquinas estiradoras durante el tiempo de recocido.

El manejo de este sistema requiere de 2-2/3 horas-hombre de operación por turno y de 4 horas-hombre de supervisión directa de operación por día.

El costo de mantenimiento es también muy reducido.

En las líneas siguientes se encuentran los datos de operación así como los costos unitarios:

Producción en toneladas por año	1,080	tons/año
Costo de adquisición	\$ 290,000.00	
Espacio ocupado en m ²	40	m ²
Costo de mano de obra por mes	\$ 920.00	
Costo de mantenimiento por año	\$ 1,400.00	
Consumo de agua por mes	220	m ³
Consumo de energía para calentamiento por mes	42,000	KWH
Consumo de energía para motores por mes	1.3	KWH

(base - 1 tonelada recocida)

Fuentes de datos:

Para este horno se toma en cuenta el mismo sistema de información que para el horno de vapor, agregando la siguiente consideración:

La energía de calentamiento consumida se determinó en un wattmetro.

Depreciación maquinaria	$290,000 - 15 \times 1,080$	Pesos \$	17.901
Depreciación edificios	$40 \times 480 - 20 \times 1,080$		0.889
Mano de obra	$920 \times 12 / 1,080$		10.222
Mantenimiento	$1,400 / 1,080$		1.296
Agua	$0.039 \times 220 \times 12 / 1,080$		0.095
Energía eléctrica calentamiento			
	$0.17 \times 42,000 \times 12 / 1,080$		79.333
Energía eléctrica motores	$0.17 \times 1.3 \times 12 / 1,080$		0.002
Costo total por tonelada		Pesos \$	109.738

Nota: El costo unitario de energía eléctrica se calculó como el promedio del costo por KWH sacado del consumo total de la planta.

3. - Horno de atmósfera inerte.

El horno de atmósfera inerte se caracteriza por su alta capacidad, por lo que se usa casi exclusivamente para el recocido de alambres de calibres gruesos, en especial cuando éstos van a tomar parte de un conductor de varios hilos.

Con el uso de este horno se tiene una calidad uniforme y una superficie de alto brillo.

La mano de obra y la supervisión directa empleadas son las mismas que para el horno de vacío.

Producción en toneladas por año	4,600	tons/año
Costo de adquisición	\$ 490,000.00	
Espacio ocupado en m ²	60	m ²
Costo de mano de obra por mes	\$ 920.00	
Costo de mantenimiento por año	\$ 1,630.00	
Consumo de agua por mes	180	m ³
Consumo de energía para calentamiento por mes	22,500	KWH
Consumo de energía para motores por mes	5,400	KWH
Consumo de gas butano por mes	1,170	Kgs.
(base - 1 tonelada recocida)		

Fuentes de datos:

Los datos de este horno están considerados tomando en cuenta los sistemas vistos anteriormente, pero agregando el costo del gas necesario. El consumo de gas está medido por medio de un manómetro.

Depreciación maquinaria 490,000 - 15 x 4,600 Pesos \$ 7.101

Depreciación edificios	60 x 480 - 20 x 4,600	Pesos \$	0.313
Mano de obra	920 x 12 / 4,600		2.400
Mantenimiento	1,630 / 4,600		0.354
Agua	0.039 x 180 x 12 / 4,600		0.018
Energía eléctrica	0.17 x 27,900 x 12 / 4,600		12.373
Gas	0.42 x 1,170 x 12 / 4,600		<u>1.282</u>
Costo total por tonelada		Pesos \$	23.841

4. - Recocido eléctrico continuo.

El recocido eléctrico continuo es un dispositivo que está colocado dentro de la máquina estiradora, obteniéndose por lo tanto alambre suave directamente. Así mismo, presenta la ventaja de no ser necesaria mano de obra adicional, ya que el operador de la estiradora opera el mismo sistema. La mano de obra implica únicamente el tiempo que tiene que tomar el operador para instalar el alambre en el recocedor. También es necesaria supervisión directa, en especial al iniciarse la producción de un determinado calibre.

En las líneas siguientes aparecen los costos de operación:

Producción en toneladas por año	1,590	tons/año
Costo de adquisición	\$ 35,000.00	
Espacio ocupado en m ²	3	m ²
Costo de mano de obra por mes	\$ 305.00	
Costo de mantenimiento por año	\$ 1,100.00	
Consumo de agua por mes	1,400	m ³
Consumo de energía por mes	12,000	KWH

(base - 1 tonelada recocida)

Nota: El consumo de vapor es despreciable. Los datos se

han tomado de una manera similar a la usada en los otros sistemas.

Depreciación maquinaria	35,000 - 15 x 1,590	Pesos \$	1.467
Depreciación edificios	3 x 480 - 20 x 1,590		0.045
Mano de obra	305 x 12 / 1,590		2.302
Mantenimiento	1,100 / 1,590		0.692
Agua	0.039 x 1,400 x 12 / 1,590		0.412
Energía	0.17 x 12,000 x 12 / 1,590		15.396
			<hr/>
Costo total por tonelada		Pesos \$	20.314

C) Aplicación de los datos obtenidos en el presente estudio a un caso de programación lineal empleando el método del transporte.

1. - Antecedentes.

Los métodos de investigación de operaciones aplicados a la programación lineal proveen de un sistema matemático con el que se obtienen soluciones óptimas, imposibles de lograrse con los métodos empíricos actualmente usados.

2. - Se ha seleccionado el método de transporte para aplicarlo en este caso debido a que, siendo el más sencillo, no presenta dificultades de cálculo y los resultados que se obtienen cumplen completamente con el fin a que se destina.

3. - El desarrollo del problema se hará en forma sistemática, describiendo el proceso de cálculo empleado y haciendo las anotaciones pertinentes.

Problema:

Se desean recocer diferentes cantidades de distintos calibres de alambre, para lo cual se dispone de tres de los sistemas de re-

cocido, que son:

- a) el horno de vapor,
- b) el horno de vacfo, y
- c) el horno de gas.

El período en el cual deben de recocerse es un mes, debiendo obtenerse una solución con la que el costo de proceso de todos estos alambres sea un mínimo.

Las cantidades de alambre por recocer y las capacidades de los hornos en Tons/mes aparecen a continuación:

Alambres:	4 AWG = 60	16 AWG = 150	Hornos:	vapor = 320
	8 AWG = 100	20 AWG = 20		vacfo = 90
	12 AWG = 330	24 AWG = 60		gas = 380

Para llevar a cabo la resolución del problema es necesario establecer dos matrices: una que va a representar las cantidades de alambre por recocer en cada horno, y la otra que nos indica los costos directos de manufactura de el recocido de cada alambre en cada horno.

La primera matriz constará de 3 columnas y 7 filas, 6 de las cuales corresponden a los calibres de alambre por recocer y la restante simboliza la capacidad no aprovechada en alguno o algunos de los hornos. Cada una de las cantidades la representaremos por medio de literales, las que a su vez son las incógnitas que hay que encontrar con el fin de llegar a una solución óptima.

En la matriz de costos (Tabla # 2) anotaremos exclusivamente los costos unitarios para cada calibre en cada horno. Entonces tenemos las matrices:

TABLA # 1				
Hornos \ Calibres	1	2	3	Total
1	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	60
2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	100
3	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	330
4	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	150
5	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	20
6	X ₆₁	X ₆₂	X ₆₃	60
no aprovechado	<u>X_a</u>	<u>X_b</u>	<u>X_c</u>	<u>70</u>
Total:	320	90	380	790

TABLA # 2			
Hornos \ Calibres	1	2	3
1	-31	-120	-27
2	-29	-116	-26
3	-28	-113	-26
4	-27	-111	-25
5	-27	-109	-25
6	-26	-107	-24

Los costos se consideraran con signo negativo por ser utilidades negativas.

El método seguido con el fin de encontrar la solución óptima consiste en el método del transporte simplificado tal como aparece en la referencia 20, y el cual básicamente consiste de lo siguiente:

1. - Se construye una matriz base (Tabla # 1) dejando en blanco los encabezados de columnas y líneas.

2. - En la matriz de costos se localiza la casilla de menor costo, o sea 5,3.

3. - La primera línea se encabeza con 5 y la primera columna con 3, anotando los totales correspondientes.

4. - En la casilla seleccionada se anota el menor de estos totales.

5. - Al hacer la operación anterior en la columna 3 queda disponible más capacidad, por lo que se anota en ella el valor de costo menor o sea la fila 5, poniendo este encabezado y su total. Como este total puede ser absorbido en la capacidad de 3 se anota en la casilla correspondiente; se continua así hasta llegar a la fila 3, en donde la producción total de 3 no puede ser absorbida totalmente por la capacidad de 3, entonces se completa la capacidad de 3 (columna) y se procede horizontalmente con el menor costo que aparezca en la misma columna e hilera, o sea la casilla 3,1, se encabeza esta columna con 1 y se anota su total. Como en la casilla 3,1 se puede absorber el déficit de la fi la 3 se anota este (180). Se procede así sucesivamente hasta completar toda la producción requerida, quedando un cierto valor de capacidad no aprovechada, la que se anota en la casilla adecuada, en este caso la correspondiente al horno 1.

6. - El siguiente paso consiste en considerar las casillas vacías para ver si en ellas no ha quedado excluida una solución de costo menor al no emplearlas. Para esto se procede como se indica a continuación:

Las casillas evaluadas anteriormente se encierran en un - círculo con el fin de facilitar su distinción; entonces se procede a

efectuar con cada casilla un ciclo, el cual empieza en la propia casilla por evaluar y se inicia horizontalmente hasta encontrarse con una casilla con círculo; la casilla con la que se inicia debe tener la propiedad de tener otra casilla con círculo en su misma columna. Se procede trazando el ciclo con líneas horizontales y verticales consecutivamente, aplicando la regla anterior. El último trazo debe ser vertical o sea provenir de una casilla en círculo que esté en la misma columna de la casilla por evaluar.

En la Tabla # 3 que aparece a continuación se encuentra indicado como se evaluó la casilla 6,2; ya teniendo el ciclo trazado se suman los valores correspondientes a los costos de dicha casilla en la siguiente manera: el valor de la primera casilla hacia la que se inició el movimiento se considera positivo, el siguiente negativo, y así sucesivamente hasta cerrar con la casilla por evaluar. Para evitar confusiones en esta operación es recomendable construir una nueva matriz de costos poniendo las columnas y filas en el mismo orden que se encuentra la matriz de la Tabla # 3, como se aprecia en la Tabla # 4.

H \ C	3	1	2	Tot.
6	60	0	-8	60
5	20	0	-7	20
4	150	0	-5	150
3	150	180	-4	330
2	-1	100	-2	100
1	-2	40	20	60
No Ap.	---	---	70	70
Total	380	320	90	790

H \ C	3	1	2
6	-24	-26	-107
5	-25	-27	-109
4	-25	-27	-111
3	-26	-28	-113
2	-26	-29	-116
1	-27	-31	-120

7. - Al hacer las evaluaciones correspondientes a cada columna se encontró que el valor más negativo es el correspondiente a la casilla 6,2 (-8), por lo que este número se encierra en un rectángulo, se recorre el ciclo que dió origen a este valor y se separan las cantidades que entraron en la suma con signo positivo, o sea las correspondientes a las casillas (6,3) (3,1) y (1,2). La cantidad con valor más alto de éstas se selecciona, o sea (1,2) = (-120).

8. - El valor correspondiente a la casilla 1,2 en la Tabla # 3 se transporta a la casilla 6,2 (Tabla # 5), haciéndose los ajustes necesarios por la introducción de este valor en la fila 6.

Al hacer estos ajustes se debe proceder con el criterio del costo menor como se procedió en la Tabla # 3.

9. - Se repiten las operaciones 6, 7 y 8 hasta que se obtengan en las casillas sin círculo exclusivamente valores no negativos - (Tablas 5, 6 y 7). En la Tabla # 8 aparece representada la solución al problema.

TABLA # 5				
H \ C	3	1	2	Tot.
6	(40)	0	(20)	60
5	(20)	0	1	20
4	(150)	0	3	150
3	(170)	(160)	4	330
2	-1	(100)	6	100
1	-2	(60)	8	60
No Ap.	---	---	(70)	70
Total	380	320	90	790

TABLA # 6				
H \ C	3	1	2	Tot.
6	(40)	0	(20)	60
5	(20)	0	1	20
4	(150)	0	3	150
3	(110)	(220)	4	330
2	-1	(100)	6	100
1	(60)	2	10	60
No Ap.	---	---	(70)	70
Total	380	320	90	790

TABLA # 7				
H \ C	3	1	2	Tot.
6	40	0	20	60
5	20	0	1	20
4	50	0	3	150
3	10	320	4	330
2	100	1	7	100
1	60	2	10	60
No Ap.	—	—	70	70
Total	380	320	90	790

TABLA # 8				
H \ C	1	2	3	Tot.
1	—	—	60	60
2	—	—	100	100
3	320	—	10	330
4	—	—	150	150
5	—	—	20	20
6	—	20	40	60
No Ap.	—	70	—	70
Total	320	90	380	790

Los costos calculados para cada una de las soluciones son:

Tabla # 3 = \$ 21,170.00

Tabla # 5 = \$ 21,010.00

Tabla # 6 = \$ 20,890.00

Tabla # 7 = \$ 20,790.00

V - CONCLUSIONES

V - CONCLUSIONES.

Al seguir el desarrollo de este trabajo nos podemos ir dando cuenta de que los sistemas estudiados son diferentes entre si y el costo de operacion a su vez es diferente. Pero, no obstante, no se puede escoger un solo tipo debido a que cada uno tiene características especiales para determinado tipo de trabajo, o sea que, dentro de la gran variedad de procesos que se sigan para obtener un conductor de electricidad, cada uno de los sistemas tiene un uso específico para cada línea de proceso. Sin embargo, podemos concluir los siguientes resultados esenciales:

1. - El costo de operación del horno de vacío es sumamente elevado comparándolo con los demás sistemas.
2. - La eficiencia térmica dentro del horno de vapor como del horno de vacío es muy baja. El horno de vapor es un sistema anticuado con el cual se obtiene un costo razonable y una producción en ciclos cortos, lo que lo hace muy práctico. En cambio el horno de vacío, aunque produce alambre de máxima calidad, tiene las desventajas de ser muy costoso su proceso y de tener ciclos de operación prolongados. Esto se puede corregir mediante la aplicación de un sistema similar al que opera en el horno de gas inerte aumentando con esto la velocidad del procedimiento y reduciendo el costo de operacion del mismo.
3. - En el horno de gas se tiene la desventaja de ciclos de operacion largos, lo que se puede mejorar mediante la colocación de un aditamento que acelere el ciclo de enfriado. Este aditamento básicamente consiste en provocar la circulación forzada de aire alrededor

de las campanas del horno al estar siendo éstas enfriadas.

4. - El recocido eléctrico continuo presenta las mayores ventajas para el procesado de alambres de calibres intermedios, lo que lo hace superior para esta aplicación.

5. - El horno de gas inerte, debido a su alta capacidad, es el más adecuado para recocer grandes cantidades de alambre en calibres gruesos.

6. - El horno de vacío es adecuado para el recocido de alambres en calibres finos y en los cuales se debe obtener una superficie muy limpia.

7. - El horno de vapor sigue siendo el más adecuado para procesos en los productos cuya manufactura requiera celeridad.

8. - Una conclusión cuantitativa se obtiene en la aplicación de los datos obtenidos para la programación lineal de un mes.

VI - BIBLIOGRAFIA

VI - BIBLIOGRAFIA

- 1 - PHYSICS OF METALS - Seitz - McGraw Hill - 1943
- 2 - STRUCTURE OF METALS - Barrett - McGraw Hill - 1952
- 3 - COPPER, THE SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE METAL, ITS ALLOYS AND COMPOUNDS - Butts - Reinhold - 1954
- 4 - INDUSTRIAL STOICHIOMETRY - Lewis - McGraw Hill - 1954
- 5 - FUELS COMBUSTION AND FURNACES - Griswold - McGraw Hill - 1946
- 6 - CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK - Perry - McGraw Hill - 1950
- 7 - INDUSTRIAL CHEMICAL CALCULATIONS - Hougen and Watson - Wiley - 1955
- 8 - NON-FERROUS PHYSICAL METALURGY - Pitman - Wiley - 1938
- 9 - NON-FERROUS METALS SPECIFICATIONS - ASTM - 1958
- 10 - METALS TEST METHODS - ASTM - 1958
- 11 - AGENDA DEL QUIMICO - Luis Blas - 1954
- 12 - GAS FURNACES - Berliner - Berliner Research Report - 1957
- 13 - HEAT-TREATING FURNACES - Berliner - Berliner Research Report - 1957
- 14 - TECHNICAL DATA - Anaconda Wire & Cable Co. - 1954
- 15 - COPPER WIRE TABLES - National Bureau of Standards - 1956
- 16 - NORMA OFICIAL J-2 - Dirección General de Normas - 1945
- 17 - PRONTUARIO TECNICO - Pirelli, S.p.A.
- 18 - STRUCTURAL CHEMISTRY AND METALURGY OF COPPER - Crampton - ASTM - 1956
- 19 - CONTABILIDAD DE COSTOS - Lawrence - Northwestern University
- 20 - PROGRAMACION LINEAL. LA TECNICA DEL TRANSPORTE - S. Cardona - Revista Ingenieria Química N° 21, Abril de 1958
- 21 - OPERATION RESEARCH (METHODS AND PROBLEMS) - Sasiani, Yaspan y Friedman - John Wiley - 1959