

TESIS DONADA POR
D. G. B. - UNAM

TESIS DONADA POR
D. G. B. - UNAM

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

TESIS



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

puesta en marcha del horno de inducción a vacío
del instituto de investigaciones en materiales de
la U.N.A.M.

ELIAS CARRILLO BAÑUELOS

Ingeniero Químico Metalúrgico

1983



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.

INDICE

	Pag.
I.- INTRODUCCION	1
II.- BREVE HISTORIA DE LOS HORNOS DE INDUCCION	3
III.- PRINCIPIO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS DE INDUCCION	8
III.1.- Calentamiento por resistencia	9
III.2.- Hornos sin núcleo y hornos de canal	13
III.3.- Corrientes de Foucault	16
III.4.- Efecto "SKIN"	19
III.5.- Potencia eléctrica y factor de potencia	29
III.5.a).- Nivel del metal	34
III.5.b).- Grosor del revestimiento	35
III.6.- Agitación del baño metálico	41
III.6.a).- Repulsión mutua de bobinas	42
III.6.b).- Efecto "PINCH"	44
III.6.c).- Ventajas y desventajas de la agitación	47
III.7.- Blindaje magnético en los hornos de inducción sin núcleo	49
III.8.- Perfil de cobre de los hornos sin núcleo	52
III.9.- Devanados de bobinas en hornos sin núcleo	53
III.9.a).- Espaciamiento entre espiras	57
III.10.- Diseño de inductores en hornos de canal	58

	Pag.
IV.- LOS HORNOS DE INDUCCION EN LA FUSION DE LOS METALES	64
IV.1.- Los hornos de canal	65
IV.1.a).- Hornos de fusión	67
IV.1.b).- Hornos de mantenimiento (Holding)	69
IV.2.- Fundición de aluminio en hornos de canal	70
IV.3.- Fundición de latón en hornos de canal	78
IV.4.- Fundición de hierros en hornos de canal	80
V.- REFRACTARIOS PARA HORNOS DE INDUCCION	85
V.1.- Refractarios colables	86
V.2.- Mezclas apisonables	90
V.2.a).- Revestimientos apisonables básicos	99
V.2.b).- Instalación de apisonables en hornos de inducción	102
V.2.c).- Revestimientos para fusión de metales no ferrosos	105
V.3.- Problemas que plantean los refractarios en los hornos de inducción	108
V.3.a).- Fallas en los revestimientos para los hornos sin núcleo	108
V.3.b).- Fallas en los revestimientos de los hornos de canal	117
VI.- FUSION POR INDUCCION A VACIO	129
VII.- REFRACTARIOS EN LA FUSION POR INDUCCION A VACIO	135
VIII.- GENERACION DE CORRIENTE DE MEDIA FRECUENCIA	148
VIII.1.- Dispositivos para la generación de corriente de media frecuencia (convertidores de frecuencia)	155

	Pag.
IX.- EL HORNO DE INDUCCION A VACIO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES DE LA U.N.A.M.	161
IX.1.- Generador estático de media frecuencia	163
IX.2.- Manual para el generador estático	168
IX.3.- Sistema de vacío	178
IX.4.- Problemas encontrados durante la puesta en marcha del horno	184
X.- CONCLUSIONES	193
BIBLIOGRAFIA Y FUENTES DE REFERENCIA	196

I INTRODUCCION

INTRODUCCION

Gran parte del progreso logrado durante los últimos años en la comprensión del comportamiento de metales y aleaciones se han debido a las innovaciones en los equipos requeridos para el procesamiento de metales como son, entre otros, la fusión por inducción electromagnética. Aunado a esto, la fusión por inducción ha sido promovido - en las fundiciones en este país - por el creciente encarecimiento de los combustibles fósiles usados en los sistemas habituales de fusión. Sin embargo, el metalurgista raramente está familiarizado con los hornos de inducción.

Esta tesis tiene por objetivo, recalcar la importancia que representa el horno de inducción al profesional relacionado con la metalurgia. Para cumplir con este fin, en el presente trabajo se hace una revisión sobre:

- Los fundamentos teóricos del funcionamiento de los hornos de inducción.
- Hornos de inducción específicos en la fusión de metales y aleaciones más comunes.
- Refractarios utilizados en hornos de inducción, en esta sección se hace hincapié en las reacciones escoria-refractario en la fundición de hierros colados, ya que este tipo de material es del que se tiene mayor volumen de producción.

Como parte medular de la tesis, en el trabajo experimental, se pone en marcha un horno de inducción en particular, el horno de inducción a vacío del Instituto de Investigaciones en Materiales de la U.N.A.M. Aquí se expone con sencillez, la descripción de los aparatos e instrumentos de los sistemas de fusión y de vacío, su funcionamiento, los problemas encontrados durante el arranque del equipo y se elabora un manual para la operación del horno.

II.- BREVE HISTORIA DE LOS HORNOS DE INDUCCION

El primer trabajo de que se tiene registros¹ data de 1888, cuando E. A. Colby en los E.U.A., desarrolló el primer concepto de un horno con núcleo demostrando que una carga de material conductor eléctrico podría generar calor por medio de la inducción electromagnética.

Este tipo de hornos en ocasiones fueron llamados de anillo porque el metal estaba contenido en un recipiente en forma de anillo comportándose éste como el secundario de un transformador.

Debido a los problemas que se tenían para controlar el carbono en los hornos de arco, Ferranti en Inglaterra² en 1887 empezó a experimentar con calentamiento por inducción, con la ventaja de no usar electrodos de carbón evitando la contaminación del baño.

Sin embargo, se hizo muy poco en ambos continentes, hasta que en 1900 Kjellin construyó un horno para aceración en Gysing, Suecia, el cual tenía una capacidad de 176 lb y un consumo de energía de 78 kW.

Durante estos primeros años fueron hechas algunas mejoras por la Röchling Rodenhauser en 1906, el cual tenía un suministro de energía de 750 kW de un generador especial de 5 Hz.

Esta baja frecuencia fue usada para obtener un mejor factor de potencia que el que era posible lograr a la frecuencia de la red.

La General Electric Company ³ también construyó hornos en E.U.A. en 1914.

Estos hornos encontraron su mejor utilización en procesos Duplex o en la fabricación de aceros especiales.

Las desventajas de estos hornos fueron la forma voluminosa e inapropiada del núcleo, la baja frecuencia requerida para obtener un buen factor de potencia lo cual se conseguía con unos generadores muy caros y con costoso mantenimiento.

Todos estos trabajos fueron hechos con frecuencias de 5 a 10 Hz. ³

En Inglaterra James Wyatt inventa el primer horno de canal en 1916, conocido con el nombre "Horno Ajax - Wyatt".

En 1916⁴, el Dr. E.F. Northrup de la Universidad de Princeton con el financiamiento de el Dr. G.H. Clamer, presidente de Ajax Metal Co. patentó su horno sin núcleo de alta frecuencia. Esto fue anunciado como la invención del horno "firelesswire less".

Se encontró que las altas periodicidades⁵ (de 20 kHz en adelante) que caracterizaban a estas pequeñas unidades, no eran necesarias y hasta indeseables para hornos industriales de gran tamaño.

En 1925,⁵ se señala la expansión de la industria de los hornos sin núcleo a raíz de los diseños de conjuntos motor-generador... que podían trabajar a frecuencias entre 500 y 300 Hz, y últimamente hasta kHz energizando hornos con capacidades excediendo los 20 kW.

Este desarrollo fue primeramente aplicado a la fusión de cobre puro y aleaciones de níquel y plata en la planta Waterbury de la American Brass Company.

La fusión de aceros de herramientas y materiales ferrosos por este método⁵ fue explotada por Messrs Edgard Allen and Co. L.T.D. en Sheffield, Inglaterra.

En 1915⁶ en Milán, Italia, Francisco Spinelli investiga la manera de acentuar la corriente del tercer armónico (inherente en los transformadores) y de suprimir completamente la fundamental con el fin de producir una frecuencia de salida 3 veces mayor que la de la entrada.

Sólo hasta 1933 F. Brailford, diseñó y construyó un triplicador de frecuencia de 500 kW, sin embargo, estos aparatos no eran comerciales debido a su baja eficiencia y al alto costo de los capa

citores para la corrección del factor de potencia.

Ulteriores investigaciones realizadas por el Dr. Biringer de la Universidad de Toronto, Canadá, reconocieron el potencial comercial de los triplicadores de frecuencia.

Entre 1960 y 1962 Inductotherm Corp., desarrolló triplicadores con núcleo toroidal de acero de grano orientado y con bobinados especiales para lograr una eficiencia de operación del 95 % comercializado con la denominación "tripler".

El "tripler" de 180/150 ofreció una solución para el hueco que existía en la gama de frecuencia; era la única alternativa comercial al grupo motor - generador.

Por muchos años se supuso que las frecuencias arriba de la alimentación de red (60 Hz) era necesaria para la operación satisfactoria del horno sin núcleo.

Después de la II Guerra Mundial[?] el problema fue reexaminado y en los primeros años de la década de los 50, varios obstáculos de los cuales los principales eran los precios prohibitivos de unidades de capacitores para la corrección del factor de potencia, la erosión del refractario y el diseño de bobinas capaces de soportar gran amparaje por vuelta, fueron superados y dieron a los hornos sin núcleo a la red, nuevos ímpetus.

Sin embargo, durante los últimos 20 años⁸, la conversión de frecuencias dió un gran paso con el desarrollo e introducción de equipo electrónico de estado sólido utilizando rectificadores controlados de silicio, también denominados tiristores.

Estos fueron desarrollados y utilizados por primera vez en Europa.

Inductotherm Corporation fue el primer fabricante en E.U.A. que produjo un equipo práctico de estado sólido para las aplicaciones de fusión y calentamiento por Inducción (1968).

Estas unidades fueron denominadas V.I.P. (Variable Induction Power).

Con esto queda cubierta toda la gama de tamaños del horno con su frecuencia respectiva de operación.

III PRINCIPIOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL HORNO DE INDUCCION

III.1.- CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA

Cuando pasa una corriente eléctrica a través de un material conductor, éste se calienta debido a su resistencia eléctrica. Este fenómeno se conoce como efecto "JOULE".

La energía generada en el material está dada por la relación $W = I^2 R$ donde I es la corriente en amperes, R es la resistencia óhmica de la parte del conductor por el cual fluye la corriente y W es el calor generado en Joules.

Como se sabe, el flujo de corriente está relacionado con el movimiento de electrones de conducción del metal o del material conductor.

Cuando existe corriente, algunos electrones colisionan con átomos estacionarios, haciéndolos vibrar y la energía liberada por la vibración aparece como calor.

Por lo tanto, una carga de metal será calentado porque ofrece una resistencia al flujo de corriente eléctrica.

Para que exista una corriente, es necesaria la influencia de una fuerza impulsora, es decir, un voltaje aplicado.

Los electrones se moverán de un potencial eléctrico menor, a uno superior.

Podemos imaginar como un voltaje negativo a una concentración de electrones libres en un conductor, y como un voltaje positivo a una concentración de iones positivos, originada por una deficiencia de electrones de conducción.

En resumen, una diferencia de potencial en un conductor, origina una corriente.

Para la obtención de un voltaje podemos recurrir a varios métodos (baterías, generadores, etc.)

Uno de ellos es la producción de voltaje por medio de un campo magnético alterno. El voltaje y la corriente obtenidos de esta manera se denominan inducidos y son de comportamiento también alterno.

Según la ley de inducción de Faraday, el voltaje inducido en un conductor es igual a la variación del flujo de campo magnético Φ con el tiempo, esto es $V = - \frac{d\Phi}{dt}$.

Para producir una fem inducida, es necesario que el flujo de campo magnético cambie al transcurrir el tiempo, y para un área fija perpendicular al flujo magnético es necesario en el elemento inductor, una corriente que varíe con el tiempo, esto es, una corriente alterna.

Dado que la corriente alterna invierte periódicamente su

dirección surge la pregunta de que efectos tendrá ésta, en lo que respecta al calentamiento del metal.

Siempre que se presenta resistencia al flujo de corriente, que es la causa principal de calentamiento, sin importar en que dirección fluye la corriente, habrá calentamiento.

Cualquier material conductor eléctrico puede calentarse induciéndole una corriente eléctrica, con una espiral que lo rodee y que permita el paso de una corriente alterna.

La cantidad de energía absorbida dependerá de la densidad de campo magnético, la resistividad eléctrica de la carga y la frecuencia de operación. No es necesario que la carga del material tenga propiedades magnéticas.

En sí el equipo eléctrico de inducción se basa en el principio del transformador eléctrico, en el cual, al hacer circular una corriente alterna en el devanado primario, genera un campo electromagnético cuyas líneas, al cortar el devanado secundario aislado eléctricamente del primario, induce en él una corriente alterna proporcional a la que generó.

En el horno de inducción la bobina es el primario y el secundario lo forma la carga de metal, teniendo así un secundario en corto circuito, que al cortar las líneas de inducción magnéticas genera co-

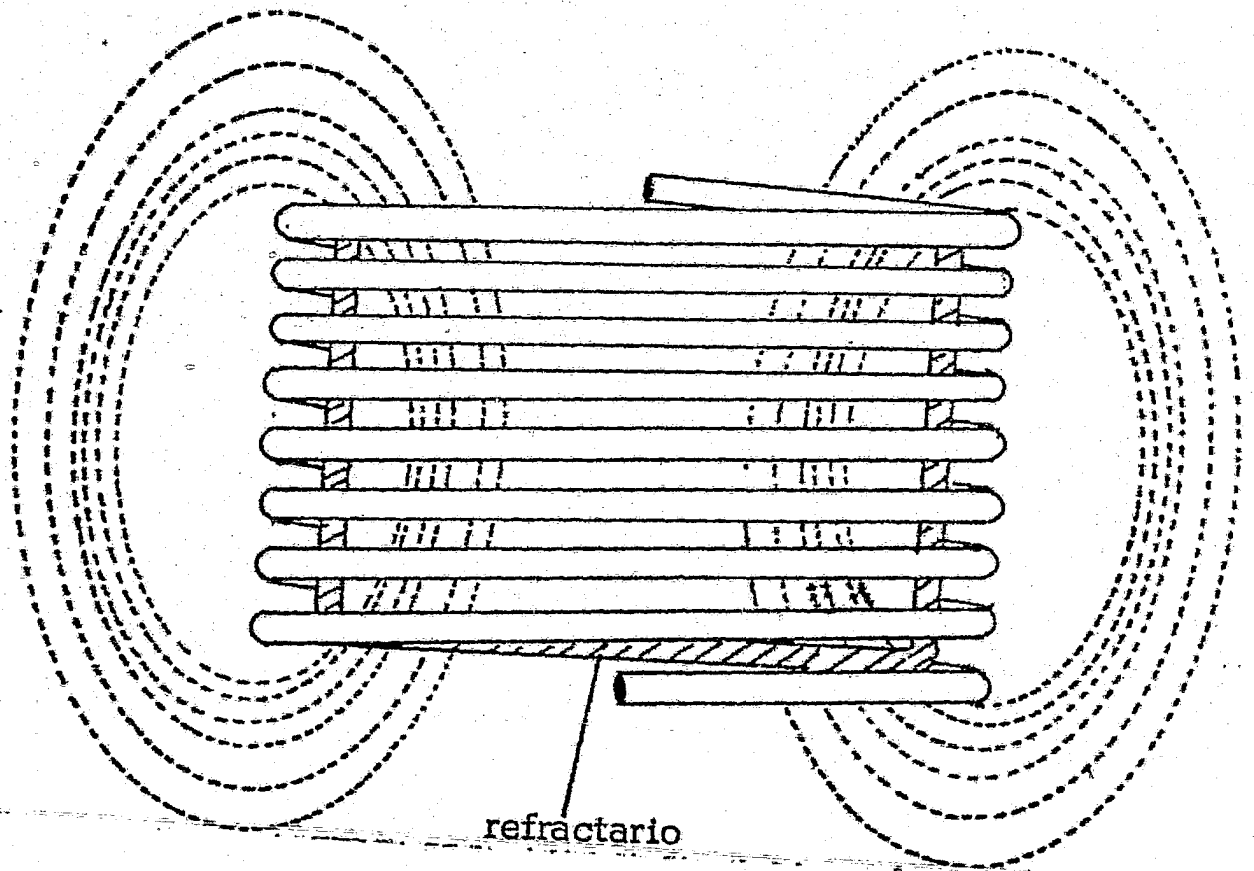
corriente alterna. La resistencia que presenta la carga a la circulación de corriente genera pérdidas que se manifiestan en forma de calor hasta llegar a fundir la carga.

III.2.- HORNOS SIN NUCLEO Y HORNOS DE CANAL

Veamos ahora la manera en que el campo magnético puede pasar a través de la carga del metal en los dos tipos de hornos de inducción más comúnmente usados.

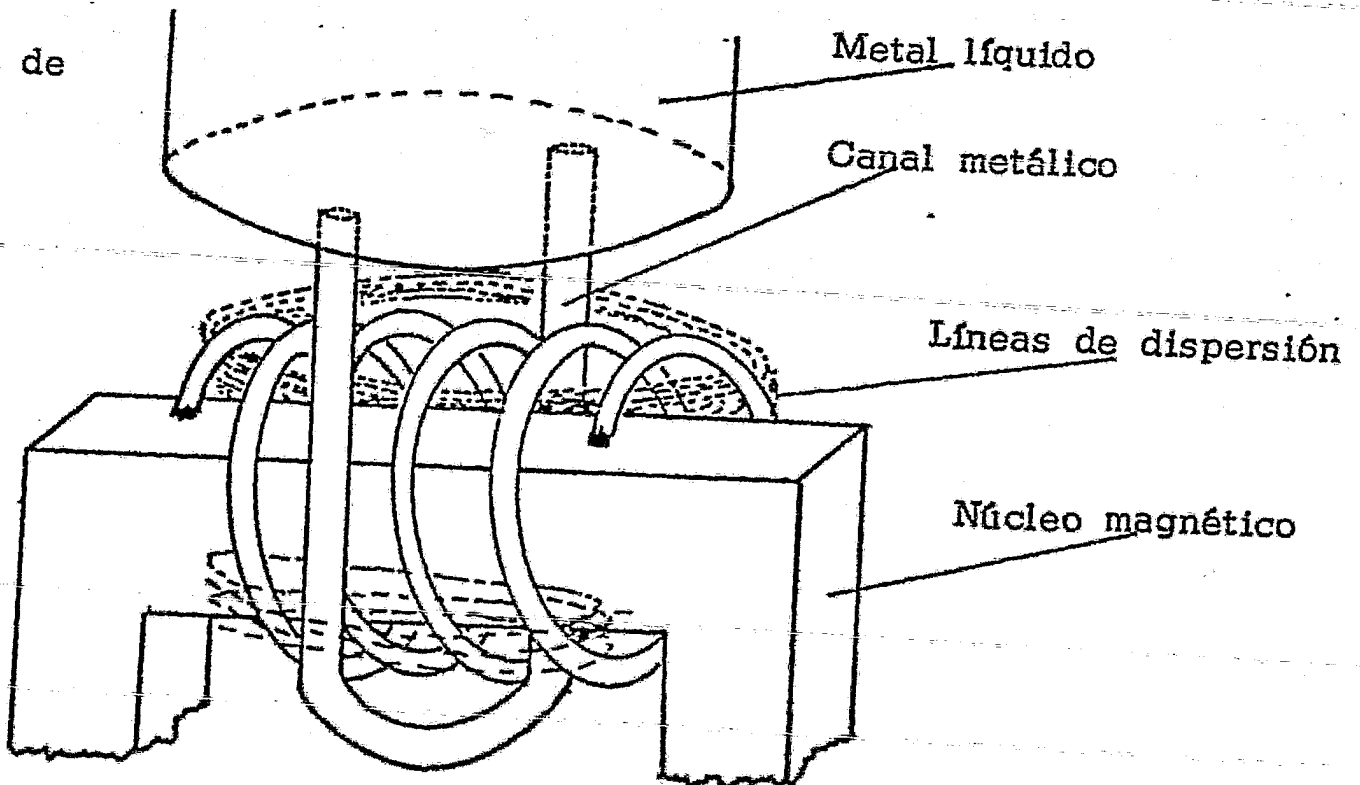
Fig. 1

Horno sin Núcleo



Horno de Canal

Fig 2



En los hornos sin núcleo, el campo magnético pasa a través del metal en el cuerpo principal del horno, es decir, en el corazón mismo de la bobina.

También se observa de la fig. 1 que la misma cantidad de líneas magnéticas que pasan a través del metal que se desea fundir, está circulando por fuera de la bobina.

En la figura 2 el campo magnético pasa a través del metal por el canal en forma de "U" en el fondo del horno.

Ahora en este caso, las líneas de inducción magnética que atraviesan la carga, son las que están en la parte exterior de la espiral (líneas de dispersión).

En los hornos sin núcleo, el elemento inductor, recibe el nombre de BOBINA DE INDUCCION.

En los hornos de canal,¹⁰ la bobina primaria, su núcleo de hierro y el canal de metal fundido que constituye el secundario, colectivamente se denominan INDUCTOR.

Los hornos de canal funcionan con fuentes de potencia a la frecuencia de la línea (50/60 Hz). Considerando que ésta es la frecuencia básica de los sistemas eléctricos actuales y que representa el límite inferior a la cual trabajan los hornos, podemos decir que los hornos de canal son de baja frecuencia. Para obtener un acoplamiento magnético intenso¹¹ es necesaria la presencia del núcleo magnético laminado.

Los hornos sin núcleo son operados a frecuencias de la red (60 Hz) a frecuencias triplicadas (180, 540 Hz), medias frecuencias (de 1 a 10 kHz) y altas frecuencias (arriba de 10 kHz).

En estos también se obtiene un acoplamiento magnético intenso,¹¹ compensando la elevada frecuencia, la menor permeabilidad del medio.

III.3.- CORRIENTES DE FOUCOULT

En el calentamiento por inducción se prefieren corrientes de altas frecuencias, ya que al aumentar ésta se incrementan las corrientes de FOUCOULT o corrientes de remolino. (eddy currents), estas son corrientes parásitas que aparecen en las masas metálicas por efecto de inducción y se traducen en pérdidas por calor.

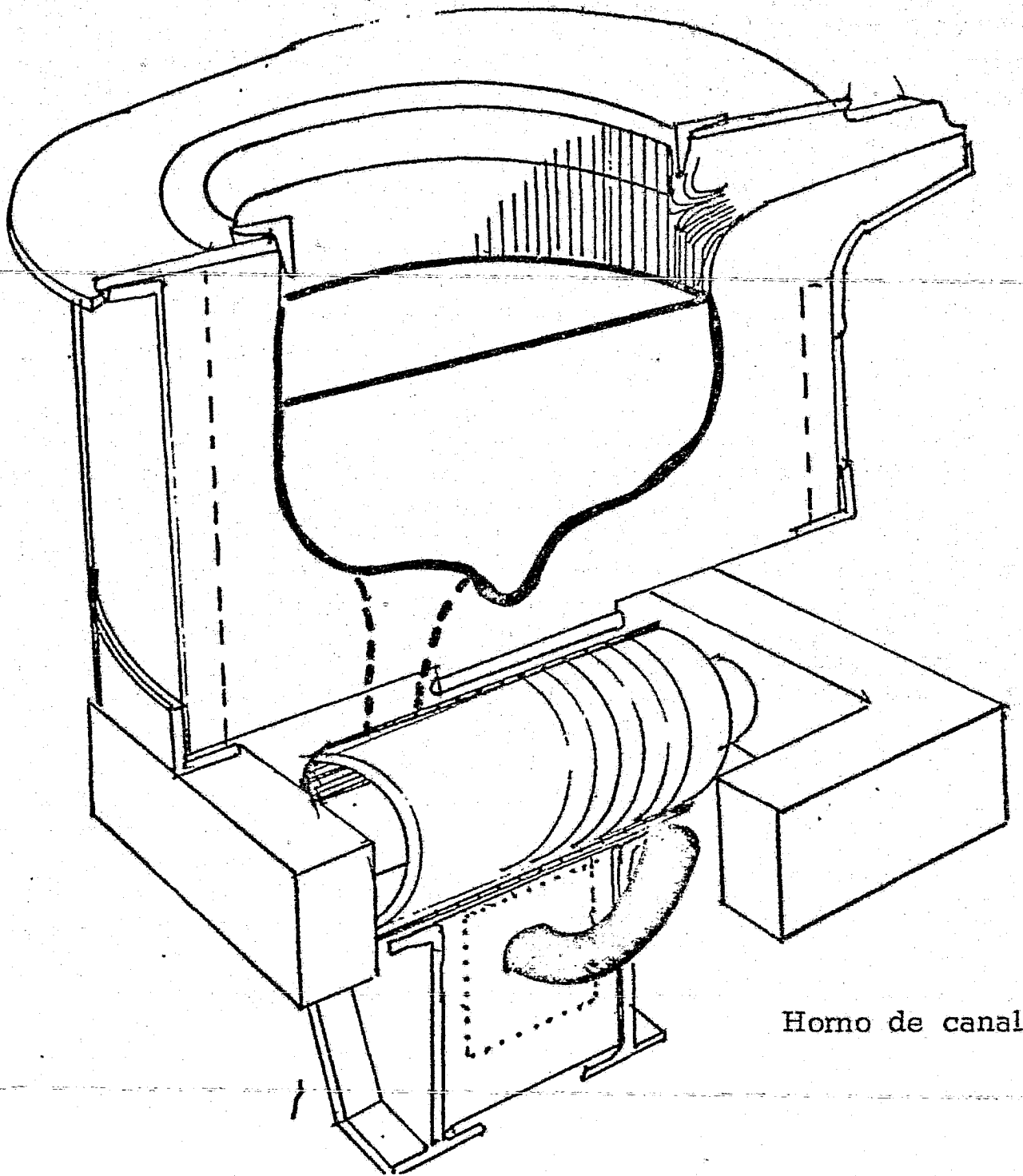
Estas corrientes son las que se tratan de evitar en los núcleos macizos de los transformadores, mediante la construcción laminada del núcleo. Cada laminación va aislada de la adyacente por medio de una capa de material dieléctrico, cortando en esa forma la trayectoria al flujo de las corrientes de remolino o de FOUCOULT.

En cambio, en los hornos de inducción, se busca aumentar el "camino" para estas corrientes. La longitud de la trayectoria eléctrica depende de los contactos entre las piezas de carga.

En los hornos sin núcleo, se sigue esta tendencia.

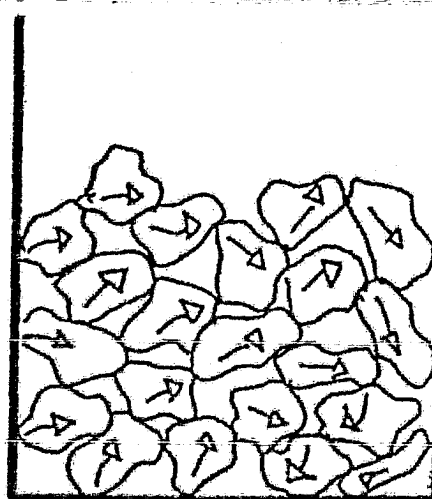
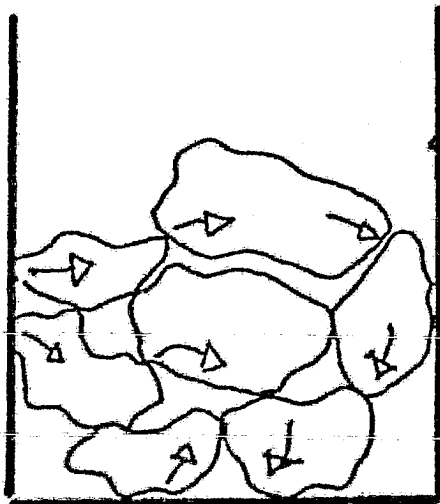
Los hornos de canal, son operados a frecuencias de la línea (60 Hz), ya que las altas frecuencias le son prohibitivas para el núcleo de hierro que forma parte del inductor.

En la figura 3 se muestran dos situaciones diferentes



Horno de canal

Figura 3



Las figuras sugieren que el circuito eléctrico tiende a ser menor cuando el número de las piezas de carga es menor (piezas grandes) o sea que la trayectoria eléctrica o circuito es corto, obteniéndose, así, una corriente de mayor intensidad, y viceversa, entre más larga sea la trayectoria eléctrica o circuito, la corriente será de menor intensidad.

En un horno de 60 Hz, sin núcleo, arrancando con carga fría, se deben evitar piezas menores que 8-10 in (200 mm)¹², a menos que sea posible muy buen contacto entre las piezas acortando así la trayectoria general de la carga.

Generalmente, el horno sin núcleo a la red debe ser puesto en marcha¹² con blocks especiales para el arranque con peso de alrededor de 25% de la carga total del horno.

En un horno de 500 Hz¹³, la sección de la carga no debe ser menor de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm).

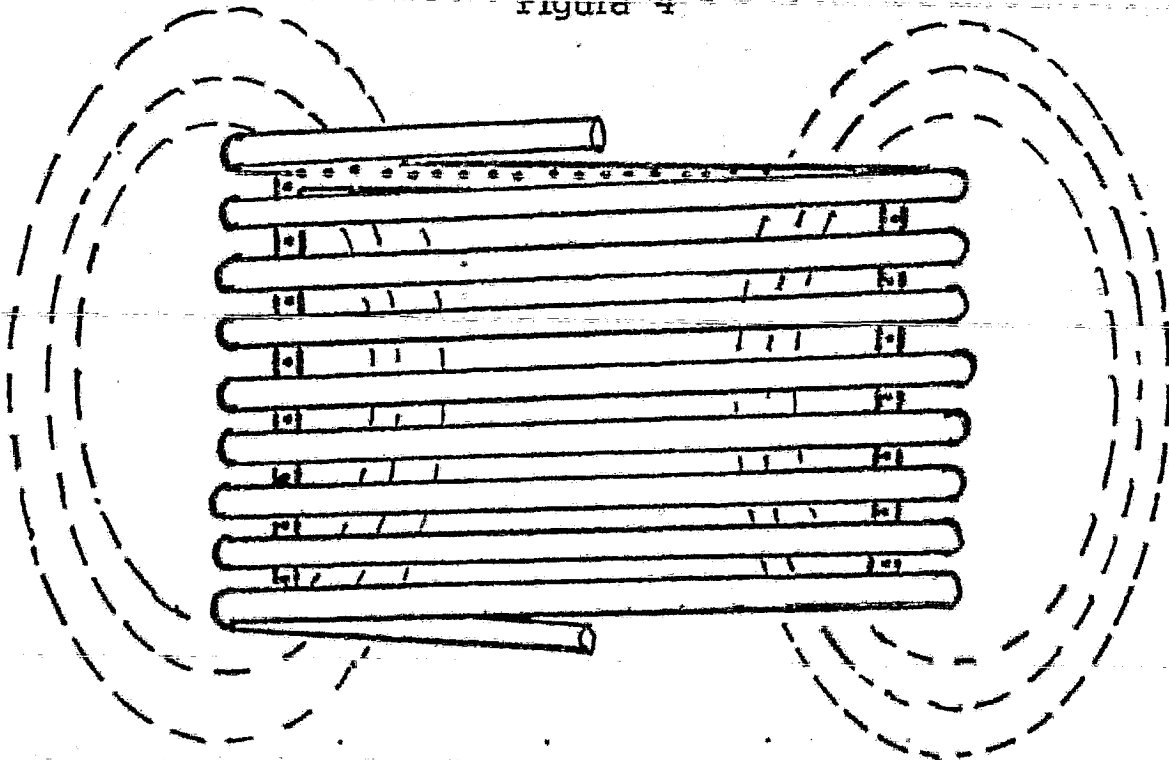
III.4.- E F E C T O "SKIN"

La corriente alterna de alta frecuencia tiende a circular por la superficie, la potencia útil se distribuye, partiendo de la superficie externa del material contenido en el crisol y progresando hacia el interior, hasta una profundidad llamada profundidad de penetración. Esto se manifiesta en el fenómeno conocido como efecto "SKIN".

Cuando se presenta el efecto Skin, la corriente no atraviesa la totalidad del secundario, si no sólo penetra a cierta profundidad.¹⁴ Este fenómeno puede explicarse mediante la ley de Lenz, que dice que la fem inducida debe siempre actuar en forma opuesta a la causa que lo origina, esta ley es la que impone el signo algebraico a la ley de Faraday.

A manera de ilustración veamos la figura 4.

Figura 4



Este diagrama muestra la intensidad de el campo magnético en diferentes partes de un horno de inducción, sin carga a fundir.

Aquí el campo magnético es más intenso cerca de las paredes del horno.

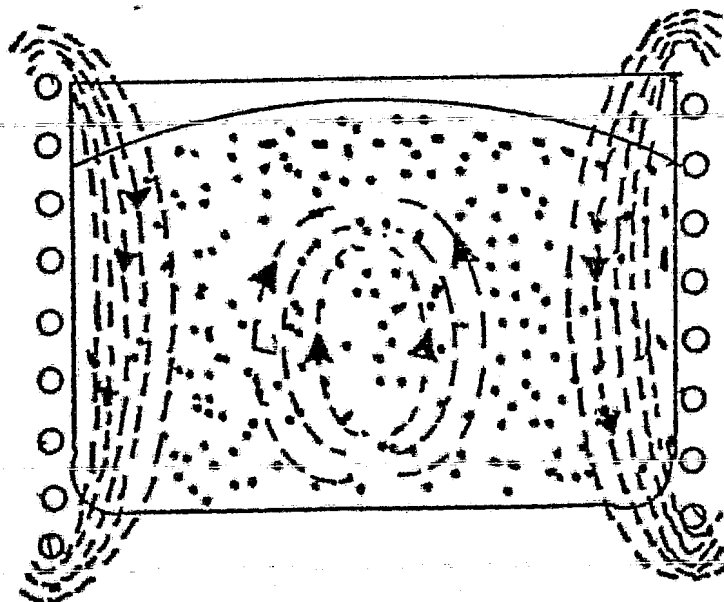
El término SKIN se usa para describir la gran intensidad del campo magnético en ciertas partes del horno.

Al introducir carga al horno de la fig 4, se inducirá un voltaje en el metal, produciendo corriente y por lo tanto generando otro campo magnético.

Es decir, en un horno de inducción el campo magnético es generado por la bobina y la carga metálica.

Esta situación se representa en la fig 5.

Figura 5



El campo magnético producido por la bobina está representado por las líneas de campo cercanas a la pared.

El campo magnético producido por la carga está representado por las líneas de campo en el centro del horno.

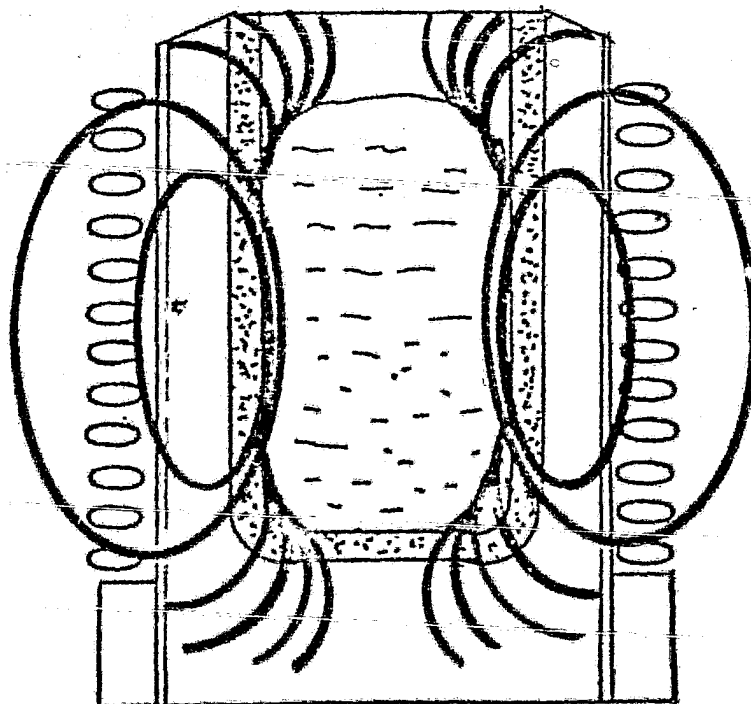
Nótese las direcciones opuestas del campo.

La densidad de flujo a lo largo del perfil transversal de la bobina, no es constante. La corriente inducida en la carga genera un campo magnético el cual tiene un sentido opuesto al de la bobina inductora.

El resultado es una concentración de energía en la corteza de la carga.

La superposición de ambos campos se muestra en la figura 6.

Figura 6 .



Para hornos de baja frecuencia, la profundidad de penetración resulta aproximada por la relación ¹⁵

$$\frac{\text{Área de la espira secundaria}}{\text{Altura de la espira secundaria}}$$

El efecto SKIN es mucho más pronunciado a altas frecuencias. Este efecto es de gran importancia cuando se funden cargas frías.

La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y directamente proporcional a la raíz cuadrada de su resistencia específica.

Ya que la resistencia específica en los metales, es una función creciente con la temperatura, la profundidad de penetración aumentará con ésta.

De acuerdo con Steinmetz, ¹⁶ para conductores rectilíneos:

$$P = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}$$

P = profundidad de penetración en cm.

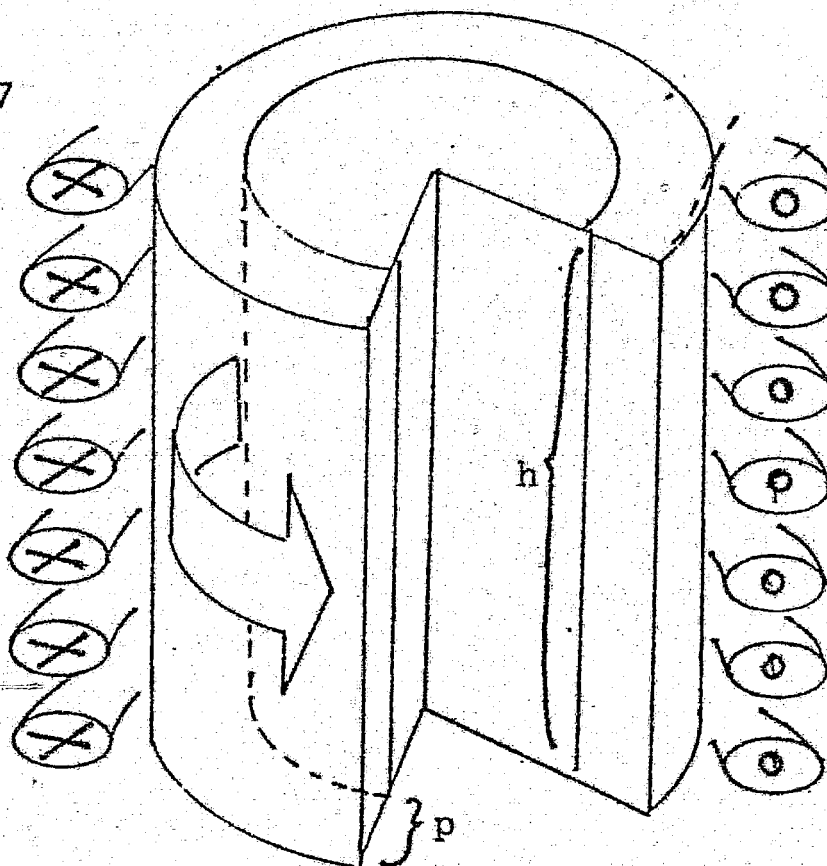
ρ = resistividad eléctrica en unidades electromagnéticas absolutas
(en abohm-cm: 1 abohm = 10^{-9} ohm.)

μ = permeabilidad magnética en el sistema absoluto electromagnético (e.m.)

f = frecuencia en ciclos por segundo (Hertz).

Si la espiral de inducción es un solenoide vertical y el conductor un cilindro vertical, la corriente inducida fluirá en forma circular. Fig. 7

Figura 7



El valor de la resistencia R del metal calentado será directamente proporcional a la resistencia específica del conductor y a la longitud de la trayectoria de la corriente (πD). E inversamente proporcional al área perpendicular a la dirección de flujo de la corriente ($P \cdot h$)

$$R = \left(\frac{\pi \cdot D}{P \cdot h} \right) \rho$$

(R = resistencia en el circuito secundario)

y si se sustituye en la ecuación de Steinmetz el valor de p

$$R = \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot D}{h} \sqrt{\mu \cdot f \cdot \rho}$$

Brewer¹⁷ ha computado que la corriente que fluye en un secundario de forma cilíndrica está dada por: (sistema electromagnético c.g.s.)

$$\frac{I^2}{I_0^2} = \frac{4 \cdot \pi^4 \cdot D^4 \cdot n^2 \cdot \omega^2}{R^2 + \omega^2 L^2}$$

aquí: $L = \frac{\pi^2 \cdot D^2}{H}$ (en abhenry)

donde:

I = valor medio de la corriente inducida en abamperes

I_0 = valor medio de la corriente fluyendo en espiral de inducción. (en abamperes)

n = número de vueltas de la bobina

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

R = resistencia en abohm

H = altura

D = diámetro

en el cilindro conductor

El término L es la autoinducción del cilindro cuando la corriente fluye en la superficie del cilindro.

La ecuación anterior se cumple sólo si R es pequeña comparada con $(\omega \cdot L)$. Si ésta es mayor, el valor de I es de un cuarto del dado.

Brewer ha deducido que las condiciones óptimas en el calentamiento por inducción para un cilindro sólido, existen cuando su diámetro es de cerca de 4 veces el espesor de la profundidad de penetración ($D = 4p$).

Un calentamiento eficientemente razonable puede obtenerse con diámetros mayores que $4p$. pero, si el diámetro es mucho menor

que $2p$, dificultará el alcance de temperaturas elevadas.

En la tabla I se presentan valores de p y $4p$ para cierto número de materiales y frecuencias.

Según Luigi Sitia¹⁸ el diámetro de un cuerpo conductor para fundir por inducción, debe ser 3.5 veces la profundidad de penetración de la corriente ($D = 3.5 \cdot p$).

De acuerdo a Burch y Davis¹⁶ existe una relación entre el radio del crisol y la frecuencia de operación la cual es:

donde: r = radio del crisol en cm.

ρ = resistividad en unidades electromagnéticas del metal caliente

f = frecuencia en Hertz

$$\frac{r}{\sqrt{\frac{\rho}{8 \cdot \pi^2 \cdot f}}} > 3$$

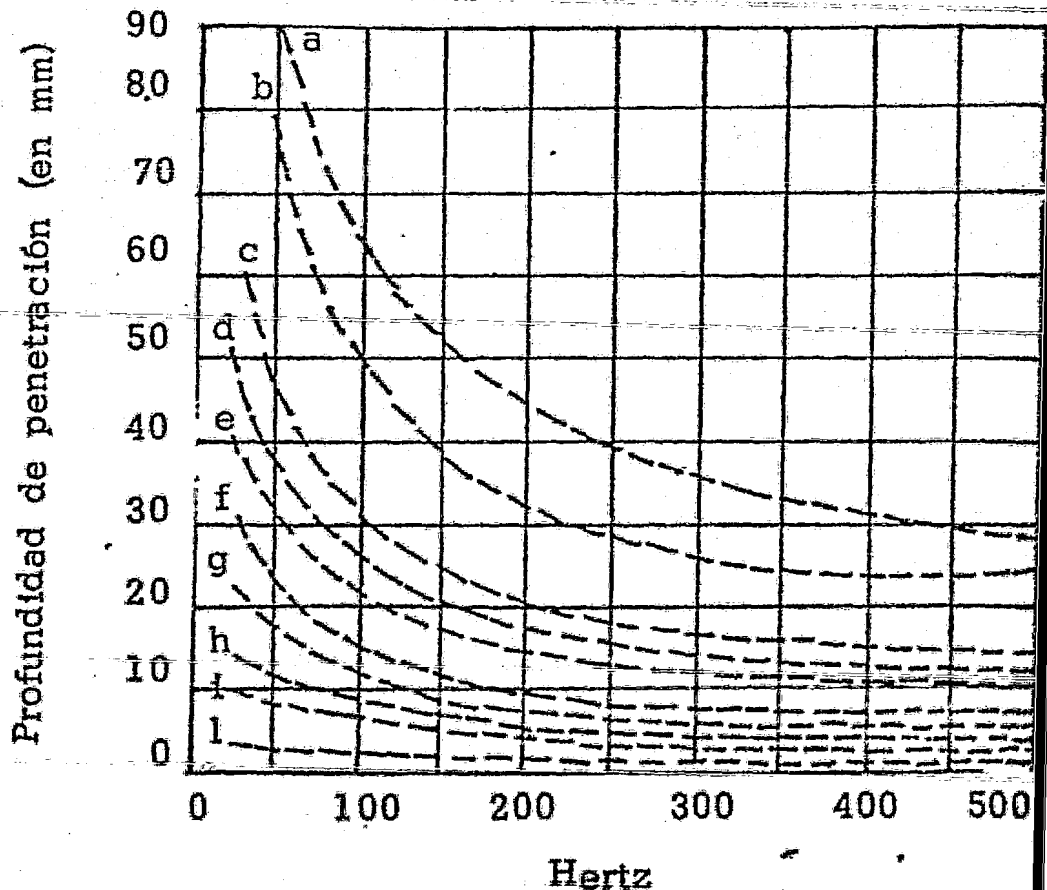
TABLA I

Valores de p y de 4p, en centímetros, para varios materiales y frecuencias.

		Frecuencias							
		2000		10000		30000		300,000	
abohm cm		p	4p	p	4p	p	4p	p	4p
Cu (20°C)	1.7*10 ³	0.15	0.59	0.066	0.26	0.038	0.15	0.012	0.047
W (0°C)	5*10 ³	0.25	1.0	0.112	0.45	0.065	0.26	0.021	0.082
W (2230°C)	74*10 ³	0.97	3.9	0.43	1.73	0.250	1.0	0.08	0.32
Mo (0°C)	5*10 ³	0.25	1.0	0.112	0.45	0.065	0.26	0.021	0.082
MO (2000°C)	59*10 ³	0.87	3.46	0.38	1.52	0.22	0.88	0.07	0.028
Ta (0°C)	12*10 ³	0.39	1.56	0.173	0.70	0.100	0.40	0.032	0.127
Ta (2230°C)	94*10 ³	1.09	4.36	0.49	1.95	0.282	1.13	0.09	0.36
Grafito (0°C)	800*10 ³	3.2	12.8	1.42	5.70	0.82	3.28	0.26	1.04
Grafito (22309)	560*10 ³	2.66	10.64	1.20	4.85	0.69	2.8	0.22	0.89

Figura 8

- a) acero líquido
- b) níquel líquido
- c) latón líquido
- d) aluminio líquido
- e) cobre líquido
- f) níquel sólido
- g) latón sólido
- h) aluminio líquido
- i) cobre sólido
- l) acero líquido



La figura (8) indica la profundidad de penetración para algunos metales al estado líquido y al estado sólido.

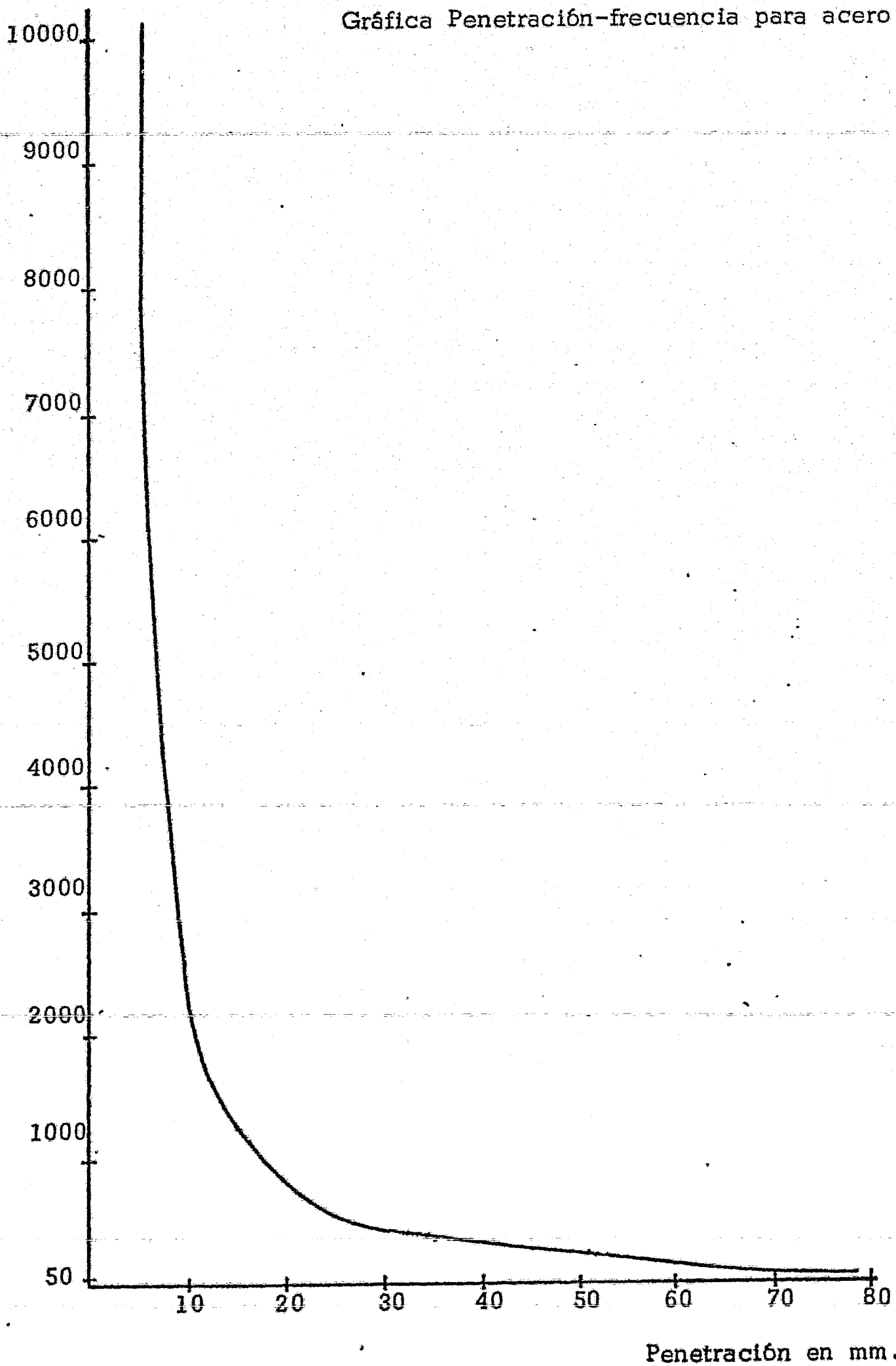
Como un ejemplo típico, la profundidad de penetración en acero fundido cuando se trabaja a la frecuencia de 1000 Hz, es de 1.5 cm. en estado sólido y cuando el material es magnético, esta profundidad es de alrededor de 0.2 cm.

La figura (9) muestra esta relación a 1000°C.

El calentamiento debido a la resistencia metálica y al efecto skin son la forma más importante por las cuales, el metal es calentado en el horno de inducción. Sin embargo, el calentamiento también puede ^{19,20} (en menor grado y a bajas temperaturas) ser el resultado del efecto de la corriente en la carga metálica que puede estar magnetizada. En este caso la corriente alternante produce pequeñas partículas magnetizadas que vibran generando calor. (Histéresis magnética).

Aunque este efecto es más grande a altas frecuencias, es de menor importancia que el calentamiento debido a la resistencia al flujo de corriente ofrecida por el metal.

Figura 9

Gráfica Penetración-frecuencia para acero a 1000°C 

II.5.- POTENCIA ELECTRICA Y FACTOR DE POTENCIA

En muchos dispositivos eléctricos uno de los parámetros que más nos interesa es el de la potencia. En este caso es importante conocer la potencia absorbida por el horno de inducción.

La potencia instantánea puede tomar valores positivos o negativos según el intervalo de tiempo que se considere. Una potencia positiva significa una transferencia de energía de la fuente a la red, mientras que una potencia negativa corresponde a una transferencia de energía de la red a la fuente.

En los circuitos resistivos puros, la potencia disipada por un circuito es igual al producto del voltaje por la corriente, el voltaje y la corriente están en fase. Fig. 10

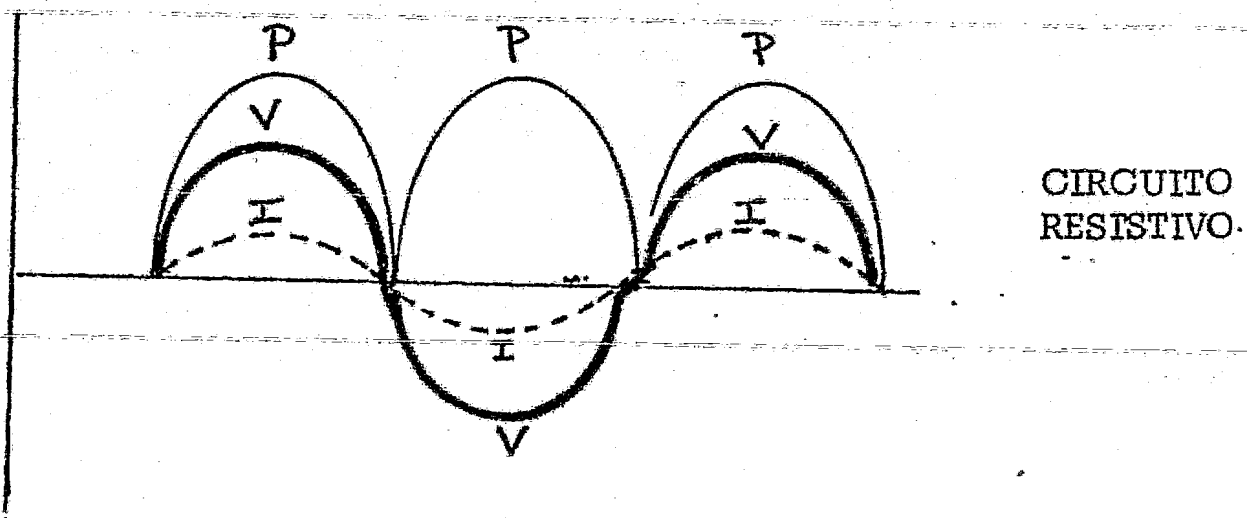


Figura 10

En un circuito de C. A. que contenga solamente inductancia, fluirá la corriente, limitada solamente por la reactancia del circuito, pero la energía utilizada para producir el campo magnético regresar al circuito al caer dicho campo. Durante el ciclo se usan cantidades iguales de potencia positiva y negativa que dan un total igual a cero. La corriente tiene un retraso de 90° (ngulo de fase) con respecto al voltaje. Fig. 11

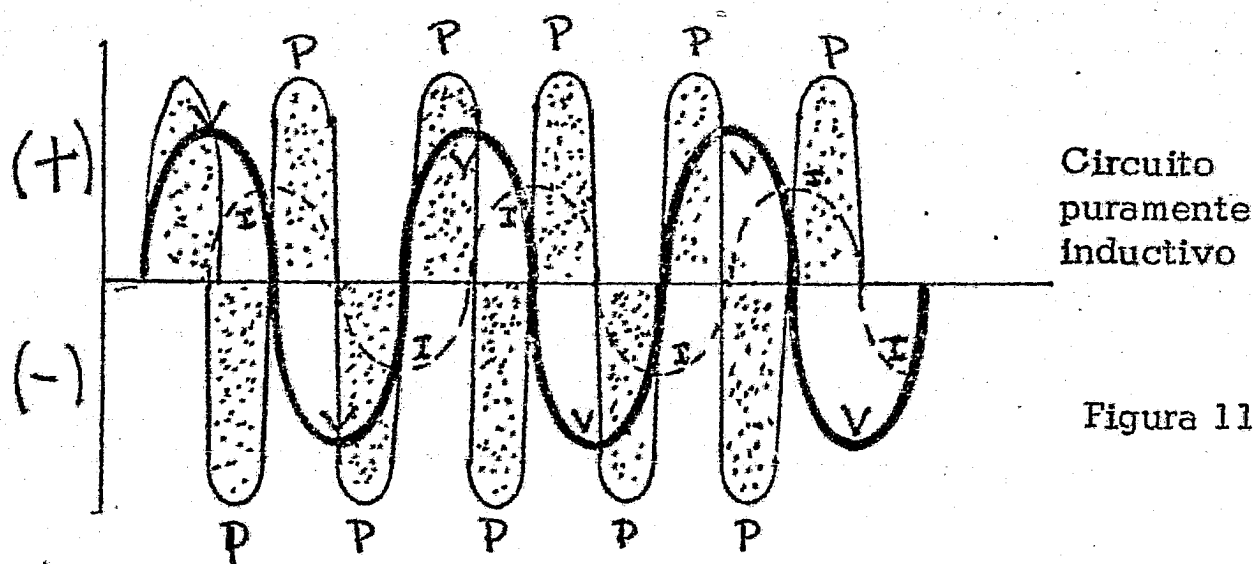


Figura 11

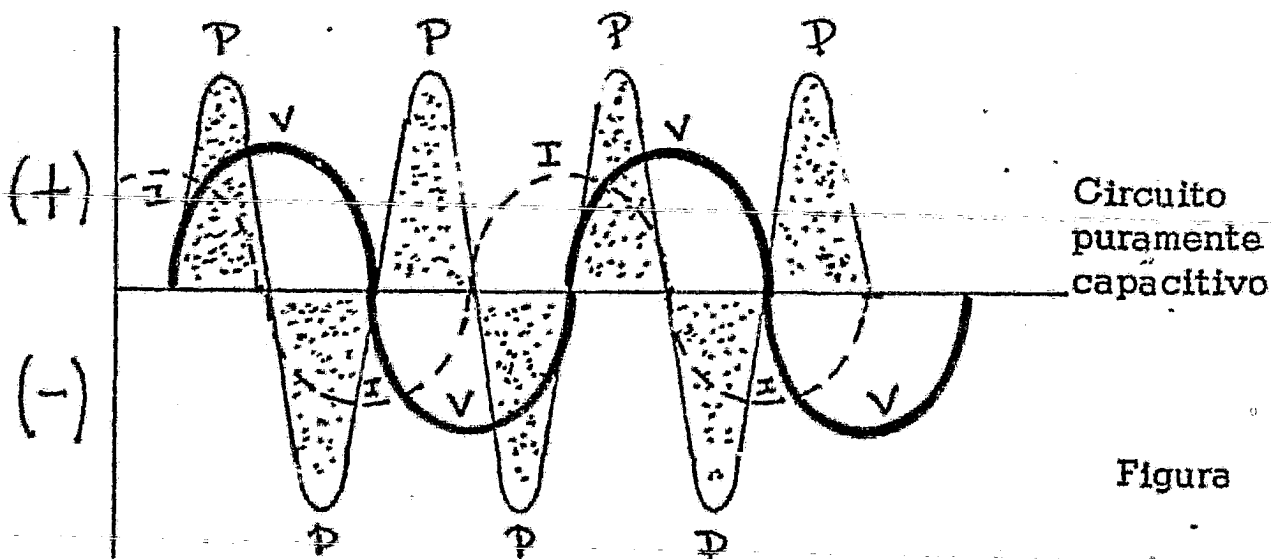


Figura 12

De igual manera, cuando se descarga un capacitor, la energía almacenada en el material dieléctrico regresa al circuito.

La energía eléctrica se utiliza temporalmente en el circuito reactivo.

La forma de onda de la energía muestra que en el circuito se utilizan cantidades iguales de energía positiva y negativa que dan como resultado un consumo igual a cero. Fig. 12

Así, la potencia que realmente consume la carga (horno de inducción) recibe el nombre de potencia activa (P) y su unidad en el sistema mks es el vatio (W) como múltiplo se emplea el kilovatio (KW).

La potencia que suministra la fuente (el producto VI) se llama potencia aparente (S), la unidad de S en el sistema mks es el voltio amperio (VA) y su múltiplo más empleado es el kilovoltio amperio (KVA).

La potencia "desperdiciada" por la carga se denomina potencia reactiva (Q), la unidad de Q en sistema mks es el voltio amperio reactivo (kVAr) siendo $1\text{kVAr} = 1000\text{ VAr}$.

Las expresiones de las potencias activa, aparente y reactiva se pueden representar gráficamente mediante los lados de un triángulo denominado triángulo de potencia. Fig. 13

Hipotenusa: Potencia aparente (S) = tensión por intensidad = VI

Cateto adyacente: Potencia activa (P) = tensión por componente activa (en fase) de la intensidad = $VI \cos \theta$

Cateto opuesto: Potencia reactiva (Q) = tensión por componente reactiva de la intensidad = $VI \sin \theta$

Aquí θ es el ángulo de fase entre el voltaje y la intensidad.

Al $\cos \theta$ se le denomina FACTOR DE POTENCIA. Siempre es conveniente que sea cercano a la unidad, pues de esta forma se aprovecha casi totalmente la energía proporcionada por la fuente.

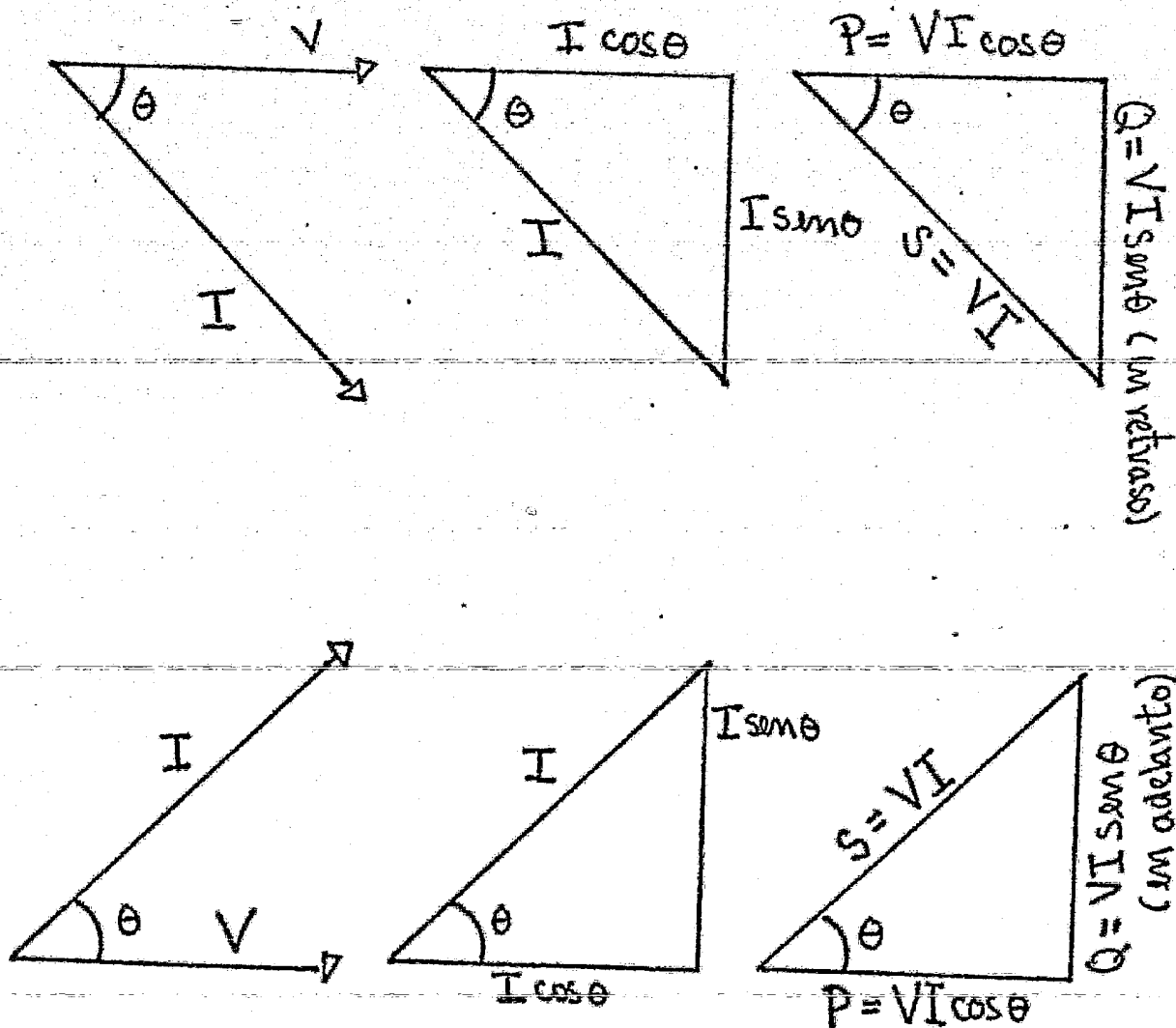


Figura 13

El horno de inducción, por su principio de funcionamiento es una carga monofásica con una componente inductiva elevada y por consiguiente con un factor de potencia indeseable.

Una batería de condensadores, dimensionada de modo óptimo y asociada en paralelo al horno, compensa la carga inductiva del horno de tal modo que en servicio normal, el circuito del horno funciona con un factor de potencia prácticamente igual a la unidad.

El banco de capacitores está dividido en secciones variables y fijas en forma tal que la capacitancia puede ser variada para compensar las condiciones cambiantes dentro del horno.

Las variaciones ocurren dentro del horno lo que cambia la relación magnética entre la bobina de inducción y el metal a fundirse por las siguientes razones:

- a) Disminución del grosor del revestimiento refractario del horno debido al desgaste normal.
- b) Cualquier cambio en el nivel de metal dentro del horno a causa del vaciado recarga o fusión inicial.
- c) Cambio en la resistencia eléctrica de la carga de metal como función de la temperatura y aleación.
- d) Cambio de propiedades magnéticas del metal, a medida que es calentado más allá de su temperatura Curie.
- e) Aumento en el grosor del revestimiento del horno, debido a la acumulación de escorias.

El grado de llenado²¹ de un horno de inducción afecta la eficiencia de operación como se muestra en la siguiente gráfica (para hornos sin núcleo a la red). Fig. 14

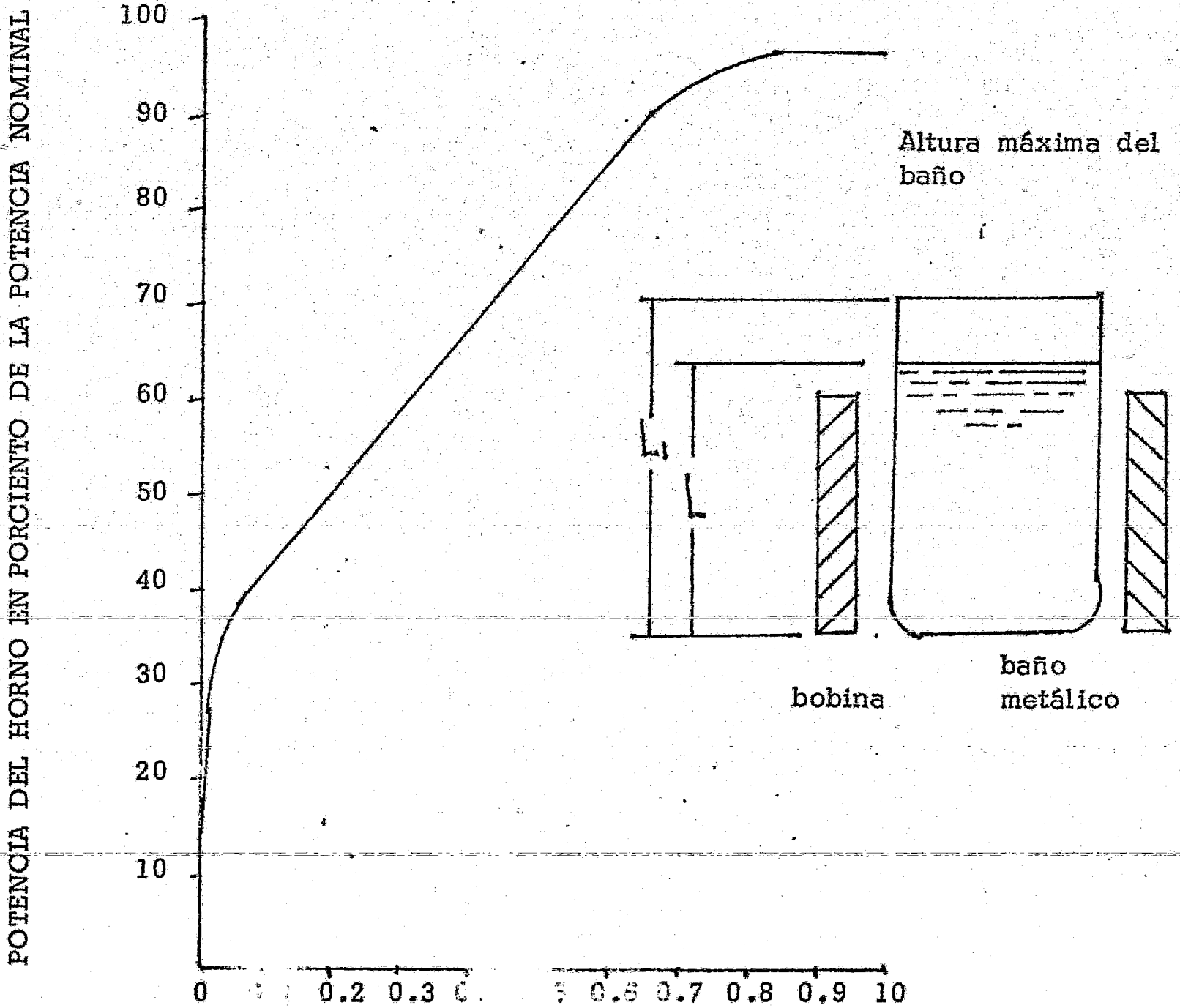


Fig. 14. Eficiencia del nivel de baño en la altura máxima del baño (L/L.)

Fig. 14

III.5.b.) - GROSOR DEL REVESTIMIENTO

Desde el punto de vista eléctrico, la condición ideal sería que la carga llenara completamente el interior de la bobina, de tal manera que no hubiera espacios libres entre la carga y la espiral, con la cual se evitarían pérdidas de flujo magnético.

Sin embargo, esto es imposible y debe haber un crisol o revestimiento para retener el metal cuando esté fundido, además de un aislamiento térmico para evitar pérdidas excesivas de calor y un aislamiento eléctrico para proteger la bobina de un posible corto circuito.

Se logra lo anterior con un recubrimiento de asbesto colocado entre la bobina y el crisol, permitiendo también espacio para la expansión del crisol.

El grosor de la pared del refractario fija la distancia entre la bobina de inducción y la carga. Dicho espacio está ocupado por líneas de inducción magnéticas las cuales aparecen, se reducen y se invierten, regulando los cambios de la corriente eléctrica que lo produce.

Como anteriormente dijimos, la eficiencia eléctrica del horno aumenta conforme el grosor del refractario disminuye.

Las paredes deben ser lo más delgadas posibles. Las paredes gruesas impiden que el flujo magnético se cierre sobre la carga con lo cual se prolonga el tiempo de colada y se aumenta el consumo de energía eléctrica.

Recuérdese que el mayor grado de calentamiento de la carga ocurre cerca de sus extremos exteriores. En otras palabras, el mayor calentamiento ocurre cerca de las paredes refractarias del horno.

Analizando más detalladamente las características eléctricas del horno, el factor de potencia de la energía absorbida del primario está dado por la siguiente expresión:²²

$$\cos \psi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$\cos \psi = \frac{R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)^2 + \left(\omega L_1 + \frac{M^2 \omega^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)^2}}$$

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\omega \frac{M^2 \omega^2 L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right)^2}}$$

donde = frecuencia en Hertz. (Frecuencia angular = $2 \pi f$).

L_1 = Coeficiente de autoinducción de la bobina inductora.

R_1 = Resistencia del arrollamiento primario en Ohms.

R_2 = Resistencia del circuito secundario en Ohms.

L_2 = Coeficiente de autoinducción total del secundario.

M = Coeficiente de inducción mutua entre el primario y el secundario.

$$L_1 = \mu \frac{4\pi N_1^2 S_1}{H_1} = \mu \frac{(\pi N_1 D_1)^2}{H_1} \quad \text{en Henrys.}$$

La autoinducción del embobinado secundario (siendo de una espira) se puede expresar como:

$$L_2 = \mu \frac{4\pi S_2}{H_2} = \mu \frac{D_2^2 \pi^2}{H_2} \quad \text{en Henrys}$$

y la inductancia mutua se puede aproximar por:

$$M = \mu \frac{4\pi N_1 S_m}{H_m} = \mu \frac{N_1 D_m^2 \pi^2}{H_m} \quad \text{en Henrys}$$

en la cual:

S_1 = Area transversal de la bobina primaria (m^2)

S_2 = Area de la espira secundaria (m^2)

D_1 = Diámetro de la espira primaria (m)

D_2 = Diámetro de la espira secundaria (m)

H_1 = Altura de la bobina primaria (m)

H_2 = Altura de la espira secundaria (m)

H_m = Altura media de la espira primaria y secundaria (m)

S_m y D_m = Sección media y diámetro medio de la espira primaria y secundaria (m^2), (m).

μ = Permeabilidad del medio en el sistema mks no racionalizado

N_1 = Número de vueltas en arrollamiento primario.

La resistencia del circuito secundario está dada en el desarrollo de la ecuación de Steinmetz para la profundidad de corriente (pag. 23).

La potencia absorbida por el primario es:

$$W_p = \frac{(R_1 + M^2 \omega^2 R_2) I_1^2}{R_2 + \omega^2 L_2^2}$$

en la que $R_1 I_1^2$ = potencia perdida en calor en el primario y

$$\begin{aligned} \frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2 + \omega^2 L_2^2} I_1^2 &= \text{potencia transmitida al circuito secundario} \\ &= \text{POTENCIA UTIL} \\ &= R_2 I_2^2 \end{aligned}$$

De aquí se deduce el rendimiento ²³

$$\eta = \frac{\frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2 + \omega^2 L_2^2}}{R_1 + \frac{M^2 \omega^2 R_2}{R_2 + \omega^2 L_2^2}} = \frac{1}{1 + R_1 \left(\frac{R_2 + \omega^2 L_2^2}{M^2 \omega^2 R_2} \right)}$$

Se puede concluir que: el rendimiento del horno de inducción es más elevado cuando:

- * La resistencia del arrollamiento primario y la impedancia del circuito secundario son bajos.
- * La resistencia del circuito secundario y el coeficiente de inducción mutua y la frecuencia son elevados.

Para mejorar el factor de potencia es necesario reducir al mínimo la diferencia $L_1 L_2 - M^2$ (que representa el flujo disperso, es decir, el flujo que no atraviesa al secundario) y aumentar al máximo R_2 .

En base a la teoría general del horno de Inducción, l'Esmarch ha probado que la potencia absorbida del secundario de un horno de ALTA FRECUENCIA es de la siguiente expresión: ²⁴

$$W_0 = [6.7] \cdot Q \cdot A \cdot Z^2 \cdot I_1^2 \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f} \cdot 10^{-10} \text{ en kW}$$

En la que:

Z = Ampere-Espira del arrollamiento primario

μ = Permeabilidad magnética en unidades electromagnéticas

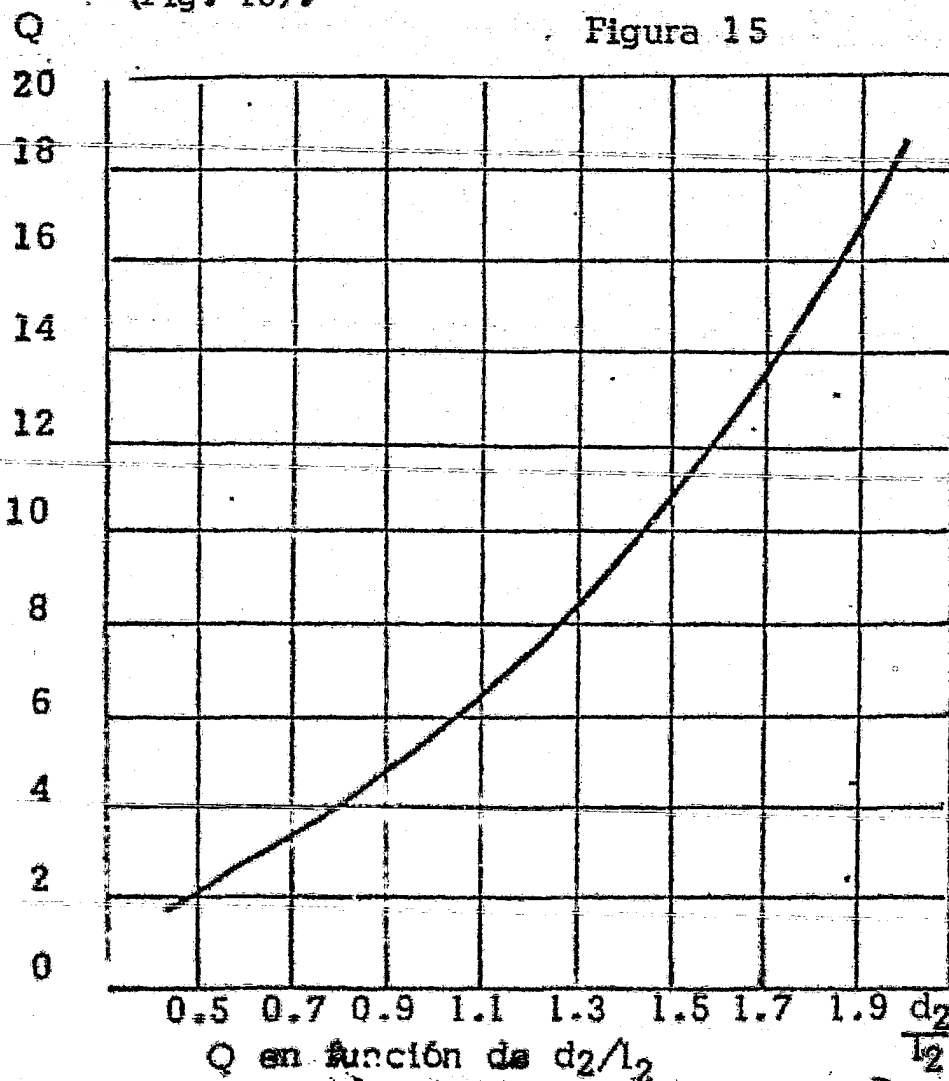
ρ = Resistividad de la carga en ohm-mm.

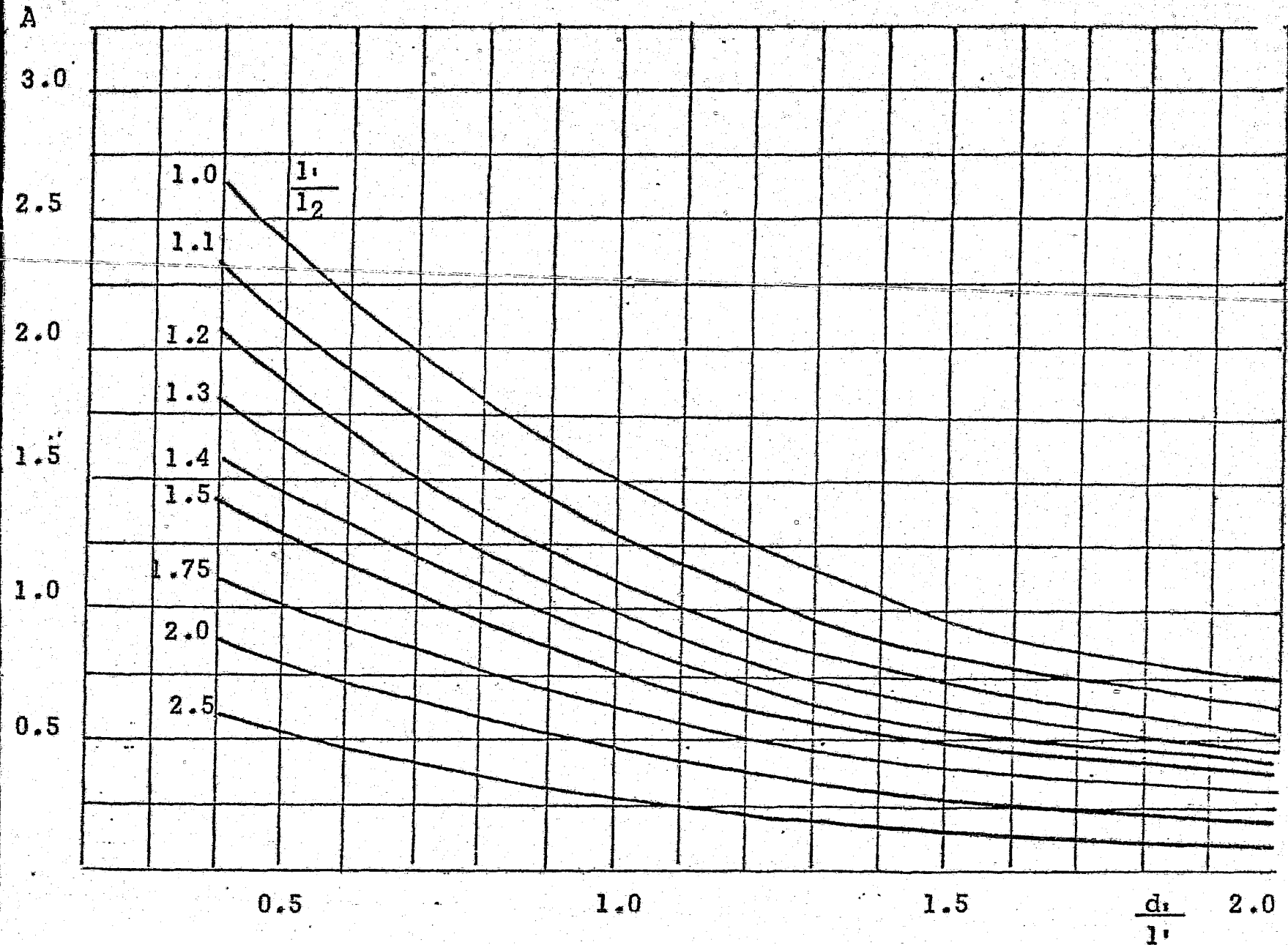
f = Frecuencia en Hertz

I_1 = Corriente primaria en Amperes

Q = Una función de la razón diámetro/altura del secundario (Fig. 15)

A = Una función compleja de la razón diámetro altura del primario (d_1/l_1) y de la razón altura secundaria l_1/l_2 (Fig. 16).





A en función de $\frac{d_1}{l_1}$ y de $\frac{l_1}{l_2}$

La frecuencia de la corriente usada en el horno sin núcleo, depende esencialmente del diámetro del horno y de la resistividad de carga.

Así, cuanto más elevada sea la frecuencia, el diámetro adecuado para el horno debe ser más pequeño y la resistividad del material a fundir debe ser más alta.

Debido a que la resistividad varía en relación al estado físico de la carga, es necesario poder variar la frecuencia dentro de límites lo suficientemente amplios en relación a las características y al estado físico del material a fundir.

III.6.- AGITACION DEL BAÑO

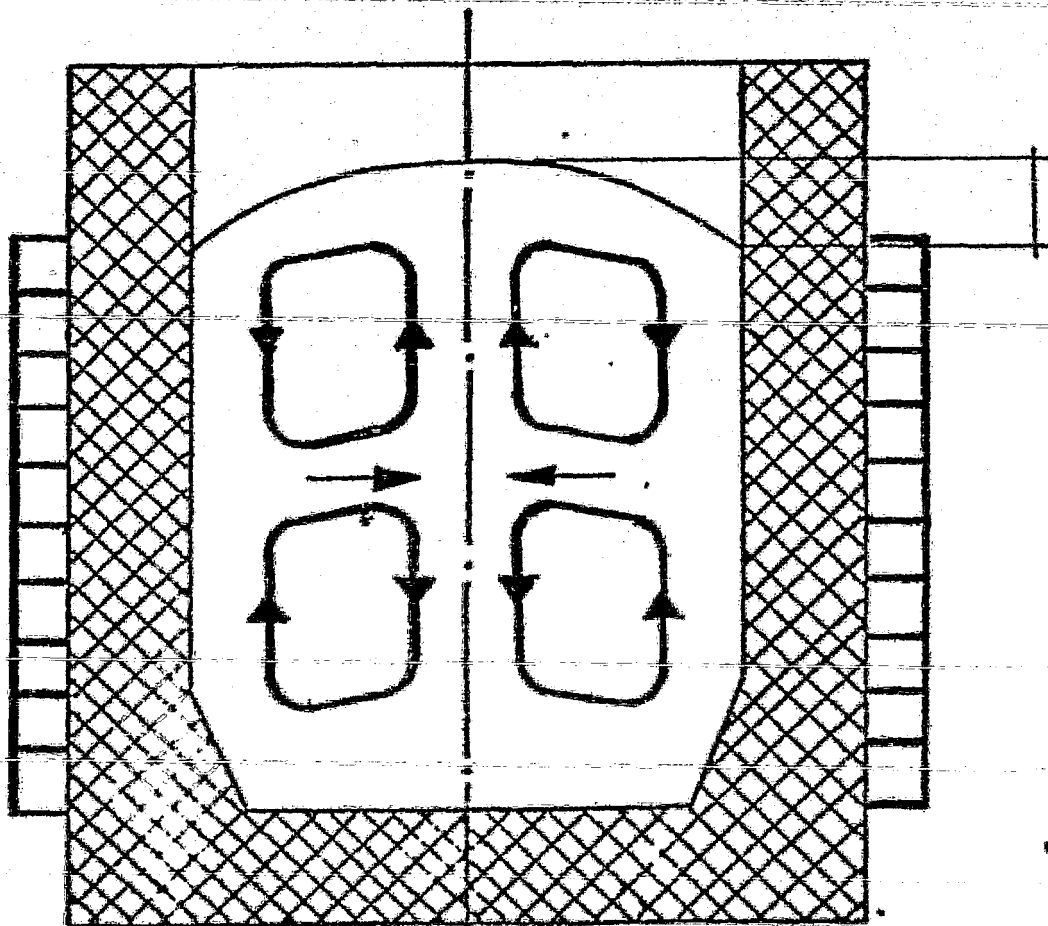
El campo magnético de un horno de inducción no solamente funde la carga, sino que también ejerce una fuerza sobre el metal, lo cual resulta en un movimiento o agitación del metal fundido.

En el horno de inducción sin núcleo, el metal fundido muestra un movimiento de agitación, cuya dirección difiere del flujo de corriente o de las líneas de inducción magnética.

El movimiento²⁵ es en dos circulaciones toroidales axiales y el modelo depende únicamente de la geometría del horno.

La figura (17) muestra estas direcciones.

Fig. 17



Este movimiento de metal es causado por la acción combinada de dos efectos distintos: ²⁶

- 1.- La repulsión mutua de las bobinas
- 2.- El efecto "Pinch"

III.6.a).- REPULSION MUTUA DE BOBINAS

En primer lugar hay una repulsión mutua entre las bobinas primaria y el metal libre en movimiento.

El campo magnético en la carga está en dirección opuesta al campo que forma la bobina, estableciéndose una fuerza de repulsión.

Las líneas de inducción magnéticas se desplazan ^{27, 31} paralelas a la longitud de la bobina sólo en la parte central de la misma.

En el fondo y en la parte superior de la carga; estas líneas se desplazan girando hacia afuera.

La fuerza es siempre perpendicular a la dirección de las líneas de inducción magnéticas.

En ambos extremos de la bobina esta fuerza cambia de dirección.

Esta desigual distribución de fuerzas magnéticas es la prin

cipal, motivo del movimiento del metal.

Estas fuerzas son más intensas en el centro de la bobina. El metal es obligado a dirigirse hacia el centro del baño donde se desvía hacia arriba y hacia abajo.

El movimiento hacia arriba del metal en el centro causa el menisco o coroneo característico del horno sin núcleo, mientras la fuerza hacia abajo se cancela con la reacción del piso del horno.

La altura del menisco es una medida de la intensidad del movimiento.

El grado de agitación debido a la repulsión mutua entre el primario y el secundario, se produce principalmente en los Hornos sin núcleo, no así en los Hornos de Canal, donde la causa principal del movimiento es el efecto "pinch".

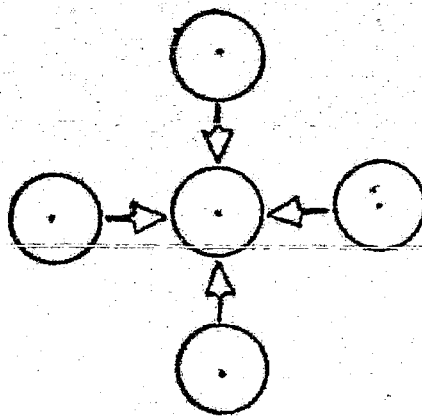
III.6.b).- EFEECTO "PINCH"

Este efecto juega un papel importante en el diseño del horno de inducción tipo canal, y dicho efecto es consecuencia de fuerzas electromagnéticas que producen movimiento violento del metal fundido.

Es comunmente conocido que conductores paralelos llevando corrientes en la misma dirección se atraen uno al otro con una fuerza proporcional al producto de las intensidades de estas corrientes.

La figura (18) ilustra este efecto:

Fig. 18



Podemos imaginar al metal fundido, consistiendo de un número infinito de conductores paralelos en libertad de movimiento, cuando la corriente fluye, una presión radial será ejercida en el líquido y actuará "pellizcando" al metal.

Si esta fuerza constrictora llega a ser tan grande que res-

place porciones de metal más allá del punto de donde puedan volver a unirse, el circuito se interrumpe.

Esto fue observado por vez primera por Hering,²⁹ quien notó depresiones en la superficie de un metal cuando la densidad de corriente alcanzaba un valor límite.

Hering trató de utilizar este efecto para producir circulación en baños líquidos.

Aunque sus experimentos no tuvieron éxito, fueron la base para posteriores mejoras en los hornos de canal.

Cabe señalar que los primitivos hornos de inducción con núcleo el canal estaba colocado en posición horizontal y abierto a la atmósfera, de esta manera el metal era fuertemente oxidado y aunado al movimiento del metal y la formación de escoria, el refractario era intensamente erosionado, aparte del problema que presentaba el efecto "pinch", que interrumpía el circuito de metal limitando la potencia absorbida.

Para prevenir la ruptura del anillo secundario, C.P. Schneider,²⁸ sugirió un método simple, que consistía en aplicar una presión longitudinal en el canal para contrarrestar la presión radial causada por la atracción de los elementos portadores de corriente hipotéticos.

Para esto, el diseño el canal del horno, sumergido, en el cual un volumen de metal fundido ejercía una presión hidrostática sobre el metal contenido en el canal.

La idea no fue totalmente fructífera, debido a que la circulación del metal fue demasiado lenta para transferir el calor generado al baño de arriba, causando sobrecalentamiento con las consecuentes fallas en el refractario.

Wyatt³⁰ encontró la forma de aumentar la velocidad de remoción de metal desde el canal sumergido.

Descubrió como las fuerzas electrodinámicas en un canal en "V" actuaban de manera favorable a la agitación de metal, llamándole a este fenómeno efecto "motor".

Este canal era de sección transversal rectangular, con las ramas de la "V" formando un ángulo de 70° con la horizontal.

En las ramas del canal "V" fluyen corrientes en sentido opuestos. Ya que conductores que lleven corrientes en sentidos opuestos tenderán a repelerse, al encontrarse la masa de metal en el ápice de la "V", esta será forzada a la posición más lejana de esta junta, esto es, el baño de metal que está encima del canal.

Esta fuerza es más intensa en el ápice de la "V" donde las ramas se encuentran.

Por otra parte, el efecto "pinch" se manifestará con mayor fuerza en la unión de las ramas de la "V" con el baño.

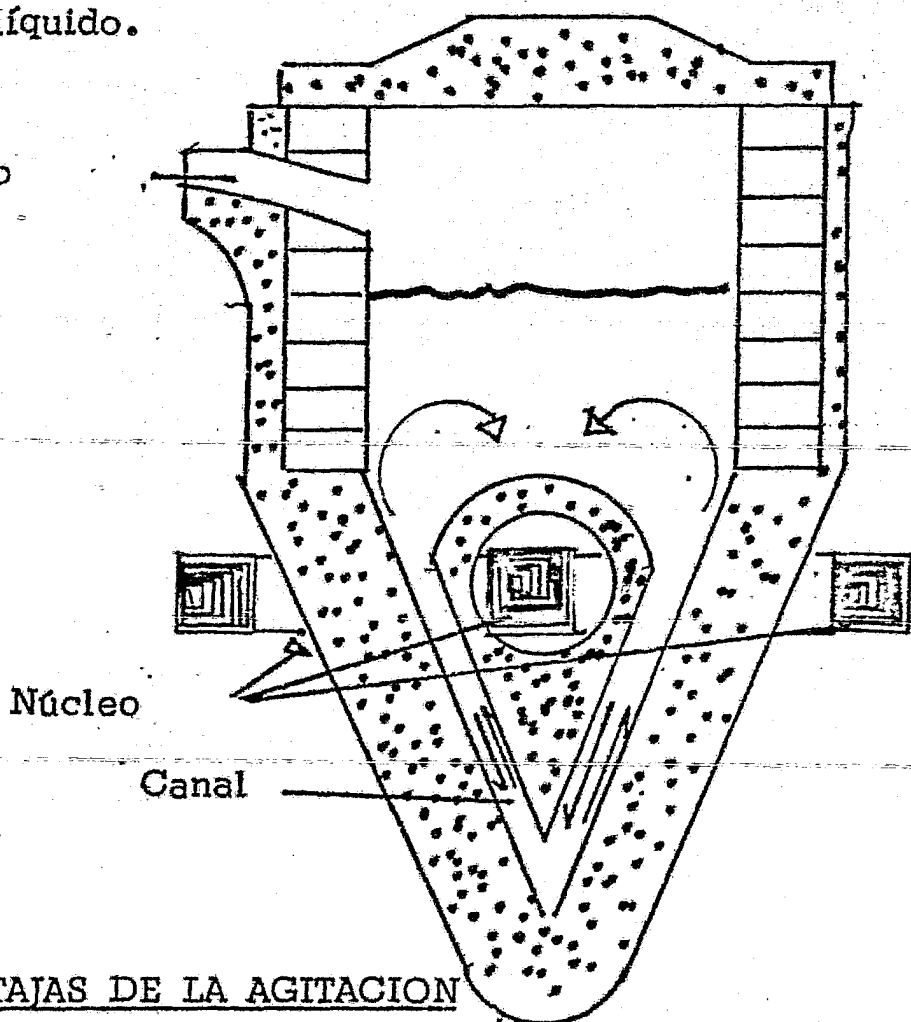
Una acción adicional al movimiento de circulación es la convección debida a la diferencia en densidad entre el metal calentado en el canal y el metal más frío del baño de metal.

El efecto combinado de estas 3 fuerzas producen un intenso movimiento de circulación.

La figura (18) muestra al horno Wyatt internamente con la trayectoria que sigue el metal líquido.

Pico de Colado

FIG. 18



III.6.b.c). VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA AGITACION

La consideración más importante para el fundidor durante la fusión es el movimiento del baño debido a la agitación.

Ventajas

(Agitación óptima)

- Homogeneización del fundido
- Uniformidad de la temperatura
- Efectiva fusión de carga finamente dividida.

Desventajas

Una agitación inadecuada tiene como consecuencia:

- Una homogeneidad insuficiente.
- Mayor gradiente de temperatura en el metal fundido
- Dificultad para carburar o alear con rapidez
- Dificultad para fundir las virutas o chatarra ligera

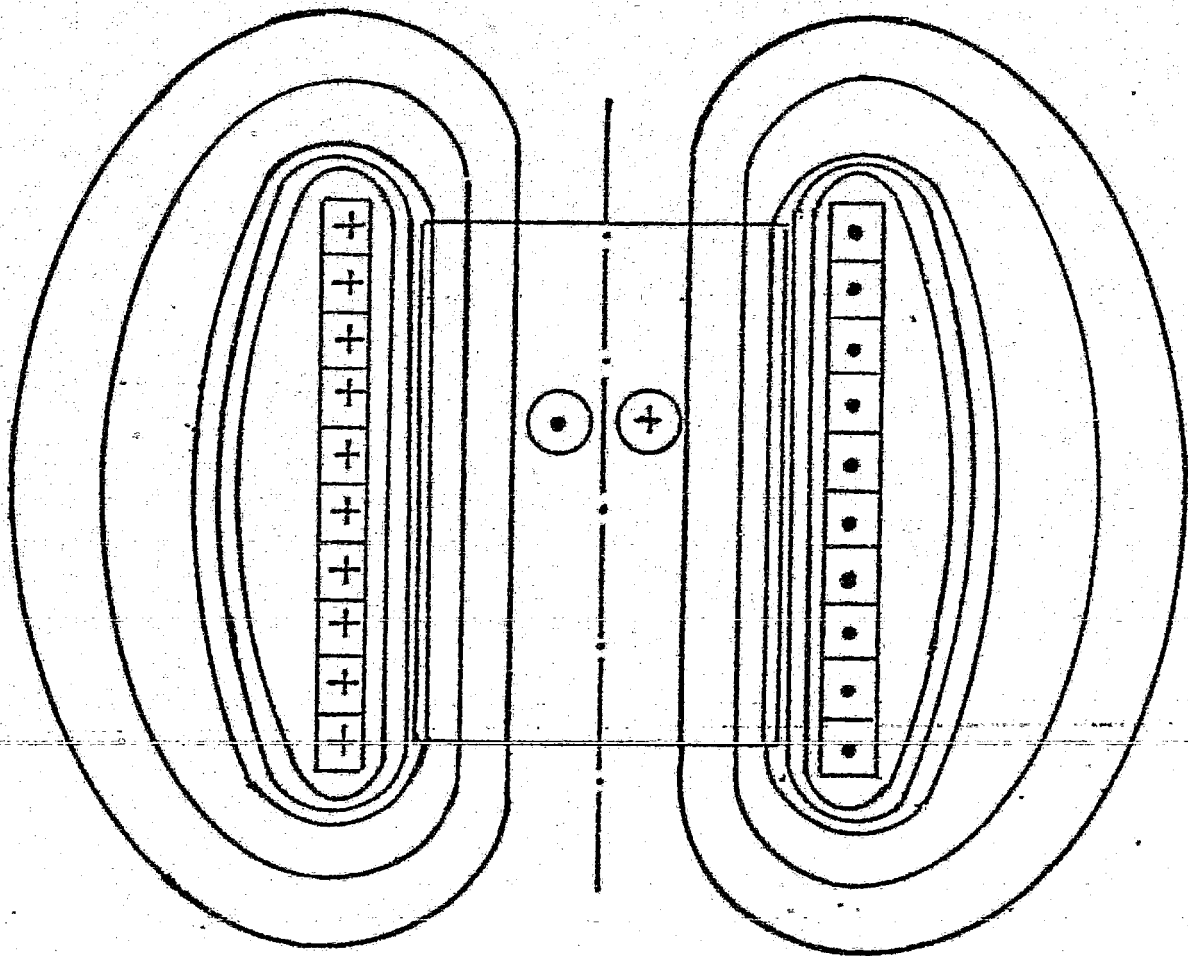
La agitación excesiva tiene como consecuencia:

- Una gran erosión del revestimiento
- Oxidación de las aleaciones
- Inclusiones de escoria y refractario
- Mayor posibilidad de absorción de gases

III.7.- BLINDAJE MAGNETICO EN LOS HORNOS DE INDUCCION SIN NUCLEO

Las líneas magnéticas en la carga no viajarán uniformemente a lo largo de la longitud de la bobina, pero salen por fuera de la bobina cerrando la trayectoria. Ver fig. 19

Fig 19



Estas líneas viajan por la parte exterior de la bobina causando algunas pérdidas de flujo. Es decir, la misma cantidad de líneas de flujo que pasan a través del metal que se desea fundir, circulan por fuera, por lo que pueden inducir corrientes en estructura de acero del cuerpo del horno.

Para minimizar este fenómeno, se puede recurrir a dos mé-

todos de blindaje magnético.

1.- Ideado por Northup,³² consiste en revestir el cuerpo de acero con una lámina de cobre de un cuarto de pulgada de espesor; ésta forma una trayectoria metálica de alta conductividad en la cual la corriente inducida tiene un pequeño efecto calefactor, produciendo un campo magnético asociado que cancela el de la bobina, previniendo corrientes de remolino inducidas en el alojamiento exterior de acero.

2.- Este otro método³³ ahora universalmente usado consiste en el uso de yugos laminados de acero con cuatro por ciento de silicio, los cuales se colocan en forma vertical y adyacentes a la bobina.

Estas láminas forman una trayectoria de baja reluctancia para el flujo magnético externo y no se forman, debido a sus características magnéticas, pérdidas por histéresis o corrientes de remolino. Ver fig. 20

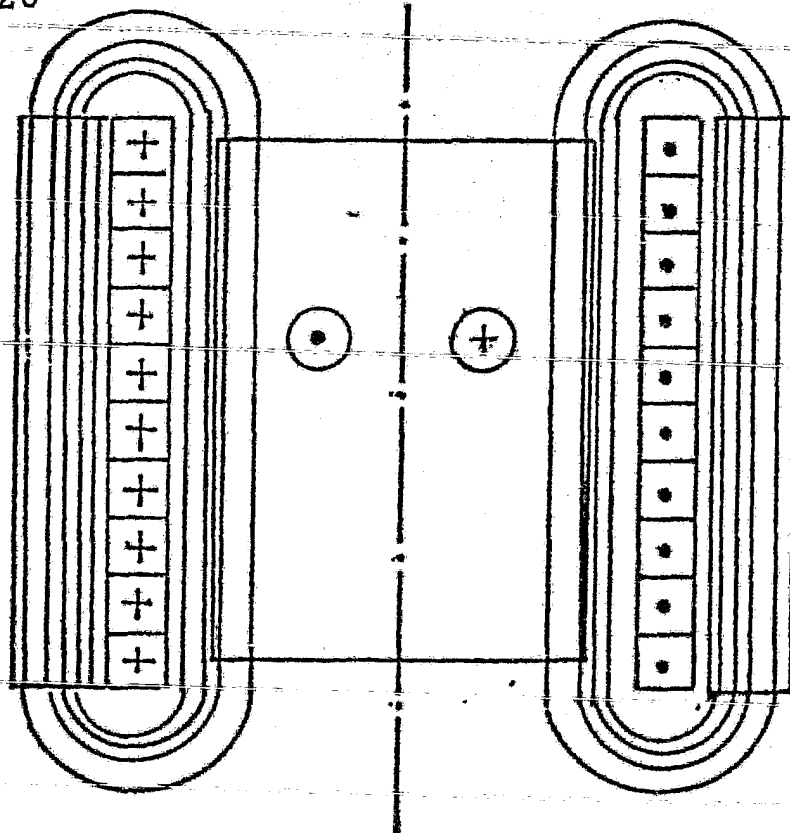


Fig. 20

Los yugos magnéticos tienen dos funciones:

1.- Guiar las líneas de inducción magnética por el exterior del crisol, previniendo la penetración del flujo magnético en la estructura de acero del cuerpo del horno.

2.- Dar a la bobina y el crisol mayor resistencia mecánica en sentido radial.

III.8.- PERFIL DE COBRE DE LOS HORNOS SIN NUCLEO

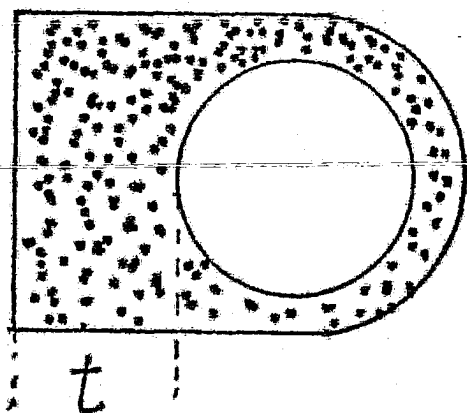
Con este nombre se designa la forma de la sección transversal extruída de la tubería que forma la bobina de inducción en los hornos sin núcleo.

Ultimamente se han hecho de uso común secciones especialmente extruídas, generalmente en forma de la letra mayúscula "D".

El lado plano de la sección se hace de un espesor óptimo "t", figura (21), tomando en cuenta la profundidad de penetración de corriente a la frecuencia de operación dada y la conductividad térmica del cobre.

Para hornos de 60 Hz este espesor es aproximadamente entre 15 mm ³⁴ y ³⁵ 3/8".

Figura 21



El agua de enfriamiento se hace pasar por la porción ahuecada del tubo.

III.9.- DEVANADOS DE BOBINAS EN LOS HORNOS SIN NUCLEO

Superficialmente hay muy poca diferencia entre el diseño de hornos de operación de media frecuencia y los hornos de operación a la alimentación de la red (60 Hz).

Sin embargo, en una inspección minuciosa, pueden observarse diferencias importantes en detalles.

En los hornos a la red³⁶, la bobina tiene mucho más vueltas, de tal manera que una gran corriente calefactora puede ser inducida en la carga con una relativa baja densidad de corriente en la bobina.

Las vueltas de la bobina están colocadas muy juntas una de otra y firmemente sujetas en compresión para resistir las fuerzas de vibración producidas por el fuerte campo magnético de baja frecuencia.

La bobina es corta, abarcando solamente $2/3$ de la altura de trabajo del crisol.

Esto sirve para dos propósitos:

1.- La concentración del campo magnético hacia el fondo del crisol facilita la fusión del block de arranque (ver sección III.3.-).

2.- El peso del metal arriba del nivel de la bobina reduce la

violenta turbulencia que de otra manera pudiera aparecer en la carga fundida a altos niveles de potencia.

En estos hornos, la mayoría de las veces se instala un serpentín de enfriamiento arriba de la bobina, para dar un soporte uniforme y enfriamiento al revestimiento del crisol sobre su superficie en contacto con el fundido.

En sí, la altura de la bobina de un horno sin núcleo, es relativamente corta comparada con su diámetro, lo que hace que muy pocas líneas de inducción magnéticas entren a la carga.

Por otra parte, los voltajes estándar de operación y las potencias de trabajo de los hornos fijan el número de vueltas.

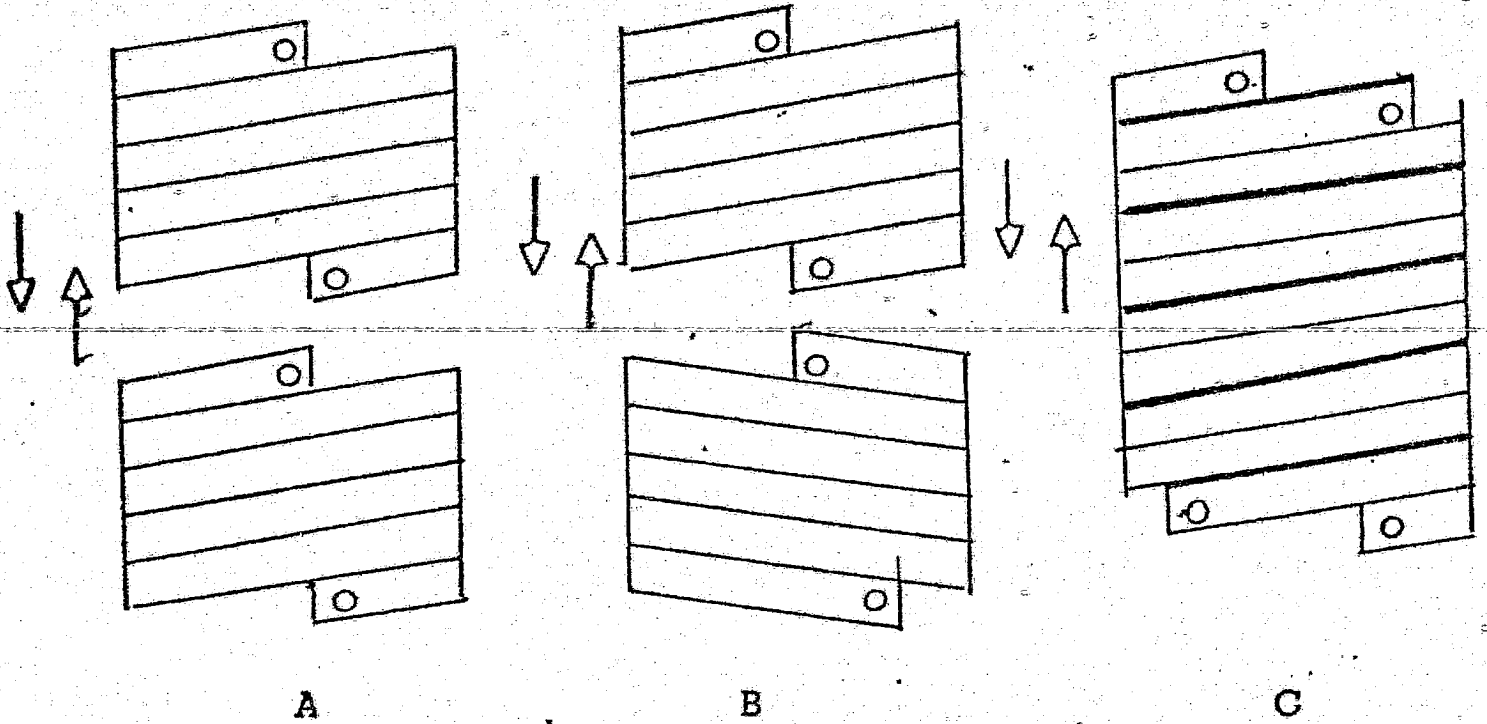
Ya que un aumento en el grosor del perfil de cobre más allá de la profundidad de penetración, no ofrece ninguna ventaja, el espesor "t" fig. (21) del perfil de cobre se fija por la densidad máxima de corriente permitida.

De manera que para llegar a un diámetro de bobina aceptable con respecto a su longitud, se devanan bobinas en paralelo.

35

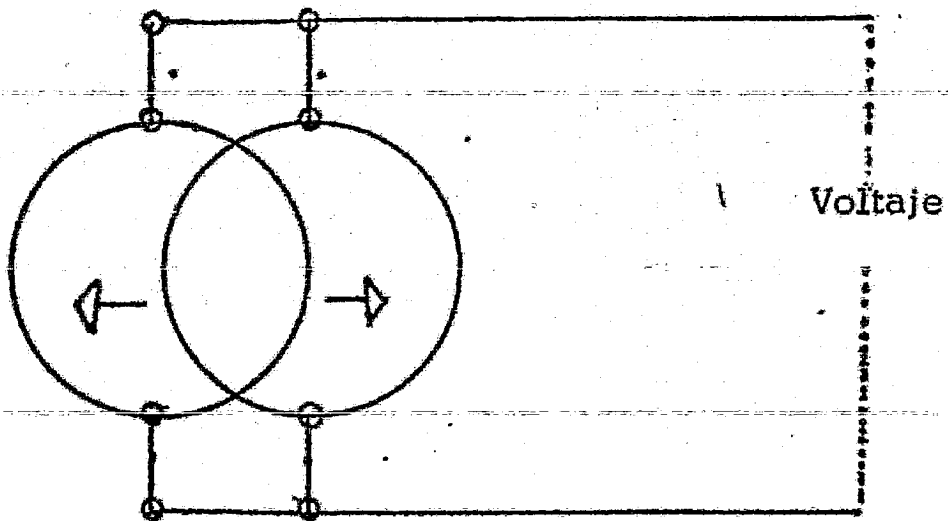
La figura (22) se muestran 3 posibles soluciones.

Figura 22



La figura A muestra dos secciones colocadas en paralelo donde están devanadas en la misma dirección.

La desventaja de esta conexión, es que existe una probabilidad de formación de un arco entre el final de una bobina y el



Conexión de dos bobinas en paralelo

comienzo de la otra.

Aquí debe aumentarse el aislamiento para el voltaje de operación.

Al hacer ésto resultará en un enfriamiento disparejo en el refractario del crisol y pueden presentarse problemas.

La figura B muestra dos secciones de bobinas devanadas en paralelo en direcciones opuestas.

Aquí no existe potencial de formación de arco entre el final de una sección y el comienzo de la otra. Sin embargo, existirá un espacio el cual es igual a el ancho de los dos conductores.

El resultado es un enfriamiento disparejo, con problemas en el refractario.

La figura C muestra el diseño ideal de bobinas en paralelo.

Los conductores están devanados para formar una bobina larga. El enfriamiento sobre la longitud entera de la espiral sobre el refractario es parejo y la eficiencia es óptima.

III.9.a).- ESPACIAMIENTO ENTRE ESPIRAS DE LA BOBINA

Entre espira y espira de la bobina de inducción de los hornos sin núcleo se encuentran segmentos aislantes convenientemente separados, para asegurar la salida de la humedad del recubrimiento refractario, lo que permite un rápido y uniforme sinterizado del crisol, y también para evitar la formación de un arco eléctrico entre los espacios.

Cada vuelta está cubierta con una cinta impregnada de material aislante, esta cinta debe ser resistente químicamente y capaz de soportar altas temperaturas; son generalmente hechas de fibra de vidrio.

Las resinas epoxy, de poliéster, silicón y barniz de silicón se usan como medios aislantes³⁸. El barniz de silicón soporta satisfactoriamente el calor, siendo menos resistente químicamente a ciertos productos de combustión que aparecen de las cargas sucias y grasientas.

Los hornos de inducción sin núcleo a la red (60 Hz), debido a la intensa vibración de gran amplitud que sufre al estarlo operando, y debido a la naturaleza de la carga (rebaba finamente dividida y sucia), las condiciones para el aislamiento de las bobinas son mucho más críticas que para un horno de media frecuencia.

El aislamiento de las bobinas en los hornos de canal se efectúa revistiendo cada vuelta con tira de mica o cinta de asbesto.

III.10.- DISEÑOS DE INDUCTORES EN HORNOS DE CANAL

Para desarrollar un máximo de potencia en un mínimo espacio, los núcleos del inductor se hacen de acero de grano orientado.

Tal núcleo permite una densidad de flujo magnético más grande para entregar mayor potencia para un tamaño de núcleo dado.

El enfriamiento del inductor, que era antes enfriado con aire se sustituyó por el enfriamiento con agua.

Debido a que un enfriamiento directo de la bobina del inductor con agua, existe un peligro potencial de explosión por el contacto directo entre el agua y el metal fundido que pudiere penetrar al alojamiento del inductor, el enfriamiento se realiza con serpentines.

Con la obtención de potencias más altas, en el canal se tiene un movimiento de metal más favorable, pudiéndose reemplazar el clásico canal en "V"³⁹ de Wyatt por un canal en forma de "U", favoreciéndose así la uniformidad del revestimiento y mejorándose de paso el factor de potencia.

Para potencias relativamente grandes, es de uso común los inductores que emplean un sistema de canal teniendo 3 ranuras verticales.

Estos particulares arreglos de inductor, se denominan inductor de bobinas gemelas.⁴⁰

Existen dos tipos de Inductores de Bobinas Gemelas a saber: ⁴¹

tipo "D" y tipo "T", cada uno de los cuales se componen de 2 bobinas. Fig. 23

- 1.- Tipo "D" (2 bobinas, 1 núcleo)
 - Escariable (para la fusión de aluminio)
 - Omega (para la fusión de hierro y cobre, generalmente)
- 2.- Tipo "T" (2 bobinas, 2 núcleos)
 - Omega

En el tipo "D", dos "ventanas" se forman en el alojamiento del inductor a través de las cuales se hace pasar el núcleo. En cada rama del núcleo (alojadas en las "ventanas" del inductor), van devanadas las bobinas. Fig. 24

Con este arreglo, por los ductos externos del canal fluye la corriente en la misma dirección encontrándose éstas en la ranura central, la cual usualmente se hace más grande su sección transversal para llevar la resultante de la suma de estas corrientes.

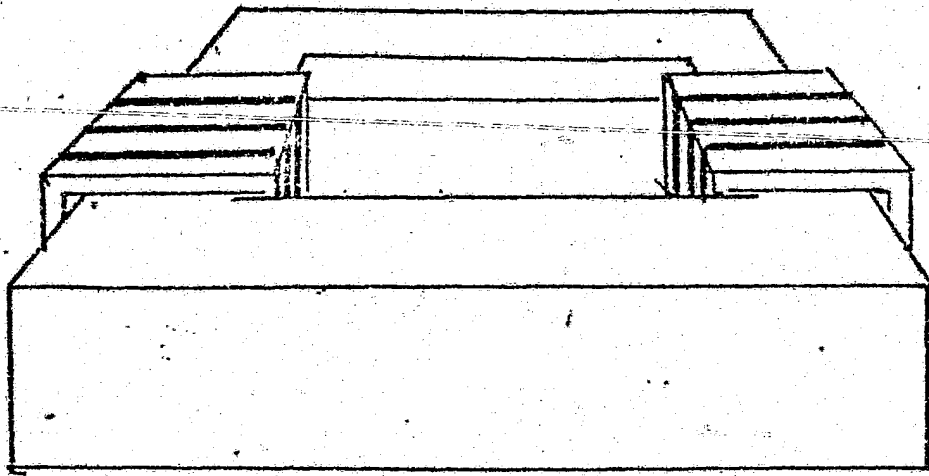
De esa manera más potencia se desarrolla de la misma sección del núcleo y el vigoroso movimiento del metal en el canal central, disminuye el gradiente de temperatura entre el inductor y el baño aminorando la obstrucción por escoria.

El horno de canal escariable se usa para la fusión de aluminio donde es necesaria una sección longitudinal recta para su manteni

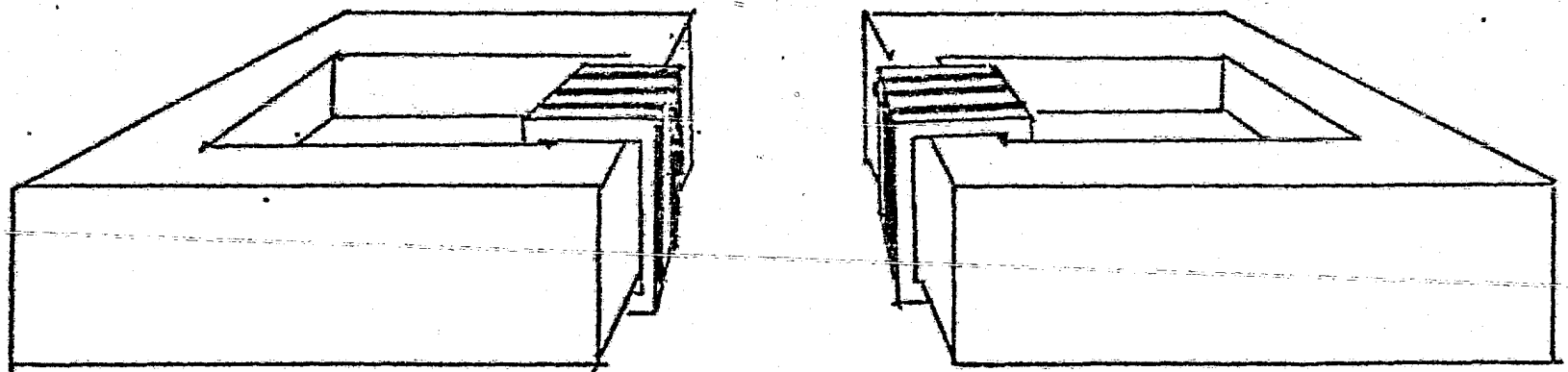
miento (como se verá en la sección "Fundición de Aluminio y sus aleaciones").

Para la fusión de otros metales, los canales pueden ser curvados simétricamente de tal manera que presenten una sección longitudinal vertical en la forma de la letra griega minúscula "omega".

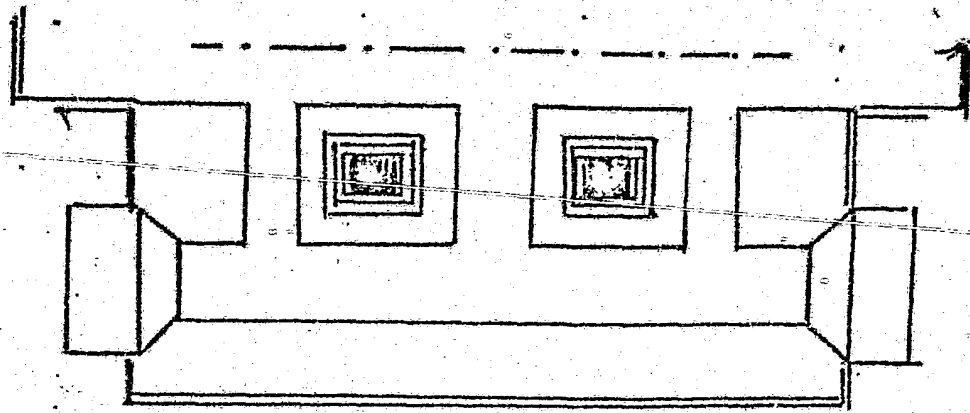
Figura 23



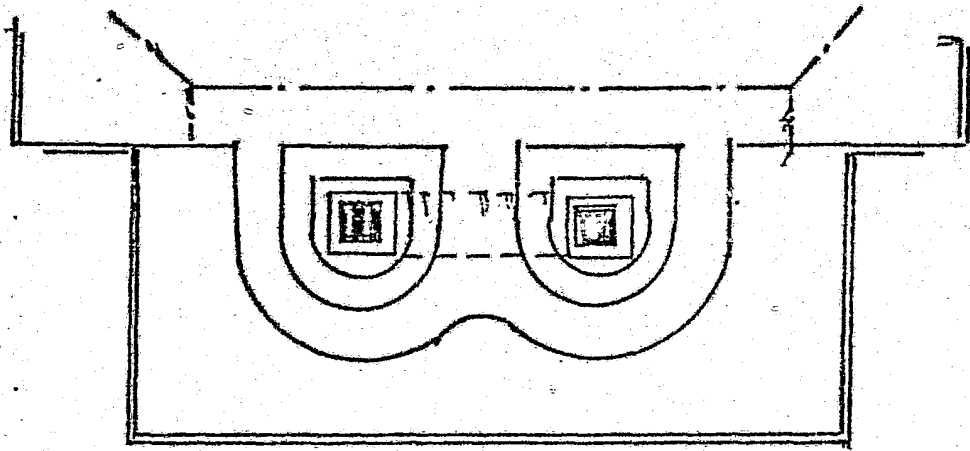
Bobinas Gemelas tipo "D"



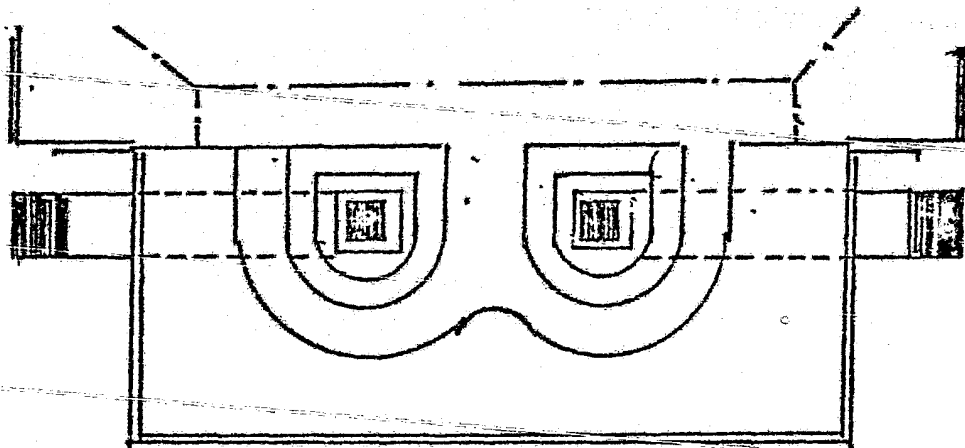
Bobinas Gemelas tipo "T"



Inductor de Bobinas Gemelas con Canal Escariable



Inductor de Bobinas Gemelas tipo "D" con Canal "Omega"



Inductor de Bobinas Gemelas tipo "T" con Canal "Omega"

Figura 24

IV LOS HORNOS DE INDUCCION EN LA FUSION DE METALES

IV.- LOS HORNOS DE INDUCCION EN LA FUSION DE LOS METALES

Los Hornos de Inducción sin Núcleo, son uno de los métodos de fusión más versátiles. Desde la fusión de metales preciosos, hasta la aleación de metales exóticos al vacío, pasando por las fundiciones de producción en masa.

Los Hornos de Canal, son los más eficientes eléctricamente, de cualquiera de las formas de fusión eléctricas.

Existen varios modelos de Hornos de Canal, dependiendo el diseño de cada horno, sobre el metal que se piense fundir y de su función en la fundición (ya sea como unidad de fusión o de mantenimiento).

Más adelante se hablará sobre los tipos de Hornos de Canal más importantes, usados en la fusión de algunos metales.

IV.1.- LOS HORNOS DE CANAL

Los hornos de canal son generalmente asociados con una carga grande de metal fundido y a una unidad de potencia relativamente pequeña.

Se usan principalmente para la producción de metales en proceso continuo.

Los hornos de canal en la fundición, pueden cumplir 2 funciones:

- 1.- Como unidad de fusión.
- 2.- Como unidad de mantenimiento. (holding).

Los hornos de canal, como hornos de mantenimiento o de espera son requeridos para operación Duplex.

La operación Duplex se refiere a la combinación de 2 hornos; el primero como unidad de fusión (cubilote, hornos de arco, etc.) y el segundo haciendo la función de mantenimiento (hornos de canal), ambos operados como una instalación unitaria para proveer una alimentación continua de metal caliente dentro del rango de temperatura y análisis químico establecidos para la aplicación particular.

Desde el punto de vista de ahorro de energía la operación Duplex es importante, pues evita un sobrecalentamiento innecesario de la unidad de fusión, al vaciar directamente en los moldes.

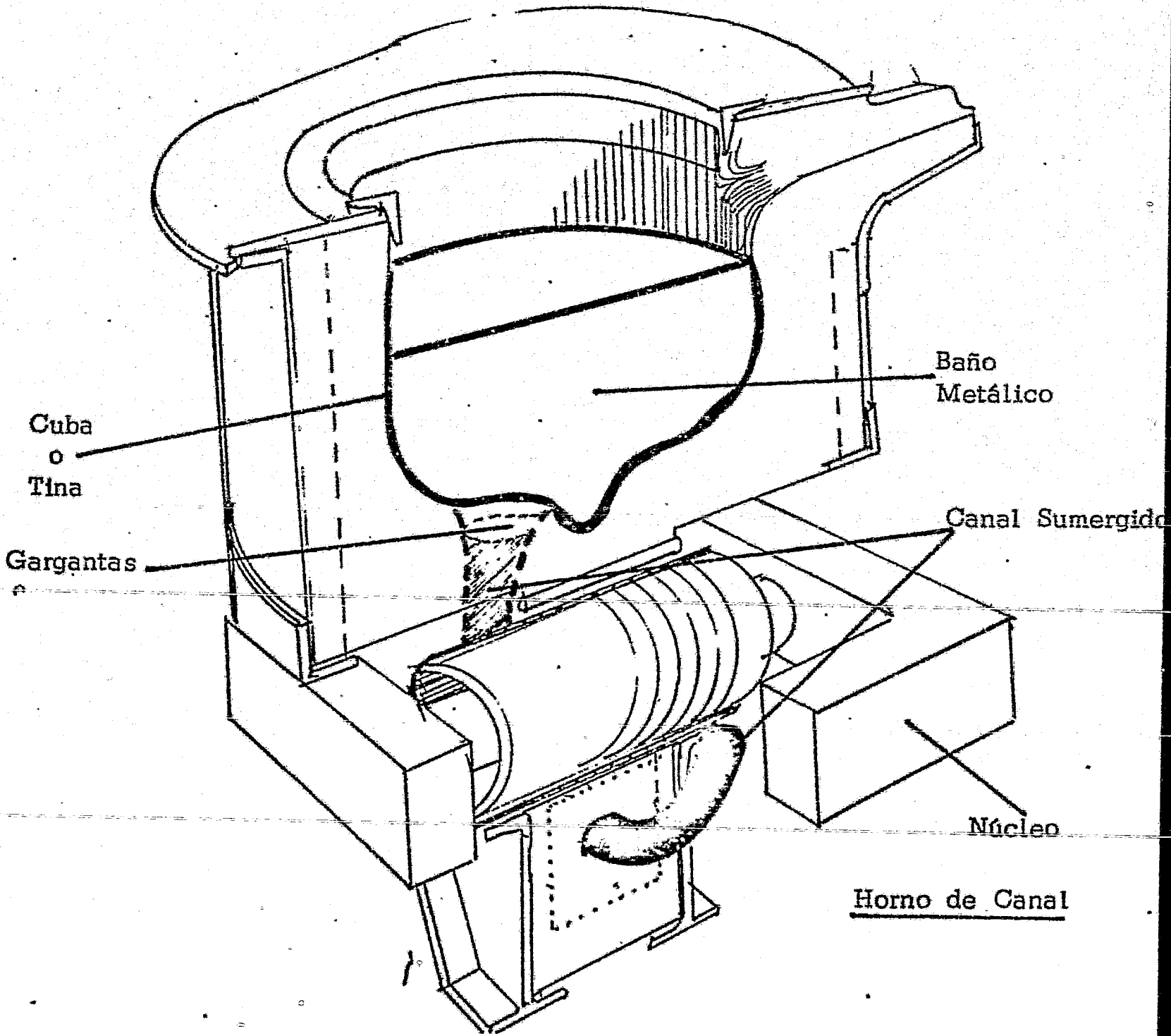


Figura 25

IV.1.a).- Hornos de fusión

Los más comunes son los hornos con núcleo de canal sumergido dentro de los cuales se incluyen: Los hornos AJAX - WYATT, los hornos con canal en forma de "V" (figura 25), los hornos de canal recto escariable (figura 27), los hornos de bobinas gemelas (figura 24).

Los Hornos TAGLIAFERRI.- Se emplea en la fusión de metales no ferrosos y hierros fundidos.

Un tipo de estos, tiene la cámara del horno en posición vertical con el canal inductor inclinado en la parte inferior del horno, en dirección opuesta al pico de colada. Figura 26.b

El otro tipo, tiene al inductor alojado verticalmente en la parte central de la cámara principal, de tal manera que la bobina de inducción, queda en la misma posición de un horno sin núcleo.

Figura 26. A

Bobina de Inducción

Núcleo

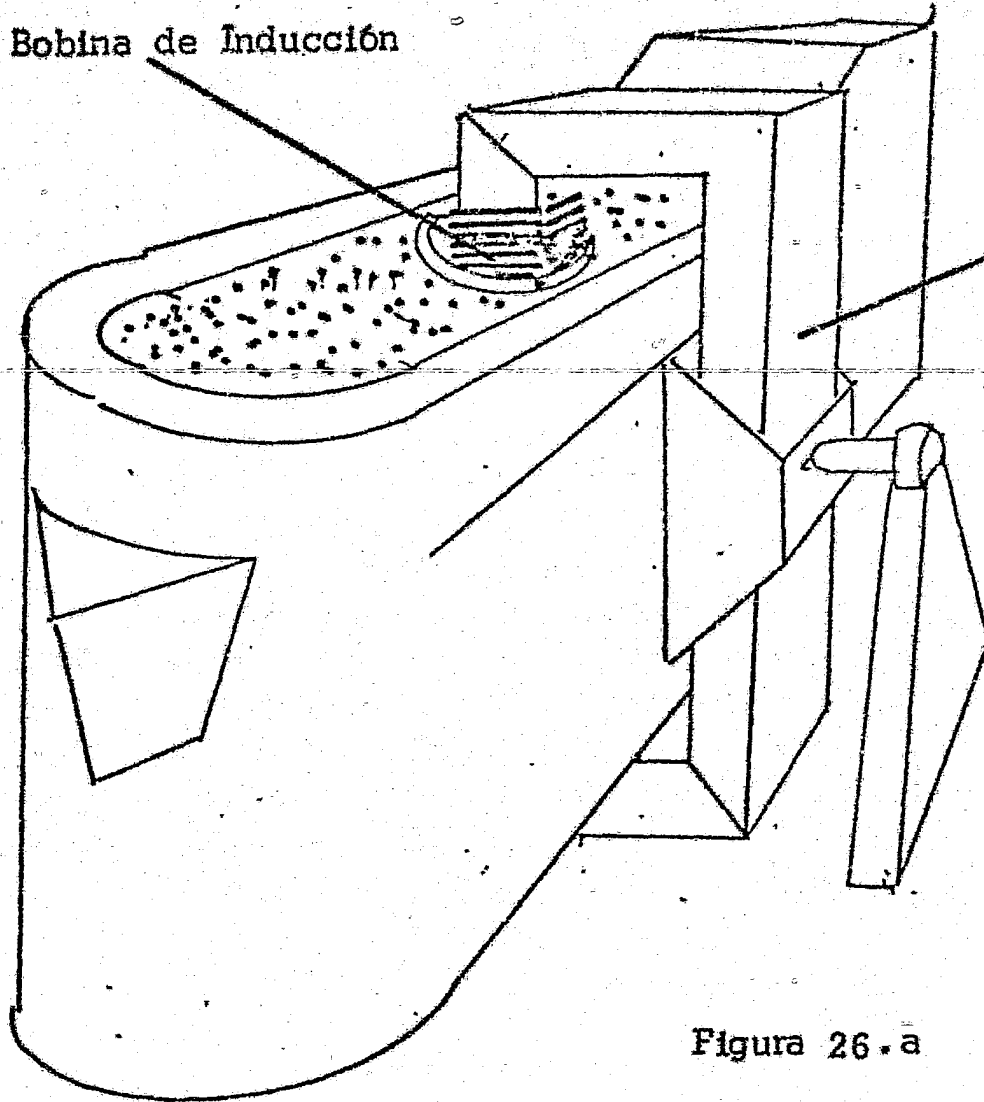


Figura 26. a

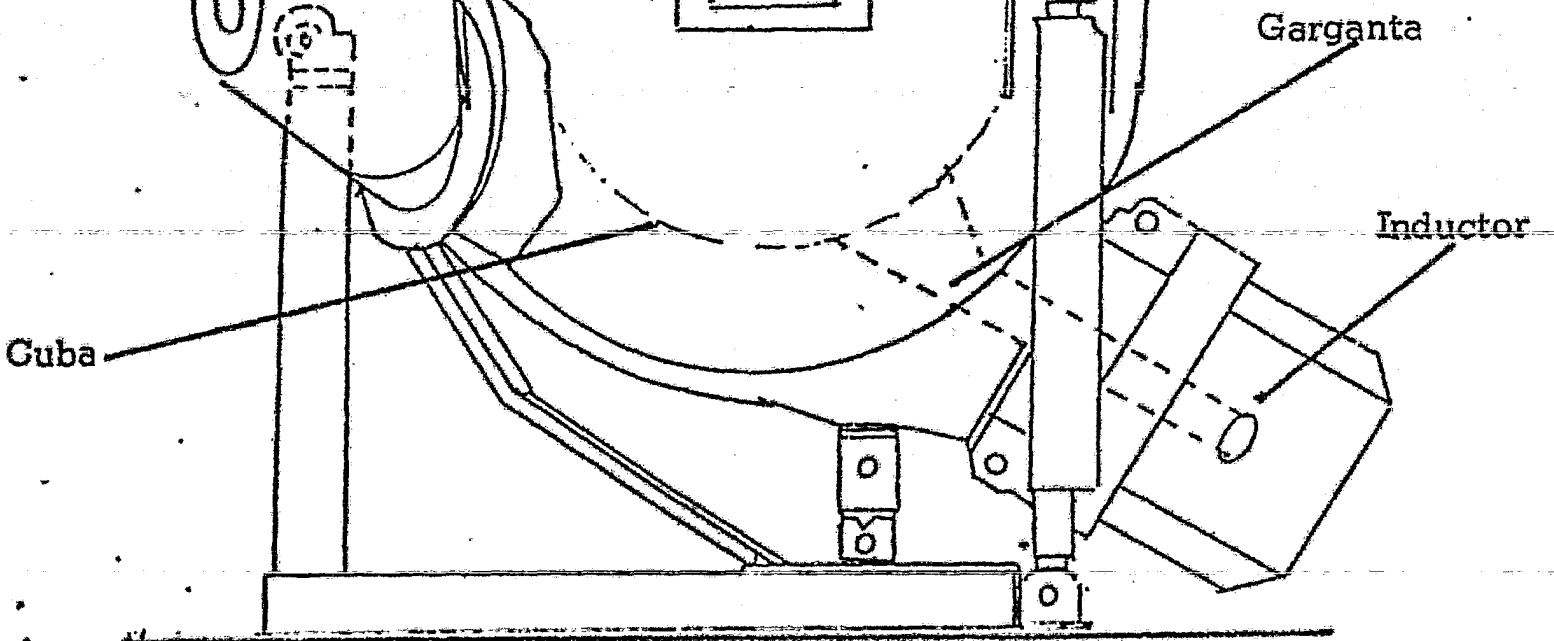


Figura 26. b

IV.1.b).- Hornos para Mantenimiento

Por lo general, consisten de una cámara principal en forma cilíndrica, colocada en posición horizontal.

El sistema de calentamiento por inducción, generalmente consiste de varios inductores colocados radialmente en diferentes puntos en la parte inferior del horno.

Este horno se carga o descarga por rotación.

Existe otra variedad de hornos de tambor, el Horno SCOMETT.⁴¹

Este permite un control independiente de carga y descarga dentro de los límites de capacidad del horno.

La cámara cilíndrica rota sobre una pista circular.

En cada extremo del horno van colocadas las puertas de carga y descarga respectivamente.

La unidad se monta inclinadamente, quedando la puerta de descarga en un nivel inferior respecto al centro de gravedad del horno.

De esta manera la rotación controla la velocidad de descarga de metal mientras la inclinación de la unidad asegura que la puerta de carga se mantenga arriba del nivel de metal, para dar más cabida a metal proveniente de la unidad de fusión.

IV.2.- FUNDICION DE ALUMINIO EN LOS HORNOS DE CANAL

Cuando se funde aluminio o sus aleaciones, surge una dificultad práctica debido a la presencia de alúmina formada por oxidación en la superficie del caldo y derivada también de la película muy fina que cubre la superficie de cualquier carga sólida añadida.

La alúmina se presenta en pequeñas partículas y no se separa del aluminio por gravedad, sino que tiende a permanecer dentro del caldo.

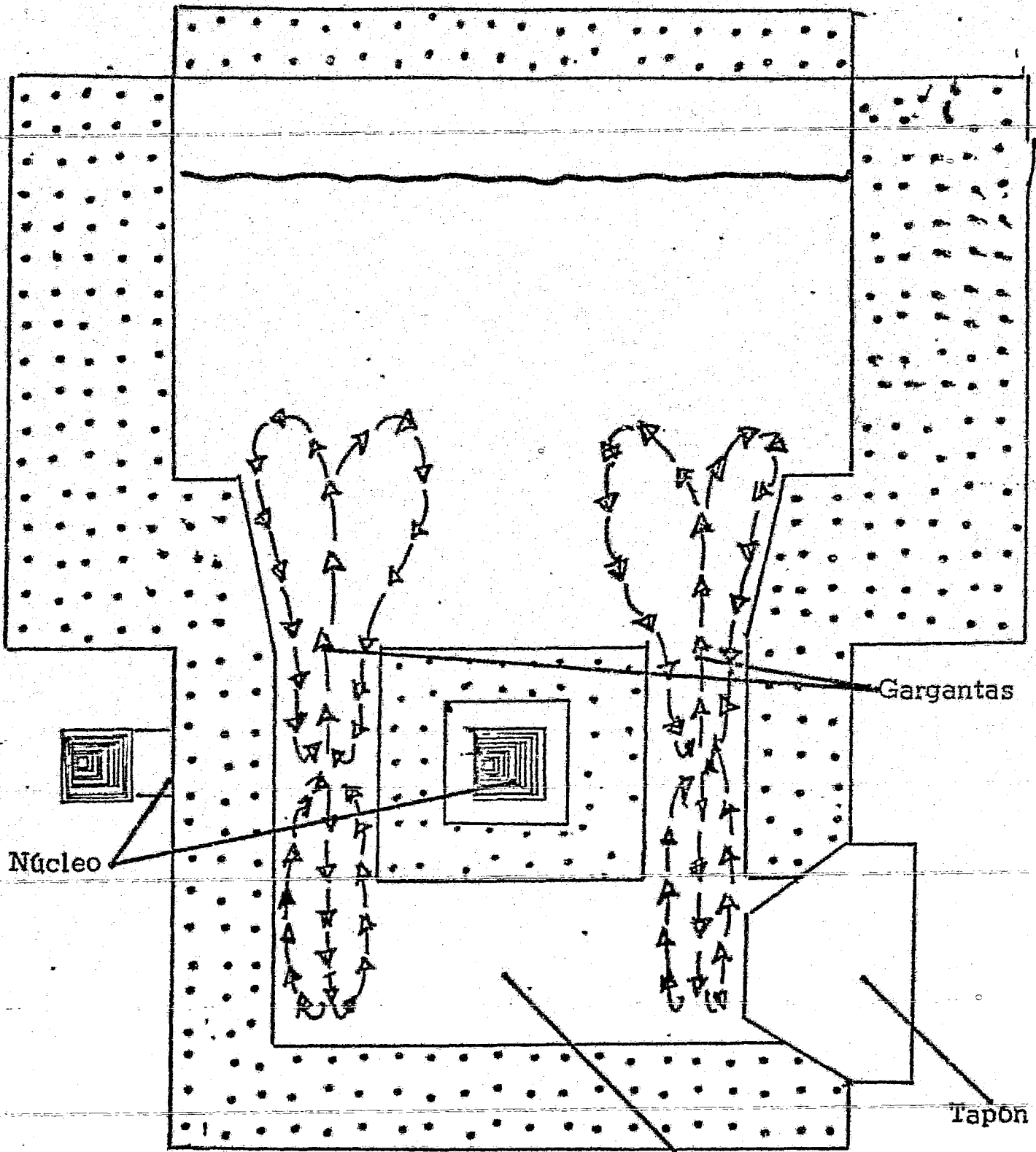
La dificultad práctica surge en el horno de canal porque la alúmina se deposita en los lados del canal. Si no se retira frecuentemente, el canal ve disminuida su sección transversal con la correspondiente disminución de potencia absorbida, lo que induce finalmente al bloqueo completo del canal.

Es esencial que se prevea la retirada regular y frecuente del lodo de alúmina.

La alúmina se deposita en forma de Corindón y en esta forma es especialmente dura y tenaz.

Durante la segunda Guerra Mundial, Manuel Tama⁴² introdujo el Horno de Canal Escariable. Figura 27

Este horno se compone de 3 ductos rectos de sección cua-



Núcleo

Gargantas

Tapón

Canal Escariable

Figura 27

Sección de un Homo Escariable

drada. Los dos tubos verticales son las zonas en las que se produce principalmente la deposición y estas son fácilmente accesibles desde encima de la superficie del caldo, de forma que para eliminar el depósito de alúmina puede introducirse un escariador. Suele ser este ducto de sección transversal pequeña para facilitar el trabajo.

El escariado de las paredes se lleva a cabo a la primera señal de abatimiento de potencia.

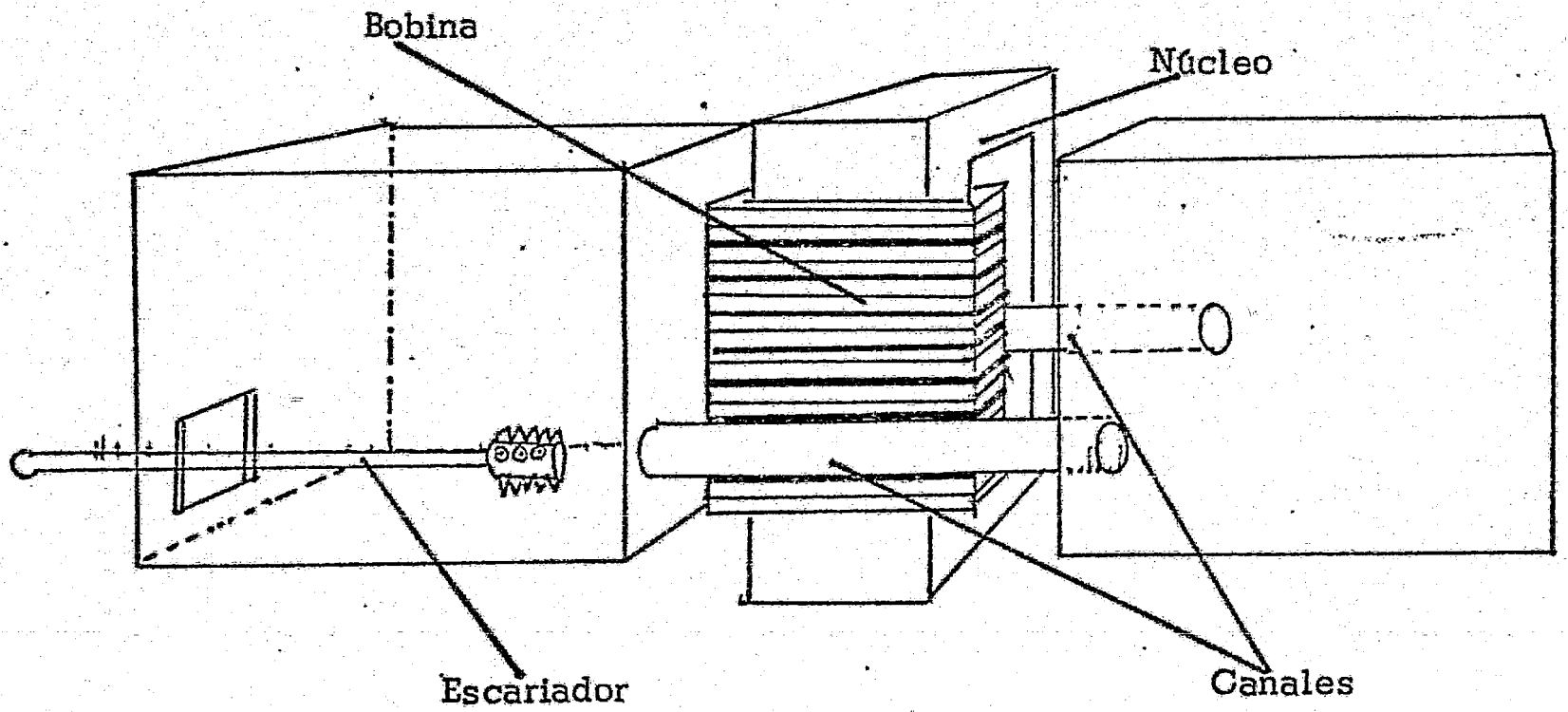
Ciertos residuos caen en el canal horizontal del fondo, pero gracias a su diámetro relativamente grande el efecto sin la tendencia de aglomeración fue despreciable; se permitió una reducción substancial del diámetro efectivo, sin una reducción significativa de la potencia del horno.

La rama inferior se limpia si es necesario a través de una portezuela de acceso hermetizada, por lo general con un tapón. Esta puerta también sirve para vaciar el canal de metal en el caso de que el horno no sea basculante.

Otros tipos de hornos de canal,⁴² también se utilizan para la fusión de aluminio y sus aleaciones, estos son el Horno Lindberg-Fisher y los Hornos Siemens -la diferencia estriba en su capacidad, el horno Lindberg-Fisher usado para pequeñas cargas y el horno Siemens utilizado para capacidades de varias toneladas. Figura 28

Estos hornos disponen de dos cámaras adyacentes conecta-

Figura 28



Hornos Lindberg-Fisher, Siemens

das en la parte inferior por dos o más ductos rectos haciendo las veces de canal. Estas cámaras están suficientemente espaciadas para dar cabida a los núcleos magnéticos y a las bobinas.

Los tapones se colocan en la parte inferior de la pared exterior de una de las cámaras para permitir el escariado de los canales (ver figura 28).

Este tipo de hornos no tiene gran aceptación debido a que el revestimiento del inductor, no se presta a un remplazamiento independiente, teniendo por consiguiente tirar todo el refractario de la cámara e inductor al hacer reparaciones.

Un método más reciente y eficaz para evitar la deposición de alúmina en los hornos de canal,⁴³ consiste en introducir una corriente fina de burbujas de nitrógeno en el canal.

Con esta técnica se evita la operación de escariado en todos los casos, elimina de paso el gas introducido haciendo innecesaria la desgasificación previa del metal introducido.

Este gas (que es inerte e insoluble en el aluminio) se inyecta en el punto más bajo del canal. Figura 29

Las partículas de alúmina situadas dentro del caldo se hacen flotar hasta la superficie por unión de la "piel" de tensión de la burbuja. Es deseable una burbuja de pequeño tamaño para conseguir una superficie máxima a una velocidad de flujo .

La necesidad de presión en el suministro del nitrógeno es sólo para compensar la carga estática del caldo, puesto que el inyector no tiene resistencia interna contra el flujo de gas. Para el aluminio, ésta es de 28 kPa/m de profundidad.

Para la medición de la velocidad de flujo, el método más satisfactorio es el intervalo de tiempo transcurrido entre las burbujas que se abren paso a la superficie.

Esto debe hacerse con el horno desconectado, ya que con la alimentación conectada, la turbulencia fragmenta muchísimo las burbujas y éstas no pueden observarse.

La velocidad de flujo en la práctica es alrededor de 100 cm³ por minuto lo que supone una burbuja cada 2 segundos en la superficie.

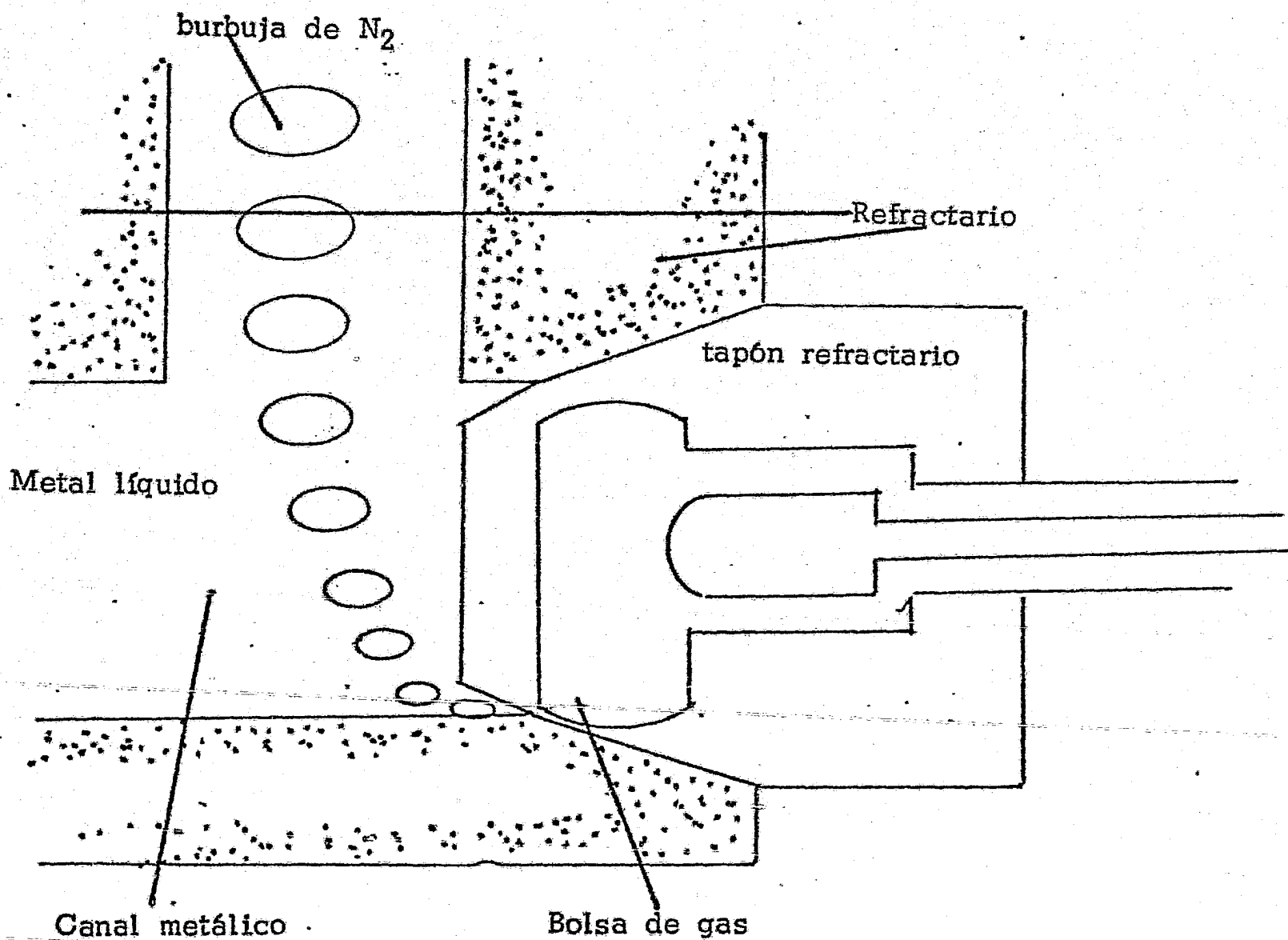
Sólo es necesaria una baja velocidad de flujo de nitrógeno debido a los siguientes factores ventajosos:

- La turbulencia del canal lleva con frecuencia el metal a la corriente de burbujas.
- La turbulencia del canal produce burbujas muy finas
- Las burbujas circulan por toda la profundidad del baño y también por el canal.
- El gas fluye en todo momento.

En general, la eficiencia en la fusión de aluminio es del

orden del 75 % en la conversión de energía.

Figura 29



Los inyectores se hallan en el fondo de una rama vertical del canal, sustituyendo al tapón de vaciado de un horno no basculante.

Para el diseño se toman en cuenta los siguientes factores:

1.- La coalescencia de la burbuja tiene lugar en la superficie del bloque en contacto con el metal. Por esta razón se desecharon los bloques porosos.

2.- Inyectores que usaban ductos finos, se bloqueaban lentamente con un depósito muy pequeño de alúmina en la salida hacia el metal. En las aleaciones que contienen magnesio, el bloque se producía con mayor rapidez con la formación de espinela $Al_2O_3 \cdot MgO$.

Teniendo en mente los factores antes mencionados, se diseñó un inyector que evita el contacto entre el metal fundido y los pequeños agujeros, atrapando al gas en una cámara amortiguadora desde la que escapa hacia el caldo situado debajo de un rebosadero invertido. Figura 29

IV.3.- FUNDICION DE LATON

El horno idóneo para la fusión de latones es el horno Wyatt.

En la fusión de latón con hornos de canal, ⁴⁴ la pérdida de metal es extremadamente baja y para aleaciones con alto contenido de zinc, la pérdida que se experimenta es mínima en comparación con cualquier otro horno.

Para la fusión de latón, el cobre se agrega primero al baño, le sigue después el zinc.

El baño se sella efectivamente y es solamente expuesto al aire en los pasos iniciales de carga, cuando la temperatura es la más baja que se tiene, de tal manera que se mantiene mínima la volatilización del zinc.

El punto de ebullición del zinc en el rango de los latones comerciales, está cercano a la temperatura de vaciado, dicha volatilización del zinc en el canal secundario se usa como una medida conveniente para acertar la temperatura correcta de vaciado (El medidor de kilowatt-horas de una fiel representación de las condiciones de temperatura).

Quando el fundido es expuesto a las condiciones oxidantes externas, algunas barras de carbón son mantenidas en la superficie

para asegurar una atmósfera reductora.

M. Cook y N. F. Fletcher opinan que el carbón que se emplea como cubierta sobre el metal, actúa como una barrera para la difusión del zinc hacia el exterior por volatilización, así como barrera para el oxígeno hacia el interior.

Estos 2 elementos (el zinc y el oxígeno) se encuentran en esa barrera para formar el ZnO , la cual bloquea los intersticios en la capa de carbón, formando una cubierta protectora.

M. Cook mostró que las pérdidas de metal podían mantenerse abajo del 1 %, cubriendo el metal residual con carbono y agregar una mezcla de borax y sal.

El carbón y escoria formados, se eliminan antes del vaciado.

M. Cook y E. Davis, mostraron el efecto de la circulación del metal en este tipo de hornos sobre la uniformidad del contenido de Pb en los latones de maquinado libre y también se encontró que la uniformidad no fue apreciablemente influida por el tiempo de adición durante el ciclo de fusión. Sin embargo, para evitar pérdidas por oxidación se debe agregar al final de la fusión silicio y aluminio.

Para fundir rebaba ligera, ésta puede briquetarse con ácido bórico para facilitar su inmersión en el baño.

IV.4.- FUNDICION DE HIERROS EN HORNOS DE CANAL⁴⁵

La principal inconveniencia en el uso de hornos de canal para la fusión de metales ferrosos, estriba en la corta vida del revestimiento refractario del inductor que se tiene a altas temperaturas.

El problema de penetración prematura del refractario del inductor en el horno de canal, debido a los altos puntos de fusión del hierro y sus aleaciones y a sus escorias asociadas -muchas veces muy reactivas con los materiales de revestimiento- puede ser solucionado de alguna manera, entre las cuales están:

1.- Aumento de la densidad del revestimiento.

Este requiere de materiales cuidadosamente clasificados por tamaño de partícula y una meticulosa atención en su instalación.

Indudablemente se puede obtener un revestimiento extremadamente denso, el cual es muy resistente a la penetración física del metal o escoria en el canal, debido al efecto erosivo de las fuerzas electromagnéticas, así como la presión ferrostática que se ejerce arriba del canal. Por este procedimiento, la refractariedad y la resistencia al ataque químico, no son necesariamente mejoradas.

El resultado final dependerá en mucho, de la habilidad en la instalación del revestimiento.

2.- Aumento de la refractariedad y resistencia al ataque de

escorias del material refractario.

En este caso, los revestimientos a base de arcilla son totalmente inadecuados. Incluso las cuarzitas puras instaladas por el método Rohn trabajan en su límite, de tal manera que la más ligera grieta en la estructura apisonada podría permitir penetración y por consiguiente, fallas.

El uso de materiales cuidadosamente tamizados y clasificados ha jugado una gran parte en la reciente ampliación del campo de aplicación del horno de canal.

Frecuentemente la penetración de metal en la masa del revestimiento, es precedida por la penetración del óxido de metal que se está fundiendo o escoria.

La combinación de la fluidez y la reactividad química de la escoria, tienen un efecto penetrante, incluso en lo más denso del apisonado.

Normalmente se usa alta alúmina, ya que ésta es resistente a escorias que contienen altos contenidos de sílica y cal.

3.- Intenso enfriamiento de los inductores.

El enfriamiento con agua, de la cara fría del revestimiento

El enfriamiento con agua, de la cara fría del revestimiento por medio de serpentines en estrecho contacto con el túnel de la bobina o alojamiento del inductor, abaten la temperatura del refractario, de tal manera que limita la penetración de escoria a algunas pulgadas de la cara enfriada.

4.- Reducción del gradiente de temperatura entre el metal del canal y el metal del baño.

Ya que la energía se genera solamente en el metal contenido en el canal, el cual representa una fracción muy pequeña del volumen total, existe necesariamente un gradiente de temperatura entre el metal del canal y el del baño. En la práctica éste está entre 100 y los 200°C.

La reducción de este gradiente se logra por el rápido intercambio de metal entre canal y baño.

Este intercambio es limitado cuando se funde hierro en hornos Wyatt.

Esto se debe a la alta resistividad del metal y a la forma y sección transversal del canal. Este canal ofrece una resistencia a la corriente inducida muy alta y prohibitiva.

Por lo anterior, para desarrollar suficiente energía en el canal

su sección transversal debe ser grande, lo cual resulta en densidades de corrientes menores y un movimiento menor de metal que el que se experimenta al fundir latones.

Una gran convección en el canal más grande solamente com-
pensa parcialmente este efecto.

Un movimiento unidireccional del metal a través del canal,
si es suficientemente rápido, sería la solución al problema.

Han sido propuestos algunos medios para efectuar tal circu-
lación electromagnéticamente.

Las opiniones, sin embargo, se dividen a este respecto,
sosteniendo algunos que ningún movimiento unidireccional significa-
tivo puede ser producido por el sistema canal - inductor, excepto por
métodos que podrían reducir el factor de potencia, haciéndolos ine-
ficientes.

La solución más prometedora es quizá aprovechar la acción
termosifón que se pudiere obtener con una adecuada posición del in-
ductor.

Esto se logra más eficientemente colocando el inductor ver-
ticalmente sobre un costado del horno, a manera de "orejera" de taza
de café, con lo cual se logra un fuerte movimiento de convección
arriba y abajo del canal.

5.- Una solución alternativa para el problema de la vida del inductor, es la de reemplazar los inductores convencionales costosos, por inductores de corta vida con refacciones disponibles y de rápido montaje -en minutos, en lugar de las horas que requerirán la colocación de inductores convencionales- eliminando todos los procedimientos de secado y curado y empleando materiales baratos que requieren poca o ninguna habilidad para su instalación.

V REFRACTARIOS PARA HORNOS DE INDUCCION

V.1.- REFRACTARIOS COLABLES ⁴⁶

El uso de refractarios colables en algunos medios de operación es relativamente una nueva aplicación, única en el sentido en que los colables pueden ser instalados rápidamente en lugares inaccesibles y de formas intrincadas por medio de la utilización de moldes desmontables.

Su éxito en la demanda de más aplicaciones es debido al desarrollo y al uso de agregados de alta pureza y al mejoramiento de sistemas de ligas con formulaciones que permiten una rápida aglomeración y curado.

Hay dos sistemas básicos de liga que son empleados en los colables.

El primero y más común, son las ligas activadas hidráulicamente, tales como las que se usan frecuentemente en las arcillas y productos de alta alúmina. Estos, en la mayor parte son cementos de aluminato de calcio, los cuales dependen de la hidratación del componente cementante para su resistencia en verde.

El segundo sistema utiliza una reacción química, el cual es frecuentemente encontrado en los colables de magnesia.

Estos se activan por la adición de agua causando una reac-

ción química entre el constituyente ligante y el grano.

A pesar de la diferencia entre estas dos ligas hay muchos factores en su utilización y su instalación que son comunes a ambos.

El factor más importante en el logro de un revestimiento colable, es el control de humedad. La cantidad mínima de agua debe ser la suficiente para permitir la colocación del material, dependiendo del método de instalación.

Para los colables de alta alúmina, conforme su contenido de humedad es aumentado, la resistencia y la densidad disminuyen marcadamente, fenómeno que es más atenuado en los colables a base de magnesita.

Las formas más usuales para la colocación de los colables son el pudelado y el vibrado.

El pudelado puede ser solamente considerado cuando el área de asentamiento es inaccesible o restringida. Aquí, un exceso de agua debe agregarse para obtener la fluidez necesaria.

Si el colable se va a usar a su máxima potencialidad, el mejor método de instalación es por medio del uso de vibradores. Con estos, el material se coloca a su máxima densidad con un mínimo de contenido de humedad.

Otro factor en la instalación de colables el cual es muchas

veces, sobreestimada, es la temperatura ambiente del área donde se requiere el material y en conexión con ésta, la temperatura del agua mezclado y la de la masa del colable.

El moldeable, bajo ninguna circunstancia, debe ser aplicado a temperaturas próximas a la de congelación del agua.

El significado de ésta es obvio, ya que los cristales de hielo en la solución tomarán parte en el enlace y no hidratarán al cemento en los colables de alta alúmina. A temperaturas reducidas la hidratación del cemento se retarda al punto que, el fraguado es extremadamente lento.

Con los colables ligados químicamente, otro factor se debe tomar en consideración. A temperaturas reducidas, tomará lugar un enlace insuficiente para obtener la resistencia deseada en el fraguado al aire.

En general, estos productos abajo de los 40C son extremadamente débiles y aumentan rápidamente su resistencia al aplicarle calor.

Por estas razones la temperatura mínima para los materiales y el aire ambiental debe estar por los 21C.

Para el secado del material no se recomienda aplicar flama

directa al colable recién instalado. Es necesario aplicar cantidades de calor, la necesaria para vaporizar el agua de los colables sin sobrecalentar hasta el punto donde la presión de vapor interna, excede la exterior o la resistencia de la cara caliente.

V.2.- MEZCLAS APISONABLES

Las mezclas refractarias apisonables se caracterizan por ser:

- 1) De bajo contenido de humedad (normalmente abajo del 6%)
- 2) Diseñadas para instalarse usando plantillas o cimbras como sostén para su aplicación.
- 3) De excelente granulometría para lograr una máxima densidad.
- 4) De poca plasticidad debido primariamente a su bajo contenido de humedad.

En general, los revestimientos ácidos se emplean en mayor escala que los básicos al fundir materiales ferrosos. Entre los revestimientos apisonables de carácter ácido más usados están los de sílice y alúmina.

La preferencia en la selección entre estos refractarios estriba en que los materiales de alúmina para apisonar son unas 5 veces más caros que los materiales de sílice, dado que tienen una densidad mayor y para revestir el horno se necesita un peso mucho mayor de refractario, por tanto, los revestimientos de alúmina son mucho más caros y éste es el motivo de que casi todas las funderías revistan sus hornos de inducción con materiales síliceos a base de cuarcitas.

El apisonable más ampliamente usado para los hornos de inducción sin núcleo⁴⁷ son las cuarcitas suecas cuya composición es la siguiente:

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O% %	Na ₂ O %
98.99	0.32	0.26	0.01	0.08	0.21	0.15	0.08

En general el uso de cuarcitas locales, aunque sean completamente puros y similares a la cuarcita sueca, no iguala la duración de revestimientos del que se consigue con material sueco.

La principal diferencia entre la cuarcita sueca y las otras cuarcitas, que podría explicar las diferencias observadas en la duración del revestimiento, se halla en la estructura de la roca.

La diferencia observada en los rendimientos debe atribuirse a las variaciones en el tamaño de los cristales.

La cuarcita sueca es famosa por su invariabilidad y uniformidad de estructura. Los pequeños cristales uniformes de cuarzo de la cuarcita sueca son probablemente más aptos para acomodarse a los cambios de fase y de expansión que tienen lugar al calentarse, que las cuarcitas con cristales mucho más gruesos.

Existen muchas teorías en cuanto a cual es la granulometría que proporciona el mejor revestimiento, es decir, el revestimiento con menor porosidad.

Para los revestimientos apisonados, es más frecuente elegir una granulometría continua, por su mejor facilidad de trabajo y compactación.

Al examinar la granulometría de los refractarios de cuarcita, se obtiene una concordancia muy buena con la curva de distribución

de Andreassen. La figura (30) muestra la línea recta de distribución de Andreassen con las tres curvas características de distribución de la cuarcita que representan una granulometría satisfactoria que debe producir un revestimiento de porosidad mínima con un correcto procedimiento de colocación y compactación.

Una granulometría que tenga un exceso de finos con una cantidad insuficiente de partículas gruesas tendrá una distribución como la que indica la curva A de la figura 31 mientras que una granulometría muy gruesa se representaría mediante la curva B.

La curva C se obtendría cuando un agregado contuviera una gran proporción de partículas de cierto tamaño y careciera de partículas de otras series de tamaños.

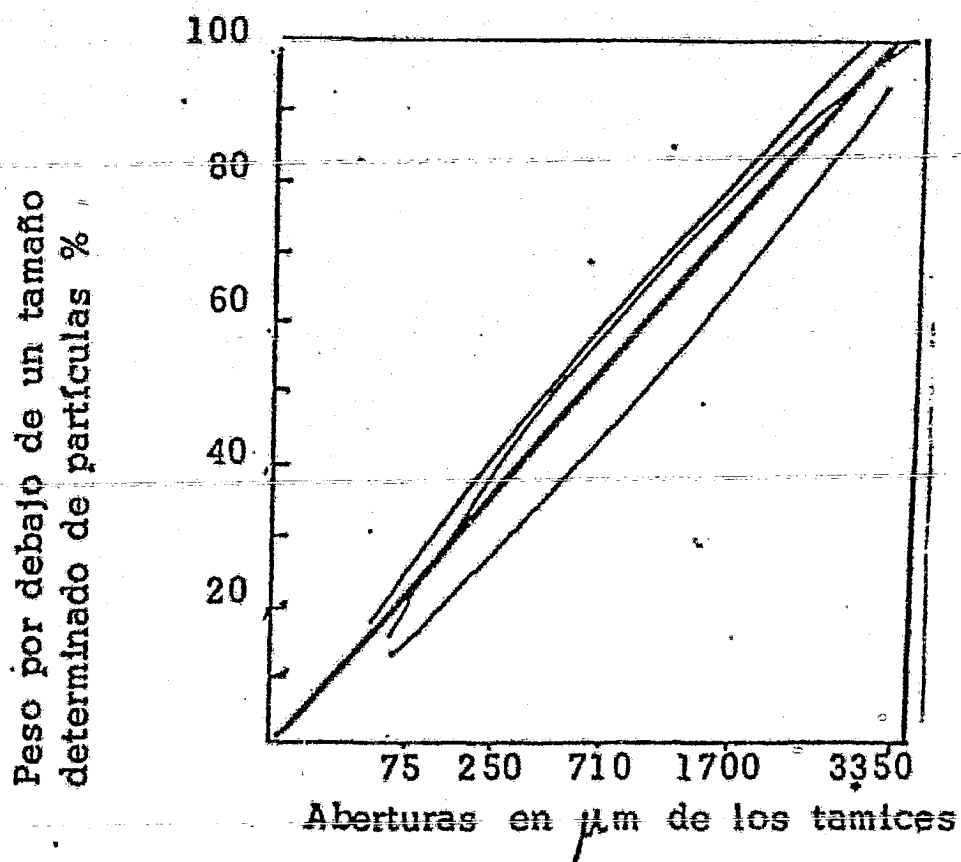


Figura 30

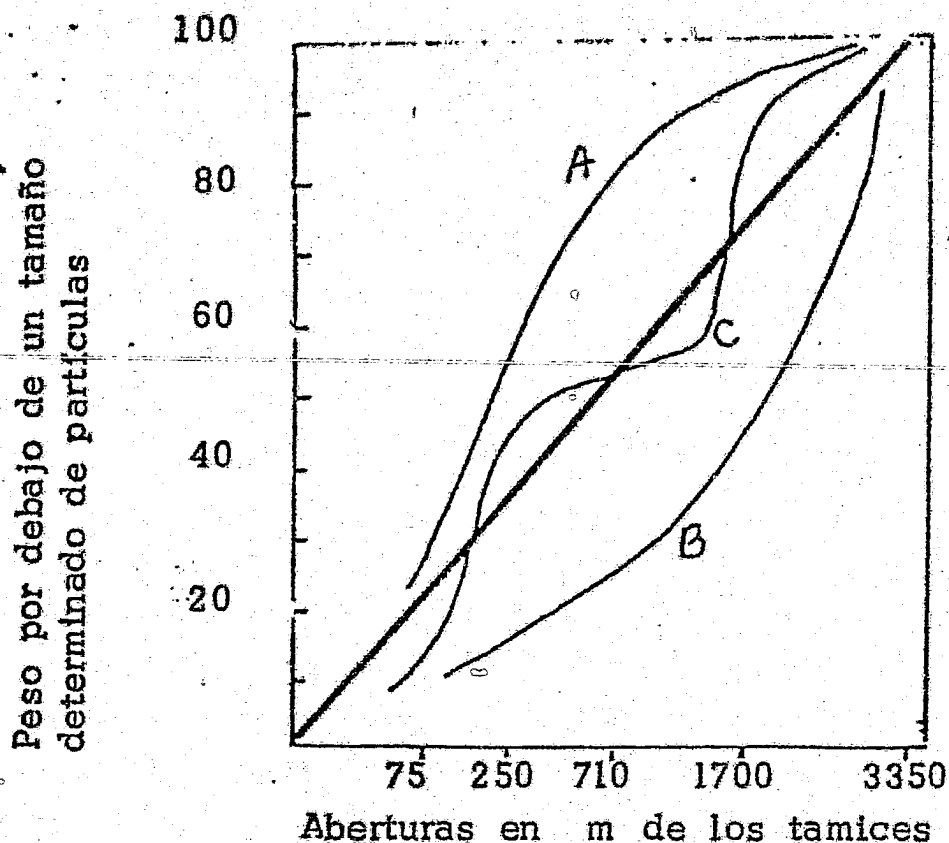


Figura 31

Para lograr la sinterización de un apisonable de cuarcita sueca (Swenska Silica) se debe mezclar con ácido bórico en polvo, que es el agente de liga.

Este método⁴⁸ fue originalmente ideado por Rohn y empleado para los hornos de canal.

En el sinterizado las partículas grandes tendrán sus superficies sólidamente fusionadas por las partículas más pequeñas de sílice que forman con el ácido bórico un vidrio que puede ser enfriado a la temperatura ambiente sin cristalizarse. Fig. 33

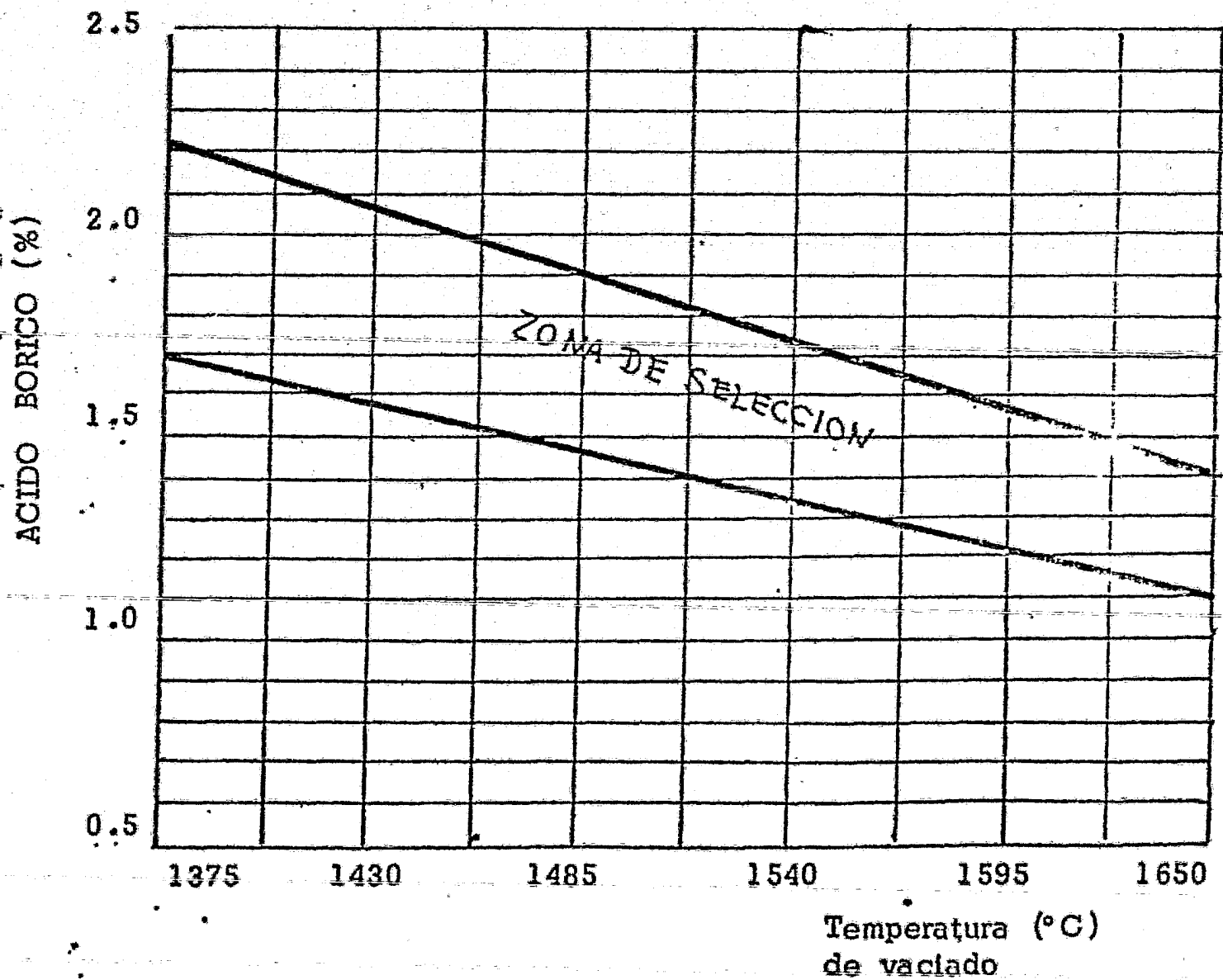
Sin embargo, aunque no cristalice, es extremadamente vis

coso y proporciona una dura y fuerte unión vítrea.

Quando esto ocurre la sílice alcanza su más alta densidad y su grado más bajo de porosidad.

El porcentaje de ácido bórico que se usa depende sobre las temperaturas de operación de los hornos. Fig. 32

Figura 32

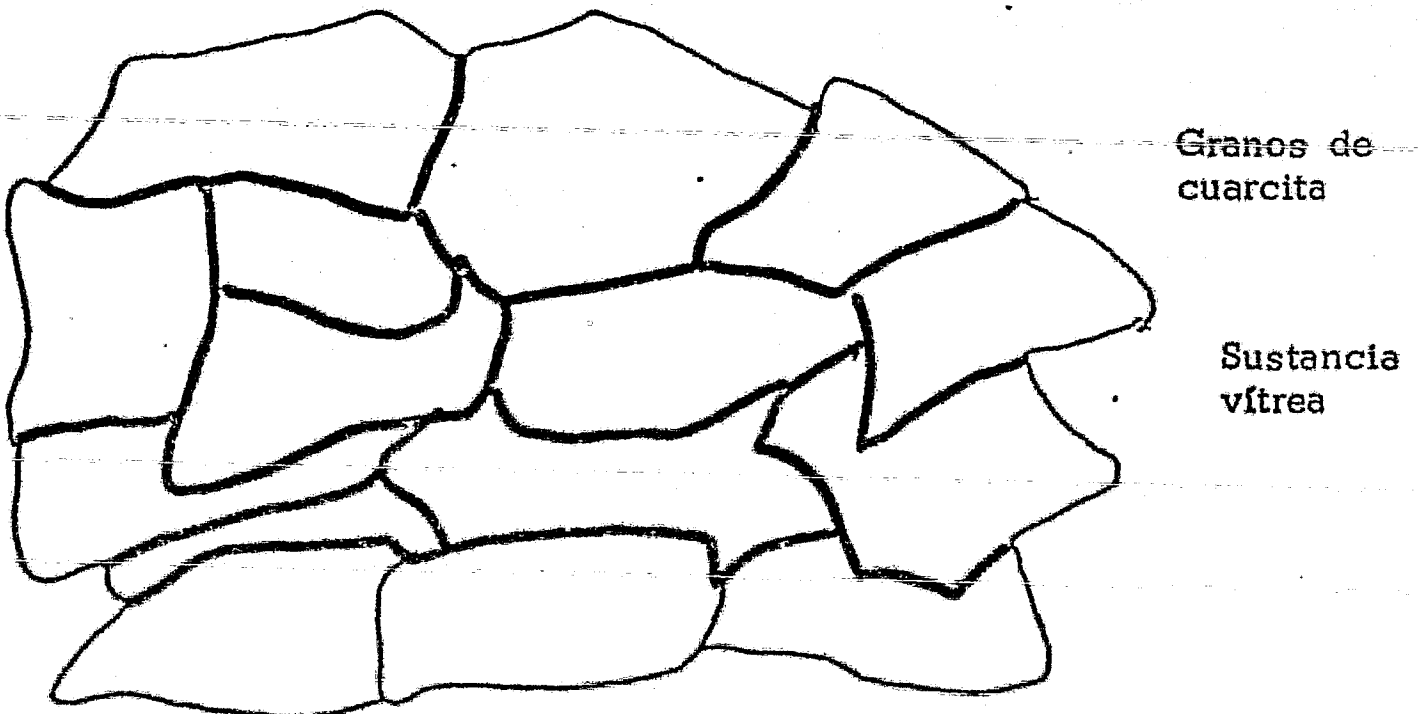


La figura (32) es graficada con una banda, en vez de una línea recta, debido al porcentaje de ácido bórico varía con la naturaleza y composición del grano de cuarcita así como también la temperatura de operación. Al haber un aumento de finos, es requerida una disminución en la cantidad de ácido bórico necesario para lograr la acción de sinterización.

Para una vida máxima del revestimiento la sinterización debe ocurrir en un rango específico de temperaturas con el objeto de reducir tensiones. El rango óptimo ⁴⁹ de sinterización debe tomar lugar entre 690 C y 1475 C.

Si la acción de sinterizado se hace por abajo de 690 C, cuando no hay o existe muy poca fase líquida entre los granos, la acción compresiva que resulta de la expansión de los granos de cuarcita, causa fracturas en los granos, acentuando de esa manera la cantidad de finos. (Figura 34).

Figura 33

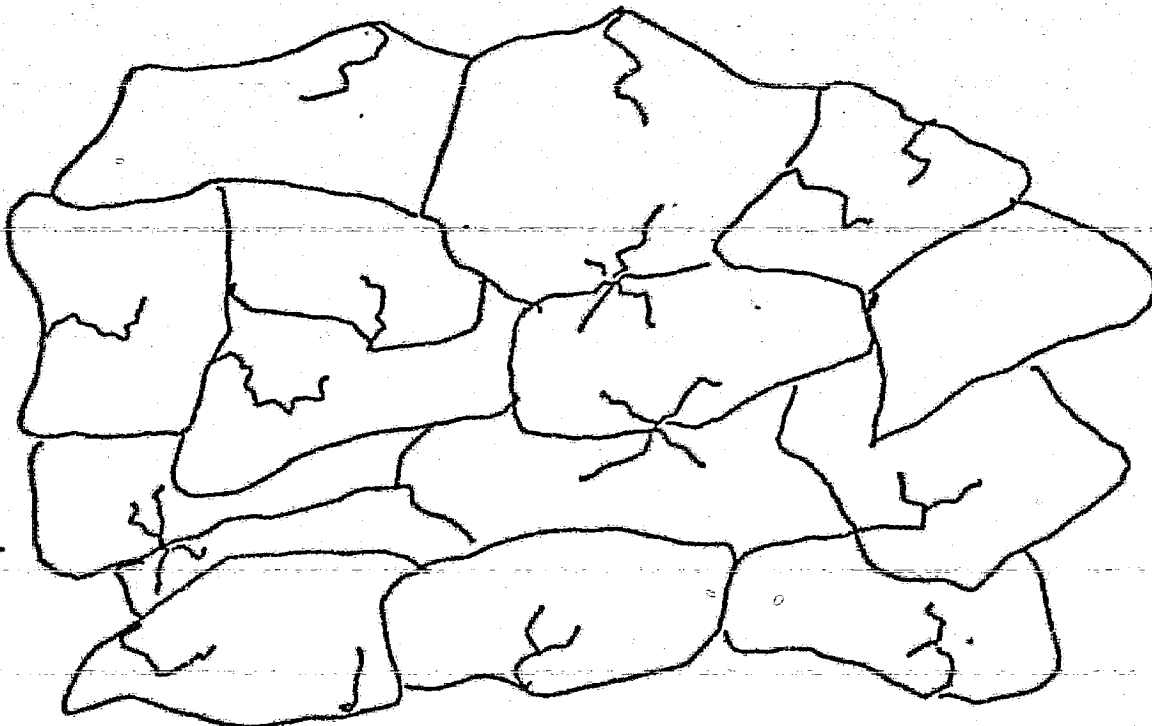


Cuando la sinterización ocurre en el rango apropiado, las tensiones compresivas producidas por la expansión de los granos de cuarcita son amortiguadas por el flujo de la sustancia viscosa producida por la combinación del ácido bórico y los finos de cuarcita.

La cuarcita sueca tiene la cualidad de absorber la expansión extrema que se lleva a cabo durante el proceso de sinterización, neutralizando cualquier tensión compresiva.

Ya que la temperatura del revestimiento varía considerablemente desde su cara caliente que está en contacto con el metal líquido hasta la cara fría próxima a la bobina de enfriamiento, se crean ⁴⁹ 3 zonas distintas a través de la sección transversal de la masa del revestimiento.

Figura 34



Las tres zonas se clasifican como:

- 1) La zona sinterizada, la cual está sujeta a la temperatura más alta y es donde se lleva a cabo la máxima transformación. El contenido de sílica debe ser alto (99%), así que el porcentaje de impurezas y la cantidad de vidrio formados, son bajos (un bajo porcentaje de constituyentes no cristalinos aumenta la vida del revestimiento).
- 2) La zona fritada, la cual se expone a temperaturas más reducidas comparadas a las de la zona sinterizada.

Esta zona fritada está menos vitrificada y tiene una porosidad mayor.

Cuando las reacciones químicas conducen a la desintegración de la zona sinterizada, la zona fritada se vuelve la zona sinterizada.

- 3) La zona de cuarcitas, ~~próxima~~ a la bobina, forma un componente relativamente movedizo, el cual permite la expansión vertical sin hacer tensiones en la masa total apisonada.

Para preparar el apisonable, generalmente se mezcla el ácido bórico y las cuarcitas en mezcladoras mecánicas.

El tiempo óptimo para el mezclado está entre 7 y 10 minutos. Un tiempo más largo que éste podría afectar la estructura angular de los granos, los cuales a su vez, afectan las características del api-

sonable.

Las mezclas apisonables deben ser aplicadas donde pueda ejercerse sobre el material fuertes presiones directas, de manera que no sea estorbosa la configuración del horno o de la instalación y donde estén sólidamente contenidos detrás de sus cimbras o plantillas.

La rigidez de la cimbra es de importancia debido a que cualquier flexión en esta área podría permitir al material rebotar después de cada impacto de la herramienta de apisonado, causando ruptura o discontinuidad en la masa refractaria.

V.2.a).- REVESTIMIENTOS APISONABLES BASICOS⁵⁰

Los revestimientos básicos presentan grandes dificultades, debido a la contracción por quemado y a la tendencia pronunciada a la fractura.

El problema de obtener un aglutinate adecuado, el cual no dañe mucho la refractariedad y la resistencia a la penetración de escorias, todavía no ha sido completamente resuelto.

La magnesita quemada es el material más comunmente usado en los revestimientos básicos.

Los revestimientos básicos hechos de ladrillo de magnesita molida conteniendo 10% de escoria básica de un horno eléctrico, teniendo la siguiente granulometría, ha mostrado un buen desempeño en condiciones severas.

	porcentaje
Retenidos en la malla 8 (1.57 mm)	15 %
Pasados por la malla 8 y retenidos en la malla 20 (0.64 mm)	58 %
Pasados por la malla 20	27 %
Escoria básica de horno de arco pasados por la malla 60	10 %

Para los hornos de gran tamaño, la posibilidad de fractura es más acentuada. Los materiales fabricados con magnesita fundida eléctri-

camente, ofrecen mejoras al respecto a cambio de incrementarse el costo del refractario.

Los aglutinantes para este tipo de material incluyen: de 5 a 10 % de escoria Martin Siemens, 1-3 % de Borax, 3-5 % de polvo de arcilla quemada.

Estas mezclas hechas cuidadosamente darán buena resistencia y buenas propiedades al desgaste.

Debe enfatizarse la pureza de los materiales usados, ya que una pequeña adulteración en los materiales básicos puede efectuar seriamente la refractariedad del material.

También es de uso común, revestimientos a base de mezclas de magnesia y arenas de zircón.

Comstock postula que una mezcla compuesta por un volumen con 25 % de arena de zircón refinado y 75 % de magnesita con bajo contenido de hierro sinterizado y molido y con otro volumen igual de cemento de baja contracción de zircón puro refinado (35 %) y finos de magnesita eléctricamente fundida, ofrecería un desempeño muy prometedor.

Para superar los problemas asociados con la fractura debido a la contracción del material, se puede recurrir al uso de mezclas de 60 % de MgO y 40 % de Al_2O_3 .

Estas mezclas al calentarse forman espinelas, las cuales poseen buena resistencia a la penetración de escorias y una baja contracción relativa, ya que al formarse la espinela, ésta sufre permanente contracción por ser ésta más densa que el MgO ó el Al_2O_3 .

La vida del refractario dependerá, entre otras cosas, sobre el grado de oxidación y contaminación del material de carga y sobre la frecuencia la cual directamente controla el movimiento del metal.

A manera de regla, el diámetro interno disminuye, indicando desgaste, pero en ocasiones en que se funden aceros de aleados con Cr, se forman acumulaciones de Cr_2O_3 .

Los aceros con altos contenidos de aluminio, similarmente producen acumulaciones de espinelas en los revestimientos básicos.

V.2.b).- INSTALACION DE REFRACTARIO EN HORNOS DE INDUCCION

Existen varios métodos para la instalación de apisonables en los hornos de inducción. El de mayor aceptación, casi universalmente empleado, es el método de Rhon, el cual usa una cimbra o plantilla de lámina soldada hecha de acero de media aleación de una sola pieza, para hornos pequeños o de varias piezas para hornos de mayor tamaño.

El material apisonable, el cual se puede trabajar manualmente con pisoneta neumática o con vibradores, se coloca en el espacio que se forma entre las bobinas y la cimbra bien centrada dentro del horno. En los hornos sin núcleo la cimbra se diseña en forma de cilindro con diámetro menor que el de la bobina y con su base ligeramente cónica, de tal manera que forme una estructura que haga las veces de un crisol. En los hornos de canal, las cimbras consisten de tubos o piezas de metal sólido con la forma del canal que hará las veces de secundario en un transformador.

El calor necesario para la sinterización lo proporciona la carga de metal a fundir. la plantilla de acero en esta operación se funde junto con la carga.

En Alemania, con el fin de encontrar un sustituto para la costosa plantilla de acero normalmente utilizada en los hornos sin núcleo y que se usa una sola vez, se ha desarrollado el proceso de-

nominado "Mikanit".⁵²

Consiste en forrar la cimbra o plantilla con un cerámico que proporcione protección contra el calor irradiado que sea incombustible y flexible.

El material con estas características es la mica utilizándose en forma de hojas. Comercialmente son conocidas como "Mikanit".

Al usar este método, la sinterización se lleva a cabo con hierro líquido vaciado desde otro horno, ya que las vibraciones que se producen cuando se calientan con bloques de arranque, podrían destruir el revestimiento cerámico de la plantilla.

Otro método, desarrollado por Northrup, consiste en formar un revestimiento refractario granular seco detrás de una cimbra de asbesto. Después de la sinterización del material, se funde la cimbra y sube a la superficie del baño metálico en forma de escoria.

Un tercer método consiste en colocar plástico refractario húmedo alrededor de una cimbra de madera, dejando un espacio entre el revestimiento y la bobina, el cual se llena con polvo refractario. El crisol de esta manera puede ser apisonado fuera del horno y secado antes de su inserción.

El cuarto método, empleado en Francia, pero de utilidad

limitada, es el uso de un crisol a manera de plantilla. El material se apisona detrás del crisol como en el método de Rhon. Conforme se desgasta el crisol, el material detrás de esta cimbra cerámica va formando un subsecuente revestimiento.

Este método, debido a que se forma un revestimiento demasiado grueso, deteriora las características eléctricas del horno y en el caso de hornos grandes no es adecuado el uso de crisoles de gran tamaño hechos con materiales fácilmente desmoronables, como por ejemplo la magnesita.

REVESTIMIENTOS PARA FUSION DE METALES NO FERROSOS

Las condiciones que se encuentran en la fusión por inducción de aluminio o latones en hornos de canal, no son muy severas desde el punto de vista de fusión o de escoriación del material refractario.

La parte más caliente del horno es el canal sumergido, pero incluso aquí las condiciones limitantes del material, no se alcanzan a lograr cuando se funden estos metales.

Para aleaciones cobre-zinc,⁵³ en el cual el plomo no exceda más del 3% y el cobre no más del 85%, son adecuados refractarios base arcilla. Este material no presenta apreciable ataque en el revestimiento

Una composición típica del refractario para este tipo de aleaciones es:

Al_2O_3	39 %
SiO_2	56 %
TiO_2	2 %
Fe_2O_3	1.7 %
Pérdidas por combustión y residuos	1.3 %

También se ha tenido éxito el empleo de materiales de revestimiento conteniendo una mezcla de minerales de cromo y arcilla refractaria.

El óxido de cobre ejerce una acción muy severa en el revestimiento debido a la penetración del óxido y al escoriado del material.

Las aleaciones cuprosas en el rango de 85 a 100 % en cobre, reducen en gran cantidad la vida de un refractario de base arcilla, como el usado en la fundición de latones.

El plomo forma un silicato muy fluido con la sílica "libre" en un refractario de base arcilla, penetrando rápidamente al revestimiento.

Para fundir aleaciones de cobre o aleaciones conteniendo cualquier proporción substancial de plomo, se usan materiales de revestimiento de alta alúmina y de bajo contenido de sílice. Una composición típica es como la que sigue:

Al_2O_3	67 %
SiO_2	28 %
TiO_2	2.8 %
Fe_2O_3	1.2 %
Perdidas por combustión y residuos	1 %

Para la fusión de cobre puro se usan con relativo éxito materiales base Corundum. En USA se han usado regularmente materiales apisonables, compuestos de magnesia fundida para aleaciones formadas de 85 % o más de cobre.

Los revestimientos para hornos de canal escariable usados para la fusión de aluminio y en ocasiones zinc, están formados aproximadamente por la siguiente composición: 55

Al_2O_3	20 %
SiO_2	70 %
TiO_2 , Fe_2O_3 y otros óxidos	50 %
Sulfatos aglomerantes	4 %
Pérdidas por combustión	1 %

Este material se apisona con un contenido de agua del 4 %.

El aluminio fundido no tiene efecto erosivo sobre el material refractario, pero es extremadamente fluido, así que el apisonado debe hacerse con particular cuidado para evitar porosidad, estratificación y grietas.

V.3.- PROBLEMAS QUE PLANTEAN LOS REFRACTARIOS EN LOS HORNOS DE INDUCCION

V.3.a).- FALLAS EN EL REVESTIMIENTO PARA LOS HORNOS SIN NUCLEO

En esta parte se hablará sobre los factores que originan problemas en el revestimiento de cuarcita en la fusión de hierros colados.

Granulometría⁵⁶

A menudo cabe atribuir el deficiente rendimiento de un revestimiento a la mala técnica de colocación.

Durante el manejo y transporte del material ensacado es posible que se produzca la segregación de las partículas gruesas y finas y, de ser así, el material deberá ser mezclado de nuevo.

Donde existe un agregado predominantemente grueso hay gran porosidad y puede producirse la penetración del metal además de un ataque más rápido por parte de la escoria.

En las zonas en que existe una gran proporción de finos, éstos contienen también una gran proporción de ácido bórico y por consiguiente tendrán un bajo punto de fusión y formarán abundante vidrio de borosilicato en el que el óxido de hierro y la escoria se difundirán con facilidad. Dicho de otro modo, en las zonas con gran proporción de finos serán mucho más susceptibles a la erosión y al ataque de escoria que un revestimiento normal.

Penetración del metal 57

La penetración del metal prosigue a través del revestimiento hasta una línea claramente definida en la que el metal solidifica debido al gradiente térmico a través del espesor del revestimiento.

En los casos graves, la penetración del metal prosigue a través del revestimiento de la base del horno, debido a la falta de enfriamiento en dicha zona y a la gran presión ferrostática, permitiendo al metal escapar hasta encontrarse con la bobina del horno, causando corto circuito y pérdidas de potencia.

Este efecto es más pronunciado en las paredes inferiores y el piso del horno cuando se tienen largos periodos de mantenimiento con un pie de metal líquido a temperaturas lo bastante altas como para reducir la estructura del revestimiento.

Varias son las causas de este fenómeno:

- 1.- Calentamiento de sinterización demasiado rápido, durante el cual el metal líquido ejerce presión sobre un revestimiento apisonado antes de que tenga tiempo para desarrollarse la aglomeración cerámica entre partículas.
- 2.- Compactación insuficiente del refractario apisonable durante la colocación.
- 3.- Granulometría incorrecta y gruesa.
- 4.- Insuficiente cantidad de aglutinante.

Otro patrón de desgaste localizado en las paredes inferiores y el fondo del horno, permite la penetración del metal a través de la sección transversal del crisol y por el fondo del horno. Frecuentemente el revestimiento tiende a fracturarse.

La causa principal es un enfriamiento inapropiado por abajo de la bobina de inducción.

Al observarse un desgaste como éste, se deberá eliminar completamente el revestimiento.

57

Temperatura excesiva del metal

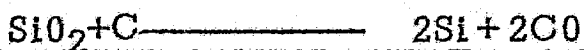
Una vez que el revestimiento ha sido colocado de un modo satisfactorio, uno de los factores más importantes que hay que tener controlado es la temperatura del metal.

En el caso de revestimientos ácidos tenemos que:

A bajas temperaturas del metal, existe tendencia a que se oxide el silicio disuelto en el metal y se produzca una escoria muy siliciosa que es probable que origine erosión significativa del revestimiento:



A altas temperaturas, la oxidación del silicio es menor y se hace más efectiva otra reacción en la que el carbono del caldo reacciona con el revestimiento de sílice reduciéndola y convirtiéndola en silicio al mismo tiempo que se libera monóxido de carbono gaseoso:



Este monóxido de carbono puede realmente verse burbujear alrededor de las paredes del horno cuando el metal se mantiene a altas temperaturas.

La temperatura excesiva del metal hace muy sinterizadas las capas del revestimiento al grado que la cara caliente se convierte en una sola pieza fundida de sílice, muy similar a la utilizada para la fabricación de forros de sílice fundida de los termopares.

Deposición de carbono 57

Con frecuencia esto no origina ningún problema pero en los casos graves, se produce la formación de un arco entre espiras contiguas de la bobina. El color negro se debe al depósito de carbono, que por lo general se cree que ha sido causado por la descomposición del monóxido de carbono a medida que este pasa a través del revestimiento.

Acumulación de escoria en la parte superior del horno 58

La acumulación de escoria aumenta efectivamente el espesor del revestimiento refractario y ello ejerce un efecto nocivo sobre las características eléctricas del horno en cuanto reduce la potencia de entrada.

La facilidad de remoción de una acumulación de escoria dependerá de que tenga un punto de fusión alto o bajo.

La acumulación de escoria de bajo punto de fusión ocurre normalmente como consecuencia de las bajas temperaturas de funcionamiento y se forman en la parte superior del crisol. Las bajas temperaturas se deben por lo general a:

- 1) Tiempo excesivo de exposición del fundido al medio externo cuando se quita la tapa del horno y a excesivo enfriamiento por agua en las paredes del horno.
- 2) Conductividad térmica muy alta en la sección superior del horno debido a un aislamiento deficiente.

3) Bajas temperaturas de operación.⁵⁹

En muchos casos, se elimina fácilmente elevando el nivel de metal para que cubra la acumulación y aumentando entonces la temperatura del metal hasta 1 530 ó 1 550 C. En estas condiciones, la escoria deberá fundirse gradualmente y flotar hasta la superficie del metal, de donde puede ser retirada.

La acumulación de escoria de alto punto de fusión no puede eliminarse con la misma técnica y algunas funderías recurren al uso de fundentes, tales como la soda comercial y el espato fluor.

La utilización de fundentes para eliminar una acumulación existente de escoria debe emprenderse solamente con gran precaución, ya que es fácil que un revestimiento en buen estado pueda ser eliminado de una zona del horno al mismo tiempo que se intenta fundir la acumulación.

Si se va a utilizar fundente, es preferible utilizarlo en cantidades muy pequeñas; no eliminar la acumulación una vez que se ha formado, sino cambiar el carácter de la escoria normal de funcionamiento, de modo que no se produzca la acumulación.

Formación de Mullita

Como consecuencia de la formación de mullita dentro del horno, surge una serie de problemas con la acumulación de escorias.

La mullita es un material refractario y tiene un punto de fusión unos 100°C más alto que el de revestimiento de sílice.

En los hornos de inducción sin núcleo, la mullita se forma cuando existe alúmina para combinarse con la escoria silícea o incluso con el revestimiento del horno según la reacción:



Empleo de materiales de carga oxidados. ⁵⁸

El óxido de hierro está presente en algún grado en todos los baños metálicos ferrosos e incluso más acentuado en cargas compuestas de un alto porcentaje de chatarra de acero de sección delgada.

La sílica del revestimiento formará con el óxido de hierro, un eutéctico, la fayalita, con una temperatura de fusión de aproximadamente 1180°C, muy por debajo de las temperaturas de operación normales.

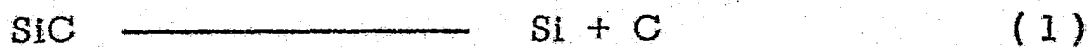
⁶⁰
Según Haessler, el FeO ataca los revestimientos de sílica, formando primero el eutéctico fayalita en la superficie del refractario. Esta fayalita líquida, difunde por el revestimiento entre los granos de sílica causando gradual deterioro.

La alúmina y magnesia están sujetas al mismo ataque en presencia de sílice.

Una adición de carburo de silicio a la carga puede reducir el

óxido perjudicial en la escoria y el baño, resultando un menor deterioro en los revestimientos de sílica.

El carburo de silicio es también material aportador de silicio y fuente de carbono. Este material en el baño, no se funde, sino que se disuelve:



El carbono y silicio al estado naciente son altamente reactivos. A bajas temperaturas del metal, el óxido de hierro es reducido por el silicio del metal formando hierro metálico y sílice.



Además, ya no se genera más sílice por la reacción a bajas temperaturas, puesto que el carburo disponible reduce más fácilmente al FeO



Una adición en exceso de carburo de silicio puede forzar la reacción (1) y (2) hacia la derecha, según la ley de acción de masas.

Desgaste sobre el nivel del baño de metal ⁵⁹

La parte superior de el horno de inducción, la mayoría de las

veces sufre un mayor desgaste que en cualquier otra parte del horno.

Este desgaste puede ser mecánico debido a un método de carga muy brusca o por una erosión del área justo arriba del nivel del baño metálico, que resulta del ataque de escorias compuestas por gran cantidad de óxido de manganeso y óxidos de fierro.

También son posibles causas de desgaste en esta zona, la excesiva agitación del metal y temperaturas demasiado bajas en este punto.

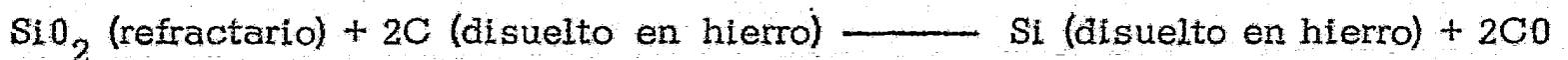
V.3.b.) - FALLAS EN EL REVESTIMIENTO DE LOS HORNOS DE CANAL

Las fallas en el revestimiento de los hornos de canal pueden ocurrir a causa de seis maneras distintas o bien por la combinación de dos o más de estas formas en la fusión de hierros:

1) Erosión

La erosión es común cuando se usan refractarios de baja alúmina como material de revestimiento para la fusión de hierro.

La erosión ocurre cuando el constituyente SiO_2 ⁶² del refractario de base alúmina se reduce por el hierro de acuerdo con la siguiente reacción:



2) Penetración de metal.

Este problema resulta cuando el fundido llena los huecos en el revestimiento refractario en la interfase metal revestimiento.

El metal entra a los huecos, desarrollados éstos por las reacciones químicas ocurridas durante el calentamiento o bien en los huecos formados durante una instalación deficiente del refractario.

La penetración metálica también resulta de una excesiva conductividad térmica del material refractario y puede causar despostillamientos, grietas y velocidades progresivas de erosión.

Una penetración metálica muy pronunciada en el revestimiento, da características eléctricas similares a los que produce la erosión del canal.

3) Despostillamientos.

El despostillamiento puede ocurrir como resultado de un apisonado deficiente y a un ciclo de calentamiento muy rápido durante el proceso de sinterizado o curado.

Las excesivas velocidades de calentamiento pueden generar vapor en cantidades suficientes para debilitar secciones del revestimiento, y para producir tensiones desarrolladas por una expansión no uniforme del refractario, causando fracturas en el material.

Este tipo de fallas, después de que la operación comienza, se nota por una súbita disminución en el factor de potencia.

4) Fusión del refractario.

Si el metal en el canal excede la temperatura de fusión del refractario, el revestimiento del inductor falla rápidamente.

Las temperaturas excesivas en el canal pueden resultar de un control inapropiado de potencia, taponamiento de las gargantas o incluso, durante el período de mantenimiento a baja temperatura cuando el metal dentro del canal al dejar el "pie" de metal líquido, es insuficien-

te, sobrecalentándose éste excesivamente.

A esta condición se suma también el calor radiado, en este caso en dirección hacia las gargantas, en lugar de hacerlo hacia la cuba.

5) Formación de "aletas".

Cuando una grieta se desarrolla desde el canal hacia la bobina de inducción, el metal penetra en dicha grieta y solamente cuando lo hace de esta manera, se le denomina "aleta" al metal penetrado.

Estas aletas pueden sobrecalentarse por corrientes inducidas, las cuales causan posterior tensión en el material del revestimiento y también pueden hacer las grietas ya formadas, más profundas.

Este tipo de fallas es más común con revestimientos de magnesia que con revestimientos de alúmina, debido al alto coeficiente de expansión térmica de la magnesia.

Por este motivo, cuando se usan revestimientos con magnesia, no se debe dejar apagado el horno por más de 10 minutos.

Las excesivas velocidades de curado y sinterizado en un inductor nuevo, pueden causar grietas que conducen la formación de "aletas".

6) Desgaste por efecto químico.

Lo más importante en la selección de un refractario, son las consideraciones de las reacciones de los minerales presentes en el refractario y con las escorias y metales que se encuentran en el horno.

El deterioro de los óxidos metálicos del material refractario, se debe en gran parte a las reacciones de reducción que pueda sufrir dicho material.

Cuando los óxidos metálicos de la escoria se combinan con los óxidos metálicos del refractario, se puede ejercer sobre el revestimiento, una acción fundente por medio de los eutécticos, óxidos complejos con temperaturas de fusión por abajo de la temperatura de operación del horno, disolviéndose de esta manera el refractario.

Este fenómeno ocurre en el revestimiento de los inductores y en la pared del horno, a la altura del nivel del baño.

La velocidad de disolución del refractario aumenta exponencialmente conforme aumenta la temperatura.

La corrosión verdadera de un refractario depende sobre la cantidad de refractario disuelto necesario para alcanzar el equilibrio y varía con el tipo de refractario y escoria empleada.

La tabla (II) muestra las posibles fases presentes con refractarios de magnesita y de alúmina.

Frente a escorias básicas, los refractarios de magnesita son los más adecuados. En equilibrio, muy poca cantidad de periclasa se disolverá y las fases cristalinas formadas son muy refractarias.

En refractarios de alta alúmina, las escorias básicas, reaccionarán aproximadamente 5 veces más que con los refractarios de magnesita. Aquí es posible la formación de gran cantidad de Anortita, eutéctico del sistema ternario $Al_2O_3-CaO-SiO_2$ cuyo punto de fusión es de 1553 C.

Los refractarios de magnesita no son adecuados frente a escorias ácidas. En estos casos, una gran cantidad de periclasa se disuelve y, también es posible la formación de Monticellita, eutéctico del sistema ternario $MgO-CaO-SiO_2$ cuyo punto de fusión es de 1485 C. Las escorias ácidas reaccionan unas 2 ó 3 veces más con refractarios de magnesita que con refractarios de alúmina.

TABLA II

FASES CRISTALINAS PRESENTES EN EQUILIBRIO

<u>Fase mineral</u>	<u>Composición química</u>	<u>Punto de fusión</u>
Monticellita	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	1485C
Forsterita	$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	1900C
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130C
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	2130C
Espinela	$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	2135C
Solución sólida de periclasa	$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}) \text{O}$	1600-1800C
Anortita	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1850C
Mullita	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1850C
Solución sólida de espinela	$(\text{FeO}, \text{MgO}, \text{MnO}) \text{Al}_2\text{O}_3$	1700-1900C

63

Fallás en la cuba de los hornos de canal en la fusión de hierros.

El cuerpo principal del horno de canal suele revestirse con refractario de alúmina, ya sea apisonado o en forma de ladrillos. Muchos de los problemas de corta duración de revestimientos en esta parte del horno pueden relacionarse con la colocación de un refractario inadecuado o con las temperaturas excesivas del metal o como ocurre en muchos casos, con una escoria agresiva.

Las escorias con un gran contenido de cal, tales como las trasladadas desde el cubilote o procedentes de un proceso de desulfuración, pueden causar una grave erosión de los refractarios en el horno de canal, especialmente donde existe un lavado continuo o movimiento de la escoria sobre el refractario. En los hornos-revestidos con ladrillo de alta alúmina, la cal se combina con el refractario aluminoso y produce un mineral muy cristalino denominado hexaaluminato de calcio ($\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$), cuyo punto de fusión es de 1850 C.

Esta modificación de la estructura del ladrillo va casi siempre acompañada del desconchado de capas de refractario.

Aunque el desconchado reduce evidentemente el espesor efectivo del revestimiento, no es probable que se produzca una avería seria por este motivo exclusivamente, pues se encuentra mayor erosión de material en otras zonas del horno.

En cualquier instalación duplex con horno de canal, es muy importante que se evite la entrada en este de las escorias procedentes del cubilote o de un proceso de desulfuración para poder lograr una duración máxima del revestimiento del cuerpo receptor principal.

Además de la cal, se sabe que los óxidos de potasio y de sodio causan también una erosión muy rápida de los refractarios aluminosos de los hornos de canal.

El carácter físico de la escoria debe tomarse en consideración. Si al disolverse el refractario en la escoria líquida se produce un líquido viscoso, esta tenderá a adherirse a la superficie del refractario, protegiéndola de posterior corrosión. Sin embargo, si la solución del refractario dentro de la escoria líquida produce una escoria menos viscosa, tenderá a fluir desde la superficie del refractario expuesta a la superficie fresca para reacción posterior, resultando en un desgaste más rápido del refractario.

La formación de una acumulación mineral sobre las superficie del revestimiento, toma lugar solamente en el inductor de los hornos de canal.

Es muy importante que la erosión y el desgaste que tienen lugar en el circuito del inductor se mantengan bajo observación continua mediante el registro y trazado de una característica eléctrica que

cambie con el desgaste, como por ejemplo, la corriente de la bobina, el factor de potencia o la reactancia.

Revestimientos de magnesia para inductores en la fundición de hierros 64

Para revestimientos de magnesia de alta pureza, la acumulación de material está constituida principalmente por periclasa recristalizada con grandes porciones de solución sólida de Al_2O_3 , FeO y MnO .

Estos forman una zona impermeable la cual permite muy poca concentración de sílica. La ausencia de sílica dentro de esta zona permite que permanezca casi intacto el refractario pero debido a la alta densidad, baja porosidad y alta expansión térmica, lo hace propenso a choques térmicos y posibles despostillamientos térmicos.

La solución sólida de periclasa (Fe , Mg , Mn) O funde en un rango comprendido entre $1600-2800^{\circ}C$.

En los revestimientos de magnesia de los inductores de los hornos de canal, se ven claramente diferenciadas las distintas zonas afectadas gradualmente por el calor.

El revestimiento inalterado consiste en el refractario original nodulizado. Al examinar el refractario próximo a la cara del inductor, es evidente que el refractario se modifica y se convierte en una estructura muy cristalina.

Durante la recristalización, el metal que había penetrado en la porosidad irregular del refractario, adopta su más natural forma esférica.

Se sabe que es necesaria para la recristalización de la magnesita en periclasa, temperaturas de 1600 a 2800 C. pero esto no significa necesariamente que hayan sido alcanzadas estas temperaturas en el inductor del horno de canal, ya que es completamente posible que el mismo cambio se produzca a 1500 ó 1600 C. durante un periodo prolongado de tiempo.

La recristalización de la magnesita de este modo origina una clara contracción del refractario, debido a una reducida porosidad del revestimiento causada por la unión de la estructura cristalina que producirá grietas y fisuras.

Al eliminar el revestimiento del inductor revestido de magnesita, es frecuente el aspecto de piel de cocodrilo.

Este agrietamiento en forma de piel de cocodrilo es consecuencia de la contracción del refractario, que ha permitido que el metal penetre a la grieta.

Este metal se oxida más adelante para formar óxido de hierro, lo que da a las grietas el aspecto negruzco.

En los casos más graves, esta penetración del metal en las grietas de contracción llega a alcanzar el blindaje de la bobina lo que da por resultado la fuga del metal desde el inductor.

Revestimientos de alúmina para inductores en la fusión de hierros ⁶⁴

Los refractarios monolíticos colables de alúmina son muchas veces ligados con cementos de aluminato de calcio.

En presencia de sílica, el aluminato de calcio puede formar fases vitrificadas con baja temperatura de fusión.

La profundidad de estas fases vitrificadas dependen de la permeabilidad de la masa refractaria.

Los revestimientos hechos a base de alta alúmina no forman gran cantidad de solución sólida con los óxidos típico de las escorias (óxidos básicos como óxido de hierro, óxido de manganeso, óxido de magnesia formados en escorias traídas de otros hornos (operación duplex o por la oxidación del metal) pero sí reacciona con estos para formar depósitos de espínelas.

La solución sólida de espínelas (FeO , MgO , MnO) Al_2O_3 funden entre 1700 y 1900 C.

Los inductores apisonados que duran mucho, tienen un aglomerante cerámico bien desarrollada en la cara caliente, en la que el

revestimiento apisonado ordinario ha recristalizado, formándose corindón, y esto permite que cualquier metal atrapado adopte formas esféricas. Más allá de la cara caliente, el metal que penetra se encuentra en formas irregulares que ocupan los poros presentes en el agregado refractario.

La penetración del metal de esta cuantía es corriente. Está todavía por verse un refractario de inductor en el que no haya penetrado metal.

Si un inductor se deteriora rápidamente desde el principio de su uso, es muy probable que la aglomeración cerámica antes mencionada no haya tenido tiempo u oportunidad de desarrollarse adecuadamente.

Al desgastarse el revestimiento, la aglomeración entre los granos se elimina. Las causas posibles de este tipo de desgaste son un calentamiento demasiado rápido del inductor o altas potencias de entrada y altas temperaturas en el inductor poco después de haber sido puesto en servicio.

VI FUSION POR INDUCCION A VACIO

FUSION AL VACIO

Los materiales fundidos al vacío mejoran su pureza y consistencia de composición. El contenido de H_2 , O_2 y N_2 se ven considerablemente disminuidos junto con la cantidad de inclusiones no metálicas. Esto último se debe parcialmente de la protección de el metal de la oxidación atmosférica y parcialmente también a la descomposición de inclusiones ya existentes por mecanismos como la reacción carbono oxígeno.⁶⁵

En fundición a la atmósfera, al tratar la desoxidación, el empleo de desoxidantes puede dejar algún material residual en el fundido, posibilitando un cambio significativo en las propiedades del metal.

Cuando no se pueden tolerar tales elementos residuales, la colada en vacío facilita una técnica que permite fundir y colar aleaciones sin el riesgo de contaminación.

Además es posible purificar ciertos metales durante la fusión al vacío, eliminando especialmente las impurezas volátiles tales como el Mg, S, Mn, y Ca. No solamente se evita la disolución de gases en el fundido sino que se pueden eliminar en algunos casos, varios de los que se encontraban presentes originalmente en la carga.⁶⁵

La porosidad de gas en colados hechos por fusión al vacío se elimina completamente de una manera natural.

El hecho de que ciertas impurezas metálicas volátiles se puedan eliminar durante la fusión al vacío, significa que estos mismos metales no se pueden fundir al vacío con posibilidad de éxito, ya que en este caso, tal fusión tendería a constituir un proceso de destilación. Sin embargo, los metales de presión de vapor elevada y las aleaciones que los contienen se pueden fundir en equipo de vacío si se introduce una presión parcial de gas noble suficientemente alta como para mantener bajos los vapores metálicos.

La fundición en atmósfera de gas inerte se usa en los metales demasiados reactivos como para poderse fundir al aire o demasiado volátiles para fundirlos en vacío.

Para tener un control adecuado sobre la atmósfera en la fusión en gas inerte, es necesario conducirla en un equipo de vacío hermético. El procedimiento ordinario consiste en evacuar la cámara de fusión tal como se hace en la fusión al vacío, pero se introduce Ar o He purificados antes de que se presente la fusión. La presión de gas inerte que se introduce depende de la reducción que se desee en la volatilización y del degasado del fundido que se quiera.

Si no fuera necesaria la eliminación del gas del metal, se podría utilizar una atmósfera completa de gas inerte, pero el inconveniente de esto radica en la pérdida excesiva de calor por conducción y por convección. Esta pérdida puede ser importante si se de

sea una temperatura aproximada a la límite alcanzable el equipo de fundición al vacío; la temperatura máxima que podría obtenerse con una atmósfera de gas noble sería considerablemente más baja que la que se tiene en vacío, donde solamente las pérdidas por calor son debidas a la radiación. En este caso es preferible el argón al helio, ya que la conductividad térmica es más baja en el argón.

Todo metal absorbe gases como el hidrógeno u oxígeno. Para disolverse en los metales, estos gases moleculares deben romperse a su forma atómica. Por consiguiente, la ley de Henry, la cual establece que la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión, debe modificarse para gases diatómicos para instituir que la solubilidad es proporcional a la raíz cuadrada de la presión, o

$$S = k(p^{1/2})$$

Esta ley modificada se conoce generalmente como la ley de Sievert.

Para muchos metales, la solubilidad del gas aumenta con la temperatura, presentando una discontinuidad en el punto de fusión donde la solubilidad es mucho mayor que en el estado sólido.

La solubilidad del gas decrece bruscamente cuando el me-

tal solidificado y el gas es luego expelido súbitamente. El gas así expulsado forma burbujas y defectos, si su contenido es suficientemente alto. En general, el gas elemental de este comportamiento es el hidrógeno, ya que el oxígeno forma óxidos estables en casi la mayoría de los casos y, por consiguiente, puede que no cause una presión gaseosa, ya que la presión de descomposición de la mayoría de los óxidos es muy baja.

Se debe notar que ningún gas puede formar burbujas y por consiguiente porosidad, a menos que su presión sea menor que la atmosférica más la hidrostática del metal que se está solidificando.

Muy a menudo los defectos por gas o por porosidad en metales solidificados no son causados por el hidrógeno o por cualquier otro gas elemental, sino más bien por la formación de compuestos gaseosos ⁶⁷ como H_2 , SO_2 , o CO . Los dos primeros son particularmente importantes en los colados de cobre, el tercero lo es en los colados de acero.

La no validez de la ley de Sievert puede esperarse sobre todo en los metales afines a H_2 , N_2 y O_2 y especialmente con altas concentraciones.

Presión de vapor de los metales

Todo metal tiene una determinada presión de vapor, propor-

cional a la temperatura. En la mayoría de los casos la presión de vapor puede expresarse con una ecuación del tipo:⁶⁸

$$\log p_{Me} = - A/T + B$$

El uso de vacío hace posible evaporar metales a temperaturas relativamente bajas. La evaporación se localiza exclusivamente en la superficie del metal fundido. Como la velocidad de destilación de un metal líquido a una temperatura dada es proporcional a la superficie expuesta, se prefiere luego, un crisol alto y angosto, para mantener un nivel bajo las pérdidas por evaporación. La evaporación es más intensa dentro de un campo magnético de alta frecuencia⁶⁹ (como el presente en los hornos de inducción sin núcleo).

La cantidad de gas de metal perdida por evaporación durante la fundición a vacío puede calcularse aproximadamente de la relación.⁷⁰

$$G = \frac{P}{17.14 T/M}$$

donde

G es la cantidad de metal evaporado en gramos/cm²-seg.

M es el peso atómico del metal

P es la presión de vapor del metal en milímetros de mercurio

T es la temperatura absoluta en °K.

Nótese que el área que se incluye en el cálculo de G es la del crisol.

VII.- REFRACTARIOS EN LA FUSION A VACIO

VII.- REFRACTARIOS EN LA FUSION POR INDUCCION A VACIO

La selección del material del crisol refractario es gobernada necesariamente por condiciones diferentes de las que prevalecen en hornos de fusión abiertos al aire atmosférico.

Primariamente estas condiciones derivan directamente de la operación a bajas presiones las cuales alteran el equilibrio químico entre el metal, carbono y óxidos metálicos refractarios de tal manera que estos últimos, son más rápidamente reducidos, resultando en pérdidas de material del crisol, captación de O_2 y contaminación de metal en el fundido, ambos provenientes de la reducción de los óxidos metálicos que constituyen el material refractario. Por lo anterior, las fallas en el crisol parecen ser el mayor problema en el caso de un horno de inducción al vacío.

Se acepta generalmente que la vida del crisol en vacío⁷¹ para un mismo material, es la mitad de la que se obtiene en fusión al aire.

La vida del crisol⁷² depende en gran parte de los siguientes factores: composición del grano o partícula del material refractario usado, método de apisonado e ignición, temperatura de trabajo, ataque químico de metal líquido y de escorias, velocidad de enfriamiento y de calentamiento, efectos de los cambios de dimensión del crisol.

Las temperaturas excesivas durante la fusión y la exposición prolongada a grandes choques térmicos causan envejecimiento prematuro del

crisol, y deben ser evitados lo más posible.

Un crisol muy denso tiene una buena resistencia al ataque químico del fundido, pero son más propensos al choque térmico que un crisol poroso. Ya que los materiales porosos son objeto de ataques químicos y mecánicos por parte del fundido, es aconsejable seleccionar un crisol de densidad media.

La tabla III muestra el resultado obtenido de las posibles interacciones con 21 combinaciones binarias de materiales refractarios en vacío estudiadas por Johnson⁷³ en condiciones de temperatura de 1500 a 2300°C. La tabla IV de la temperatura y tiempo (en superescritos) donde se registra la primera evidencia de reacción.

TABLA III

Combinación	temperatura mínima de reacción (°C)	tipo de reacción	Notas
Carbono-Tungsteno	1500	Formación de carburo	
Carbono-Molibdeno	1500	Formación de carburo	
Carbono-Toria	2000	Reducción de Toria	formación de carburo a altas temperaturas
Carbono-Zirconia	1600	Reducción de Zirconia	formación de carburo a altas temperaturas
Carbono-Magnesia	1800	Reducción de Magnesia	Alguna adherencia
Carbono-Berilia	2300	Reducción de Berilia	recubrimiento metálico sobre el carbono

Berilia-Tungsteno	2000	Depósito metálico amarillo sobre la berilia	el depósito aumenta con la temperatura
Berilia-Molibdeno	1900	Depósito plateado sobre la Berilia	Descomposición de producto de reacción evidentes a 2300°C.
Berilia-Toria	2100	Formación de líquido	Completa fusión a 2200°C.
Berilia-Zirconia	1900	Ligera adherencia debido a la formación de líquido	puro líquido a 2000°C.
Berilia-Magnesia	1800	Fase líquida	
Magnesia-Tungsteno	2000	Reducción de magnesia	Ligera adherencia
Magnesia-Molibdeno	1600	Depósitos plateados de magnesia	Fuerte en erosión sobre el molibdeno a 2100°C.
Magnesia-Toria	2200	Reacción con vapores	La Toria se erosiona pero no hay adherencia
Magnesia-Zirconia	2000	Fase líquida	los especímenes se soldan a 2000°C.
Zirconia-Tungsteno	1600	Depósitos amarillos en la superficie	Pequeño cambio arriba de los 2300°C. donde es evidente la descomposición de Zirconia
Zirconia-Molibdeno	2000	Ligera adherencia debido al sinterizado	Descomposición de Zirconia a 2300°C.
Zirconia-Toria	2000	Ligera adherencia	No hay evidencia de fase líquida a 2300°C.
Toria Tungsteno	2200	Ligera reducción de la Toria	Poca reacción arriba de los 2300°C pero con evidente adherencia
Toria-Molibdeno	1900	Pequeños depósitos con adherencia	Poca reacción arriba de 2300°C. No hay adherencia arriba de los 2000°C.

Molibdeno-Tungsteno .2000

Ligera adherencia
debido al sinterizado

Gran adherencia arri-
ba de los 2300°C.

TABLA IV

Temperatura (°C) a la cual ya no existe estabilidad en la superficie de contacto entre los materiales indicados en la tabla III

	W	Mo	ThO ₂	ZrO ₂	MgO	BeO
C	1500 ⁸	1500 ⁸	2000 ⁴	1600 ⁴	1800 ⁸	2300 ²
BeO	2000 ²	1900 ⁴	2100 ⁴	1900 ²	1800 ²	
MgO	2000 ²	1600 ⁴	2200 ⁴			
ZrO ₂	1600 ⁴	2200 ⁴	2200 ⁴			
ThO ₂	2200 ⁴	2900 ⁴				
Mo	2000 ⁸					

Los superescritos indican el tiempo en minutos

Rango de presión: 0.1 - 0.5 micrones de Hg.

Johnson concluye:

A altas temperaturas, el factor limitante para muchos refractarios, no es su punto de fusión, sino estabilidad cuando están en contacto con otras sustancias y su velocidad de volatilización.

El carbono (grafito), Zirconia, Toria, Molibdeno y Tungsteno, pueden usarse por periodos largos abajo de 2300°C.

La máxima densidad de algunos óxidos, tales como Magnesia y Berilia no se pueden obtener en rangos altos de temperatura, quizás debido a su volatilización.

De las combinaciones de refractarios probados, la Berilia es más estable en contacto con Molibdeno la Toria es más estable en contacto con Tungsteno.

La combinación más estable de óxidos son $ZrO_2 - ThO_2$ y $MgO - ThO_2$.

A escala industrial y para la fusión de aceros en vacío, la magnesia es el mejor material desde el punto de vista químico. Es relativamente estable, incluso a bajas presiones, y en el caso de que se reduzca, siendo el magnesio altamente volátil, éste se desaloja por el sistema de vacío.

Se debe notar que por Magnesia, se debe entender el material puro fundido. La magnesita natural contiene óxidos de hierro y sílica, cuya presencia causaría la captación excesiva de O_2 por parte del fundido.

Cuando se usan materiales de crisol con aglutinante, tales como silicatos, óxido de boro, óxido de hierro y similares, relativamente estables a la atmósfera, serán más o menos reducidos durante la fusión al vacío, según Balzers*, el óxido de boro se reduce y éste entra al fundido en forma metálica, pudiendo ejercer efectos considerables en las características mecánicas del metal que se está fundiendo.

* Firma Alemana,⁷⁴ constructora de hornos de inducción.

La estabilidad química en vacío, no es el único criterio de selección. La Magnesita tiene una alta expansión térmica y una alta conductividad térmica. Estas propiedades dan respectivamente, fracturas al enfriarse y pérdidas substanciales de calor.

Al respecto, es factible tratar mejor con espinelas ⁷⁵ (40 % Al_2O_3 60 % MgO). Con esto resulta muy bajos contenidos finales de O_2 pero puede haber contaminación de aluminio, ya que éste es soluble en el hierro. Al usar Magnesita, no existe contaminación en el fundido por ser el magnesio insoluble en el hierro, sin embargo en las aleaciones base níquel puede disolverse el magnesio en el fundido.

Para la fusión de uranio y cobre, se usa como material de crisol grafito puro. En este caso, debido a que grafito es conductor de la electricidad, la mayor parte de el calentamiento la proporciona el crisol mismo.

TABLA V

MATERIALES PARA CRISOL EN LA FUSION DE LOS METALES

Metal líquido	Material para Crisol	Puede usarse hasta (°C)	Atmósfera
Ag	Al_2O_3 ; SiO_2 ; C	1200	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
Al	BeO; ZrO_2	1000	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
	C; hierro colado	800	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
	SiO_2	700	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
Au	Al_2O_3 ; MgO; SiO_2 ; ZrO_2 ; C	1200	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
Ba	C	900	Vac.
Be	BeO	1450	Ar; H_2 ; Vac.
Bi	C; Nb; Ta	800	Ar; Vac.
	Al_2O_3 ; ZrO_2	600	Ar; H_2 ; Vac.
Ca	BeO; CaO	1000	Ar; Vac.
	C	900	Ar; Vac.
Cd	C	600	Ar; Vac.
	SiO_2	375	Ar; Vac.
Ce	BeO; Ta	1000	Ar; Vac.
Co	Al_2O_3 ; MgO; Mg-espínela ZrO_2	1600	Ar; H_2 ; Vac.
Cr	BeO; ThO_2 ; ZrO_2	2000	Ar; H_2 ; Vac.
Cs	SiO_2 ; acero 18/8	200	Ar; Vac.
Cu	Al_2O_3 ; MgO; SiO_2 ; C	1200	Ar; H_2 ; N_2 ; Vac.
Tierras raras	Ta	1700	Ar; Vac.
	Mo	1400	Ar; Vac.
Fe	Al_2O_3 ; BeO; CaO; MgO; Mg-espínela; ZrO_2	1700	Ar; H_2 ; Vac.
Ga	SiO_2 ; C	1000	Ar; Vac.

- 1) Ar = Argon
 H_2 = Hidrógeno
 N_2 = Nitrógeno
 Vac. = Vacío

Metal lfquido	Material para Crisol	Puede usarse hasta (°C)	Atmósfera
Ge	Al ₂ O ₃ ;SiO ₂ ;C	1100	Ar;Vac.
K;Na	acero 18/18	1000	Ar;H ₂ ;Vac.
	Nb;Ta	800	Ar;Vac.
	SiO ₂	200	Ar;H ₂ ;Vac.
Li	Nb;Ta	800	Ar;Vac.
	SiO ₂	250	Ar;Vac.
Mg	MgO;ZrO ₂ ; C;Fe	800	Ar;H ₂ ;Vac.
Mn	Al ₂ O ₃ ;Mg-espinela, ThO ₂	1500	Ar;H ₂ ;Vac.
Ni	Al ₂ O ₃ ;BeO;MgO; Mg-espinela;ZrO ₂	1600	Ar;H ₂ ;Vac.
Pb	Al ₂ O ₃ ;SiO ₂ ;ZrO ₂ C; hierro colado	600	Ar;H ₂ ;Vac.
Pt	CaO;ThO ₂	1900	Ar;Vac.
Rh	ZrO ₂	2050	Ar;Vac.
Sb	Al ₂ O ₃ ;ZrO ₂ ;C	800	Ar;H ₂
Si	BeO;SiO ₂	1500	Ar;H ₂ ;Vac.
Sn	Al ₂ O ₃ ;SiO ₂ ;C	1200	Ar;H ₂ ;N ₂ ;Vac.
Ti ²⁾	C	1800	Ar;Vac.
Te	Al ₂ O ₃ ;acero 18/8	650	Ar;Vac.
Th ²⁾	C	1750	Ar;Vac.
U	Al ₂ O ₃ ;BeO;MgO;ThO ₂ ; C	1300	Ar;Vac.
Zn	SiO ₂ ;C	800	Ar;Vac.
Zr ²⁾	C	1900	Ar;Vac.

2) Hf, Mo, Nb, Re, Ta, Th, Ti, V, W, y Zr Son fundidos casi exclusivamente en hornos de arco al vacío o en hornos de bombardeo de electrones.

TABLA VI

Material de crisol	Puede usarse en el aire hasta °C	Puede usarse en vacío hasta (°C)	Punto de fusión (°C)	Densidad	Impermeabilidad a los gases	Resistencia a cambios de temperatura	Coefficiente de expansión lineal por °C	Propiedades químicas
SiO ₂	1200*)	1200*)	1750	2.1	buena	excelente	10 ⁻⁶	Desvitrificación arriba de 1200°C, Resistentes a ácidos con excepción de H ₃ PO ₄ a 300°C y a F
MgO	2200	1600	2700	2.8	pobre	buena	10 ⁻⁵	Conserva su estabilidad a altas temperaturas.
Al ₂ O ₃	1900	1900	2050	3.4 to 3.9	buena	buena	10 ⁻⁷ to 10 ⁻⁶	Resistente a los alkalis y otros metales.
Espinela de Magnesio	1950	1950	2135	3.8	-	ligera	8.10 ⁻⁶	Entre MgO y Al ₂ O ₃
BeO	2200	2100	2550	2.9	buena	muy buena	-	Resistente a sustancias alcalinas y a influencia reductoras de metales fundidos.
ThO ₂	2700	2200	3000	9.2	buena	pobre	alto coeficiente de expansión	Resistente a temperaturas extremadamente altas, a alkalis y a su reducción al trabajar con sustancias de fusión difícil.
ZrO ₂	2500	2300	2700	5.4	ligeramente buena	ligera	10 ⁻⁵	Resistente a sustancias básicas y ácidas a temperaturas muy altas.

Material de crisol	Puede ser usado en aire arriba de (°C)	Puede usarse en vacío hasta (°C)	Punto de fusión (°C)	Densidad	Impermeabilidad a los gases	Resistencia a cambios de temperatura	Coefficiente de expansión lineal por °C	Propiedades químicas
TiB ₂	1400 a 1500	2200	2900 a 3000	4.52	-	-	-	-
HfB ₂	1100 a 1200	2200	3100	11.2	-	-	-	-
TaB ₂	1100 a 1200	-	3000	12.6	-	-	-	Estable arriba de 2000°C en atmósfera neutra o inerte.
AlN	1000	-	2227	-	-	-	-	-
BN	-	-	sublima a 3000	2.34	-	-	-	-
TiN	1200	1000	-	5.2	-	-	-	-
ZrN	(1200)	1700	-	6.93	-	-	-	-
HfN	(1200)	1700	-	-	-	-	-	-
BaS		1200	2200	4.25	-	-	-	-
CeS		1700	2450	5.93	-	-	-	-
Ce ₃ S ₄		1700	2050	5.3	-	-	-	-
Ce ₂ S ₃		1700	1890	5.19	-	-	-	-
ThS		1700	2200	8.57	-	-	-	-
Th ₂ S ₃		1700	2000	7.38	-	-	-	-
Th ₆ S ₇		1700	2000	7.59	-	-	-	-
US		1700	2000	10.87	-	-	-	-

Oxidación a altas temperaturas

Material de crisol	Puede ser usado en aire arriba de (°C)	Puede usarse en vacio hasta (°C)	Punto de fusión (°C)	Densidad	Impermeabilidad a los gases	Resistencia a cambios de temperatura	Coefficiente de expansión lineal por °C	Propiedades químicas
SiC	1000 1140	1700	2700	3.2	-	-	-	Atacado a altas temperaturas por óxidos y metales fundidos
B ₂ C	1000	-	2450	2.52	-	-	-	-
MoC	-	2200	2687	8.5	-	-	-	-
WC	-	2200	2867	15.5	-	-	-	-
TiC	1000	2200	3100 a 3200	4.25	-	-	-	-
ZrC	1000	2200	3500	6.7	-	-	-	-
NbC	-	2200	3500	7.82	-	-	-	-
TaC	-	2200	3880	14.48	-	-	-	-
HfC	-	2200	3890	12.2	-	-	-	-
MoB	1000	-	2180	8.77	-	-	-	Estable arriba de 2000°C en atmósfera neutra o reductora
NbB ₂	1100 a	-	2900 (de composición)	7.21	-	-	-	Estable arriba de 2000°C en atmósfera neutra o reductora.
Wb	1100 a 1200	-	2860	16.0	-	-	-	Estable arriba de 2000°C en atmósfera neutra o reductora.
ZrB ₂	1300 a 1400	2200	2990 a 3000	6.09	-	-	-	Estable arriba de 2000°C en atmósfera neutra o reductora.

Material de crisol	Puede usarse en el aire hasta °C	Puede usarse en vacío hasta (°C)	Punto de fusión (°C)	Densidad	Impermeabilidad a los gases	Resistencia a cambios de temperatura	Coefficiente de expansión lineal por °C	Propiedades químicas
Nb	250	2000 a 2100	2497	8.55	buena	buena	7.10^{-6}	Resistente a los ácidos con la excepción de H ₂ SO ₄ concentrado y caliente.
Mo	400	2300	2610	10.2	buena	buena	$5.3.10^{-6}$	Resistente a ácidos no oxidantes.
C	550	2300		ca.1.5	pobre	muy buena	10^{-6}	Resistente a agentes fundentes ácidos y básicos.
Ta	250	2200 a 2500	2997	16.6	buena	buena	$6.6.10^{-6}$	Similar a Nb.
W	500	2800	3380	19.3	buena	buena	$4.4.10^{-6}$	Similar a Mo

VIII.- GENERACION DE CORRIENTE DE MEDIA FRECUENCIA

VIII.- GENERACION DE CORRIENTE DE MEDIA FRECUENCIA

Un sistema oscilante eléctrico se puede formar con los tres tipos de componentes eléctricos: inductores, capacitores y resistores.

Los tres componentes de los circuitos están íntimamente relacionados con ciertos fenómenos eléctricos fundamentales de los que derivan su nombre: inductancia, capacitancia y resistencia.

La oscilación eléctrica consiste de un intercambio cíclico de energía entre un campo eléctrico y un campo magnético.

Este sistema oscilatorio eléctrico se forma conectándose un capacitor y una bobina en circuito cerrado. Fig. (35).

Cuando el condensador se halla cargado, existe una diferencia de tensión entre sus placas y tiende entonces la corriente (positiva, por convención) a pasar desde la placa que se halla con potencial superior hasta la del potencial inferior. El condensador se descarga, hasta que no exista diferencia de potencial entre sus placas.

La presencia de la bobina hace que, cuando la última placa haya alcanzado el mismo potencial que la primera, siga recibiendo la corriente retrasada y acabe por tener un potencial superior.

Ello provoca una nueva descarga del condensador en el senti-

do contrario, cargándose otra vez la primera placa y recibiendo después corriente "retrasada".

Este ciclo de descarga y carga se repite una y otra vez y la corriente cambia periódicamente de dirección en el circuito, produciendo una corriente alterna. Se dice que el circuito oscila.

Las inversiones periódicas de la corriente en el circuito se denominan acción volante (Fly Wheel).

Este fenómeno es comparable al que se observa con dos depósitos unidos mediante una tubería por su parte inferior.

Si se llena de agua (un símil de carga eléctrica) uno de ellos y se abre la llave (descarga), el agua subirá en el otro para igualar el nivel del agua (Voltaje).

En vez de detenerse a alcanzar el nivel del primero, seguirá subiendo por efecto de la fuerza de la corriente de agua (inercia), rebasando el nivel del segundo y así sucesivamente hasta que la resistencia que halla la corriente acabe por estabilizar el agua al mismo nivel en ambos depósitos.

Una vez iniciada la oscilación podría continuar indefinidamente, si no fuera por las pérdidas inevitables debido a la resistencia en los devanados y contactos. Esto se conoce como amortiguación de las oscilaciones.

La resistencia que causa la amortiguación utiliza la energía almacenada en el circuito y reduce la amplitud de la oscilación.

Las oscilaciones del circuito oscilante pueden compararse a un niño en un balanceo o columpio.

El niño puede ir hacia adelante y atrás y oscilar, pero si nadie le da un impulso de vez en cuando, el movimiento disminuirá gradualmente de amplitud, hasta que finalmente el columpio se detenga. De no ser por la fricción o la resistencia, el balanceo podría continuar indefinidamente, lo cual sería un movimiento perpetuo, cosa que es imposible.

Ahora bien, si hubiera otro niño detrás del que se balancea y le diera un empujón cada vez que alcanzara su punto máximo de retroceso, la energía añadida por el impulso reemplazaría a la pérdida por la fricción y el balanceo proseguiría en tanto el niño siguiera empujando.

Los valores del capacitor y del inductor determinan la frecuencia básica de operación del sistema oscilante (frecuencia NATURAL de oscilación) igual a $1/\sqrt{LC}$.

En general, siempre que actúe sobre un sistema que es capaz de oscilar, una serie de impulsos que tengan una frecuencia igual o casi igual a la frecuencia natural de oscilación del sistema, éste se pone a vibrar con una amplitud relativamente grande, este fenómeno se conoce como resonancia.

El sistema oscilante eléctrico es similar al columpio.

Si se añaden pulsos de energía al circuito con una frecuencia igual o cercana a la frecuencia natural o de resonancia, continuará oscilando.

Esto se debe a que durante la carga y la descarga del capacitor del circuito, debe transcurrir un espacio definido de tiempo, del mismo modo que en el caso del columpio, donde los "aventones" al balancín se deben de aplicar sincronizados con la frecuencia de oscilación del columpio.

Así, si se hacen mayores C o L, de tal modo que sea preciso más tiempo para la carga, la frecuencia del circuito disminuirá y viceversa, de acuerdo con la fórmula de resonancia $f = 1/2\pi(LC)^{1/2}$

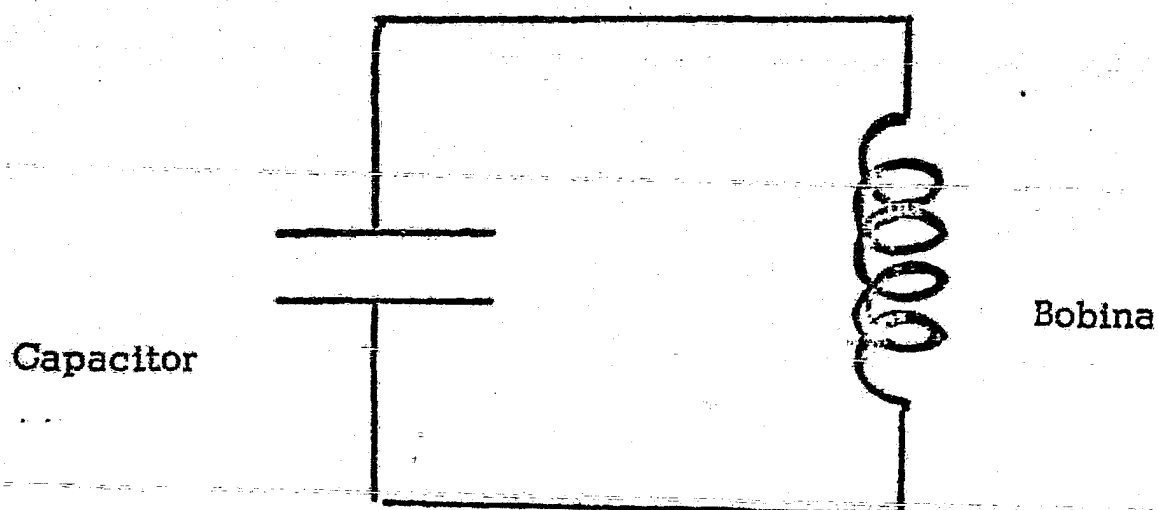
Si los impulsos necesarios para mantener la oscilación se dan con la frecuencia de resonancia de tal manera que la corriente desde una fuente externa y el voltaje del circuito oscilante están en fase, o bien el voltaje desde una fuente externa y la corriente del sistema oscilante están en fase, entonces el factor de potencia es igual a la unidad, y por lo tanto, se tiene a resonancia la máxima absorción de potencia posible.

Si los impulsos necesarios para mantener la oscilación, están por abajo de la frecuencia natural del sistema oscilante, el voltaje se

adelanta a la corriente, y forma una carga inductiva, lo que significa que el factor de potencia es más pequeño que la unidad, causando que la absorción de potencia sea pequeña.

Si los impulsos para mantener la oscilación están arriba de la frecuencia de resonancia, de tal manera que la corriente "adelanta" a el voltaje, la carga es capacitiva y la absorción de potencia de nuevo es menor.

Figura 35
Sistema oscilante eléctrico



VIII.1.- DISPOSITIVOS PARA LA GENERACION DE CORRIENTE DE MEDIA FRECUENCIA (CONVERTIDORES DE FRECUENCIA)

Para energizar los hornos de inducción con corriente de alta y media frecuencia, se utilizan dispositivos conocidos como convertidores.

Los convertidores pueden ser rotatorios o estáticos.

Convertidores Rotatorios

Se usan dos tipos de máquinas rotatorias: Equipos de motor generador, y equipos de inductor alternador, producen corriente de alta frecuencia.

Convertidores estáticos

Tenemos los triplicadores de frecuencia.

La elevación de frecuencias de 60 Hz a 180 Hz, se efectúa por medio de la acentuación de la 3a. armónica inherente a todos los transformadores, suprimiendo la onda fundamental.

Con los recientes avances de semiconductores de estado sólido, ha sido posible el uso de convertidores estáticos, capaces de manejar alta potencia con relativa alta eficiencia.

Un particular convertidor estático, se basa en un aparato conocido como inversor.⁷⁶

El convertidor en consideración consiste de un rectificador equipado con diodos, que producen la corriente directa necesaria para el inversor.

El diodo semiconductor es un conductor unilateral, lo cual significa que los electrones se mueven fácilmente por el dispositivo en una sola dirección.

El inversor, por medio de tiristores, conecta alternadamente a sus terminales de salida, impulsos de energía requeridos para mantener las oscilaciones del sistema horno-capacitores.

El tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR) es similar a un rectificador ordinario, excepto que su característica de rectificación puede ser controlada.

El SCR puede describirse como dos diodos unidos uno tras otro, si se establece una tercera conexión al SCR (la compuerta), se producirá la acción de control del rectificador.

En términos sencillos, el tiristor puede conducir o no, y no conduce hasta que la señal correcta llegue a su compuerta. Esto se conoce como disparo.

El circuito básico del inversor se muestra en la figura (36).

Los conductores de corriente directa se conectan a sendos conductores de corriente alterna por medio de los tiristores, los cuales actúan como interruptores⁷⁷.

Al dispararse el par de tiristores que conectan la terminal U del inversor, el otro par que alimenta la terminal V deja de conducir y viceversa. Estos impulsos alternos de energía en las terminales U y V del inverso podrían ser el símil eléctrico de los "aventones" a un columpio oscilando.

Los disparos de las compuertas de los tiristores son controlados por señales en forma de pulsos de corriente provenientes desde un circuito de disparo.

La duración de estos pulsos⁷⁸ está determinada por la oscilación del sistema bobina del horno-capacitores, de tal manera que el circuito de disparo es síncrono con las oscilaciones del sistema bobina-horno, los cuales, dentro de los límites de control, se aproximará siempre a la frecuencia de resonancia del sistema en oscilación.

El inversor, dentro de los límites de tiempo de recuperación de sus tiristores, produce corriente a cualquier frecuencia determinada por la frecuencia de los pulsos de corriente de las compuertas de los tiristores.

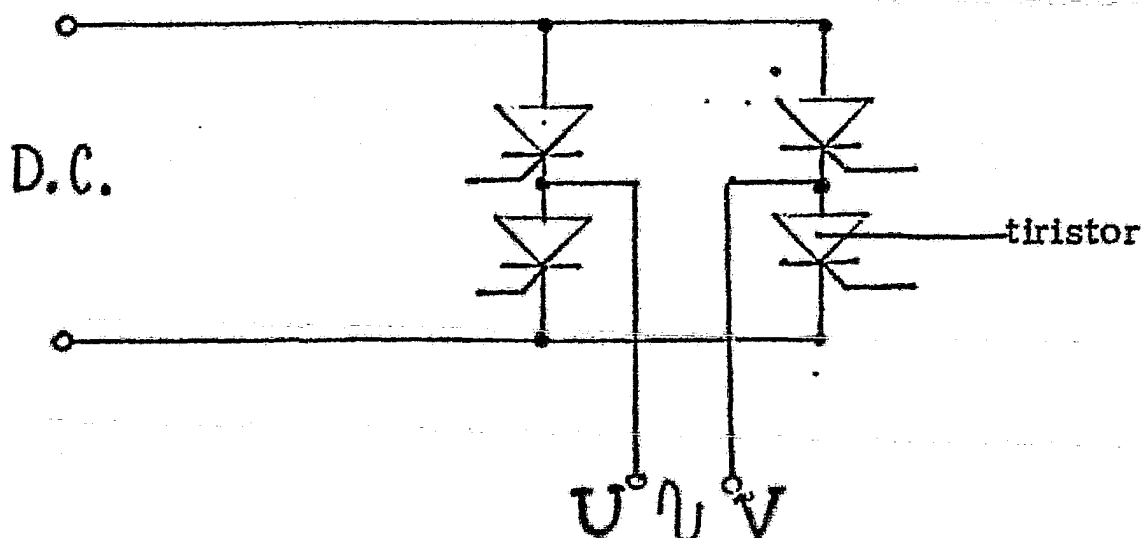
El inversor producirá en las terminales U y V, un voltaje de onda cuadrado,⁷⁷ y si alimenta una carga resistiva, la corriente fluyente será también de onda cuadrada y debido a los límites impuestos por el tiempo de recuperación de los dispositivos, se introduce una cierta pendiente a los lados de la onda cuadrada.

La bobina del horno y los capacitores, ya sean conectados en serie o en paralelo a las terminales U y V del inversor, forman un sistema oscilante en el cual es fundamental la corriente y el voltaje de onda sinusoidal.⁷⁹

El sistema bobina del horno-condensadores, se puede conectar en paralelo o en serie a las terminales U y V del inversor. Fig. 37.

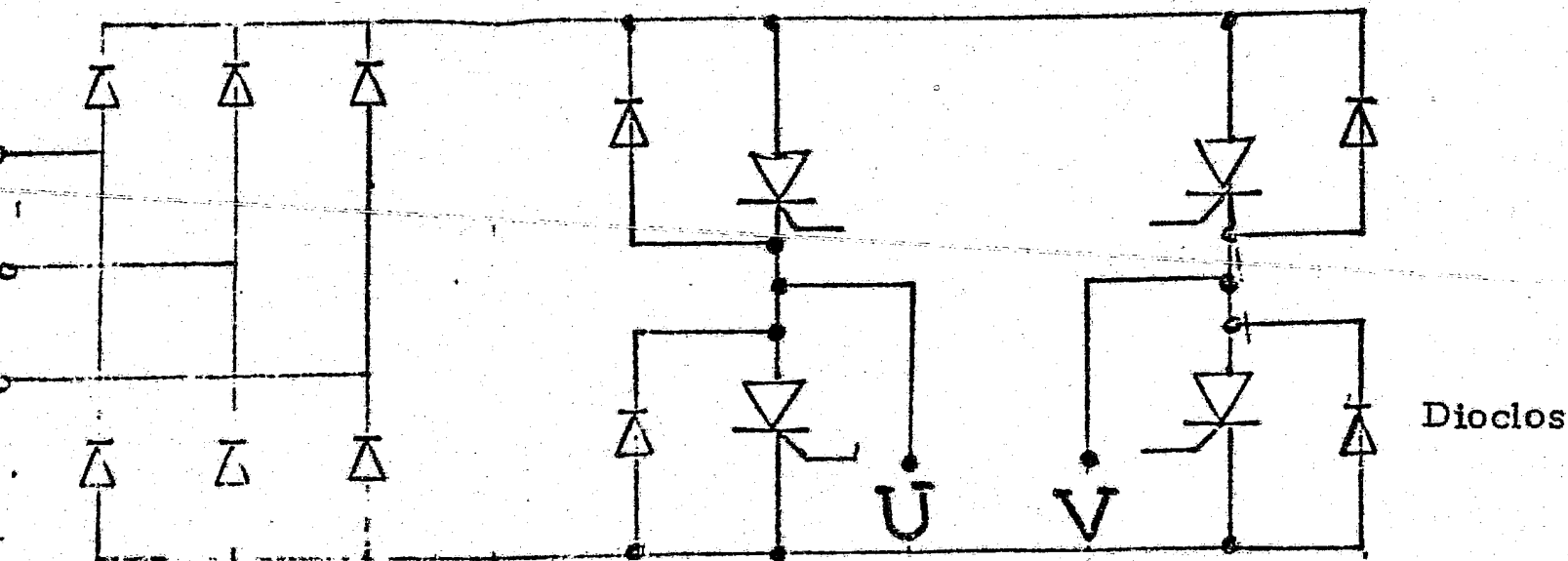
Figura 36

Inversor elemental



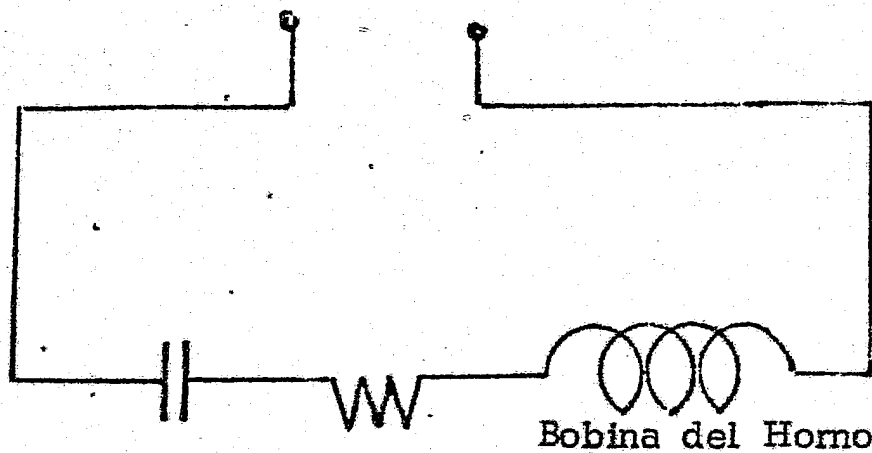
CONVERTIDOR DE FRECUENCIA ESTÁTICO

INVERSOR D.C. - A.C.



rectificador

Sistema oscilante en serie



Bobina del Horno

Sistema oscilante en paralelo

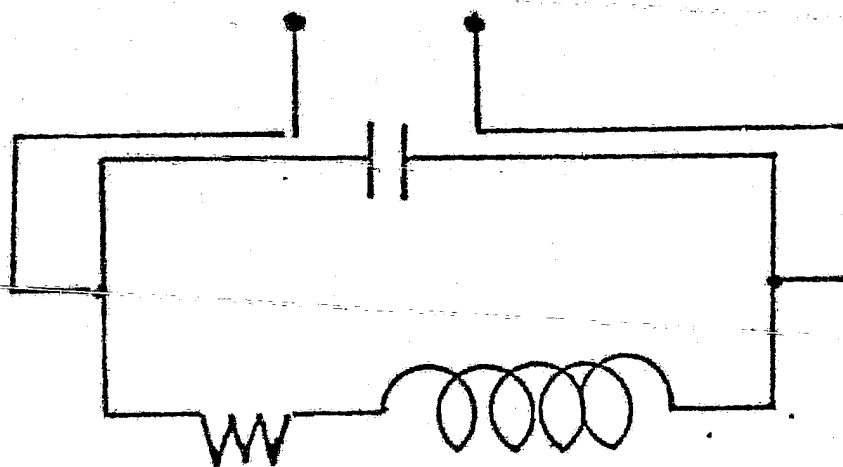


Figura 37

Comparación entre un convertidor estático basado en el inversor de tiristores y el de un convertidor rotatorio. ^{80,81}

El horno de inducción sin núcleo, presenta una carga con impedancia variable, debido a sus componentes resistiva e inductiva, durante el curso de la fusión de la carga, variando de igual modo la potencia absorbida.

Ya que un convertidor rotatorio, proporciona un voltaje fijo, generando corriente a frecuencia fija, no puede entregar la potencia total requerida, de tal manera que es necesario el ajuste continuo del factor de potencia por medio de un banco de capacitores.

Cuando se trabaja con crisol lleno, la máxima eficiencia lograda en estas unidades es de 85 a 87 % y en promedio con un 80 a 85 %.

En un inversor, la frecuencia es flexible, ajustándose a la frecuencia de resonancia formada al ir cambiando la inductancia de la bobina del horno, de tal forma que una sintonización precisa de los capacitores se suprime en las unidades estáticas.

La máxima eficiencia lograda es de 90 a 95 %.

IX EL HORNO DE INDUCCION A VACIO DEL INSTITUTO DE
INVESTIGACION EN MATERIALES

IX EL HORNO DE INDUCCION A VACIO DEL INSTITUTO DE INVESTIGACION EN MATERIALES

El conjunto consiste de una unidad generadora de corriente de media frecuencia, un equipo generador de vacío, un sistema de enfriamiento y la cámara de vacío que contiene a la bobina de inducción. Figura 38

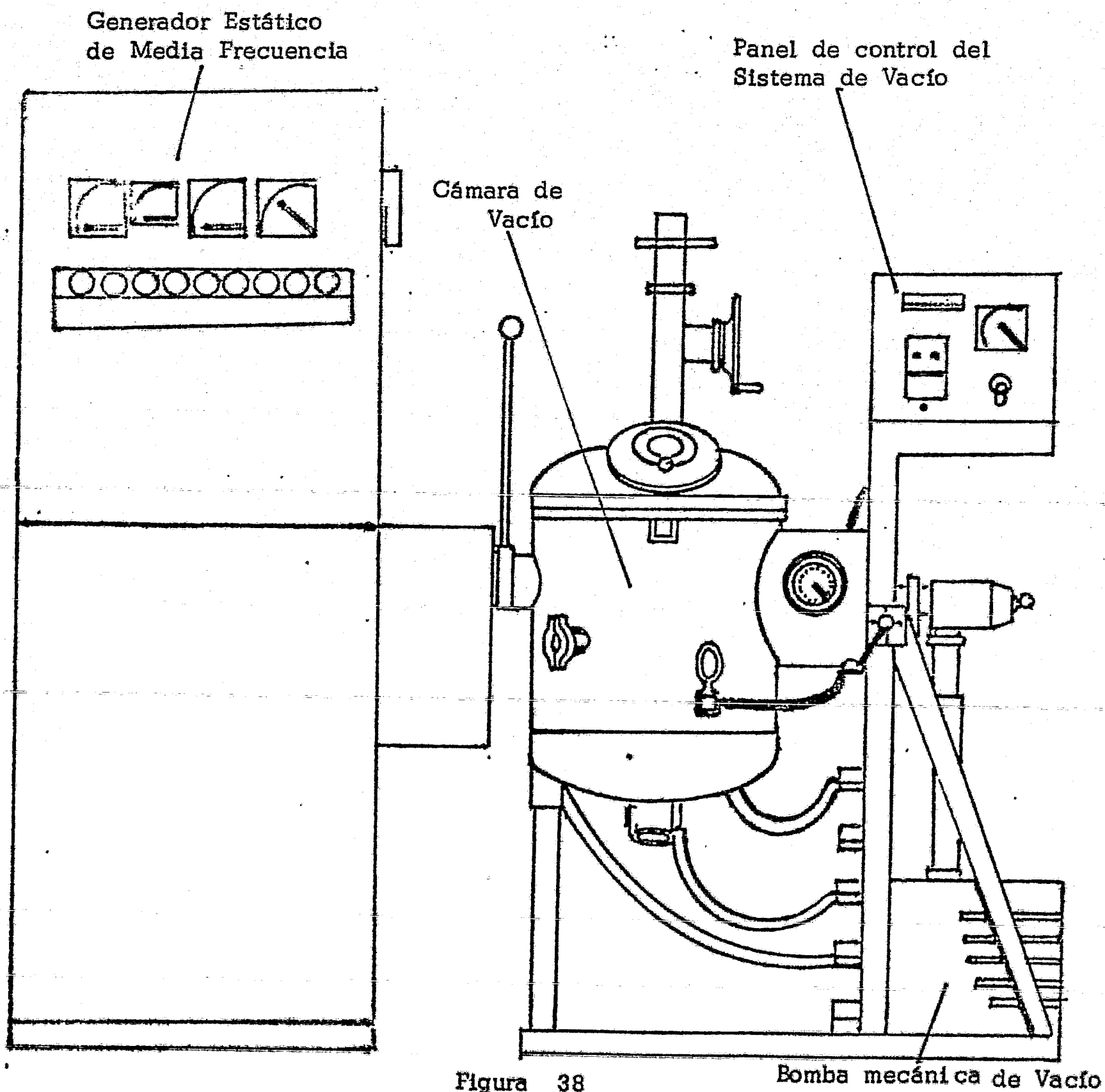


Figura 38

Bomba mecánica de Vacío

IX.1.- GENERADOR ESTÁTICO DE MEDIA FRECUENCIA

Este generador fue fabricado por la firma alemana EMA ELEKTRO MASCHINEN KG/ Schultze & Co.

Tipo: HU 264

Características técnicas:

Potencia Nominal: 40 kw

Frecuencia Nominal: 4 - 3.5 kHz

Voltaje Nominal: 250 Volts

Todos los elementos eléctricos de que consta esta unidad, están contenidos dentro de un gabinete con forma de prisma rectangular.

El diagrama simplificado (A) es un resumen de los circuitos principales que componen al generador, muestra los contactores, dispositivos eléctricos de potencia y los circuitos eléctricos de control.

El generador estático está formado por un rectificador trifásico, un convertidor de frecuencia y un transformador de media frecuencia.

El rectificador trifásico proporciona corriente directa al convertidor de frecuencia del generador. Este convertidor, consiste de un inversor de corriente directa-corriente alterna formado con tiristores (SCR-rectificador controlado de silicio-).

Los dispositivos de potencia del convertidor, están colocados en una placa aislada en el fondo del compartimiento trasero del

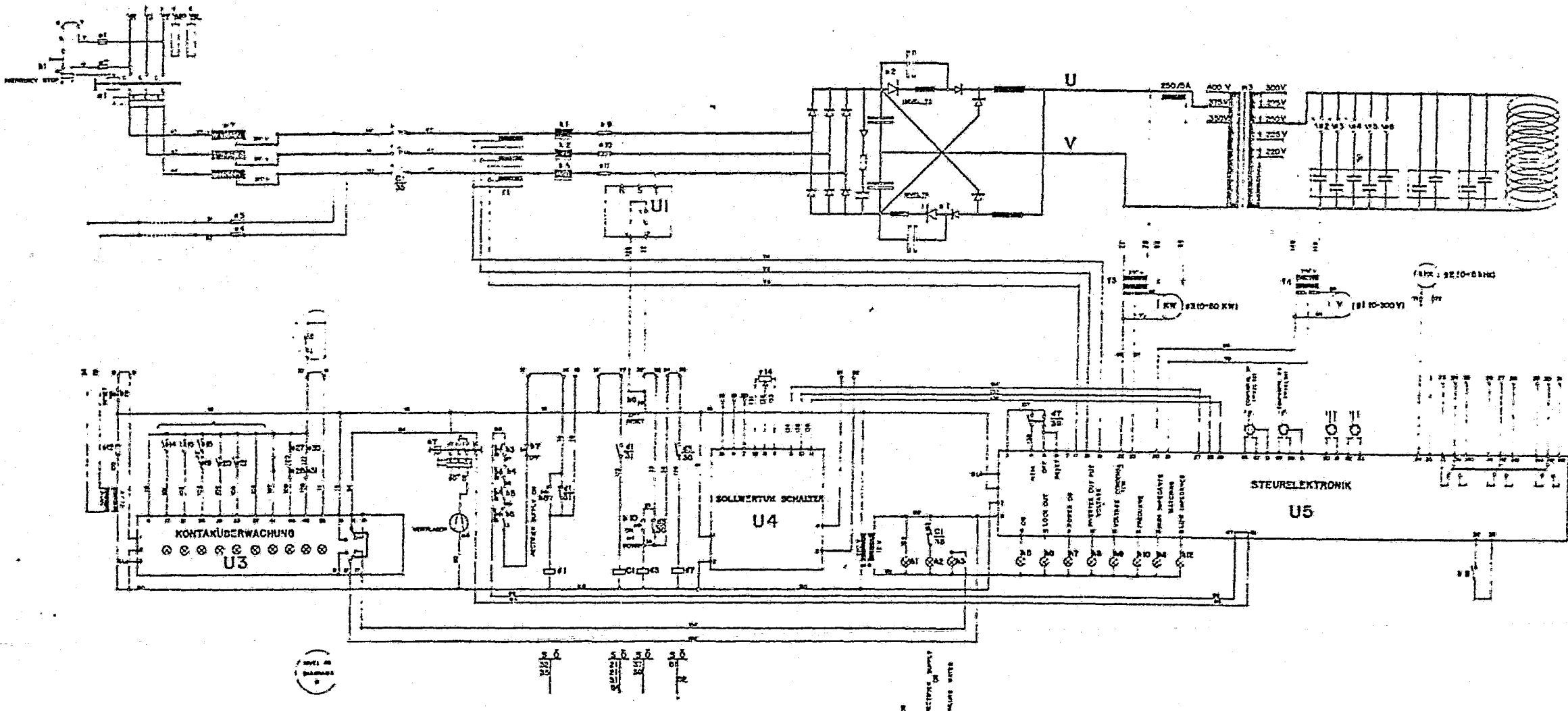
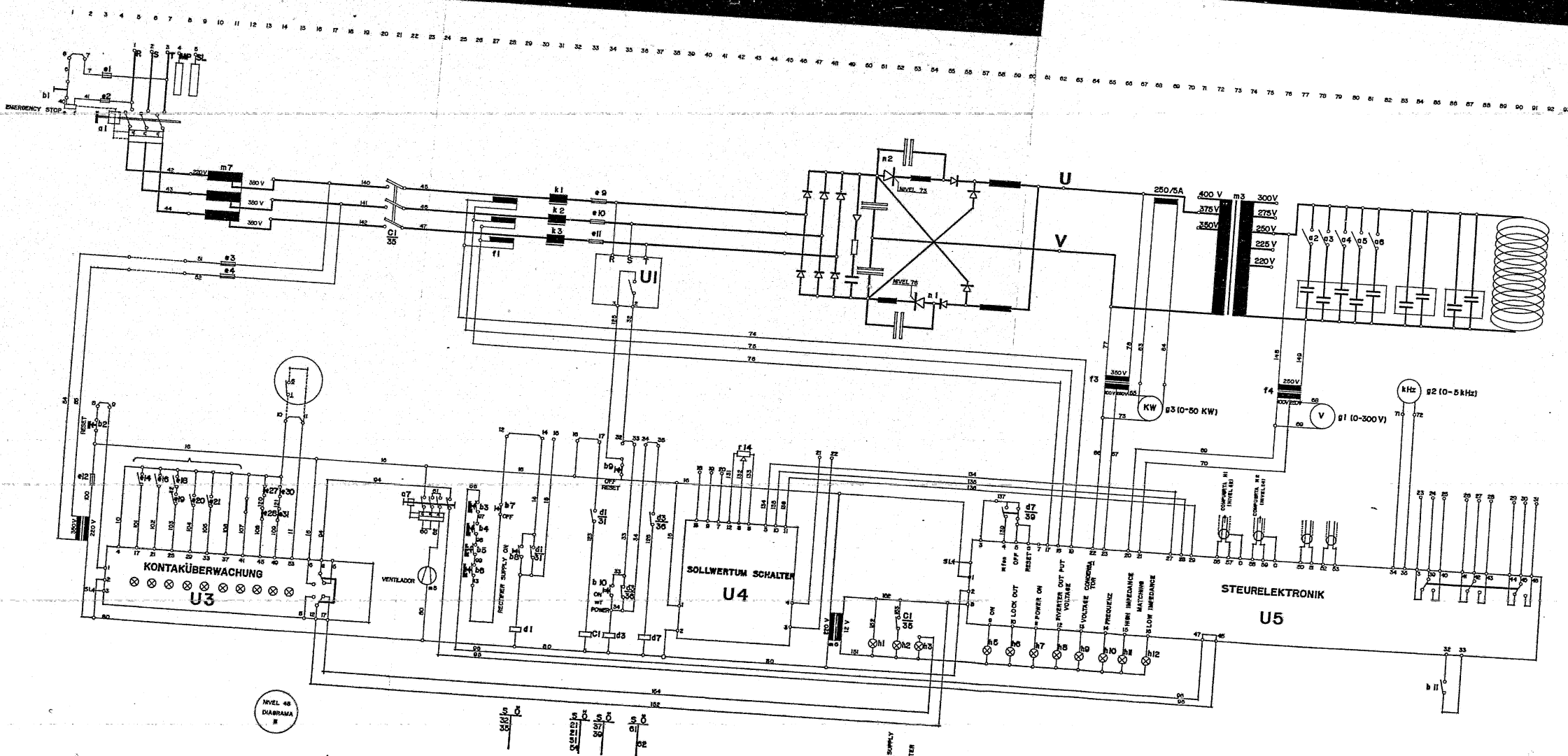


DIAGRAMA A TESTIS PROFESIONAL	ELIAS CARRILLO BARUELOS	CIRCUITO SIMPLIFICADO DEL GENERADOR
	FACULTAD DE DUMCA	DE MEDIA FRECUENCIA



AVEL 48
DIAGRAMA
#

DIAGRAMA A
 TESIS PROFESIONAL
 ELIAS CARRILLO BARUELOS
 FACULTAD DE COMUNICACION
CIRCUITO SIMPLIFICADO DEL GENERADOR DE MEDIA FRECUENCIA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 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

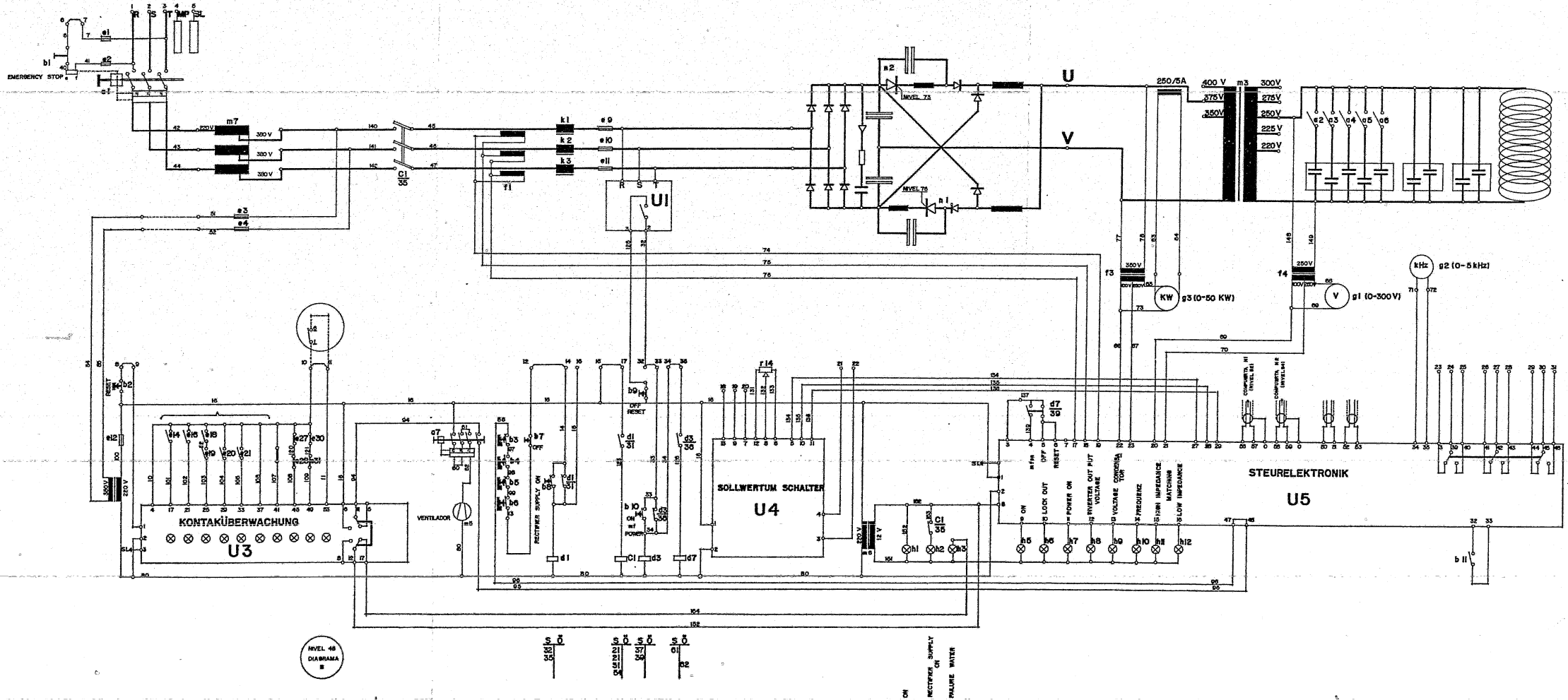


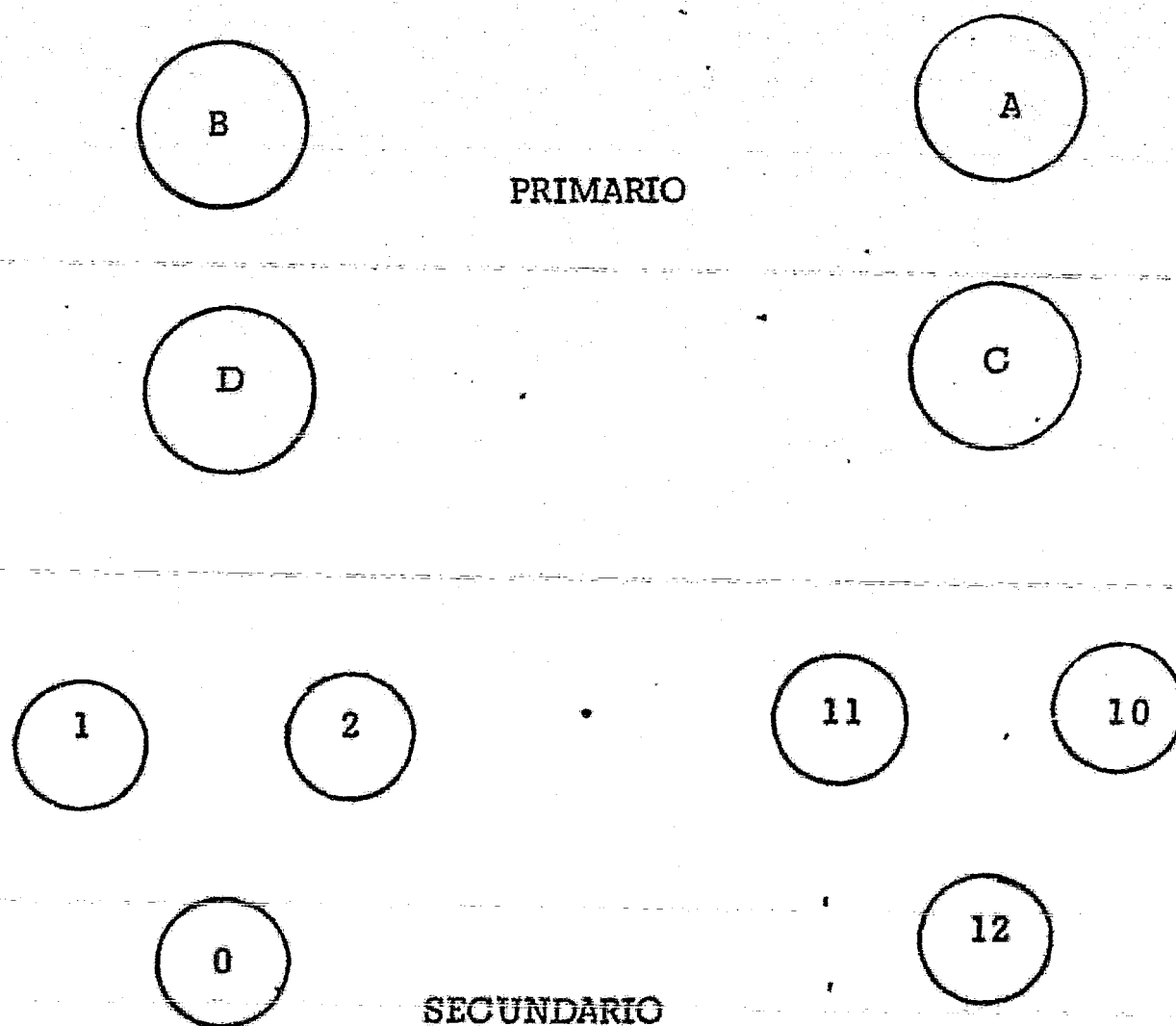
DIAGRAMA A	ELIAS CARRILLO BARUELOS	CIRCUITO SIMPLIFICADO DEL GENERADOR
TESIS PROFESIONAL	FACULTAD DE QUIMICA	DE MEDIA FRECUENCIA

gabinete. Se llega a éstos, abriendo la puerta lateral izquierda del gabinete.

A las terminales de salida del inversor, van conectados los bornes del arrollamiento primario del transformador de media frecuencia m3.

Este transformador está en la parte derecha del fondo del gabinete. Encima de éste, están varios bornes correspondientes a las derivaciones del primario y secundario, según la figura 39.

Figura 39



Con esta disposición se tiene cierta flexibilidad en la conexión de el transformador (TAPPING). Las relaciones de transformación posibles son las que a continuación se dan:

Primario/Secundario	Volts primario /Volts secundario
A-B/0-12	400/300
A-B/1-12	400/275
A-B/1-11	400/250
A-B/2-11	400/225
A-B/2-10	400/200
A-C/0-12	375/200
B-C/1-12	375/275
B-C/1-11	375/250
B-C/2-11	375/225
B-C/2-10	375/200
C-D/0-12	350/300
C-D/1-12	350/275
C-D/1-11	350/250
C-D/2-11	350/225
C-D/2-10	350/200

Al secundario de este transformador, están conectadas en paralelo los capacitores de media frecuencia y la bobina del horno de inducción, formando un sistema oscilante en circuito "tanque".

Los capacitores están colocados en el fondo, en la parte anterior del gabinete. Existen dos bancos fijos de capacitores y otro

disponible para compensación. Se encuentran estos capacitores abriendo la puerta inferior frontal del gabinete. Las dos unidades fijas poseen cada una dos celdas de 90 kVAR y la unidad disponible tiene tres celdas de 45 kVAR, una de 22.5 kVAR y otra de 11.25 kVAR. Estas celdas pueden conectarse (o desconectarse) destornillando su respectiva "Tuerca Conectora" (a2, a3, a4, a5, a6) las cuales están colocadas en una barra aislante, encima de los bornes de este capacitor disponible.

Los capacitores están conectados a la bobina, por medio del BUS BAR, la cual es una placa ancha de cobre, que está suspendida en la parte media del cubículo y que sale al exterior del gabinete para terminar en la bobina de inducción.

La bobina de inducción que es propiamente el Horno de Inducción, es un tubo helicoidal de cobre que completa un total de 7 vueltas. El diámetro interior de la bobina es de 17 cm. y la altura de 20 cm.

Los elementos que componen al inversor C.D.-C.A., el transformador de media frecuencia, los capacitores de media frecuencia y el "bus bar" son enfriados por agua. El circuito de enfriamiento de cada uno de los dispositivos, es alimentado desde un conducto común situado en la parte inferior-posterior izquierda del gabinete. El agua se desaloja al exterior del gabinete por la parte inferior-posterior derecha. Existe dentro del gabinete un ventilador que hace circular el aire interno. Este ventilador está colocado en la parte central superior. Se tiene acceso a él abriendo la puerta lateral izquierda del gabinete.

Lo anterior corresponde a la parte de potencia de la unidad electrónica. La unidad además posee un control de contactos ("U"), situados en la pared interior opuesta a la puerta frontal superior del gabinete ("puerta de servicio"), junto a éstos está el interruptor del motor del ventilador (a7), los relevadores o contactores auxiliares (d1, d3, d7), batería de fusibles (e1, e2, e3, e4, e12, e13) y el block de terminales (ver distribución fig. 40).

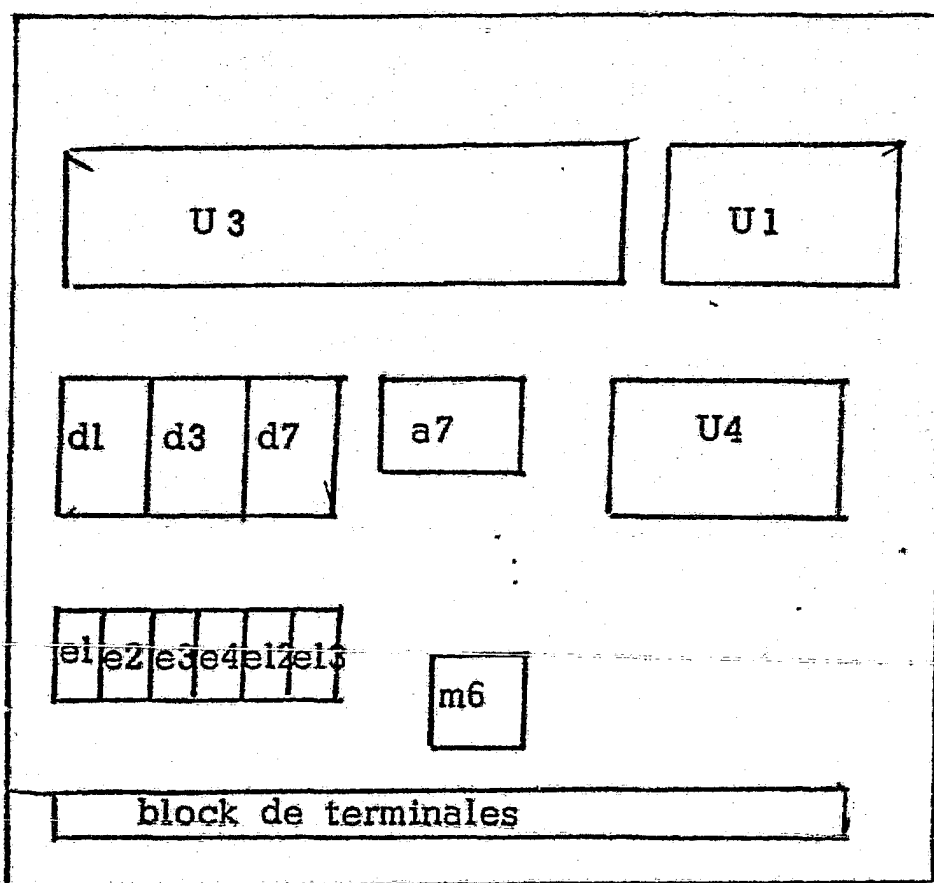


Figura 40

El control electrónico está formado por módulos electrónicos de circuitos impresos. Estos elementos están suspendidos en un soporte común, colocado en el lado interior de la puerta de servicio.

Los medidores (de frecuencia, voltaje y de potencia), los botones para operación y focos de señales, están montados sobre el exterior de la puerta de servicio.

IX.2.- MANUAL PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD ELECTRONICA DE MEDIA FRECUENCIA

I.- Conecte el "Main Switch" (autocontactor a1) a la posición "ON" (+)

(Se ilumina la lámpara blanca "MAINS" h1).

Este interruptor es una palanca amarilla colocada en la parte superior izquierda de la pared lateral derecha del gabinete.

El autocontactor a1 conecta la unidad de media frecuencia con la alimentación de la red de corriente alterna.

En la línea de alimentación está adaptado el botón b1 "EMERGENCY STOP OFF", al oprimirse este botón, a1 no puede conectarse.

Este botón se usa en paradas de emergencia como su nombre lo indica.

II.- Se oprime el botón b8 "rectifier supply on".

En este caso se conecta el contactor auxiliar d1. Este contacto hace funcionar el contactor trifásico de potencia c1.

Se prende el foco h2 "on" (rectifier supply).

En el caso de que no prenda el foco h2 "on", el contactor auxiliar no se cierra, esto se debe a que una de las alarmas impide su funcionamiento.

Este proceso se lleva a cabo por medio de las unidades de

controles de contactos "Control Contactor": U3, U1, U5.

Control de Contactor U3 "KONTAKTUBERWACHUNG"

La indicación de la falla se indica por medio del foco h3 "failure water".

Este control recibe señales de los switches de flujo, localizados por fuera, en la parte posterior del gabinete y de termoswitchs en el interior del gabinete.

La unidad de protección U3, "dispara" la señal de falla a la lámpara h3 "failure water" y mantendrá esta indicación aún después de la desaparición del desperfecto, hasta que se restablezca la señal por medio del botón b2 "reset".

PRECAUCION: El botón b2 debe ser oprimido inmediatamente después que la señal de desperfecto aparezca (como máximo 2 segundos).

Si persiste la señal, los desperfectos en este caso se pueden deber a:

* Un suministro inadecuado de agua de enfriamiento, la cancelación de la señal por medio de b2 se imposibilita, verifique si el medidor de presión indica más de 3 bar (como máximo 6 bar), o si el filtro que está atornillado en la entrada del gabinete está atascado o barrido.

Los interruptores térmicos se desconectan, la cancelación por medio de b2 no se lleva a cabo, verifique si la temperatura del agua de enfriamiento en la entrada al cubículo o la temperatura del aire dentro del gabinete esté arriba de 40°C.

Control U5 "STEURELEKTRONIK"

Este control es una unidad de enlace entre las tabletas de circuitos impresos del control electrónico, focos de señales, contactos y terminales de la unidad de media frecuencia. Está colocado en la parte inferior del soporte del control electrónico (en el lado interior de la puerta de servicio).

En este caso las fallas principales se pueden deber a:

(Los siguientes remedios deben realizarse con el generador desenergizado).

* El switch protector a7 del motor m5, se bota. Vuelva a reconectarlo, si se vuelve a botar, quizás el motor esté bloqueado.

El switch (botones rojo y negro) se encuentra en el panel de control de contactos.

* La falla se debe al control electrónico.

Abra la puerta de servicio y verifique si todas las tabletas de los circuitos impresos están colocados en su respectiva clavija (plug), especialmente la tableta u7 (regulador de potencia).

Hay que verificar que las terminales 47 y 48 del control

eléctrico U5, (que corresponde a las salidas 16 y 17 de la tableta u7) estén cortocircuitadas.

* Las puertas del cubículo están abiertas.

Si lo están, los switchs b3 a b6 se interrumpen. Estos interruptores están colocados en las esquinas superiores derechas de las puertas del gabinete.

* Las terminales 12 y 14 no tienen conexión (conectan el botón b7 "off") también tienen que estar conectadas las terminales 6 y 7, 8 y 9, 10 y 11, 32 y 33. Si solamente el contactor auxiliar d1 se excita, más no el contactor de potencia c1, es que no existe conexión de las terminales 16 y 17.

Estas terminales se encuentran en la parte inferior del panel de el control de contactos de la unidad de Media Frecuencia.

III.- Ya que esté activo el contactor c1 (cuando se prenda el foco h2 "on" (rectifier supply). La perilla del potenciómetro r14 se gira hacia un mínimo (hacia la izquierda en la perilla de control colocada sobre la puerta de servicio).

Este dispositivo sirve como auxiliar en el control del voltaje de salida del inversor, desde un valor mínimo al valor nominal, con el fin de dar un control de potencia más flexible, por medio del control U4 " conmutador del valor nominal".

Este aparato, controla las señales del módulo electrónico U5 y r14, (regulador de voltaje). La tableta u5 debe tener su switch (color blanco) en la posición 2.

IV.- Se oprime el botón b10 "ON" (mf power).

Se prenden las lámparas h5 "on" y la lámpara h7 "power".

En este caso se acciona el contactor auxiliar d3, que permite la energización al inversor C.A. - C.D.

Quando no cierre el contactor auxiliar d3, se puede atribuir la falla a la unidad de protección trifásica U1. La inspección de las anomalías se hacen de nuevo con el generador desenergizado.

Unidad de protección trifásica U1 "DREIPHAENUBERWACHUNG":

Esta ejerce control por los fusibles del rectificador, de tal manera que si se llegan a quemar, impide el funcionamiento de el contactor auxiliar d3. Estos fusibles (e9 a e11) están sobre el rectificador. Se tiene acceso a este último, abriendo la puerta lateral derecha del gabinete. Ya con el funcionamiento normal de el contactor d3, el medidor de frecuencia tiene que indicar alrededor de 2 kHz y el voltmetro y medidor de potencia indicar lecturas pequeñas.

V.- Se gira la perilla del potenciómetro gradualmente hacia un máximo.

La frecuencia aumenta entre 3.5 y 4 kHz, el voltaje y la po

tencia tienen que lograr los valores nominales (en práctica óptima).

El voltaje aproximadamente debe estar entre 200 y 250 Volts.

VI.- Para desconectar la potencia, es suficiente operar el botón b9 "off and reset".

EN NINGUN CASO DEBE USARSE EL CONTACTOR DE POTENCIA c1 "off" botón b7) PARA ESTE PROCESO. Un número muy alto de "apagadas" con el botón b7 (aproximadamente cada minuto) podría averiar el rectificador.

El contactor de potencia b7 "off" deberá usarse solamente si se prevee un tiempo prolongado de parada.

La señal de los pulsos de disparo de los tiristores que energizan los dispositivos de potencia, son proporcionadas por la tableta u10 "switching logics" y dichas señales se amplifican por la tableta u11.

El encendido y la cancelación de estas señales se llevan a cabo respectivamente por b10 "on" y por b9 "off and reset".

En el caso de que no estén bien sincronizados los disparos a los tiristores, de tal forma que no se bloqueen a su debido tiempo, la tableta u10 interrumpe el funcionamiento del contactor auxiliar d3, hace encender el foco h6 "lock out". Se restablece el funcionamiento oprimiendo el botón "off and reset" b9.

En el caso de que no se pueda lograr la potencia nominal

(40 kw) la señal del foco h7 "Power" se extingue.

Los focos h7 a h8 son auxiliares en la optimización del funcionamiento del horno.

El problema radica en lograr el mejor acoplamiento posible (MATCHING) entre las derivaciones del transformador de media frecuencia (TAPPING) y la sintonización de los capacitores de media frecuencia (TUNNING). Este proceso se lleva a cabo manualmente y con la unidad de Media Frecuencia desenergizada.

La manipulación de b11 "TANK-CIRCUIT FREQUENCY" puede ser usado como ayuda en la sintonización de los capacitores compensadores.

Al hacer esto, desconecte la potencia (paso VI), gire la perilla a la posición "tank-circuit frequency" y gire la perilla del potenciómetro r14 a un mínimo (paso III), siguiéndose con los pasos IV y V.

La frecuencia debe estar entre 3 y 4 kHz.

Si la frecuencia es menor de 3kHz - RESTE CAPACITORES

Si la frecuencia es mayor de 4kHz - AGREGUE CAPACITORES

La selección de las derivaciones del transformador (TAPPING), consiste en proporcionar altas razones de transformación (Seleccionar un voltaje pequeño en el devanado primario junto con un voltaje relativamente alto en el secundario) y relaciones pequeñas de transformación (selección de un voltaje alto en el arrollamiento del primario y

un voltaje pequeño en el secundario) al transformador de media frecuencia.

INDICACIONES DE LOS FOCOS h8 a h12

foco h10 "frequency":

El indicador de frecuencia está a 4 kHz.

Si el medidor de voltaje es cero, la potencia muy baja, entonces la frecuencia de resonancia el sistema oscilante es demasiado alta.

Tienen que adaptarse más capacitores de compensación para disminuir la frecuencia de resonancia del sistema oscilante, lo suficiente para tener una lectura entre 4 y 3.5 kHz.

foco h8 D.C.-A.C. "INVERTER OUTPUT VOLTAGE"

El voltaje sobre el primario del transformador se limita a un voltaje máximo permisible.

SOLUCION: Seleccione una relación alta para el transformador.

foco h11 "MATCHING HIGH IMPEDANCE"

El tiempo de recuperación de la tableta u6 (regulador de voltaje) limita la frecuencia debido a que el sistema oscilante toma energía con una muy baja cantidad de corriente.

En este caso, algunas veces también el foco "VOLTAGE CON-

DENSADOR" se ilumina.

SOLUCION: Seleccione una razón pequeña para el transformador, tan grande como para que se logre potencia completa entre 3.5 y 4 kHz.

foco h 9 "VOLTAGE CONDENSADOR"

El voltaje de los condensadores de media frecuencia está limitado a un valor máximo.

SOLUCION: Seleccione una relación pequeña para el transformador.

Durante el funcionamiento del homo puede no lograrse la potencia requerida entre 3.5 y 4 kHz, esto se debe a que el sistema oscilante muestra una muy alta impedancia, la frecuencia puede ser posteriormente reducida, adicionando capacitores de compensación. Con este medio la carga de la bobina absorbe más corriente.

Esta posibilidad está limitada a la cantidad máxima del banco de capacitores incorporado a la unidad de Media Frecuencia, sin embargo, cualquier cantidad de capacitores puede añadirse para proporcionar más corriente a la bobina.

foco h 12 "MATCHING LOW IMPEDANCE".

El indicador de frecuencia marca 3.5 a 4 kHz. La corriente tomada por la carga es demasiada alta.

SOLUCION: Dar una razón alta al transformador.

En ocasiones, podrían algunos focos prenderse simultáneamente, por ejemplo, el foco h11 "MATCHING HIGH IMPEDANCE" y 12 "MATCHING LOW IMPEDANCE". Cuando se iluminan a la vez, no indican discrepancia, sino que ambos dispositivos están activos, justamente cuando uno está actuando, el segundo está por hacerlo.

Este caso especial indica que un óptimo desempeño se está llevando a cabo. El horno está exactamente entre alta impedancia y baja impedancia, y esto es igual a la carga nominal.

Se debe acertar cuidadosamente en la sintonización óptima adecuada cuando se lleva a cabo con esta condición de operación, donde la máxima absorción de potencia es necesaria, por ejemplo, con el horno caliente y metal fundido.

EX.3.- SISTEMA DE VACIO

El equipo fue construido por la firma LEYBOLD-HERAEUS; consiste de un panel de control, una bomba de vacío y una cámara de vacío. Los esquemas 41 (a y b) muestran la colocación de los accesorios adaptados a la cámara de vacío.

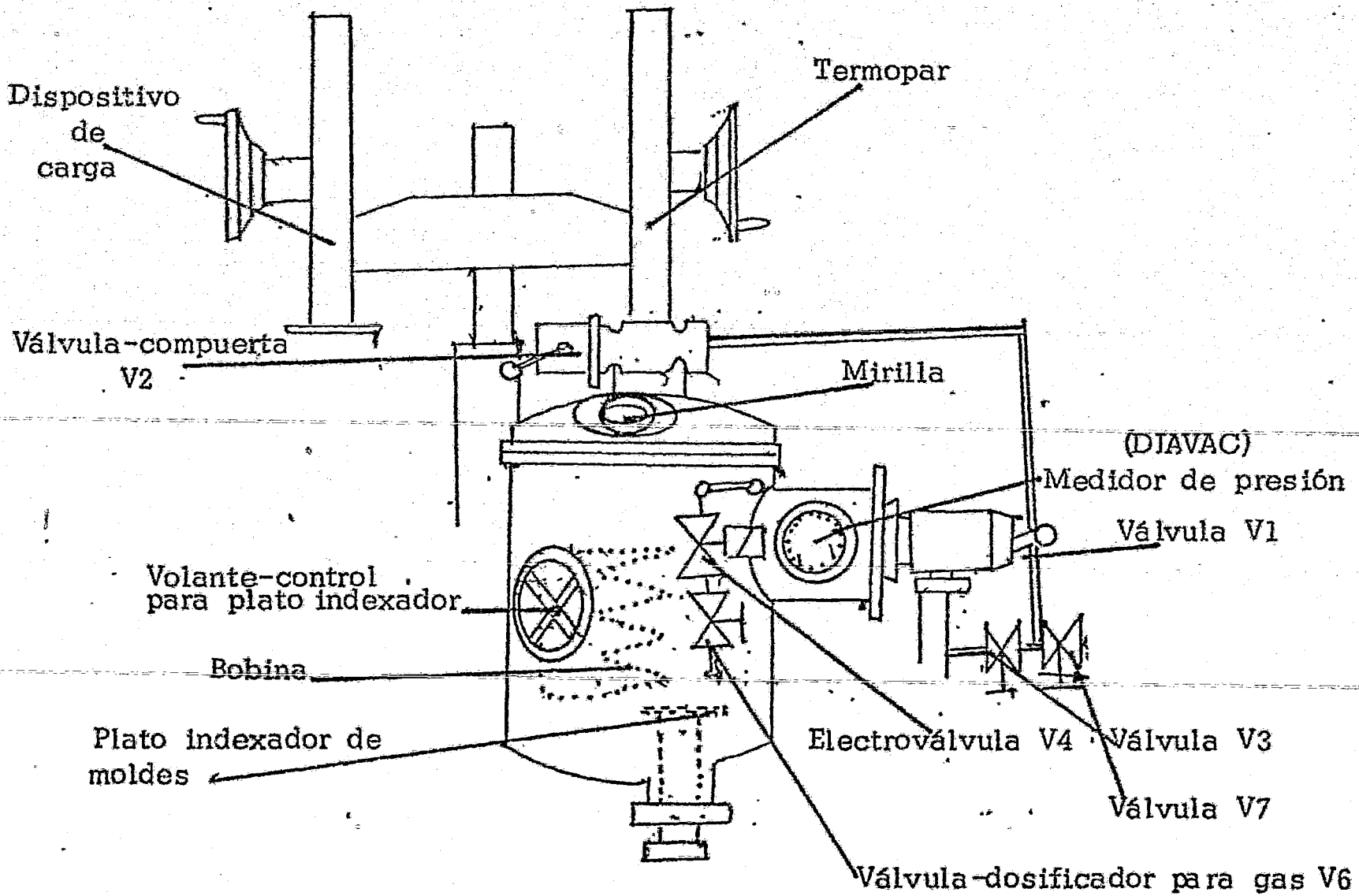


Figura 41 a

VISTA FRONTAL DE LA CAMARA DE VACIO

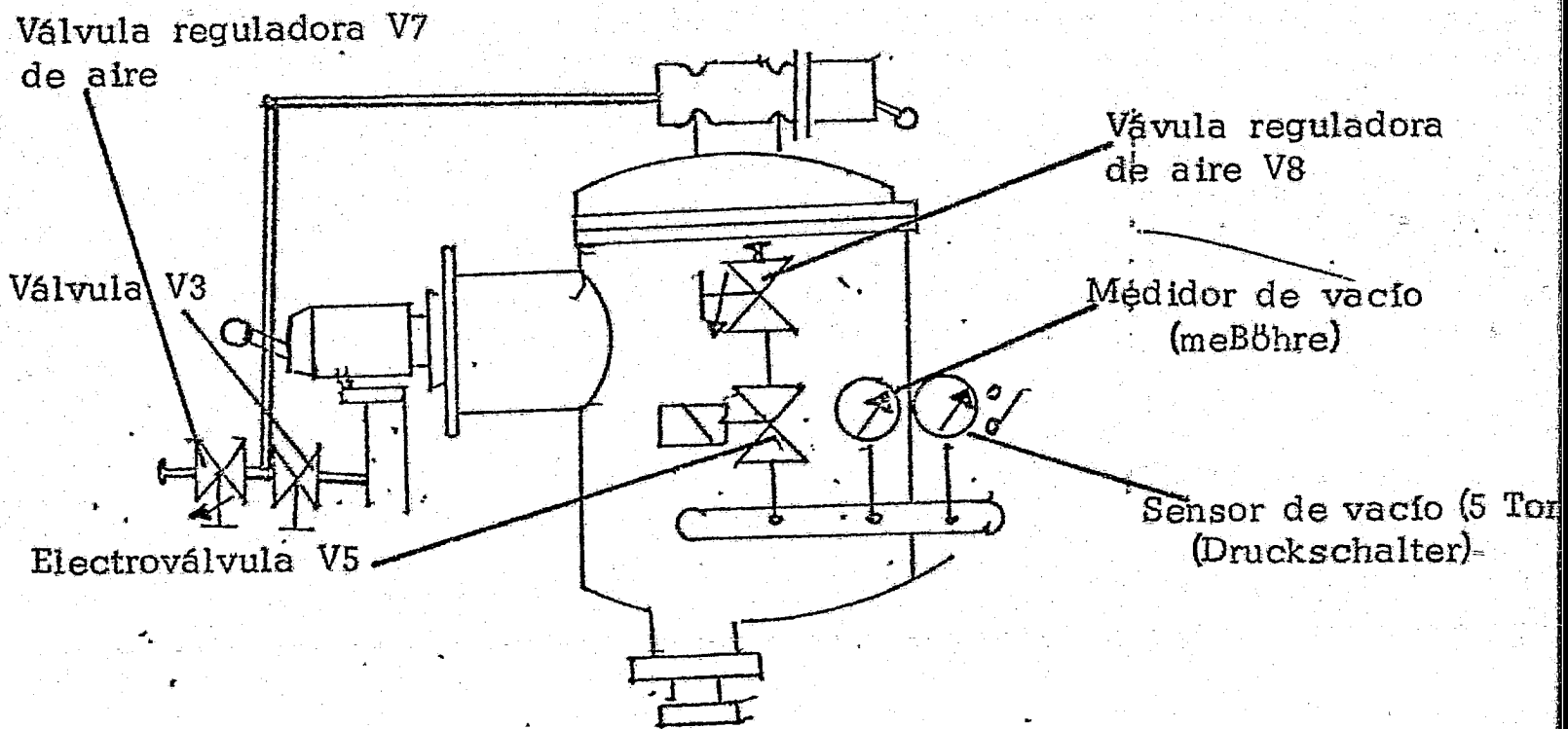
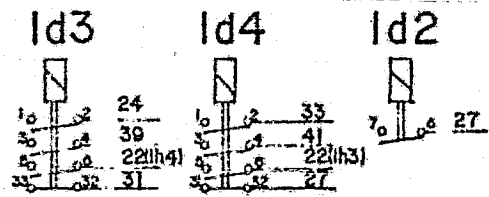
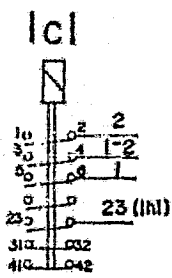
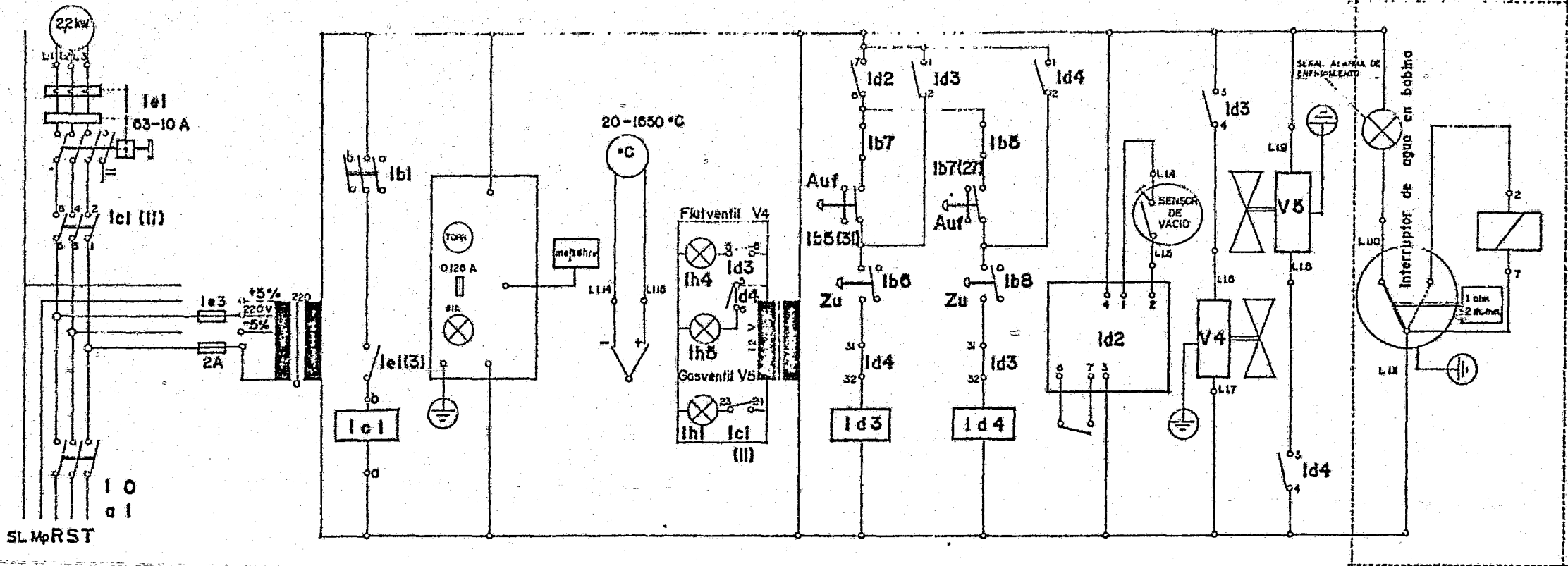


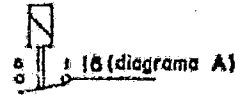
Figura 41 b

VISTA POSTERIOR DE LA CAMARA DE VACIO

El diagrama B., muestra los contactores, aparatos de medición y circuitos de control del sistema de vacío.



Ib5 Fluventil V4 Ib7 Gosventil V5



Para la producción de vacío, el sistema dispone de una bomba rotatoria de paletas (TRIVAC).

Especificaciones del sistema de vacío

Velocidad de bombeo (realizada entre 760 y 100 torr)	60 m ³ /hr
Volúmen de la cámara	115 lt
Tiempo de evacuación de la cámara	10 minutos
Presión final en la cámara	2.5 (10) ⁻² mbar

Esta presión corresponde a la región de vacíos medios (10⁰-10⁻³ mbar)

La medición de presión se efectúa con el DIAVAC, su rango de medición es de 1 a 100 mbar. Presiones arriba de 1.5 bar ejercidas durante largo tiempo pueden dañar este instrumento.

El medidor de vacío (meßöhre) posee un rango de operación es de 10⁻³-1000 mbar. Las mediciones de este aparato pueden ser leídas en el TERMOVAC, cuya carátula se extiende de 10² torr hasta 10⁻³ torr.

Procedimiento para Evacuar la Cámara de Vacío

- * Se deja en posición abierta V1
- * Se dejan en posición cerrado V2, V3, V6, V7, V8
- * Se conecta el interruptor general al (Hauptschalter)

- * Para energizar el motor de la bomba de vacío y el THERMOVAC, se conecta el interruptor 1b1 (posición EIN) y el interruptor 1e1 (botón negro), el orden de activación es indistinto.
- * Se deja funcionando la bomba hasta lograr la presión de $2.5(10)^{-2}$ mbar
- * Se cierra la válvula V1
- * Se desconecta el interruptor 1b1 (posición AUS) y el interruptor 1e1 (botón rojo).

Para la admisión de gas o aire a la cámara, se utilizan las electroválvulas "Gasventil" y "Flutventil", estas abren oprimiendo su respectivo botón "AUF" y se desconectan con su botón "ZU". El funcionamiento simultáneo de estos dos dispositivos se imposibilita.

Cabe agregar que estas válvulas funcionan solamente hasta lograrse en la cámara de vacío la presión de 5 torr. Este proceso se lleva a cabo por medio del sensor de vacío "Druckschalter".

Admisión de Gas

Se lleva a cabo por medio de "Gasventil" V4 y V6.

La válvula V6 en su posición totalmente abierta permite un flujo de 400 torr lt/seg y en posición cerrada 10^{-5} torr lt/seg.

La electroválvula V4, se abrirá después de que se haya regulado el flujo de gas desecado por medio de V6.

Procedimiento para adicionar cargas al horno o introducir el termopar

- * Se cierran las válvulas V1, V2, V4, V5, V6, V7, V8
- * Se coloca encima de la cámara el tubo que contiene el termopar o al dispositivo de carga según sea el caso.
- * Se abre la válvula V3 y se activa la bomba de vacío durante 30 seg.
- * Se abre la válvula V2 y se baja el dispositivo de carga (o el termopar).

Admisión de aire

- * Después de efectuados los colados, para ventilar la cámara de vacío, basta con mantener abiertos "Flutventil" V5 y abrir gradualmente V8 (Válvula reguladora de aire) hasta tener la cámara de vacío a la presión atmosférica para poder quitar la tapa de la cámara de vacío.

En principio, ningún aparato de vacío es absolutamente hermético.

Una medida indirecta de la impermeabilidad de un sistema de vacío es la velocidad de "fugas".

Esta velocidad se puede definir como la cantidad de gas que fluye hacia el sistema de vacío desde el exterior, a través de fisuras, orificios, etc.

En la mayoría de los casos, la velocidad de "fugas" se especifica en torr lt/seg. Este valor es proporcional a la cantidad de aire fluyendo por unidad de tiempo.

$$1 \frac{\text{torr. l}}{\text{seg}} = 1.32 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg}} \text{ de aire en condiciones normales (NTP)}$$

La cuantificación de la velocidad de escape de vacío se puede hacer con la fórmula:

$$q = \Delta p \cdot V \cdot t^{-1} \\ = (p_1 - p_2) \cdot V \cdot t^{-1} \quad [\text{mbar.l.s}^{-1}]$$

para sistemas trabajando en regiones de vacíos medios, una velocidad de escape de vacío (q) para aparatos adecuadamente herméticos, se puede tolerar hasta $10^{-3} \frac{\text{torr.l}}{\text{seg}}$ y se sugiere tomar:

p_1 = presión leída al completarse la evacuación de la cámara
($2.5 \cdot 10^{-2}$ mbar)

p_2 = presión registrada después de transcurridas 2 horas

V = volumen de la cámara de vacío (115 lt)

t = 7200 seg.

Aparte de el aire que fluye desde afuera (fugas reales) también influyen en la realización de la última presión, la evaporación, la evolución de gases de las paredes del recipiente y otros materiales dentro del sistema de vacío (fugas virtuales)

La fuga real, se distingue por tener velocidad constante, mientras que las fugas virtuales disminuyen con el tiempo.

X.4.- PROBLEMAS ENCONTRADOS Y SU SOLUCION

Instalación del Sistema de Enfriamiento
requerimientos de enfriamiento :

	Presión (Bar)	Gasto (l/min)
Unidad de Media Frecuencia	6-3	55
Cámara de Vacío	2.5-3.5	30

El agua se distribuye a la unidad de media frecuencia y a la cámara de vacío por separado, desde una cisterna de 4.5 m³.

El retorno se efectúa a través de un conducto común hasta la cisterna, formando de esa manera, un circuito cerrado.

La tubería es de cobre de 1.5 pulgada de diámetro.

El suministro necesario para el sistema de enfriamiento se realiza por medio de 2 bombas:

	HP
Unidad de media frecuencia	3
Cámara de vacío	1

Fallas en el Generador de Media Frecuencia

El control de contactos U3 "KONTAKUBERWACHUNG" resultó averiado, causando discrepancia entre la señal h9 "failure water" y los requerimientos adecuados de enfriamiento (presión 5 bar, filtro de agua sin obstrucciones, temperatura del agua y aire sin acceder los 35°C, esto último se obvió, pues nunca se había hecho funcionar la unidad.)

Para que el control U3 permita la secuencia de operación del generador, los interruptores de los sensores de flujo deberán cerrarse, y abrirse los interruptores de los termosensores como se indica en el diagrama A. En el interior del gabinete, el agua de enfriamiento se distribuye por varios ramales que enfrían a los dispositivos de potencia, cada uno con su respectivo sensor de flujo. (Tiristores: e14, Diodos: e16, Condensadores de media frecuencia: e19 y e18, Transformador de media frecuencia: e20, Bus Bar: e21.)

A cada circuito de enfriamiento le corresponde un foco sobre la tableta U3, el cual deberá estar iluminado mientras se cumplan los requisitos de enfriamiento (para comprobar la iluminación de los focos, se abre la puerta de servicio con la unidad energizada).

En nuestro caso, todos los focos de la tableta U3 permanecieron apagados, a pesar de que todos los interruptores cumplieron su condición de continuidad eléctrica. Estos interruptores están colocados en el exterior del gabinete sobre el conducto de salida del agua. al

inspeccionar la tableta U3, se encontró a su transformador de alimentación excesivamente caliente, midiéndose en el secundario 14 volts, indicando anormalidad.

Trabajando normalmente el transformador debe tener una diferencia de potencial en los bornes del primario de 220V y en el secundario de 32V.

Los devanados del transformador resultaron en corto circuito. Aún con el transformador reparado, persistió la caída de tensión por lo que se revisaron todos los elementos del módulo. Se encontraron 2 capacitores electrolíticos de 10 μ F en "corto circuito". Con la restitución de los capacitores se normalizó su funcionamiento.

Durante las pruebas, la tableta U3 volvió a dañarse, debido a que no se oprimió a tiempo el botón b2 "RESET" al momento de encenderse h9 "failure water".

Los interruptores límite b3 y b6 resultaron desactivados. Con el ajuste de los pistones de estos interruptores, se logró la presión suficiente para mantenerlos cerrados. La prueba de continuidad se

efectuó midiendo entre la terminal 96 y las terminales 97, 98 y 99 del block de terminales. Los interruptores están colocados en las esquinas superiores derechas de las puertas del gabinete.

Con el objeto de hacer las primeras pruebas del horno de inducción, se usó como circuito secundario un bloque cilíndrico de carbón grafitizado de diámetro 11 cm y altura 17 cm, maquinado a partir de un trozo de electrodo de horno de arco eléctrico. Este bloque, también puede usarse como cimbra no consumible, generadora de calor, para la sinterización de revestimientos apisonables.

La operación del potenciómetro r14, no ejerció ningún control sobre la potencia útil del horno. Se revisaron las tabletas de circuitos impresos u5 y u4, encontrándose diodos defectuosos en cada una de las tabletas, éstas corresponden al control U4 "Conmutador del valor nominal".

Para disponer de mayor información acerca del rendimiento de el equipo, se instrumentó al generador, con un medidor de Factor de Potencia.

Factorímetro: Marca: Gossen

Rango de
Frecuencia: 1-10 kHz

Relación para
transformador

de corriente: secundario 5 A

Relación para
transformador
de potencial: secundario 250 V

Debido a la inexistencia en el mercado nacional de transformadores de medición para medias frecuencias (1-10 kHz) y al hecho de tener el medidor de kilowatts los transformadores de medición la relación de transformación requerida, el factorímetro se conectó (por medio de un interruptor) en paralelo a dichos transformadores de medición como lo indica la fig. 42

El máximo rendimiento logrado en el horno, fue posible con la relación de transformación de 350/300 V, el cual corresponde al arreglo C-D/1-11. Con esta conexión, la frecuencia obtenida fue de 3.5 kHz, el voltaje fue de 250 V, (valores nominales) y la potencia alcanzada fue de 35 kW.

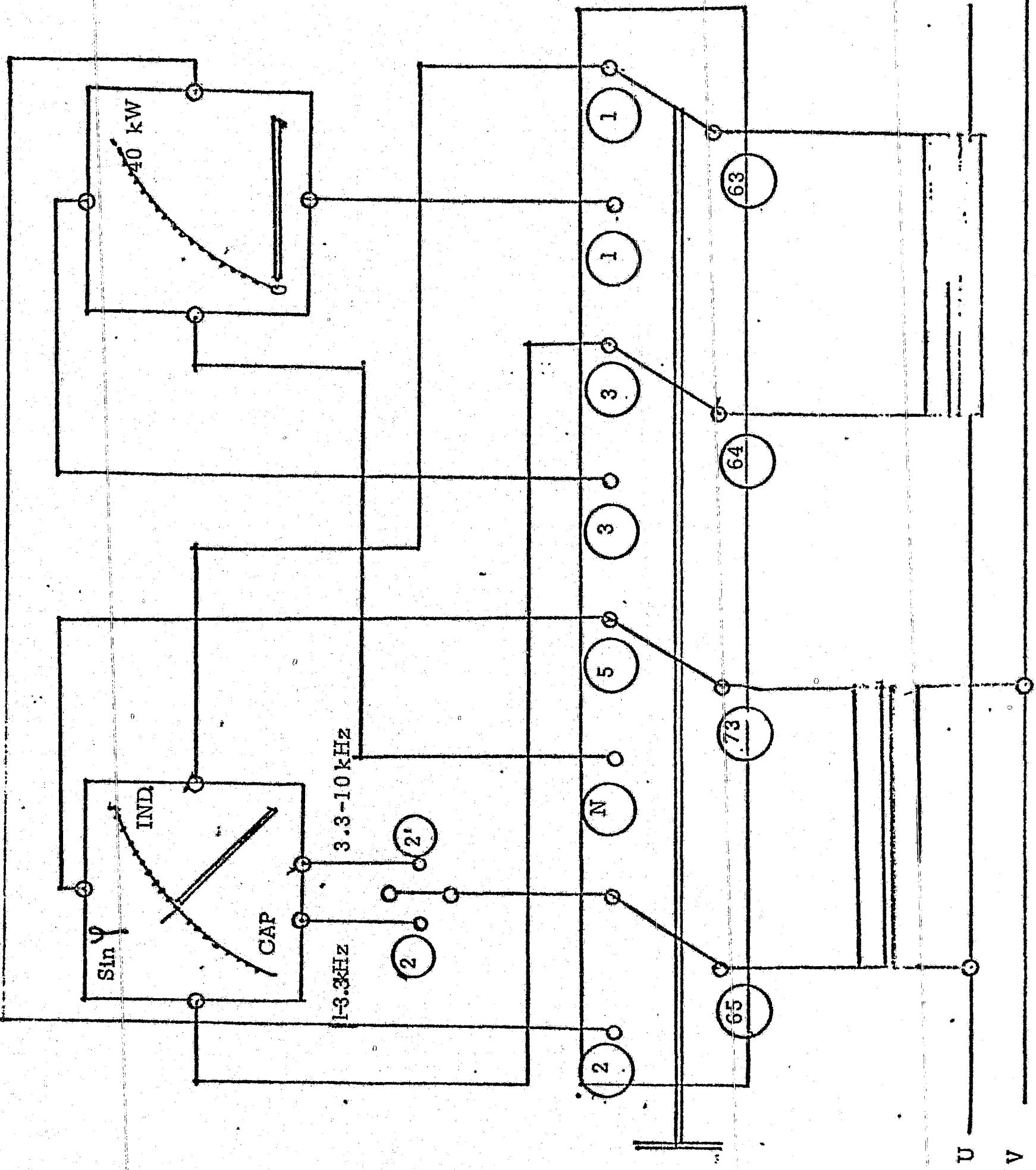


Fig. 42. Conexión de Factorímetro

Problemas encontrados en el Sistema de Vacío.

Se realizó la instalación de los accesorios del sistema de vacío como están indicados en la fig. 41 a y b.

En el control del sistema de vacío, se encontraron flojas las terminales del relevador electrónico 1d2, lo que imposibilitaba el funcionamiento de las electroválvulas "Gasventil" y "Flutventil".

Se encontró que la bobina del horno que, conectada eléctricamente al generador de media frecuencia, tiene sus circuitos de enfriamiento conectada a la cámara de vacío, de tal forma que queda el sistema de enfriamiento de la bobina independiente del sistema de enfriamiento del generador. De esa manera, cuando no este enfriada la cámara de vacío y funcionando el generador, la bobina del horno quedaría sin agua de enfriamiento, produciendo su consecuente avería.

Haciendo uso del sensor de flujo a la salida de la de agua de la bobina, se instrumentó a los controles de los sistemas de vacío y del generador, de manera que funcionen dependientes uno del otro. Tal arreglo se indica en los diagramas A y B en las secciones encerradas por líneas punteadas.

El interruptor del sensor de presión, dispone de dos posiciones, una normalmente abierta al cual se le conecta un relevador y otra posición normalmente cerrada donde se adapta una foco de alarma adicional "Alarma enfriamiento en la bobina".

Se encontró que el uso de fibras cerámicas, tales como el FIBERFRAX y el KAOWOOL, requieren una instalación muy cuidadosa. ya que el polvo que se desprende de estos materiales, provoca que la bomba rotatoria se atasque al estar funcionando, causando la apertura del interruptor de protección I e I, y en el caso extremo, el deterioro del motor de la bomba, por lo que se sugiere absoluta limpieza dentro de la cámara, antes de realizarse el vacío.

Para la detección de fugas, se fueron evacuando por separado las distintas secciones del sistema de vacío, verificándose en el TERMOVAC, posibles cambios de presión.

También se introdujo nitrógeno a la cámara de vacío a una presión de 1.1 atm, todas las uniones sospechosas se cubrieron con una solución de jabón y se observó cuidadosamente la formación de burbujas.

La zona que acusó mayor permeabilidad fue la unión de la cámara de vacío con su tapa.

Las fugas se sellaron, limpiándolas con acetona y aplicando una capa de grasa para vacío.

Para la instalación del refractario se ensayaron varios métodos:

- El uso de un crisol convencional de alúmina de alta pu-

reza (99 %), altura 13 cm. diámetro interior 6.5 cm. lana aislante (kaowool) y hojas de fiberfrax cubriendo la bobina. El espacio comprendido entre el ferro de la bobina y el crisol, se relleno con apisonable de alta alumina (90 % A.P. Green).

Este método no resultó satisfactorio, ya que después de haber hecho fusiones con aluminio, el crisol se fracturó en su parte inferior, lo cual pudo deberse a un crisol inapropiado para calentamiento por inducción y a la deficiente compactación del material colocado detrás del crisol.

- Se fabricó un revestimiento apisonado, con refractario apisonable de alta alumina (85 %, PLIBRICO). Se usó un tubo de acero sellado por el fondo (altura 17 cm. diámetro exterior 11 cm.) como cimbra consumible para la sinterización. Como soporte exterior se usó una envoltura cilíndrica de trozos de asbesto pegados con silicato de sodio de 0.5 cm. de grosor. Este revestimiento fue apisonado fuera del horno. El refractario después de un secado lento (48 horas), se calentó con quemador de gas (dirigido al interior del crisol) a 700°C con una velocidad de 100°C/hr, después calentamiento a 1100°C con una velocidad de 200°C/hr. Las temperaturas se verificaron con un pirómetro óptico. Ya en el horno se dió un sobrecalentamiento a 1350°C. Este ciclo de sinterización fue el mismo que usó L.J.

Miles y C.F. Milford para 4 tipos diferentes de apisonables de alta

alúmina comerciales en crisoles apisonados con grosor de hasta 5 cm.

Este método no fue exitoso, el contenido de metal se tiró por la parte inferior del crisol. Esto pudo deberse a que la capa de asbestos que rodeaba al revestimiento no presentó la rigidez necesaria para dar una compactación adecuada al revestimiento.

En todos los casos, se insertó sobre el labio del crisol, un pico de colada hecho de concreto refractario colable de alta alúmina (90 % A.P. Green) moldeado en una cimbra-molde de hojalata. Se unieron ambas partes (pico y crisol) con un mortero refractario base carburo de silicio (Black Salt, MORGANITE DEL CARIBE).

- Se adquirió por parte del Instituto de Investigaciones Nucleares, un crisol cilíndrico de altura 17 cm. diámetro interno 8.5 cm. hecho de Zirconia.

La bobina se recubrió con hojas de fiberfrax, y entre éstas y el crisol, se colocó un cemento (colado) del mismo material que el crisol.

Este revestimiento mostró mejor comportamiento. Se fundió una carga de 4 kg. de arrabio y 0.5 kg. de acero hasta 1650°C con una presión inicial de $7.5 (10)^{-2}$ torr. Tiempo de fusión 18 min.

X CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

La fusión por inducción:

- Es el método más limpio, menos contaminante, libre de humos, cenizas y productos de combustión, los cuales causan reacciones metalúrgicas indeseables, tales como la oxidación y la contaminación por azufre.
- Reduce pérdidas de metal.
- Involucra velocidades de fusión rápidas en comparación con otros sistemas.
- El costo de los hornos aumenta en proporción directa a la capacidad (kW) y a la frecuencia (Costo del convertidor de frecuencia).
- Costos bajos en el mantenimiento de refractarios (ninguna parte está más caliente que el metal mismo).
- Se obtiene una distribución uniforme de la temperatura, también se pueden lograr altas temperaturas, este hecho se limita por la refractariedad del revestimiento.
- Produce aleaciones (fusión al vacío) con mayor facilidad con respecto a otros métodos.

Con respecto al horno de inducción del I.I.M.

El control de potencia se realiza por medio de la variación de la frecuencia durante el ciclo de calentamiento. El amplio margen en el voltaje de salida en las derivaciones del transformador de media frecuencia, permiten un acoplamiento más versátil con la carga, de tal forma que se adapta a las variaciones de impedancia diferentes tipos de carga (resistividad del metal, configuración geométrica del material), con lo que es posible fundir en este horno, una gran variedad de metales, siempre con una máxima absorción de potencia.

Para la obtención de la potencia nominal, la posición del potenciómetro no debe girarse al 100%. La máxima potencia absorbida se logra girando el potenciómetro a una posición determinada por el tipo de carga que se funde.

Es recomendable el uso de crisoles prefabricados en este horno los cuales mostraron mejor comportamiento que los revestimientos apisonables.

La zona crítica del refractario lo constituye la unión entre las paredes verticales y la base del crisol. Esta parte es especialmente propensa a fallas en el caso de calentamientos muy rápidos, cosa que es característico en este equipo.

BIBLIOGRAFIA Y FUENTES DE REFERENCIA

1.- Robiette, A.G.E.

ELECTRIC MELTING PRACTICE.

Charles Griffin & Co. Ltd. London 1972

Superescrito	Página
7	317
12	318
13	304
16	277
26	290
28	226
29	225
30	227
32	287
34	321
36	319
38	289, 321
39	233
41	243 - 245
42	237
44	257, 258
45	262, 268
48	294
50	299, 301
51	296
53	249
54	251
55	252
75	347
76	325
79	327
80	326, 327

2.- Mainardis, Mario

I FORNI ELETTRICI le industrie elettrosiderurgiche,
elettrometallurgiche, elettrochimiche, elettrotermice,
elettrolitiche.

Editore Ulrico, Hoepli-Milano, Italia, 1953

Superescrito	Página
2	161.

Superescrito	Página
3	164 - 166
11	157
15	159
22	159, 160
23	158
24	173

3.- American Foundrymen's Society

ELECTRIC IRONMELTING CONFERENCE

American Foundrymen's Society, Cleveland, Ohio, U.S.A. 1969

Superescrito	Página
21	(5-17)
27	(5-8)
35	(5-0)
46	(4-8), (1-9), (1-10)
49	(1-13)
59	(1-4)

4.- Cast Metals Technology Series

PRINCIPLES OF INDUCTION HEATING

American Foundrymen's Society Cast Metals Institute

Superescrito	Página
9	2
10	38
14	6, 7, 8
20	15
40	42

- 5.- Osborn, H.B.
 Brace, P.H.
 Johnson, W.G.
 Cable, J.W.
 Egan, T.E.

INDUCTION HEATING

American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1946

Superescrito	Página
1	2
19	5

6.- Battey, John

FUSION Y MANTENIMIENTO POR INDUCCION

Fundición, núm. 221, febrero 1979

Superescrito	Página
6	59
8	60
31	59

7.- Sitia, Luigi.

HORNOS DE INDUCCION CON CRISOL

FONDERIA, núm. 1, 1979

Superescrito	Página
18	9

8.- Seybolt, A.U.
Burke, J.E.

TECNICAS DE METALURGIA EXPERIMENTAL

Editorial Limusa Wiley, México 1969

Superescrito	Página
17	26
67	206
70	216

9.- Almeida, Joaquín

PRINCIPIOS Y OPERACION DE HORNOS DE INDUCCION

Sociedad Mexicana de Fundidores, A. C.

Superescrito	Página
4	1, 2
33	22, 23

10.- Mendoza, Adolfo

EQUIPO ELECTRICO DE INDUCCION PARA LA FUSION DE METALES
Inductomex, S. A. de C. V.

Superescrito	Página
25	195

11.- Davies, John
Simpson, Peter

INDUCTION HEATING HANDBOOK

McGraw -Hill Book Company (UK) limited. England. 1979

Superescrito	Página
77	204
78	205, 206
81	202

12.- INYECCION DE NITROGENO EN HORNOS DE INDUCCION DE
CANAL QUE CONTIENEN ALUMINIO

Fundición, núm. 231, enero, 1980

Superescrito	Página
43	17-20

13.- Selby, M.J..

ALGUNOS DE LOS PROBLEMAS QUE PLANTEAN LOS REFRACTARIOS
EN LOS HORNOS DE INDUCCION

Fundición, núm. 222, marzo, 1979

Superescrito	Página
47	96
56	97
57	98
58	100, 101
63	102
64	103, 106

14.- F. Gwiasda

REVESTIMIENTO DE LOS HORNOS DE INDUCCION MEDIANTE
PLANTILLA PERMANENTE

Fundición, núm. 227, septiembre, 1979

Superescrito	Página
52	317 - 319

15.- Kaiser Refractories

REFRATORIES PRACTICES

Foundry

Superescrito	Página
61	13

16.- Miles, L.J.
Wilford C.F.

STUDY OF THE REACTION BETWEEN HIGH ALUMINA RAMMED
REFRATORIES AND TYPICAL SLAGS MATERIALS

Foundry Trade Journal, June 4, 1981

Superescrito	Página
62	983

17.- Becque, John H.

IMPROVING INDUCTION FURNACE REFRACTORY LIFE

Foundry, April, 1968

Superescrito	Página
60	1-3

18.- Johnson, P.D.

BEHAVIOR OF REFRACTORY OXIDES AND METALS, ALONE AND
IN COMBINATION, IN VACUO AT HIGH TEMPERATURES

Journal of the American Ceramic Society, VOL 33, No. 5

Superescrito	Página
73	168

19.- Kroll, W.J.

MELTING AND EVAPORATING METALS IN A VACUUM

Trans. Electrochem. Soc. 87, 1945

Suprescrito	Página
-------------	--------

69	583
----	-----

20.- Beck, J.A.

VACUUM TECHNIQUES IN METALURGY

Pergamon. 1963

Superescrito

71

21.- Darmara, F.N.

VACUUM INDUCTION MELTING. The Revolutionary influence in Steelmaking

Journal of Metals, December, 1967

Superescrito	Página
--------------	--------

65	43 - 45
----	---------

22.- Wahlster, Habil Manfred

METALURGIA AL VACIO

Universidad Autónoma de Azcapotzalco, 1976

Superescrito	Página
--------------	--------

66	4, 5
----	------

68	5, 6
----	------

23.- Balzers

BALZERS AKTIENGESELLSCHAFT Für Hochvakuumtechnik und Dünne Schichten

Fl-9496, Balzers, Fürstentum Liechtenstein

Superescrito	Página
--------------	--------

72	15, 16
----	--------

74	1, 2
----	------

TABLA I.- TECNICAS DE METALURGIA EXPERIMENTAL

Seybolt, A.U.
Burke, J.E.

Editorial Limusa, México, 1969

Tabla #2, página 26

TABLA II.- ELECTRIC IRON METLTING CONFERENCE

American Foundrymen's Society, U.S.A. 1969

Tabla #2, página 1-12

TABLA III.- BEHAVIOR OF REFRACTORIES OXIDES AND METALS
ALONE AND IN COMBINATION IN VACUO AT HIGH TEMPERATURES

Johnson P.D.

Journal of the American Ceramic Society, Vol 33, No. 5

Tabla II, página 170

TABLA IV.- Ob. Cit. Fig. 7, página 171

TABLA V.- VACUUM ENGINEERING TABLES AND DIAGRAMAS

Leybold-Heraus Werk Hanau

Página 13

TABLA VI.- Ob. Cit. Página 14

FIGURAS

REFERENCIA

1, 2

(4) pag 4

3

(4) pag 55

4

(4) pag 71

5

(4) pag 10

6

(1) pag 291, fig 7.15.

8

(2) pag 160, fig 103

9

(9) fig 3

14

(3) pag 5-17, fig 14

15

(2) pag 173, fig 115

16

(2) pag 174, fig 116

17

(3) pag (5-9), fig 2

19

(9) fig 2

20, 21

(9) fig 2, fig 3

22

(3) pag 5-9, fig 3

24

(1) pag 244, fig 6.17, 6.18, 6.19

25

Helne, H.G.

Line Frequency Induction Furnace
in the Iron Foundry

fig 5

26.b

(9) fig 7

27.29

(12) pag 17, fig 1

30, 31

(13) pag 96, fig 2, 3

32, 33, 34

(3) pag (1-3), fig 2, 3

36

(1) pag 325, fig 7.24

37

(1) pag 327, fig. 7.25
pag 326, fig 7.26