

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**FUNDAMENTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE
OPERACIÓN DE LOS HORNOS DE ARCO ELECTRICO**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA.

PRESENTADO POR:

JUAN MANUEL MENDOZA COVEÑAS

**PROMOCIÓN
1990– I**

**LIMA – PERU
2006**

**FUNDAMENTOS Y CARACTERÍSTICAS GENERALES DE OPERACIÓN
DE LOS HORNOS DE ARCO ELECTRICO**

Dedico este trabajo a:

Mi hija Madeleine

La razón de mi vida

SUMARIO

El presente trabajo describe el funcionamiento de los Hornos de Arco Eléctrico y adicionalmente mostrar sus virtudes de los hornos , para la producción de acero, el cual ha demostrado a través del tiempo las ventajas de su uso , así como también lo importante que es conocer su funcionamiento, desde el punto de vista de la electrotecnia, pues es una maquina eléctrica, y para poder diseñarla y mantenerla con una eficiencia que justifique los costos de operación y mantenimiento.

También , en base a la experiencia de trabajar en una fundición, se sugieren algunas ideas para salvaguardar la vida de lo trabajadores y de los equipos.

Finalmente , se hace mención a los criterios, que se deben de seguir para el mantenimiento en la plantas industriales y en especial para fundiciones, por la rudeza del ambiente, y el alto desgaste de los equipos.

ÍNDICE

PRÓLOGO

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS HORNOS DE ARCO ELECTRICO

1.1 Introducción	4
------------------	---

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN E IMPORTANCIA DE LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO INSTALADOS EN EL MUNDO

6

CAPÍTULO III

PRINCIPIOS BÁSICOS DE OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO

3.1	Análisis del arco eléctrico	11
3.1.1	Arco entre dos electrodos idénticos	11
3.1.2	El arco en los hornos de corriente alterna	14
3.2	Estudio del circuito eléctrico básico de un horno de arco eléctrico de corriente alterna	17
3.2.1	Circuito simple R, X_L	18
3.2.2	Circuito simple con corrección X_C	19
3.2.3	Circuito simple con transformador	23

3.2.4	Circuito básico del horno de arco	26
3.2.5	Expresiones para hornos de arco	36
3.2.6	Consideraciones sobre las reactancias del arco	37
3.3	Diagramas de funcionamiento en c.a.	40

CAPÍTULO IV

EQUIPOS ELÉCTRICOS EN CORRIENTE ALTERNA

4.1	Introducción componentes del equipo eléctrico	45
4.2	Transformador principal	47
4.3	Embarrado y cables secundarios	50
4.4	Equipo de control	54
4.4.1	Generalidades	54
4.4.2	Sistemas de control de impedancias	55
4.4.3	Sistemas de control por ordenador	58

CAPÍTULO V

EFFECTOS ELÉCTRICOS SOBRE LA LINEA DE SUMINISTROS

5.1	Armónicos a la frecuencia fundamental	64
5.2	Flicker	66

CAPÍTULO VI

EQUIPOS MECÁNICOS CORRIENTE ALTERNA

6.1	Componentes del equipo mecánico	70
6.1.1	Conjunto de la parte mecánica	70
6.1.2	Cuba y Bóveda	74
6.1.3	Plataforma y súper estructura	77
6.1.4	Brazos porta electrodos y columnas	81

6.1.5	Mecanismos de accionamiento	84
6.1.6	Eléctrodos	85
CAPÍTULO VII		
MANTENIMIENTO DE LOS HORNOS DE ARCO ELECTRICO		
7.1	Circuito primario sub estación de los hornos de arco eléctrico	93
7.1.1	Llave seccionadora de entrada	93
7.1.2	Disyuntor del horno	95
7.1.3	Para rayos fase a fase y fase a tierra	96
7.1.4	Transformadores de tensión y de corriente	96
7.1.5	Transformadores de horno de arco	97
7.2	Circuito secundario	119
7.2.1	Cables eléctricos refrigerados 120	
7.2.2	Brazos porta electrodo	123
7.2.3	Sistema de regulación y control de posicionamiento de los electrodos	124
7.3	Teoría del mantenimiento	130
CONCLUSIONES		149
ANEXO A		153
ANEXO B		167
BIBLIOGRAFIA		171

PRÓLOGO

El Horno de Arco Eléctrico está por cumplir sus primeros 100 años de existencia, y ya uno de sus descendientes (el Horno de Corriente Directa), esta por cumplir sus 12 años. En este periodo se han efectuado grandes desarrollos, que han permitido el crecimiento continuo de las mini-acerías eléctricas en respuesta a los requerimientos de los acereros, es una realidad que desde hoy hasta el año 2010, los proyectos de producción de acero serán, casi todos vía los Hornos de Arco eléctrico, debido a la obsolescencia de las plantas coquizadoras, es probable que exceptuando a China y tal vez la India, no se construirán acerías que no utilicen Hornos de Arco Eléctrico, en los siguientes años, de tal manera que para el año 2010, predominara el acero producido en Hornos de Arco Eléctrico.

De 1888 a 1894, el Dr. Paúl Heroult utilizó la energía eléctrica en hornos para la producción de aluminio, carburo de calcio y ferro aleaciones. El primer Horno de Arco Eléctrico para producir acero, que se tiene registrado, arrancó en La Paz, Francia, en Octubre de 1900.

Debido a la magnitud de las grandes potencias eléctrica, con que trabajan estos hornos, han contribuido mucho al desarrollo de los componentes eléctricos a usar, y una desventajas de su uso en la industria es la generación de armónicos y flickers en las redes de distribución eléctrica, pero para tales efectos se han desarrollado tecnologías que ayuden a disminuir los impactos de estos disturbios, pero lo que si no ha tenido mucha importancia o desarrollo son las practicas de trabajo del personal en cuanto a seguridad e higiene industrial, toda vez que los aparatos de maniobra en lado primario (alta tensión) generan rayos X según el catalogo de los mismos fabricantes, es por eso que en la parte de las conclusiones, se dan algunos alcances para las rutinas de mantenimiento eléctrico

La primera Guerra Mundial causo una rápida expansión en la capacidad de los Hornos de Arco Eléctrico. En 1920, se produjeron 515.000 toneladas de acero. El siguiente crecimiento dramático ocurrió durante la segunda Guerra Mundial y en el año de 1945 se produjeron 3.153.000 toneladas de acero vía Hornos de Arco, representando el 4,3 % del acero total.

En la década de los 70 se desarrollaron los Hornos de UHP(500 kVA / T), apareciendo los paneles enfriados por agua, en 1975. La utilización de energía suplementaria, operación con arco largo / escoria espumosa, transformadores de alta potencia, con alto voltaje secundario y reactor suplementario, hicieron posible llegar a potencias específicas de 700 a 1000 kVA / T.

La evolución del Horno de Arco Eléctrico se resume en tres hechos fundamentales: en los 30 años , el tiempo de colada y el consumo específico de electrodos se han reducido en cuatro veces , y la energía eléctrica (kWH / T) a la mitad. Así , de 2500 Coladas / año que se producían hace 30 años en un Horno de Arco eléctrico, ahora se producen 8,000, con la posibilidad de llegar a las 10,000 coladas / año, como resultado de la implementación de los últimos desarrollos.

En el capítulo se hace una descripción general de los H.A.E. principio de funcionamiento, las partes que lo constituyen, su historia y sus características de operación.

En el capítulo II se procede a hacer una descripción de la importancia de los Hornos de Arco y su importancia en el desarrollo de un país, como indicador de crecimiento económico.

El capítulo III se hace un análisis de los transformadores de horno de arco, partiendo de las variables económicas y se estudia cada tipo de circuito equivalente para evaluar sus características eléctricas, y las curvas de operación. Para un desenvolvimiento eficaz de transformador.

En el capítulo IV se describe las partes eléctricas del transformador, que influyen en el comportamiento del horno de Arco Eléctrico.

En el capítulo V, se describe brevemente los efectos nocivos de la operación del horno de Arco Eléctrico, para el sistema eléctrico.

En el capítulo VI se hace mención de las partes mecánicas que conforman el horno y los detalles de los mismos, como pieza importante para la correcta operación del horno.

En el capítulo **VII** se describe el mantenimiento básico que se debe de realizar en los hornos, debido a las grandes potencias eléctricas que maneja y al cuidado que se debe de tener para garantizar la correcta operación y garantizar la producción.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

1.- Introducción

Los hornos de arco de fusión de acero se basan en la transformación de la energía eléctrica en calor aplicado a la carga, lo que provoca la elevación de su temperatura.

La energía eléctrica procede de una red de corriente alterna en alta tensión y llega al horno, propiamente dicho, a través de un circuito eléctrico que consta básicamente:

- Una línea de entrada en alta tensión
- Un transformador principal, que reduce la tensión de entrada a la requerida en el horno.
- Un circuito eléctrico, a continuación el secundario del transformador, que termina en los electrodos.

En los hornos de corriente alterna se disponen tres electrodos encima de la carga, que esta puesta a tierra, y el arco salta entre electrodos a través de la carga, es decir cada electrodo hace alternativamente de cátodo y ánodo. En los hornos de corriente continua se dispone de un electrodo, que hace de cátodo encima de la carga, en cuya parte inferior se sitúa el ánodo. El arco salta entre el cátodo y la carga pasando la corriente eléctrica hasta el ánodo que esta en contacto con la carga . Desde este se cierra el circuito mediante cables hasta el equipo rectificador, colocado a continuación del transformador principal. Es evidente la importancia de un análisis previo del arco en general y de las peculiaridades que presenta, tanto en corriente continua como en corriente alterna.

- Las potencias activas a la entrada y en el arco
- Los factores de potencia en diversos puntos

Los análisis del circuito eléctrico se hará a partir de las leyes de la electrotecnia.

Finalmente, los parámetros anteriores se llevan a diagramas de funcionamiento, que permitan determinar las condiciones óptimas de funcionamiento. Pueden ser, entre otras:

- **Máxima producción**, que procederá de la mayor potencia en el arco
- **Máximo rendimiento**, es decir, mínimas pérdidas energéticas, respecto a la potencia consumida, lo que determina normalmente un punto de funcionamiento a potencia en el arco algo inferior a la máxima.
- **Mínimo coste de funcionamiento**, lo que implica, no sólo el coste de la energía sino otros (consumo de electrodos y de refractario, carga, mano de obra, etc.).

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN E IMPORTANCIA DE LOS HORNOS DE ARCO ELECTRICO INSTALADOS EN EL MUNDO

El calentamiento de materiales por arco eléctrico se realiza básicamente por el paso de la corriente eléctrica entre dos electrodos uno de los cuales puede ser la propia carga. Los dos campos principales de aplicación industrial del calentamiento por arco son:

- Los hornos de fusión de metales
- Lo hornos de reducción de minerales

En los hornos de arco de fusión se coloca la carga en el interior de la cuba y se establece el arco entre los electrodos o entre los electrodos y la carga. Pueden disponerse de un solo electrodo (hornos de corriente continua), dos electrodos dispuestos horizontalmente (calentamiento indirecto por radiación del arco al interior de la cuba) o tres electrodos (hornos de corriente alterna). Se utilizan principalmente para fusión de fundición de acero y, en unos pocos casos para metales no férricos pesados (aleaciones de cobre).

En los hornos de arco de reducción, utilizados en la fabricación de ferro aleaciones, carburo de calcio, silicio metal, etc., los electrodos están sumergidos en el baño de material fundido y el calentamiento se realiza realmente por resistencia directa del material, aunque pueden producirse pequeños arcos entre los electrodos y la superficie de la carga o incluso dentro de la carga

Fue el inglés Davy en 1800, quien primeramente hizo saltar el arco entre dos electrodos de carbono alimentados por pilas de Volta, analizando someramente sus características, a nivel de laboratorio la primera fusión de acero al arco eléctrico fue realizado por Pepys en 1815.

Sin embargo la base tecnológica del horno de arco actual corresponde al francés Paúl Heroult que comenzó sus investigaciones en 1886 y puso a punto un equipo en 1889, realizándose la primera fusión industrial en 1902 sobre una cuba rectangular de 2 t.

Alimentada por un transformador monofásico de 300 kVA. La colada tuvo una duración de 10 horas.

Después de unos comienzos con una lenta introducción en la industria, se apreciaron claramente sus ventajas en la fabricación de aceros especiales y finos al carbono, hasta el punto de realizarse en hornos de arco la mayor parte de la producción en este campo. A partir de los años sesenta, con la introducción de la técnica de Alta y Ultra alta potencia, se inicia su utilización masiva en la fabricación de acero ordinario al carbono a partir de chatarra.

Se paso de este modo a 10-12 coladas por jornada de 24 horas, en lugar de las 4-5 anteriores, y el problema del desgaste de los refractarios, al aumentar fuertemente la potencia específica, se resolvió utilizando arcos cortos sumergidos en la escoria, dentro de lo posible, operando a un factor de potencia de 0,60-0,65 y muy altas intensidades, se llegaron a capacidades de 360 T. con potencias de 165 MVA

Se introdujo posteriormente el horno de arco de afinado en cuchara y se dejó el horno de arco previo exclusivamente para la fusión de chatarra. Además, el aumento del consumo específico de oxígeno, directamente en lanzas e indirectamente en quemadores oxi-fuel y oxi-gas, supuso hacia 1980 un nuevo aumento en la productividad.

Desde hace algunos pocos años se utiliza además la técnica de la escoria espumosa, que permite utilizar arcos más largos a tensión más alta e intensidad reducida. Los hornos operan con un factor de potencia de 0,75-0,85, lo que ha permitido un mejor aprovechamiento del transformador principal. Se ha ampliado la utilización de los equipos mediante los paneles refrigerados por agua en paredes y bóveda, se ha mejorado la regulación de la potencia media absorbida por el arco y se han introducido masivamente los equipos de control informatizados. Todo ello ha permitido conseguir coladas de una hora de duración que suponen, para un horno de 150 T. de capacidad, una producción anual de acero líquido de 1.000.000 de t, para un funcionamiento de 5,5 días por semana.

En la Fig. 2.1 se muestra la evolución de los hornos de arco de fusión de acero en los últimos 40 años, de unos tiempos de fusión de 2.5 horas se ha pasado a menos de 1 hora y de una velocidad de fusión de 15 T/h a 90-95 T/h, y esta tendencia continua de momento imparable .

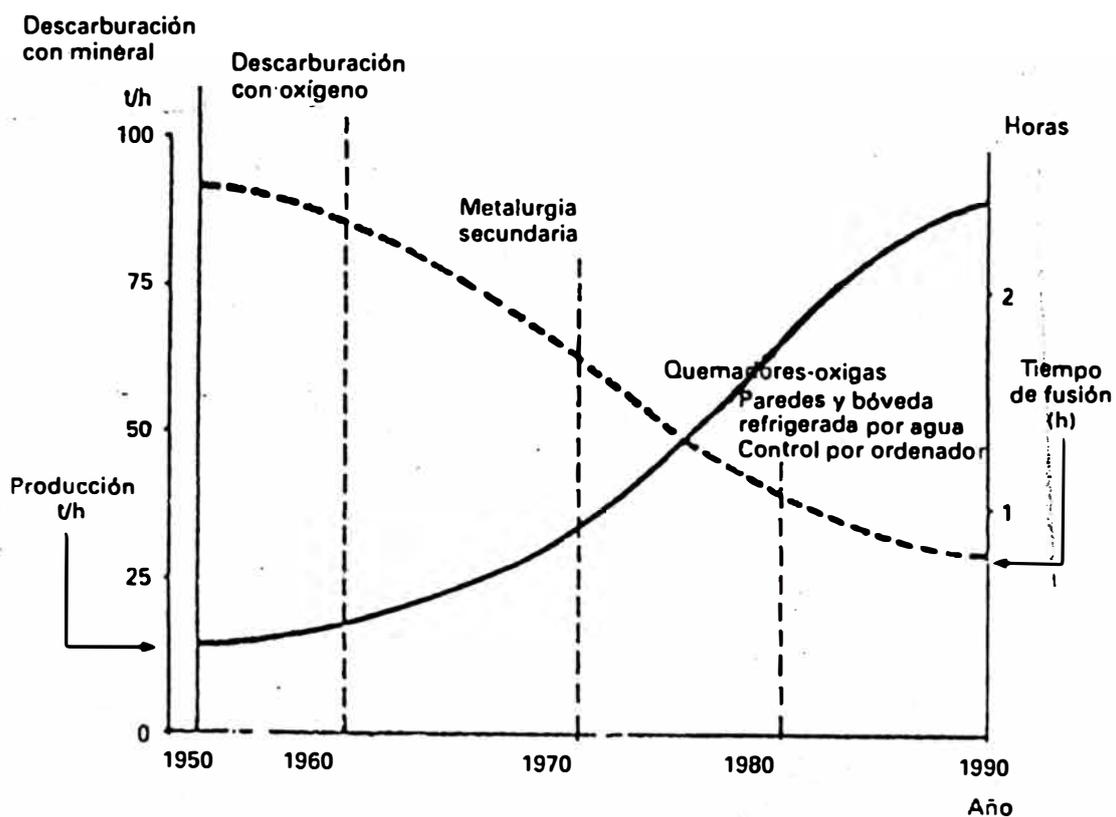


Fig. 2.1 Evolución Del Horno De Arco De C.A.

Los datos de producción en millones de toneladas(T) de acero de los últimos años son los siguientes:

Tabla 2.2 Evaluación de la producción de acero.

Año	España	CEE 12 miembros	E.E.U.U	Japón	Total Mundial
1990	12,9	142,1	88,7	110,3	747,9
1991	12,9	137,4	79,2	109,6	715,2
1992	12,3	132,5	83,2	98,1	694,7
1993	13,0	132,4	87,0	99,6	706,4
1994	13,5	139,0	88,9	998,3	702,0

Se puede estimar que se produce en hornos de arco el 40 por 100 de la producción total mundial, este porcentaje correspondiente al horno d arco sigue aumentando. En la siguiente tabla se puede apreciar la producción mundial de acero.

Tabla Nº 2.3 Producción mundial de acero.

PAIS	PRODUCCIÓN DE ACERO (millones de ton.)
CHINA	141
JAPON	103
ESTADOS UNIDOS	90
RUSIA	58
BRASIL	27
MEXICO	13
ARGENTINA	4
COLOMBIA	1
TOTAL MIUNDIAL	417

Después de este análisis previo y **Mientras el acero siga siendo un motor y un indicador del crecimiento económico mundial** y si ha esto le sumamos el hecho que el consumo per cápita de acero, principalmente, en forma de materiales de construcción y bienes de consumo duraderos, se asocia íntimamente al nivel de desarrollo y a la tasa de crecimiento económico de un país. La cifra oscila entre 17 kilos por persona en África y 625 en Japón. Según el informe de la OIT, se prevé que el consumo de los países industrializados permanezca estable o disminuya ligeramente en los próximos diez años. "No obstante, se espera un crecimiento acentuado en Asia (40% en el período citado), especialmente en China (150%) y, en menor medida, en América Latina (18%)".

En el informe se indica que actualmente se produce acero en unos 100 países y que "en los 15 años transcurridos entre 1981 y 1996, la cuota de los países industrializados de economía de mercado en la producción mundial se ha reducido ligeramente, pasando del 54,5 por ciento al 51,2 por ciento. En cambio, en la CEI y la Europa Oriental, la producción se ha reducido a la mitad y ha pasado del 29 por ciento al 14,3 por ciento, al tiempo que en China y otros países asiáticos (excluido Japón), la producción se ha triplicado prácticamente, pasando del 9,6 por ciento al 25,5 por ciento.

Por lo tanto, debido a lo poco complicado y bajo costo que es producir acero con Hornos de Arco Eléctrico, es necesario e importante desarrollar y preparar técnicamente a nuestros profesionales técnicos y difundir la tecnología de los Hornos de Arco Eléctrico.

CAPÍTULO III

PRINCIPIOS BÁSICOS DE OPERACIÓN DEL HORNO DEL ARCO ELECTRICO

3.1 Análisis Del Arco Eléctrico

3.1.1. Arco Entre Dos Electrodo Idénticos

Se puede considerar el arco eléctrico como la manifestación del paso continuo de una corriente eléctrica de alta intensidad entre dos electrodos en un medio gaseoso ionizado. Se precisa un cebado para el establecimiento del arco, que se consigna por el paso de la corriente entre los dos electrodos puestos en contacto y sometidos a potenciales eléctricos diferentes. El cátodo, calentado por el paso de corriente, emite electrones que se desplazan hacia el ánodo bajo el efecto del campo eléctrico que se crea entre los electrodos. Las moléculas de gas se ionizan al paso de los electrones, se hacen conductoras y aseguran el paso de la corriente eléctrica, aunque los electrodos estén separados. Las moléculas ionizadas, aceleradas por el campo eléctrico, chocan contra el cátodo y lo calientan dando lugar a una mayor emisión de electrones.

Por la repulsión electromagnética que se produce en las corrientes paralelas entre cátodo y ánodo, el arco toma la forma de tonel o barrica.

Realmente se origina en una pequeña parte del cátodo, denominada mancha catódica y termina en una pequeña parte del ánodo, llamada mancha anódica. La densidad de corriente es mayor en las proximidades del ánodo y cátodo que en la parte central del arco, como consecuencia de la repulsión antes citada, que hace mayor la sección de paso.

Se distinguen claramente tres zonas:

- La zona catódica, donde se produce una caída de tensión que incluye la mancha catódica.
- La columna de arco en forma de tonel con una caída de tensión progresiva.

- La zona anódica, que incluye la mancha anódica, donde produce la caída de tensión anódica.

En la figura 3.1 se representan:

1. EL esquema del circuito del arco entre cátodo y ánodo.
2. La distribución de la tensión entre electrodos U_x
3. El campo eléctrico E_x
4. La densidad de corriente eléctrica I_x a lo largo de la distancia entre electrodos.

La caída de tensión catódica es del orden de 10 V y tiene una longitud de 1 μm . Crea un campo eléctrico $10^7 - 10^8 \text{ V/m}$, netamente superior al potencial de salida de los electrones catódicos. El cebado del arco se realiza al poner en contacto los electrodos y la corriente eléctrica que atraviesa la resistencia de cortocircuito calienta localmente los electrodos y disminuye el potencial de salida del cátodo. Una vez cebado el arco, los iones de gas bombardean el cátodo a gran velocidad, calentándolo a una temperatura elevada que mantiene la emisión de electrones (se alcanzan en la mancha catódica temperaturas de 4,000 K para una densidad de corriente de 100 A/mm^2). La conductividad térmica del material de electrodo determina la conducción del calor y, por tanto, su temperatura y el potencial de salida. Es normal operar en el cátodo con densidades de corriente de 15 a 30 A/cm^2 .

En la columna del arco el gas está fuertemente ionizado con casi idéntico número de cargas positivas y negativas. El conjunto resulta prácticamente neutro y puede denominarse plasma de arco. Los electrones que se mueven a gran velocidad, son los responsables de la conducción eléctrica. Y los iones positivos simplemente compensan la carga de los electrones. La temperatura de la columna de arco puede alcanzar valores de 6.000 °K y superiores como consecuencia de las colisiones entre partículas.

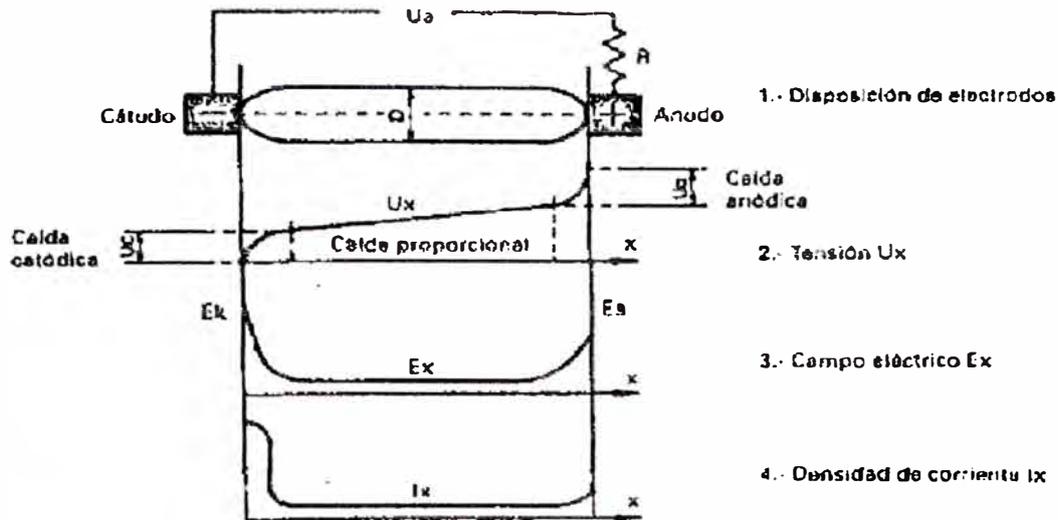


Fig. 3.1 Características Del Arco Entre Dos Electrodos Idénticos

Por repulsión entre líneas de corriente de la misma polaridad, la sección transversal del arco aumenta y tanto la intensidad de la corriente como la resistencia eléctrica disminuyen. Un orden de magnitud de la caída de tensión en el arco es :

- 5,000 V/m para intensidades de corriente de unos pocos amperios.
- 500 a 1.000 V/m para fuertes intensidades.

El ánodo, por otra parte, queda bombardeado por los electrones que provienen del cátodo a través de la columna del arco. Su velocidad es mucho más elevada que la de los iones y su número varias centenas de veces superior, dando lugar a temperaturas en el ánodo de 4.000-5.000 °K. En las proximidades del ánodo, como consecuencia de la emisión secundaria de electrones por su elevada temperatura, se produce una caída de tensión anódica que puede ser dos o tres veces superior a la del cátodo.

La suma de las caídas de tensión en la columna del arco y las catódica y anódica es la tensión mínima necesaria para el mantenimiento del arco. En los grandes hornos de arco para fusión de acero se alcanzan valores hasta de 1.000 V en corriente alterna, pero es probable que este valor se supere netamente en los próximos años con el desarrollo de los hornos que operan en corriente continua y técnicas metalúrgicas que sumerjan, aún más, el arco dentro de la escoria espumosa.

3.1.2 El Arco En Los Hornos De Corriente Alterna (C.A.)

Un esquema simplificado del horno de arco de C.A. se representa en la Fig.3.3 La línea de entrada de energía eléctrica suministra una tensión E sobre un circuito de impedancia Z (compuesta de una resistencia R y una reactancia X), que termina en los electrodos. La carga y el baño están puestos a tierra y el arco salta entre electrodos a través de la carga, es decir cada electrodo es sucesivamente cátodo y ánodo.

Si suponemos que la tensión de alimentación U es sinusoidal el arco se ceba poco después del comienzo de una alternancia al alcanzar el valor U_{am} (tensión de cebado) cae, después al valor U_a (tensión del arco) y, finalmente, se extingue cuando U baja del valor U_{ext} (tensión de extinción). Esto se repite en el semiperíodo siguiente siempre que los electrodos y su distancia al baño sean rigurosamente idénticas, lo que no ocurre en la realidad.

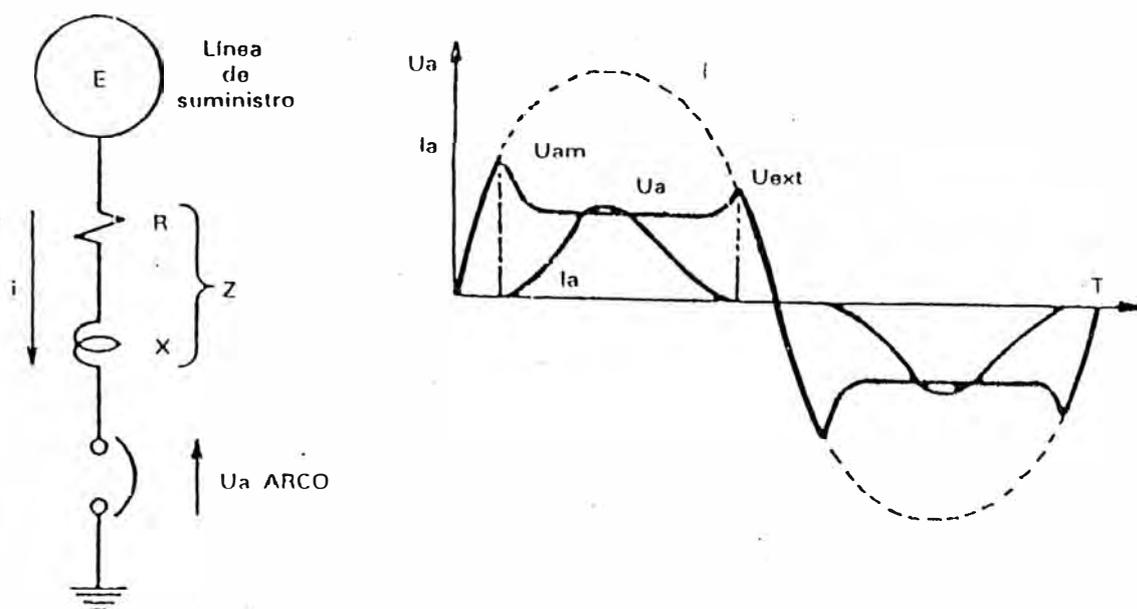


Fig. 3.2 Esquema En Corriente En C.A. Y Variación De La Tensión Y La Corriente

La intensidad de la corriente que recorre todo el circuito varía de la forma indicada en la Fig. 3.3 pero, de acuerdo con los valores de la impedancia Z del circuito, presenta un desfase respecto de la tensión, lo que facilita el cebado progresivo del arco en C.A. entre un electrodo de grafito y un bloque de acero, han mostrado que la intensidad varía

de forma próxima a una senoide, mientras que la tensión es de forma prácticamente cuadrada, como se muestra en la Fig. 3.3

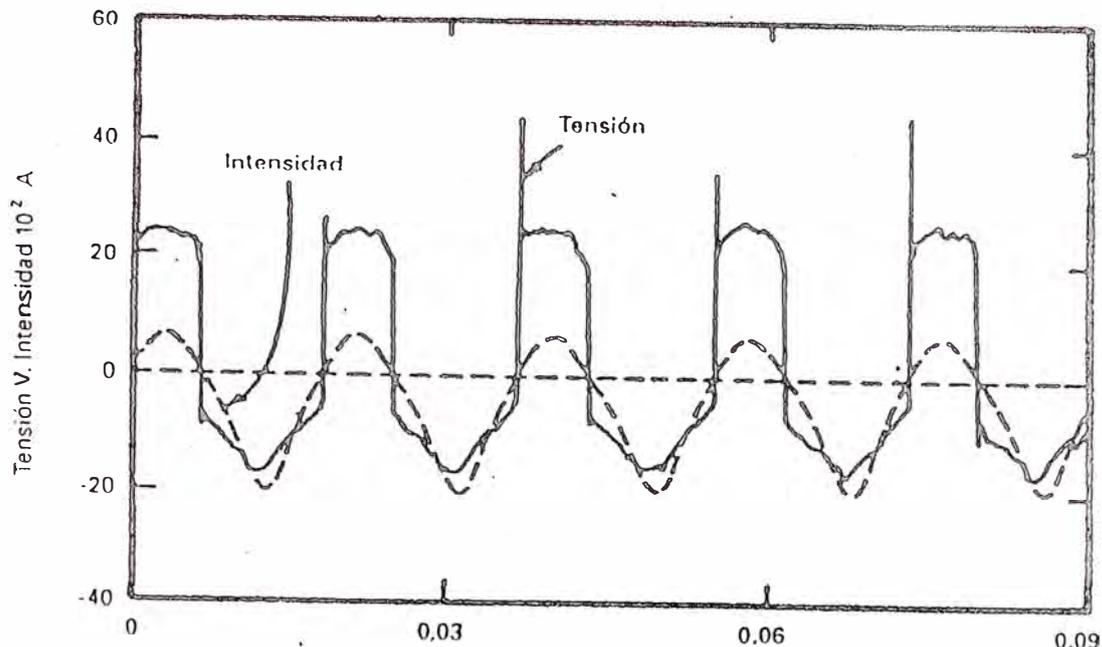


Fig. 3.3 Onda de Tensión e Intensidad en laboratorio

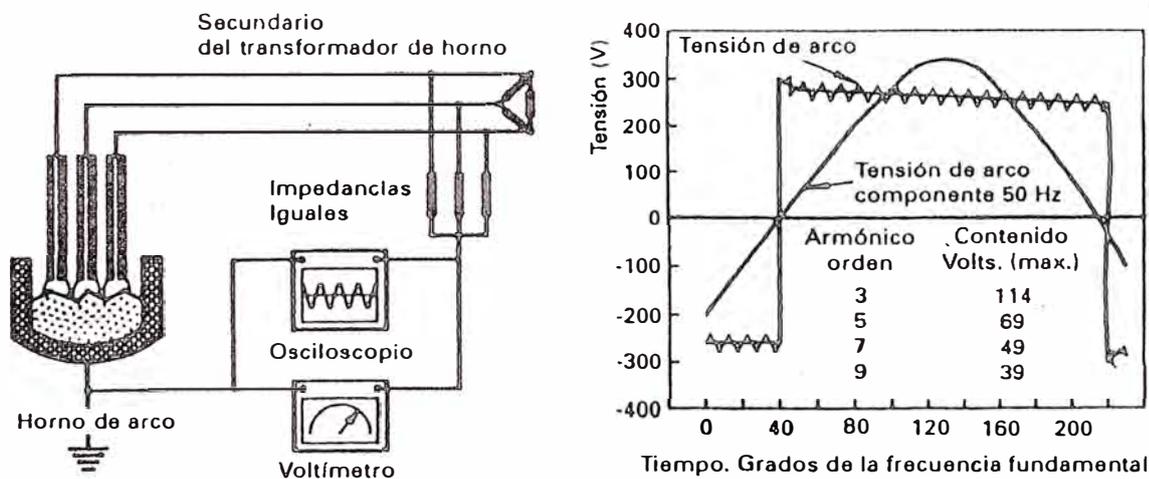


Fig. 3.4 Análisis del horno de arco y tensión en el arco de C.A.

Cuando la experiencia se realiza en un horno de arco trifásico, con un osciloscopio conectado como se indica en la Fig. 3.5 resulta una tensión en el arco prácticamente constante que incluye, además de la componente fundamental, armónicos de 3^{er}, 5^o, 7^o y 9^o orden principalmente, quedando eliminadas de la red las de 3^{er} y 9^o orden, por la conexión sin neutro del secundario del circuito.

La casi constancia de la tensión que corresponde a la distancia del electrodo al baño y la libertad de ésta para adoptar el potencia adecuado al no estar conectado al neutro del circuito, es lo que determina el comportamiento del horno de arco. En la Fig.3.6 se muestra cómo una tensión sinusoidal de 50Hz sumada a una de 150 Hz da lugar a una tensión de forma prácticamente cuadrada. Es como si el baño estuviera oscilando a una tensión de triple frecuencia. Con el esquema de la Fig. 3.5 se ha determinado realmente dicha tensión de oscilación de frecuencia triple, cuyo componentes armónicos se muestran a la derecha de la Fig. 3.6 apreciándose la pequeña importancia de los armónicos de orden 1°, 5°, 7° y 9°

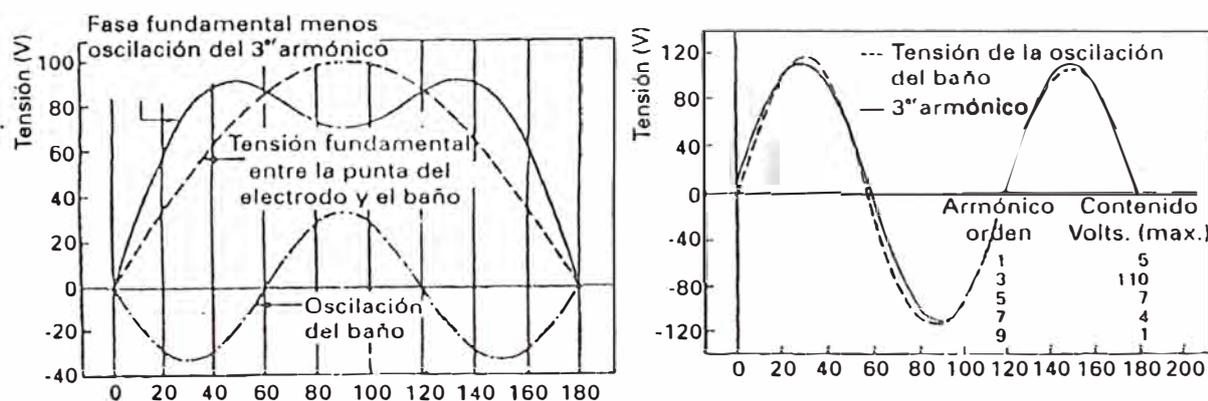


Fig. 3.5 Oscilación de la Tensión del baño a 150 Hz.

Los componentes armónicos originados en el arco, que no sean múltiplos de 3 (principalmente de orden 5° y 7°), pasan a la red, salvo que se dispongan equipos de filtrado adecuados en la entrada de la instalación. En el funcionamiento real habrá que tener en cuenta además los desequilibrios producidos por no ser las tres fases exactamente iguales.

En el Anexo A se adjunta un informe de la empresa CONELSE PERU referente a la medición de Flickes y armónicos generados por MEPSA y el Diagrama Eléctrico Unificar De Los Hornos De Arco, adicionalmente se adjunta el informe de una empresa de cómo disminuir estos con Reactancias que fue la solución adoptada.

3.2 Estudio del circuito eléctrico básico de un horno del arco de C.A.

El diagrama de la Fig.3.6 representa esquemáticamente los componentes básicos del circuito eléctrico de un horno a partir de las barras de conexión de entrada a la subestación del horno (es muy frecuente una tensión de conexión de 30 kV). Dichos componentes básico son

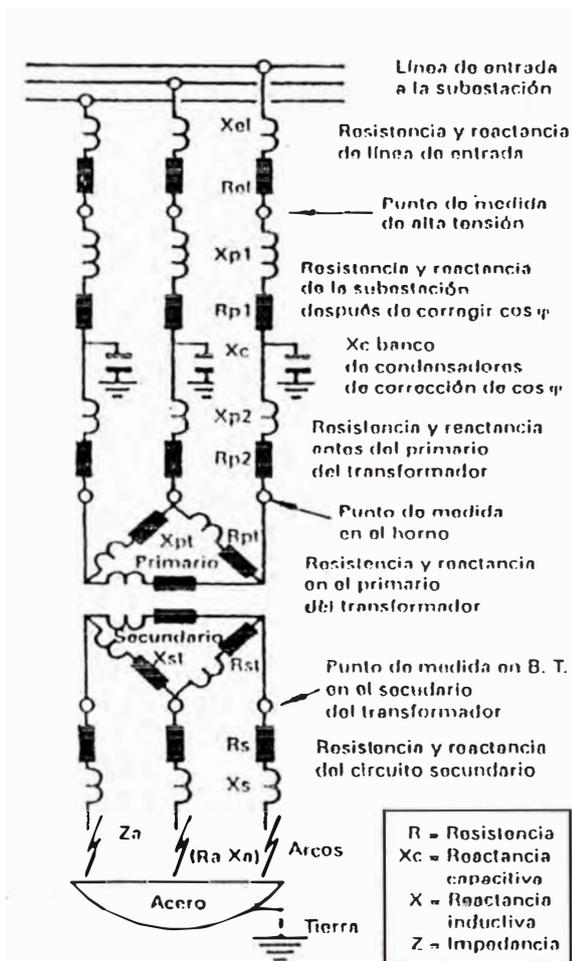


Fig. 3.6 Esquema Eléctrico Básico

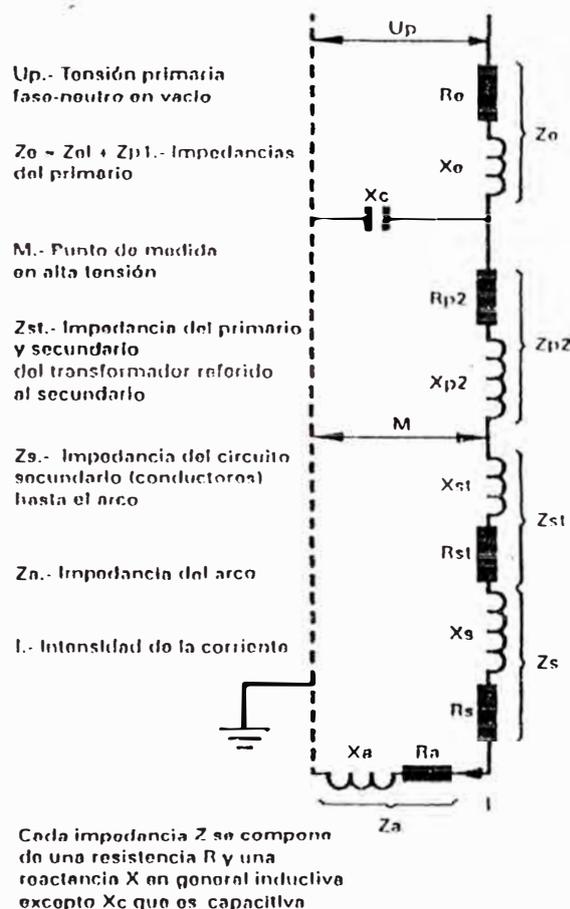


Fig.3.7Circuito Eléctrico Simplificado

- ❖ R_{el} y X_{el} : resistencia y reactancia de entrada en alta tensión hasta el punto de medida.
- ❖ R_{p1} , X_{p1} : resistencia y reactancia correspondientes a embarrados y cableados en la subestación del horno antes de banco de condensadores.
- ❖ X_c : reactancia del banco de condensadores de corrección del factor de potencia.
- ❖ R_{p2} , X_{p2} : resistencia y reactancia correspondientes a embarrados y cableados desde el banco de condensadores hasta el transformador.
- ❖ R_{pt} , X_{pt} : resistencia y reactancia correspondientes al primario del transformador.
- ❖ R_{st} , X_{st} : resistencia y reactancia correspondientes al secundario del transformador.
- ❖ R_s , X_s : resistencia y reactancia correspondientes al embarrado y cableado desde el transformador hasta el arco entre electrodos y carga.
- ❖ Z_a : impedancia propia del arco que, como se verá, más adelante, depende fundamentalmente de la longitud e intensidad en el arco.

Para un análisis previo suficientemente exacto se pueden considerar las tres fases perfectamente equilibradas y estudiar el circuito monofásico de la Fig.3.8 Es preferible estudiar dicho circuito eléctrico a partir de circuitos más elementales que vayan englobando todos sus componentes. El circuito más simple es el compuesto por una resistencia R y una reactancia inductiva X .

3.2.1. Circuito Simple R , X_L

Si en el circuito de la Fig.3.7 se elimina el banco de condensadores X_c se pueden sumar por separado las reactancias en un valor X_L y las resistencias en un valor R .

Se representa en la Fig.3.8. Se deducen las siguientes relaciones:

$$U_X = I \cdot X_L \quad (3.2)$$

$$U_R = I \cdot R \quad (3.3)$$

$$U = I \cdot Z = I \cdot \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.4)$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.5)$$

Para los valores indicados en la figura resulta:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{5^2 + 4^2} = 6,4 \text{ m}\Omega$$

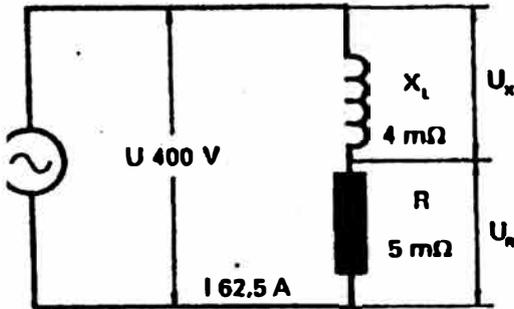


Fig. 3.8 Circuito Simple R, X_L

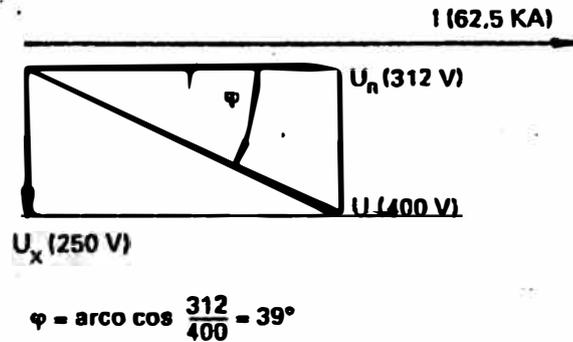


Fig. 3.9 Valores De U, U_x , U_R , I.

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{400}{6,4} = 62,5 \text{ kA}$$

$$U_x = I \cdot X_L = 62,5 \cdot 4 = 250 \text{ V}$$

$$U_R = I \cdot R = 62,5 \cdot 5 = 312 \text{ V}$$

$$\cos \varnothing = \frac{R}{Z} = \frac{5}{6,4} = 0,78$$

U (400 V) no es la suma algebraica de U_x y U_R sino la suma vectorial, teniendo en cuenta que I y U_R están en fase, pero I y U_x están desfasados 90° , como se aprecia en la Fig. 3.9

3.2.2 Circuito Simple Con Corrección X_C

Se representa en la Fig. 3.10 habiendo añadido un banco de condensadores de corrección del factor de potencia y considerando que en la línea de entrada, hasta la conexión del banco de condensadores X_C , la resistencia y reactancia son 0,05 y 0,46 mΩ, respectivamente. A la derecha se muestra el circuito equivalente con R_e y X_e .

Se verificará, operando con números imaginarios:

$$\frac{1}{R_{eq} + jX_{eq}} = \frac{1}{R + jX_L} + \frac{1}{-jX_C} \quad (3.6)$$

de donde:

$$R_{eq} = \frac{RX_c^2}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.7)$$

$$X_{eq} = \frac{X_C \cdot (X_C X_L - R^2 - X_L^2)}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.8)$$

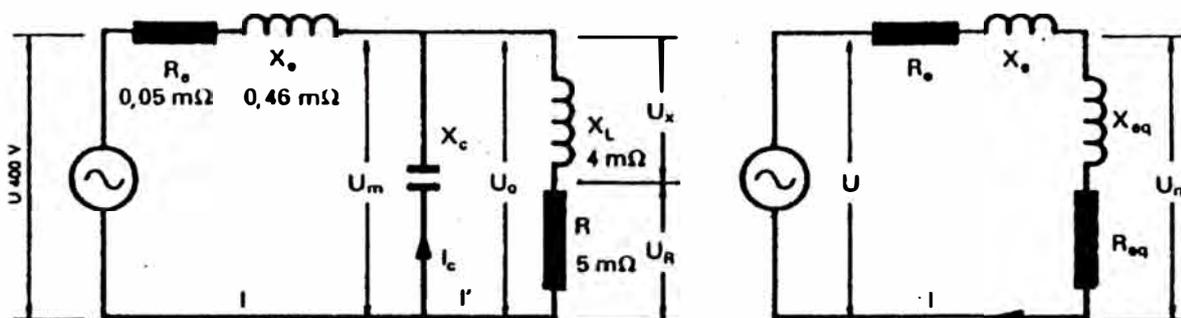


Fig. 3.10 Esquema y diagrama de circuito simple con corrección por condensadores X_C

El valor de X_{eq} será nulo para:

$$X_C = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L} = X_L + \frac{R^2}{X_L} \quad (3.9)$$

Para este valor de X_C , resulta :

- Impedancia :

$$Z = (R_{eq} + R_e) + jX_e \quad (3.10)$$

$$|Z| = \sqrt{(R_{eq} + R_e)^2 + X_e^2} \quad (3.11)$$

- Intensidad :

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R_{eq} + R_e)^2 + X_e^2}} \quad (3.12)$$

- Factor de potencia global:

$$\cos \varphi = \frac{Z}{U} = \frac{R_{eq} + R_e}{\sqrt{(R_{eq} + R_e)^2 + X_e^2}} \quad (3.13)$$

Sin embargo, en U , U_M y U_0 los factores de potencia son :

$$\cos \varphi_U = \frac{R_e}{\sqrt{R_e^2 + X_{Le}^2}} \quad (3.14)$$

$$\cos \varphi_{UM} = 1$$

$$\cos \varphi_{U0} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (3.15)$$

Operando con los valores anteriores $R = 5 \text{ m}\Omega$, $X_L = 4 \text{ m}\Omega$, $U = 400 \text{ V}$, resulta, para un valor de $X_{jeq} = 0$:

$$X_C = \frac{5^2 + 4^2}{4} = 10,25 \text{ m}\Omega$$

A una frecuencia de 50 hz. se requiere un banco de condensadores de:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} \quad (3.16)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10,25 \cdot 10^{-3}} = 0,31 \text{ F}$$

— Resistencia, reactancias e impedancias:

$$R_{eq} = \frac{5 \cdot 10,25^2}{5^2 + (4 - 10,25)^2} = 8,2 \text{ m}\Omega$$

$$R_e + R_{eq} = 0,05 + 8,2 = 8,25 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{8,25^2 + 0,46^2} = 8,26 \text{ m}\Omega$$

— Factores de potencia:

$$\cos \varphi_{U_0} = \frac{5}{\sqrt{5^2 + 4^2}} = 0,78$$

$$\cos \varphi_{U_m} = 1$$

$$\cos \varphi_U = \frac{8,25}{8,26} \simeq 1$$

— Intensidades y tensiones:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{400}{8,26} = 48,4 \text{ kA}$$

$$U_m = U_0 = I \cdot Z_{eq} = I \cdot R_{eq} = 48,4 \cdot 8,2 = 397 \text{ V}$$

$$I_C = \frac{U_m}{X_C} = \frac{397}{10,25} = 38,7 \text{ kA}$$

$$I' = \frac{U_m}{Z'} = \frac{397}{\sqrt{5^2 + 4^2}} = 62 \text{ kA}$$

— Las potencias correspondientes son:

- Aparente de entrada:

$$S = U \cdot I = 400 \cdot 48,4 = 19,360 \text{ kVA}$$

- Desarrollada en R :

$$P = I'^2 \cdot R = 62^2 \cdot 5 = 19,220 \text{ kW}$$

- Debe ser idéntica a la desarrollada en R_{eq} :

$$P = I^2 \cdot R_{eq} = 48,4^2 \cdot 8,2 = 19,220 \text{ kW}$$

- Potencia de pérdidas en la línea de entrada:

$$P_P = I^2 \cdot R_e = 48,4^2 \cdot 0,05 = 117 \text{ kW}$$

3.2.3 Circuito Simple Con Transformador

Se representa en la Fig. 3.11 para un transformador de relación $30 \text{ KV} / 1,000 \text{ V} = 30/1$ entre fases, lo que supone una tensión entre fase y neutro de:

$$\frac{1000}{\sqrt{3}} = 577 \text{ V}$$

El transformador tiene los siguientes valores de resistencia y reactancia:

— Referidos al secundario:

$$R_{st} = 0,03 \text{ m}\Omega \quad ; \quad X_{st} = 0,22 \text{ m}\Omega$$

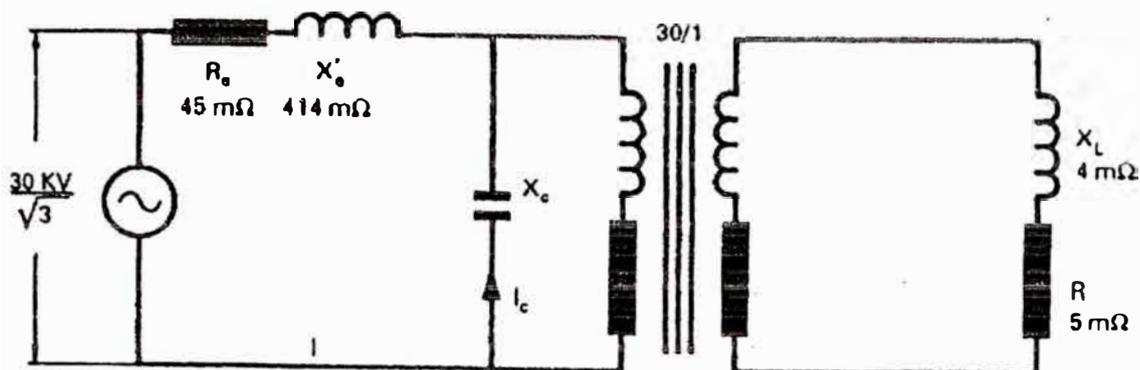


Fig. 3.11 Circuito Simple Con Transformador.

— Referidos al primario (factor multiplicador $(30/1)^2 = 900$):

$$R_{st} = 27 \text{ m}\Omega \quad ; \quad X_{st} = 198 \text{ m}\Omega$$

El circuito equivalente referido al secundario del transformador será el de la Fig. 3.12:

— Combinación de :

$$Z_{st} = R_{st} + jX_{st} \quad y \quad Z = R + jX_L$$

$$R' = R_{st} + R = 0,03 + 5 = 5,03 \text{ m}\Omega$$

$$X' = X_{st} + X_L = 0,22 + 4 = 4,22 \text{ m}\Omega$$

$$\text{Cos } \varphi = \frac{5,03}{\sqrt{5,03^2 + 4,22^2}} = 0,77$$

— Valor de X_C , para $X_{eq} = 0$:

$$X_C = \frac{R'^2 + X'^2}{X'} = \frac{5,03^2 + 4,22^2}{4,22} = 10,22 \text{ m}\Omega$$

— Prácticamente idéntico al caso anterior:

$$C' = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10,22 \cdot 10^{-3}} = 0,31 \text{ F}$$

— Resistencia, reactancia e impedancia total:

$$R'_{eq} = \frac{5 \cdot 10,22^2}{5^2 + (10,22 - 4)^2} = 8,2 \text{ m}\Omega$$

$$Z = R + jX = (R_e + R_{eq}) + jX_e$$

$$R = R_e + R_{eq} = 0,05 + 8,2 = 8,25 \text{ m}\Omega$$

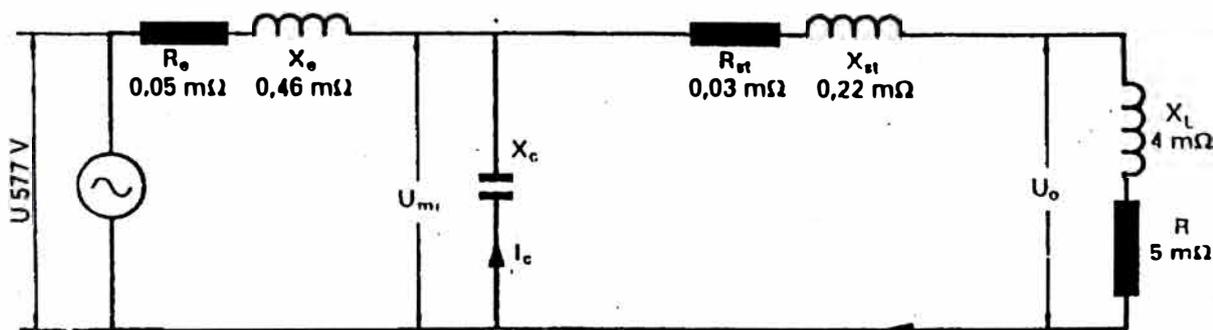


Fig. 3.12 Circuito Con Transformador Reducido Al Secundario

$$X = X_e = 0,46 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 8,263 \text{ m}\Omega$$

— Intensidades y tensiones:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{577}{8,263} = 70 \text{ kA}$$

$$U_m = U - I \cdot Z_e = 577 - 70 \cdot \sqrt{0,05^2 + 0,46^2} = 545 \text{ V}$$

$$I_c = \frac{U_m}{X_c} = \frac{545}{10,22} = 53,3 \text{ kA}$$

$$I' = \frac{U_m}{\sqrt{R'^2 + X'^2}} = \frac{545}{\sqrt{5,03^2 + 4,22^2}} = 83 \text{ kA}$$

— Potencias

- Aparente a la entrada:

$$S = 577 \cdot 70 = 40.390 \text{ kVA}$$

- Activa en la resistencia R :

$$P_a = I'^2 \cdot R = 83^2 \cdot 0,05 = 34.445 \text{ kW}$$

- Perdidas en:

$$R_e: I^2 \cdot R_e = 70^2 \cdot 0,05 = 245 \text{ kW}$$

$$R_{st}: I'^2 \cdot R_{st} = 83^2 \cdot 0,03 = 207 \text{ kW}$$

3.2.4 Circuito Básico Del Horno De Arco

Durante muchos años se ha operado con arcos cortos a baja tensión e intensidades elevadas, tratando de sumergir el arco en la escoria y reducir así la erosión

o desgaste de los refractarios de las paredes laterales y la bóveda. La introducción de paredes y bóveda refrigeradas por agua, prácticamente sin revestimiento refractario, así como la técnica de la escoria espumosa, ha permitido utilizar altas potencias, con arcos largos a tensiones altas e intensidades reducidas, con las ventajas que ello reporta en cuanto a menor consumo de electrodos, mayor factor de potencia medio de funcionamiento y rendimiento eléctrico más alto.

Como ejemplo, señalamos unos valores típicos de un horno de 100 – 110 T con un transformador principal de 70 MVA

	Arco corto	Arco largo
Tensión entre fase y neutro	400 V	400 V
Tensión en el arco	280 V	335 V
Intensidad	69 kA	50 kA
Resistencia del arco	3,7 mΩ	6,0 mΩ
Reactancia del arco	0,37 mΩ	0,99 mΩ
Impedancia del arco	3,72 mΩ	6,08 mΩ

Ha sido frecuente simplificar el esquema, suponiendo que el arco se comporta como una resistencia variable y considerando una reactancia nula, Se verán más adelante las correcciones necesarias para tener en cuenta la reactancia del arco que depende, principalmente, de la intensidad en el arco o círculo secundario.

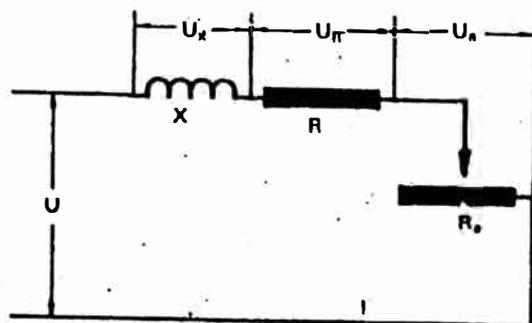
Referido al secundario del transformador, el circuito simplificado que interesa analizar se representa en la Fig. 3.13

La intensidad I , la potencia P_a desarrollada en el arco y la potencia P consumida en el círculo serán, respectivamente :

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X^2}} \quad (3.17)$$

$$P_a = I^2 \cdot R_a = U^2 \cdot \frac{R_a}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (3.18)$$

$$P = I^2 \cdot (R + R_a) = U^2 \cdot \frac{R + R_a}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (3.19)$$



X - Reactancia del circuito
Hasta el arco

R - Resistencia del circuito
Hasta el arco.

R_a - Resistencia del arco
Variable.

Fig. 3.13 Circuito Simplificado De Horno De Arco

Los valores máximos, en la variación con R_a corresponderán a :

$$\frac{dP_a}{dR_a} = 0, \text{ operando resulta: } R_a = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.20)$$

$$\frac{dP}{dR} = 0, \text{ operando resulta: } R + R_a = X \quad (3.21)$$

Dichos valores máximos son:

$$(P_a)_{max} = U^2 \cdot \frac{\sqrt{R^2 + X^2}}{(R + \sqrt{R^2 + X^2})^2 + X^2} \quad (3.22)$$

$$(P)_{\max} = U^2 \cdot \frac{1}{2X} \quad (3.23)$$

Los valores de P_a y P cuando el otro es máximo son:

$$(P_a)_{P_{\max}} = U^2 \cdot \frac{X - R}{2X^2} \quad (3.24)$$

$$(P)_{P_a_{\max}} = U^2 \cdot \frac{R + \sqrt{R^2 + X^2}}{(R + \sqrt{R^2 + X^2})^2 + X^2} \quad (3.25)$$

Para el factor de potencia se obtienen los siguientes valores:

- En general :

$$\cos \varphi = \frac{R + R_a}{\sqrt{(R + R_a)^2 + X^2}} \quad (3.26)$$

- Para $(P_a)_{\max}$:

$$\cos \varphi_1 = \frac{R + \sqrt{R^2 + X^2}}{\sqrt{(R + \sqrt{R^2 + X^2})^2 + X^2}} \quad (3.27)$$

- Para $(P)_{\max}$:

$$\cos \varphi_1 = \frac{X}{\sqrt{2} \cdot X} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \quad (3.28)$$

Se define el rendimiento eléctrico η_e como la relación entre la potencia desarrollada en el arco P_a y la potencia consumida. Resultan los siguientes valores:

- En general:

$$\eta_e = \frac{P_a}{P} = \frac{R_a}{R + R_a} \quad (3.29)$$

que no depende directamente de X :

- Para $(P_a)_{\max}$:

$$\eta_{e1} = \frac{\sqrt{R^2 + X^2}}{R + \sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.30)$$

- Para $(P)_{\max}$:

$$\eta_{e1} = \frac{X - R}{X} = 1 - \frac{R}{X} \quad (3.31)$$

El análisis de las fórmulas anteriores es más fácil introduciendo valores adimensionales tales como:

$$r = \frac{R_a}{R} \quad (\text{relación de resistencia})$$

$$x = \frac{X}{R} \quad (\text{tangente del ángulo de fase en circuito abierto})$$

A) Intensidad

A partir de la ecuación 3.17:

- Cortocircuito franco (electrodos sumergidos en el baño):

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.32)$$

O bien:

$$\frac{R \cdot I_{CC}}{U} = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \quad (3.33)$$

- En general:

$$\frac{R \cdot I}{U} = \frac{1}{\sqrt{(1+r)^2 + x^2}} \quad (3.34)$$

- Para $(P_a)_{max}$:

$$\frac{I_{CC}}{(I)_{Pa_{max}}} = \sqrt{2 \cdot \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right)} \quad (3.35)$$

que resulta:

2	para $x = 0$
1,85	para $x = 1$
1,41	para $x = \infty$

- Para $(P)_{max}$:

$$\frac{I_{CC}}{(I)_{Pmax}} = \sqrt{2 \cdot \left(1 - \frac{1}{1+x^2} \right)} \quad (3.36)$$

que resulta

0	para $x = 0$
1	para $x = 1$
1,41	para $x = \infty$

B) Potencia en el arco

A partir de la ecuación 3.18:

$$\frac{R \cdot P_a}{U^2} = \frac{r}{(1+r)^2 + x^2} \quad (3.37)$$

Se representa en la Fig.3.14 con r como abscisa

El valor máximo corresponde a:

$$r = \sqrt{1+x^2}$$

y resulta :

$$\frac{R \cdot (P_a)_{max}}{U^2} = \frac{1}{2 \cdot (1 + \sqrt{1+x^2})} \quad (3.38)$$

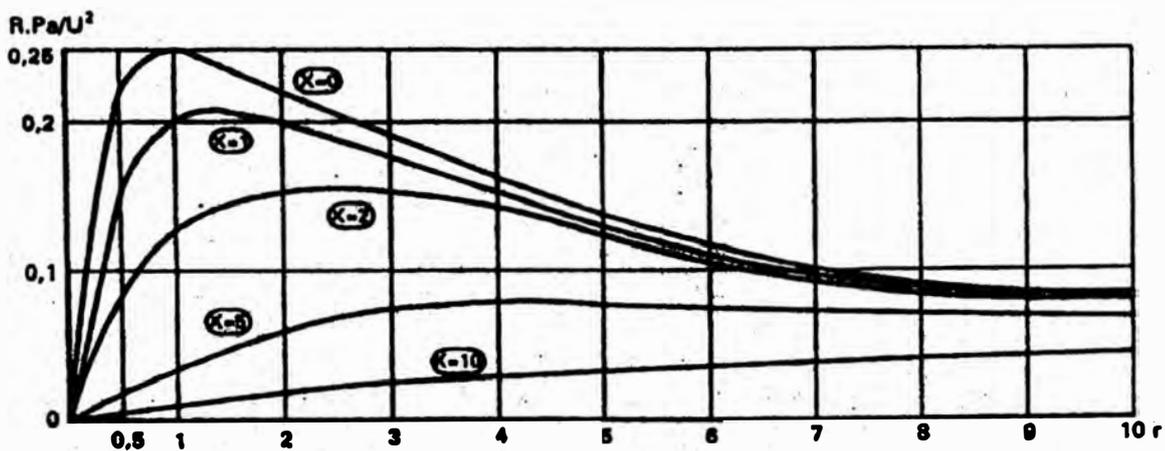


Fig. 3.14 Potencia En El Arco Adimensional ($R \cdot P_a / U^2$) En Función de R y X

Un cuadro de valores es el siguiente:

$x =$	0	1	2	3	4	5	10
$R \cdot (P_a)_{max} / U^2 =$	0,25	0,207	0,155	0,120	0,098	0,082	0,045

En la práctica los valores de r y x son altos, la curva resulta muy aplanada y se puede funcionar cerca de $(Pa)_{max}$ en una amplia gama de valores. No interesa tener valores muy bajos de r y x ya que darían lugar a intensidades muy altas según la fórmula 3.34, por lo que buscar un compromiso.

C) *Potencia Consumida*

De la ecuación 3.19 se deduce:

$$\frac{R \cdot P}{U^2} = \frac{1 + r}{(1 + r)^2 + x^2} \quad (3.39)$$

Se representa en la Fig. 3.15 con r como abscisa.

El valor máximo corresponde a $x = 1 + r$ y resulta:

$$\frac{R \cdot (P)_{max}}{U^2} = \frac{1}{2 \cdot x} \quad (3.40)$$

Para valores pequeños de r :

$$\frac{R \cdot P}{U^2} \approx \frac{1}{1 + x^2} \quad x \text{ es preponderante}$$

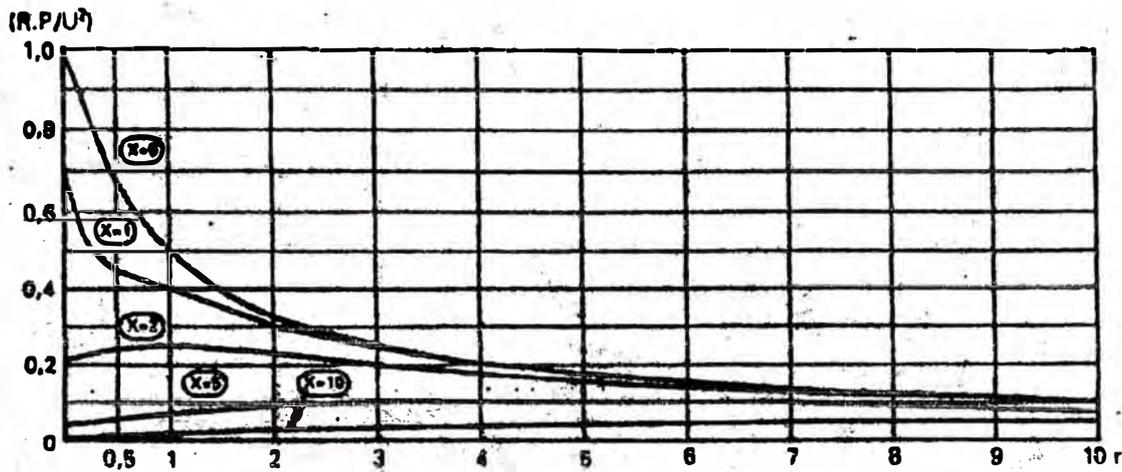


Fig. 3.15 Potencia Consumida Adimensional ($R \cdot P / U^2$) En Función R Y X

El valor de $R \cdot P / U^2$ para:

$$(P_a)_{\max} \text{ (en la que } r = \sqrt{1+x^2} \text{)}$$

resulta:

$$\left(\frac{R \cdot P}{U^2} \right)_{(P_a)_{\max}} = \frac{1 + \sqrt{1+x^2}}{1 + (1 + \sqrt{1+x^2})^2} \quad (3.41)$$

Lo que interesa realmente es que P_a esté cerca del máximo y que P está cerca de dicho valor de P_a es decir, que

$$P - (P_a)_{\max}$$

Sea lo más reducido posible, operando con las fórmulas 3.12 y 3.25 resulta:

$$\frac{\Delta P}{U^2} = \frac{P - (P_a)_{\max}}{U^2} = \frac{R}{(R + \sqrt{R^2 + X^2})^2 + X^2} \quad (3.42)$$

Interesa que R sea lo más baja posible.

D) Rendimiento Eléctrico

A partir de la ecuación 3.29

$$\eta_e = \frac{r}{1+r}$$

$$\cos \varnothing = 1$$

- Para $r = 0$ ($R_a = 0$, electrodos sumergidos):

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}$$

- Para $(P_a)_{\text{máx}}$ en que :

$$r = \sqrt{1+x^2}$$

- $$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot [(1+x^2) + \sqrt{1+x^2}]}} \quad (3.44)$$

Resultan los siguientes valores:

X =	0	1	2	3	4	5	7	10
Cos	1	0.92	0,85	0,81	0,79	0,77	0,76	0,74

Se aprecia que en el valor de $(P_a)_{\text{máx}}$. (es el que más interesa), el valor de $\cos \varnothing$ varía poco para una amplia gama de valores de x , por lo que se tiene un amplio margen en la elección.

- Para $(P)_{\text{máx}}$, en que $x = 1 + r$, resulta

$$\cos \varnothing = 0,707 \text{ como se vio en (3.28)}$$

3.2.5 Expresiones Para Hornos De Arco Trifásicos

Del esquema de la figura . 7 se deduce,, para una carga perfectamente equilibrada en las tres fases, siendo E la tensión entre fases en el esquema simplificado reducido al secundario del transformador:

$$E = U \cdot \sqrt{3} \quad (3.45)$$

$$I = \frac{E}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R+R_a)^2 + X^2}} \quad (3.46)$$

$$P_a = 3 \cdot I^2 \cdot R_a = \frac{E^2 \cdot R_a}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (3.47)$$

$$P = 3 \cdot I^2 \cdot (R + R_a) = \frac{E^2 \cdot (R + R_a)}{(R + R_a)^2 + X^2} \quad (3.48)$$

Es muy difícil conseguir en el secundario un circuito eléctrico totalmente simétrico en el extenso equipo formado por

- el embarrado y cableado a la entrada de la subestación.
- los componentes eléctricos en la subestación hasta el transformador principal.
- el embarrado y cableado desde el secundario del transformador hasta los electrodos.
- las columnas de electrodos y
- la carga.

Las asimetrías eléctricas de fases de los dos primeros son muy reducidas y no se suelen tener en cuenta en los cálculos. En los últimos 25 años han mejorado extraordinariamente los diseños para conseguir dicha simetría en el circuito secundario, pero es imposible evitar la asimetría motivada por la carga, que no es idéntica para las tres fases, excepto en la parte final del proceso cuando la carga está fundida.

Es el sistema de regulación el que debe operar ante esta asimetría entre fases:

- variando las intensidades en cada fase, cuando se opera con tensiones idénticas que es lo más frecuente, o
- variando las tensiones, cuando se opera con intensidades iguales.

3.2.6 Consideraciones Sobre La Reactancia Del Arco

En todo lo que antecede se ha supuesto en el arco una resistencia eléctrica que depende de la distancia entre electrodo y baño o de la tensión eléctrica aplicada en el arco considerando que la reactancia del arco era despreciable. Era válido para hornos de baja, media o alta potencia específica, que operaban a intensidades muy altas, arcos o tensiones bajas. Sin embargo, al operar con arcos largos a intensidades no tan altas, que dan lugar a factores de potencia más elevados, ha sido necesario considerar en los

cálculos un valor de reactancia en el circuito que representa el arco. Para su determinación se han seguido algunas reglas empíricas o utilizadas, gráficos que le relacionan con otros parámetros de funcionamientos.

Por ejemplo e en la referencia 12, se señala que:

$$X_d = 1,2 \cdot X_{cc}$$

Donde :

X_d = reactancia dinámica total en funcionamiento real,

X_{cc} = reactancia determinada en la prueba de cortocircuito.

En otras referencias aparecen factores desde 1,05 hasta 1,10 .Otros autores relacionan la reactancia dinámica con el cociente I / I_{cc} (intensidad en el circuito secundario /intensidad de la prueba en cortocircuito). Véase Fig. 3.16

Otros autores, relacionan la reactancia en el arco con la intensidad de la corriente (Fig. 3.17) y con el factor de potencia (Fig. 3.18). Asimismo en un análisis en series de Fourier de las magnitudes eléctricas llega a una expresión del tipo:

$$X_a = Z_a^2 \cdot \frac{D}{Z} \quad (3.49)$$

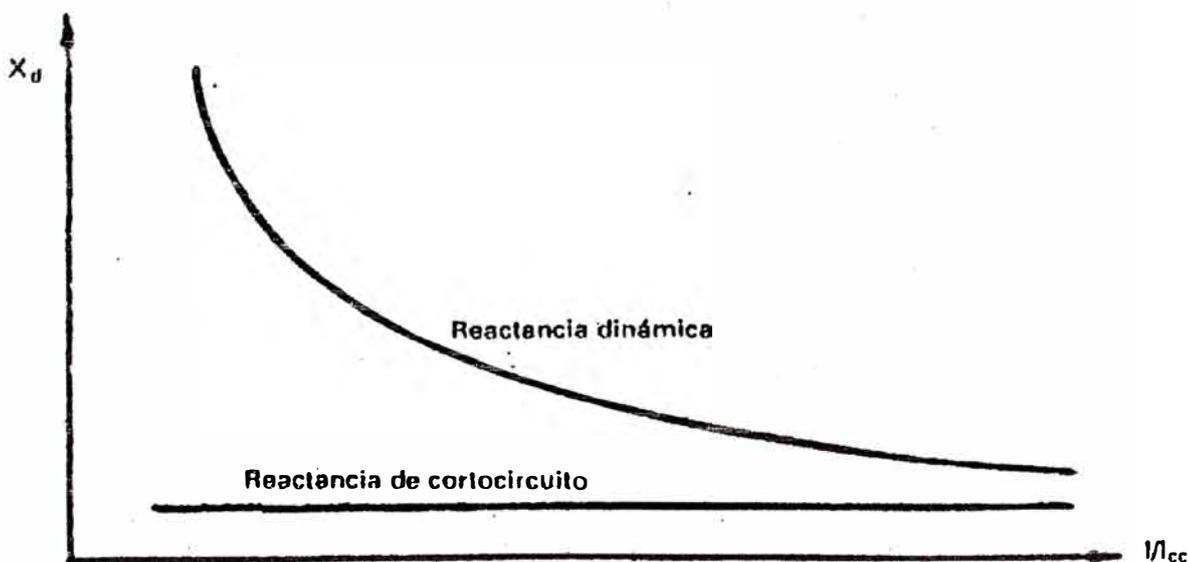


Fig. 3.16 Reactancia Dinámica En Función De La Intensidad

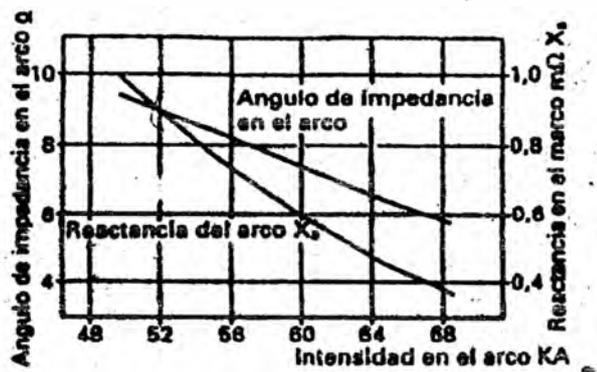


Fig. 3.17 Reactancia En El Arco
Función De I_a

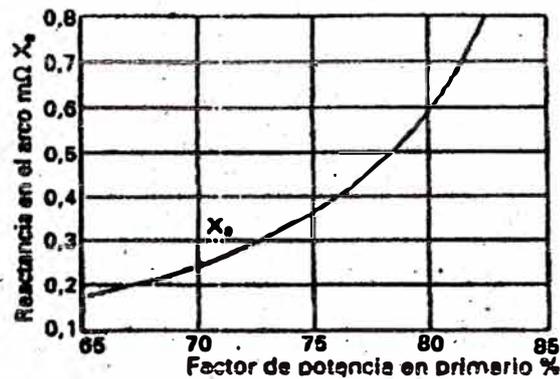


Fig. 3.18 Reactancia En El Arco
Función De $\cos \Phi$.

Donde:

X_a = reactancia en el arco,

Z_a = impedancia del arco,

D = factor resultante del análisis citado.

Z = impedancia del circuito secundario (la que resulta de la prueba en cortocircuito).

Unos valores para un horno de 100-110t con un transformador de 70 MVA son los siguientes:

Característica	Arco	Arco	Arco
	Corto	Medio	Largo
Tensión por fase de entrada (V)	394	394	394
Tensión en el arco (cuadrada) (V)	280	305	335
Intensidad secundaria (KA)	68.6	60,6	49,7
Resistencia en el arco (R) (mΩ)	3,66	4,50	6,00
Reactancia en el arco (X) (mΩ)	0,37	0,58	0,99
Impedancia en el arco (Z) (mΩ)	3,68	4,54	6,08
Resistencia de línea (mΩ)	0,39	0,39	0,39
Reactancia de línea (mΩ)	3,68	3,68	3,68
Impedancia de línea (mΩ)	3,79	3,70	3,70
Resistencia total (mΩ)	4,05	4,89	6,39
Reactancia total (mΩ)	4,05	4,26	4,67
Impedancia total (Z) (mΩ)	5,73	6,49	7,92

Resultan, aplicando la expresión (3.49) valores de D : 0,16, 0,18, 0,21, con un valor medio de 0,18 sin embargo, los factores para paso de la reactancia en cortocircuito a la reactancia dinámica son

$$4,05 / 3,68 = 1,10; 4,26 / 3,68 = 1,16; 4,67 / 3,68 = 1,27$$

que suponen incrementos del 10,16, 27 por 100 para la reactancia dinámica respecto a la de cortocircuito por lo que un aumento fijo del 20 por 100 es bastante inexacto.

3.3 Diagramas De Funcionamiento En C.A.

En la Fig. 3.19 se muestra uno de los gráficos mas utilizados en el funcionamiento de los hornos de arco. Para las tensiones más normales de funcionamiento (en el caso concreto de la Fig. 400, 550, 700 y 850 V) se indican las potencias en el arco P_a y absorbida de la red P , cuyo cociente es el rendimiento eléctrico para diferentes intensidades en el secundario. Es fácil deducir la zona de funcionamiento cerca de la potencia máxima en el arco, cuando se quiere obtener la máxima producción.

En ocasiones se completa el gráfico con las curvas de:

- factor de potencia ($\cos \varnothing$),
- rendimiento
- potencia aparente.

para la tensión nominal de la instalación (véase Fig. 3.20)

Para un análisis más detallado es preferible referir todas las características eléctricas a índices. Se toma como abscisa la relación R / X donde $R = R_a + R_l$ es variable con la resistencia del arco, y X es prácticamente

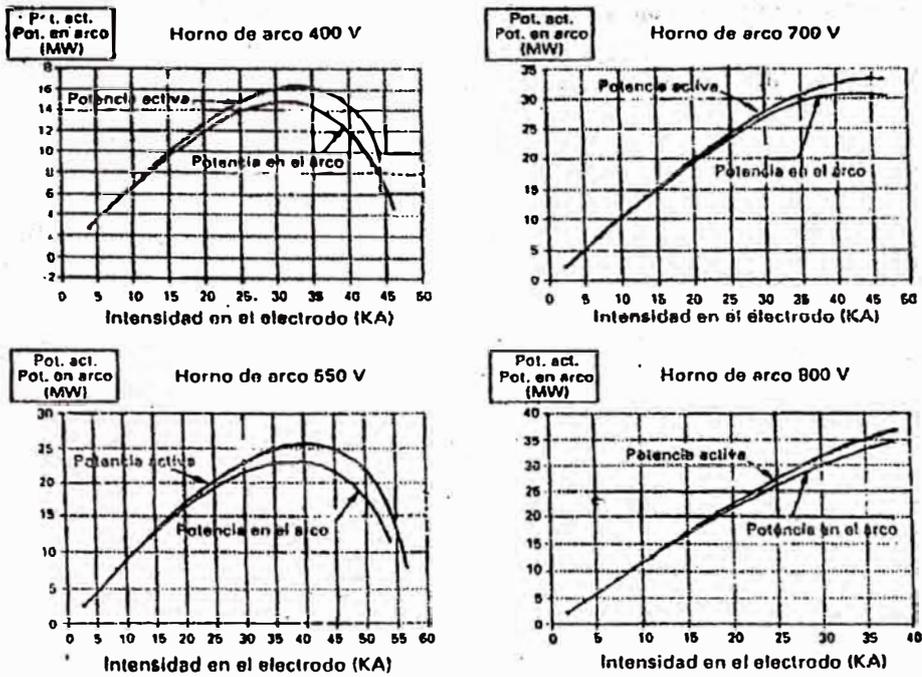


Fig. 3.19 Potencia En El Arco Y Potencia Absorbida Para Diferentes Tensiones (DANIELI)

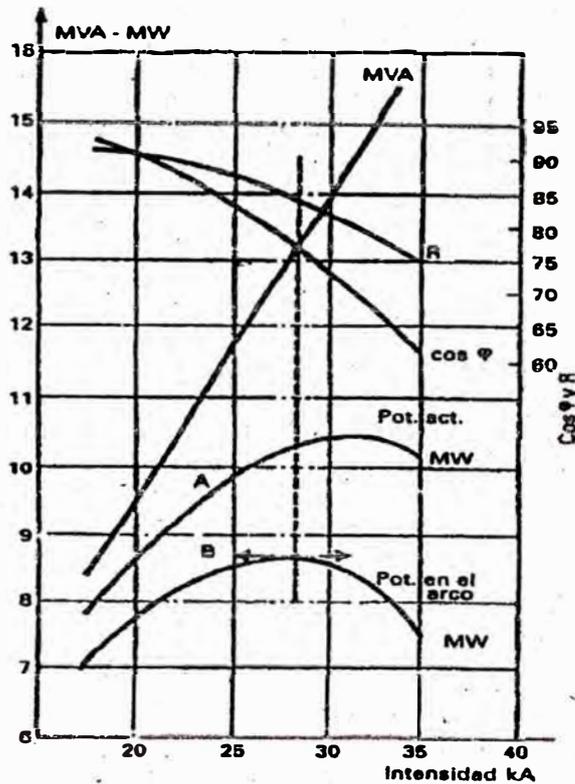


Fig. 3.20 Diagrama De Horno De 25 T-12 MVA

constante, si se considera menos importante la reactancia dinámica del arco. Las curvas de las Fig. 3.21 Fig. 3.22 señala en valores porcentuales o índices:

- El factor de potencia, creciente al aumentar R_a . (longitud del arco)
- La potencia activa o consumida P
- La intensidad en el circuito secundario
- La impedancia total del circuito
- La potencia en el arco P_a ,
- El rendimiento como relación P_a/P ,
- La potencia reactiva y la potencia aparente.

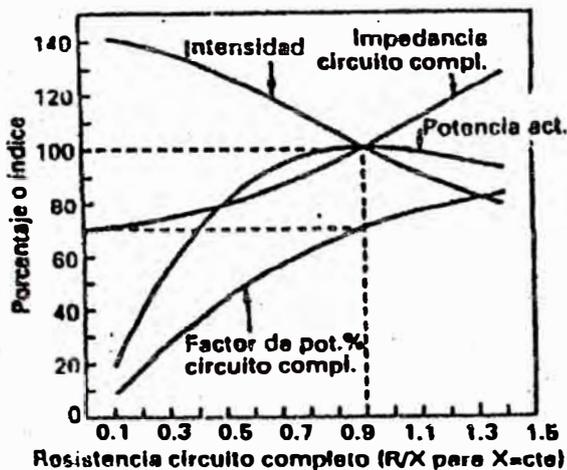


Fig. 3.21 Potencia, Intensidad
E Impedancia

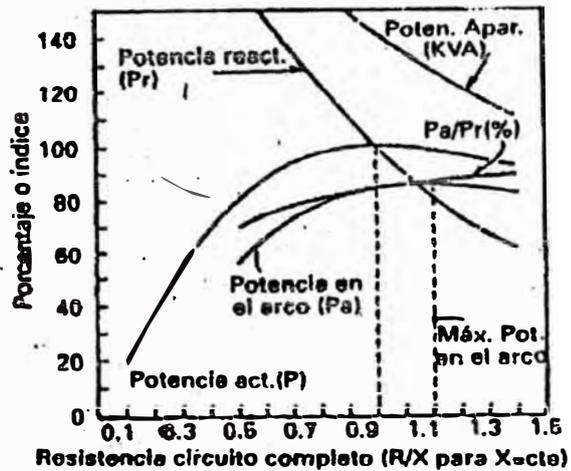


Fig. 3.22 Potencia En El Arco Y En El
Circuito

En forma similar a las máquinas eléctricas se prepara el diagrama de círculo para los hornos de arco tal como se muestra en la figura 3.23 para cada tensión se toma en abscisas un valor equivalente a la intensidad correspondiente a la reactancia total del circuito.

$$I = \frac{U}{X}$$

y se trazan círculos correspondientes a dichos diámetros.

Realmente la intensidad de cortocircuito corresponde a:

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (3.50)$$

que estará desplazada según la línea (5), a la que le corresponde un factor de potencia :

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

Las potencias se obtienen en ordenadas, siguiendo las curvas de potencia aparente en MVA y siguiendo horizontales y potencias absorbidas en MW. En abscisas se obtienen las intensidades y también las potencias reactivas siguiendo las líneas verticales. En dicha figura se han trazado las líneas límites que son:

1. Factor de potencia máximo definido a partir de la intensidad nominal y la de cortocircuito :

En el caso de la figura $I_n = 78 \text{ kA}$, $I_{CC} = 155 \text{ kA}$.

$$\cos \varphi = \frac{R_a + R_e}{\sqrt{(R_a + R_e)^2 + X^2}} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{I_n}{I_{CC}} \right)^2} = 0,86$$

2. Tensión máxima disponible: 640 V.
3. Potencia aparente del transformador principal 78 MVA
4. Intensidad máxima admisible en el circuito secundario: 78 kA
5. Factor de potencia mínimo correspondiente a cortocircuitos con los electrodos sumergidos en el baño.
6. Tensión máxima disponible 240 V.

Dentro de dicho diagrama es frecuente representar los puntos de funcionamiento para las sucesivas fases del proceso (perforación inicial de la carga, fusión en plena tensión, final de la fusión a plena intensidad, ajustes a potencias reducidas y mantenimiento antes de la colada) como se vera en el apartado 6.1.2

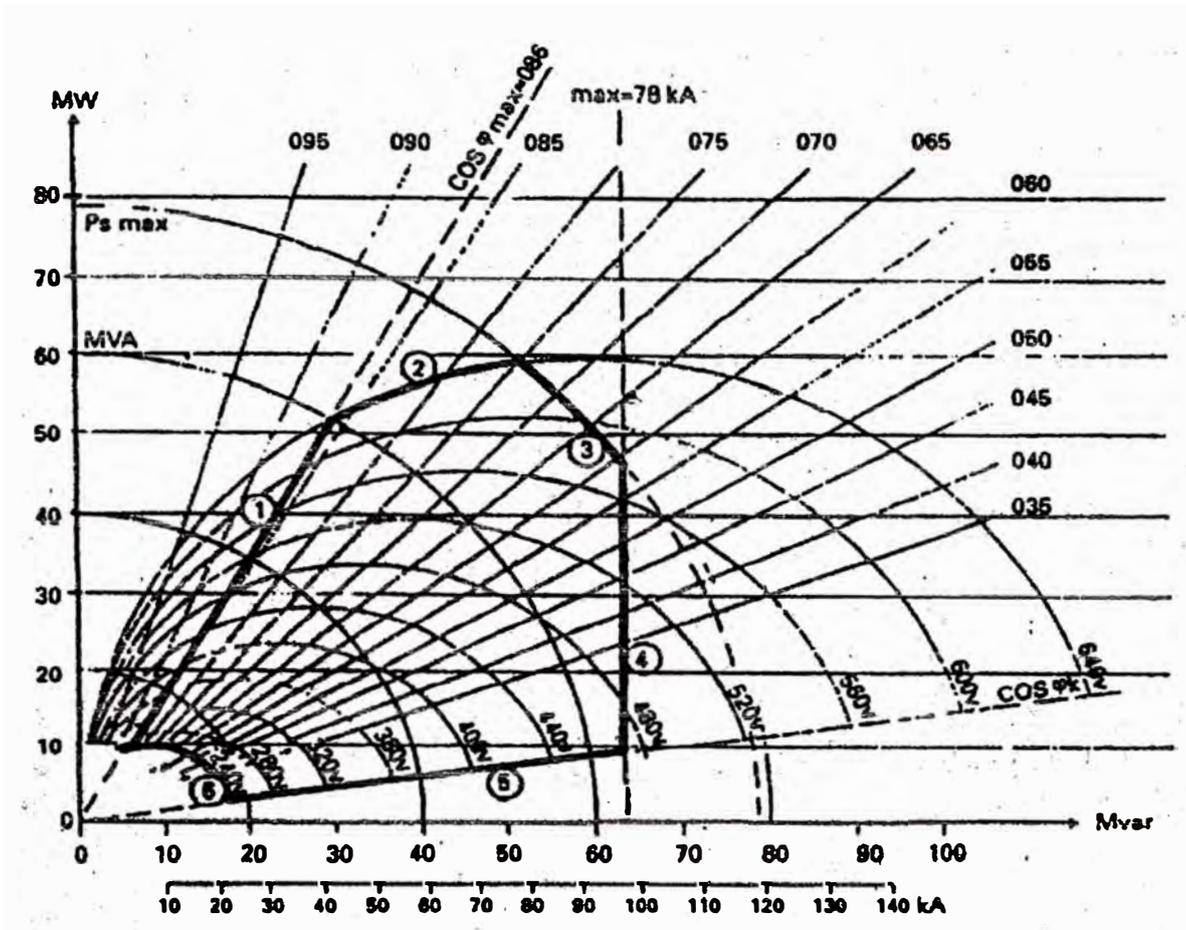


Fig. 3.23 Diagrama De Círculo En Un Horno De Arco. Líneas Límite

CAPÍTULO IV

EQUIPOS ELÉCTRICOS EN CORRIENTE ALTERNA

4.1 Introducción Componentes Del Equipo Eléctrico

En general, los hornos de arco se conectan a una línea eléctrica de 10 a 40 KV, siendo muy frecuente en las redes españolas la de 30 KV. Existen instalaciones conectadas directamente a una tensión de 130 kV e incluso 220 kV, pero lo más frecuente es disponer un transformador escalón para pasar de la línea de alta tensión de 130 o 220 kV a la tensión de entrada a la subestación del horno, tal como se muestra en la Fig. 4.1

Dentro de la subestación propia del horno los elementos principales son (véase Fig. 4.2)

- Los seccionadores de entrada con fusibles (1) para la instalación eléctrica del horno y (2) para la puesta a tierra de la línea de entrada.
- El interruptor general (3) , de diseño específico para hornos de arco , que permite un alto número de maniobras de desconexión del horno en carga. Los dos tipos más utilizados son el interruptor de vacío y el de aire comprimido, quedando para bajas potencias el interruptor magnético al aire.
- El transformador de horno (4) para reducir la tensión de entrada (10 a 40) KV y muy frecuentemente 30 kV) a las tensiones requeridas para el funcionamiento del horno.

Son frecuentes algunos casos:

- El sistema de protección (5) con pararrayos auto válvulas de Z nO
- El equipo de filtrado de armónicos y de corrección del flicker, cuando la capacidad de la línea no es suficiente, se verá con suficiente amplitud en el apartado 4.5

A ambos lados del interruptor general (3) se disponen los transformadores de medida de tensión (6), e intensidad (7) en alta tensión. Asimismo, en el lado secundario del transformador principal se disponen los transformadores reductores de tensión y de medida de intensidad (8), cuyas señales van al panel de control y al equipo electrónico de regulación de electrodos.

Por las intensidades muy altas del circuito secundario a tensiones del orden de 1,000 V y las elevadas tensiones del primario del transformador (normalmente 10 a 40 kV pero pudiendo llegar en ocasiones a 110 –220 kV, y cableado correspondientes para asegurar un funcionamiento continuo, en muchos casos de 24 horas /día, 7 días / semana.

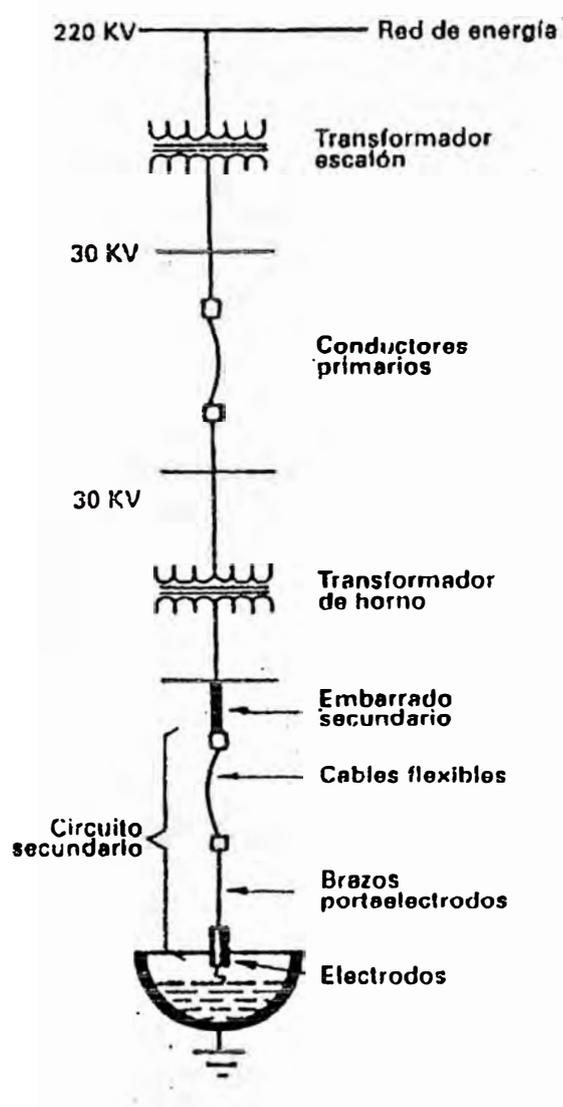


Fig. 4.1 Esquema Eléctrico Básico

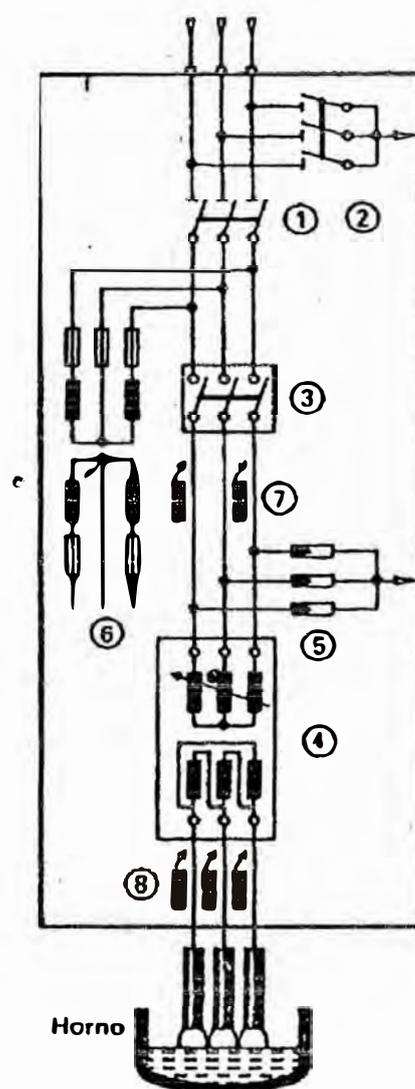


Fig. 4.2 Esquema Eléctrico De La Subestación Del Horno

4.2 Transformador Principal

Es el elemento fundamental del equipo eléctrico. Su construcción es muy robusta por estar sometido, no solamente a altas tensiones e intensidades, sino a grandes esfuerzos electrodinámicos en los devanados, sobre todo en el secundario, por el normal funcionamiento del horno con arcos continuos entre los electrodos y el baño, aunque atenuados por la reactancia del horno y del circuito secundario.

El transformador debe aceptar sobre cargas del orden del 20 por 100 durante una parte del período de fusión y su potencia específica, en kVA por T de carga del horno, continúa creciendo. Unas cifras orientativas de su evolución a lo largo del tiempo podrían ser, para un horno de 100 t de capacidad.

AÑO	Potencia específica	Notas adicionales
1960	350 kVA/T	Afino en el horno, consumo de O ₂
1965	500 kVA/T	Paneles con H ₂ O en paredes y bóveda.
1975	600 kVA/T	Quemadores oxi-gas
1980	700 kVA/T	Horno cuchara de afinado
1985	700 kVA/T	Pre calentamiento de chatarra.

En la Fig. 4.3 se muestra un transformador de horno de 40 MVA visto por el lado de alta tensión con los refrigerantes de aceite-agua y las bombas de circulación forzada de aceite, típico de los equipos de potencia superior a 20-25 MVA

En primario se conecta en triángulo o en estrella y el secundario siempre en triángulo, disponiéndose las tomas variables en el primario debido a sus menores intensidades. El cajón lateral de la Fig. 4.3, corresponde al cambiador de tomas que puede operar en vacío o en carga, siendo más frecuente esta última en los hornos de funcionamiento más automático, como se vera en el apartado 4.4.

No es grande la concordancia entre los fabricantes de hornos de arco respecto a la potencia nominal en catálogo respecto a la capacidad de la cuba en toneladas, que depende, a su vez, del diámetro interior de la calderería.

Unos valores, correspondientes a cuatro fabricantes europeos se dan en la tabla de la página siguiente.

En cuanto a las tensiones secundarias, es normal disponer de 12-16 tensiones las cuatro primeras capaces de la potencia máxima y las restantes de potencia reducida a intensidad máxima constantes en el devanado secundario. Después de las pruebas iniciales de producción se eligen las cuatro- seis tensiones mas adecuadas para el funcionamiento que son las utiliza el equipo de control automático de proceso.

Cuba Ø mm	A		B		C		D	
	T	MVA	T	MVA	T	MVA	T	MVA
4.000	25	17	--	--	--	--	30	24
4.300	35	20	30-40	20-25	25-35	15-20	38	30-34
4.600	45	25	--	--	35-45	18-24	46	37-39
4.900	55	30	40-55	30-35	45-55	25-30	55	44
5.500	75	42	60-80	40-60	60-70	30-45	80	64
6.100	100	60	90-120	65-75	85-95	50-60	110	88
6.700	160	80	120-140	85-100	120-140	75	150	120
7.300	190	100	150-190	110-120	140-180	90	--	--

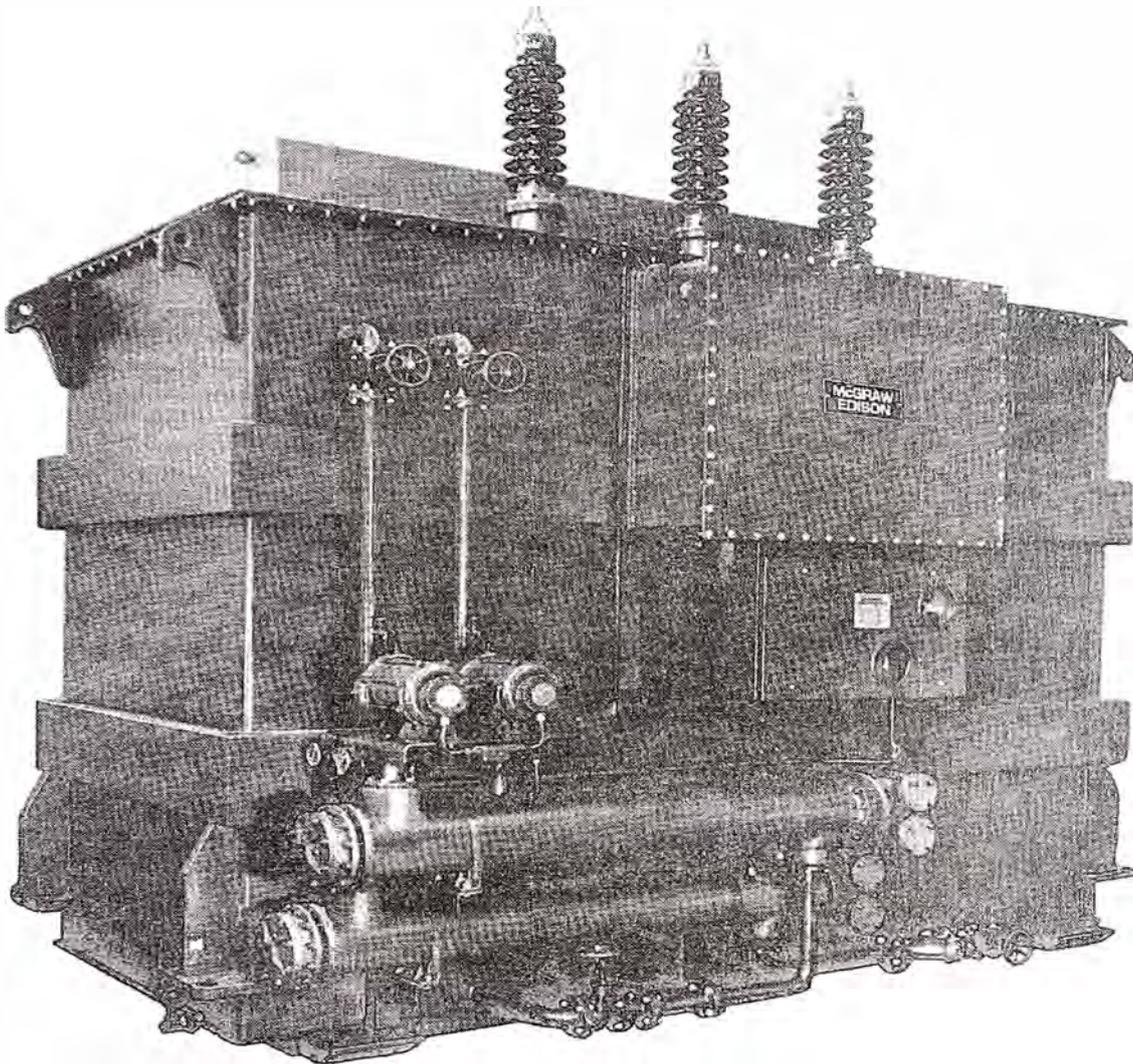


Fig. 4.3 Transformador De Horno De Arco De 40 MVA (ABB)

Como ejemplo, se indican los siguientes valores:

1. Horno de 45 –50t (diámetro de cuba 4.900 mm) con transformador de 35 MVA. Cinco tensiones de plena potencia (nominal 475 V, ± 5 por 100 y ± 10 por 100) y 8 tensiones de potencia reducida de 420 a 170 V.
2. Horno instalado en el 1981 y reformado en 1989. Capacidad 130-135 (diámetro de cuba 6,700 mm) potencia del transformador 138 MVA para dar una potencia en el secundario de 90 MW .Tensión nominal de plena potencia 950 V. Tensión máxima 1,050 V.

Con objeto de reducir las pérdidas inductivas, las conexiones entre fases para cerrar el triángulo en el secundario se realizan fuera del transformador en la salida hacia los cables refrigerados por agua. Es decir, el secundario del transformador, se realiza en triángulo abierto, En la Fig. 4.4 se muestra un transformador de horno de 36 MVA con el embarrado de salida en baja tensión y el lugar en que se cierra el triángulo, justo antes de las barras que atraviesan la pared de la subestación, y se conectan a los cables refrigerados por agua de conexión al horno.

Normalmente, la reactancia propia del transformador del horno (4-6 por 100) es suficiente en hornos de más de 2.5 t para un funcionamiento estable con arcos cortos y medios a tensiones de 400 a 800 V. Sin embargo cuando se quiere operar con arcos largos, lo que requiere tensiones del orden de 100 (V) 8 para hornos de 120 – 140 t y potencia 90 – 100 MVA) se instalan reactancias suplementarias en serie para aumentar la estabilidad del arco y reducir las roturas de electrodos, cuando se presenta un problema de resonancia mecánica del conjunto de brazo porta electrodo y columna (véase el apartado 6.1.5) de este modo se reduce sensiblemente, para la misma potencia, la intensidad en el circuito secundario.

4.3 Embarrado Y Cables Secundarios

En la Fig.4.4 se muestra el embarrado de salida del secundario del transformador por la parte superior y las conexiones para formar el triángulo. En hornos más modernos es frecuente disponer lateralmente las salidas del transformador (véase Fig. 4 .5) lo que conduce a un acortamiento del embarrado y una menor reactancia del circuito secundario. En dicha figura se aprecia también la disposición de los cables en baja tensión, desde el embarrado a la salida del transformador, atravesando la pared de la subestación donde se cierra la conexión en triángulo del secundario, hasta los brazos porta electrodos que se consideran integrantes de la parte mecánica del horno.

Tanto en dicha figura 4.5 como en la 4.6 se aprecia la disposición triangulada del embarrado, cables secundarios refrigerados por agua y tubos conductores de corriente en los brazos porta electrodos, con objeto de conseguir unos valores eléctricos de resistencia y reactancia lo más posible. Por las altas intensidades que se manejan 8 hasta 80 Ka9 es muy importante conseguir unas buenas juntas de apriete entre elementos atornillados, pero acudiendo a juntas soldadas siempre que sea posible.

Los embarrados, normalmente de cobre, se calculan para densidades de corriente de 1-1,5 A/mm². lo que exige la colocación de varias barras en paralelo. A veces para mejorar la conducción eléctrica, se alternan barras de diferentes fases y es conveniente la disposición vertical de las mismas para facilitar la refrigeración natural al aire.

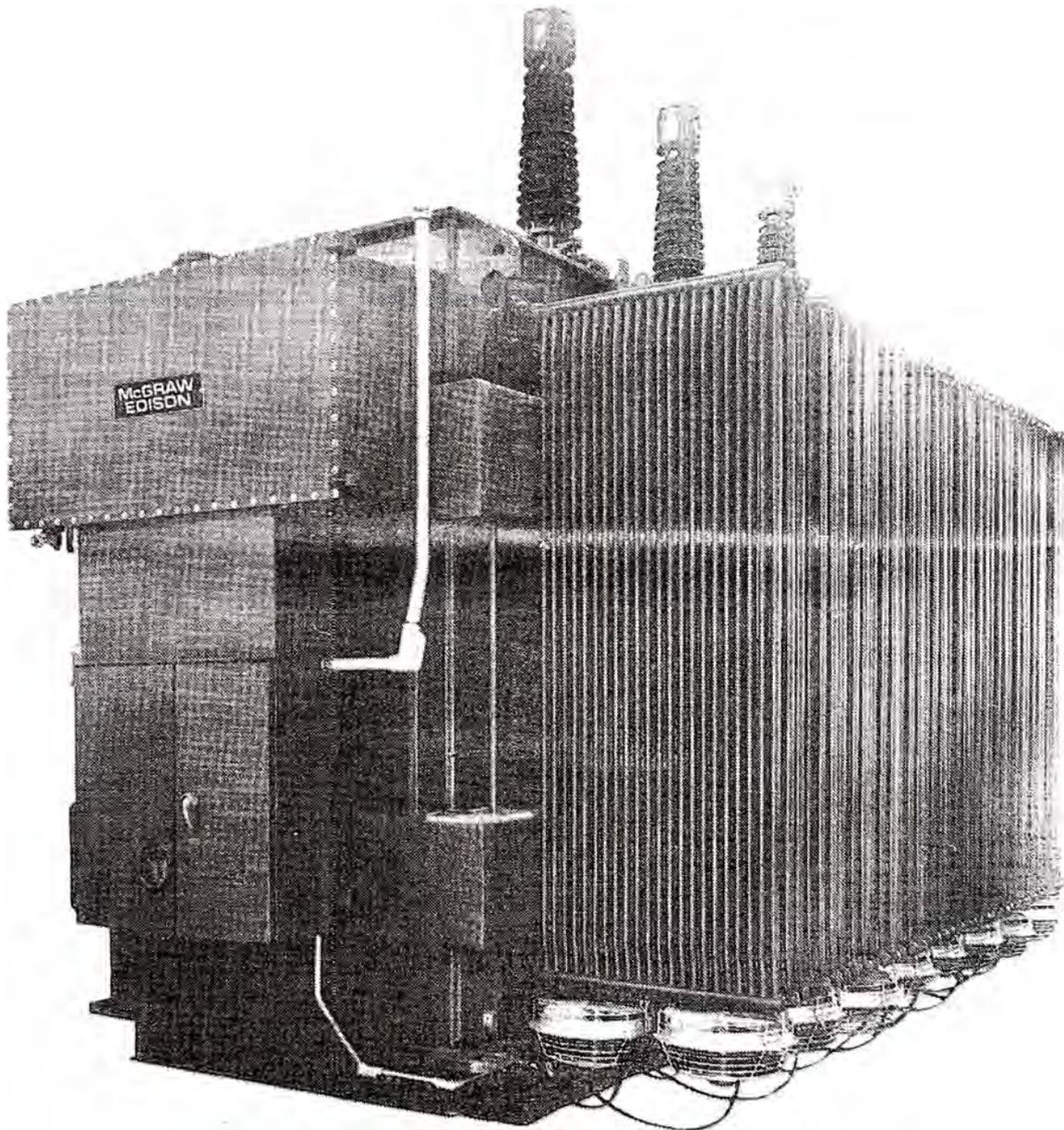


Fig. 4.4 Transformador de horno de 36 MVA con embarrado en salida y conexión exterior del triángulo secundario (GEE – ABB)

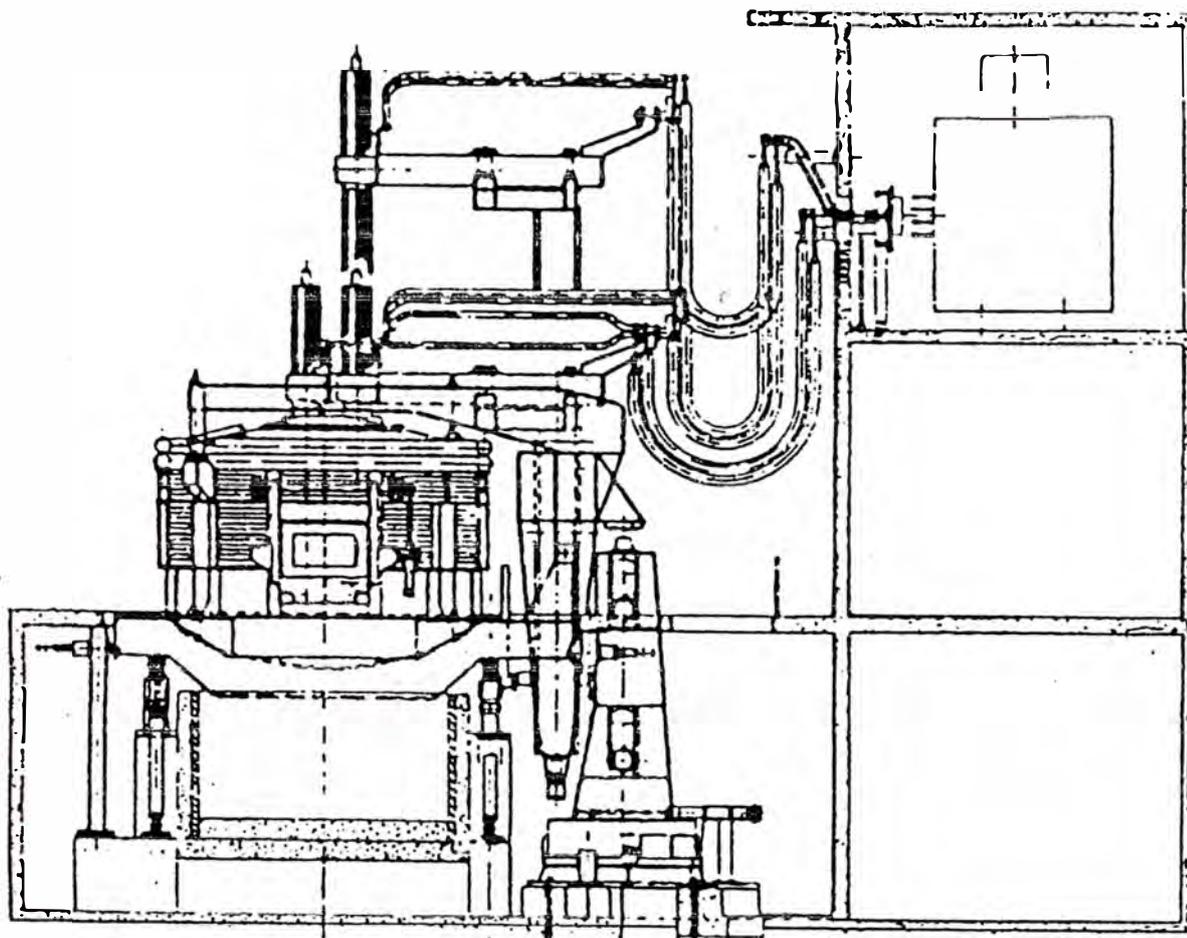


Fig.. 4.5 Disposición De Barras Y Cables Con Salida Lateral Del Transformador (DANIELI).

Se han construido también embarrados de aluminio, muy frecuentes en hornos de arco sumergido, pero menos frecuentes en los de fusión de acero de alta potencia. Se han construido también embarrados tubulares refrigerados por agua, como esquemáticamente, se muestra en la Fig. 4.6

Hasta 30-40 kA se construían los cables secundarios con 10-12 torones de refrigeración al aire, pero todos los hornos de arco modernos de potencia superior a 10 MVA llevan cables refrigerados por agua formados por:

- Un núcleo central para el paso del agua.

- 6-8 cables flexibles de cobre, separados entre sí y con un cierto arrollamiento en espiral sobre el núcleo central.
- Una funda exterior
- Unos terminales de cobre que se atornillan al embarrado, por un lado, y a los extremos de los brazos porta electrodos, por otro . Véase Fig.4.7

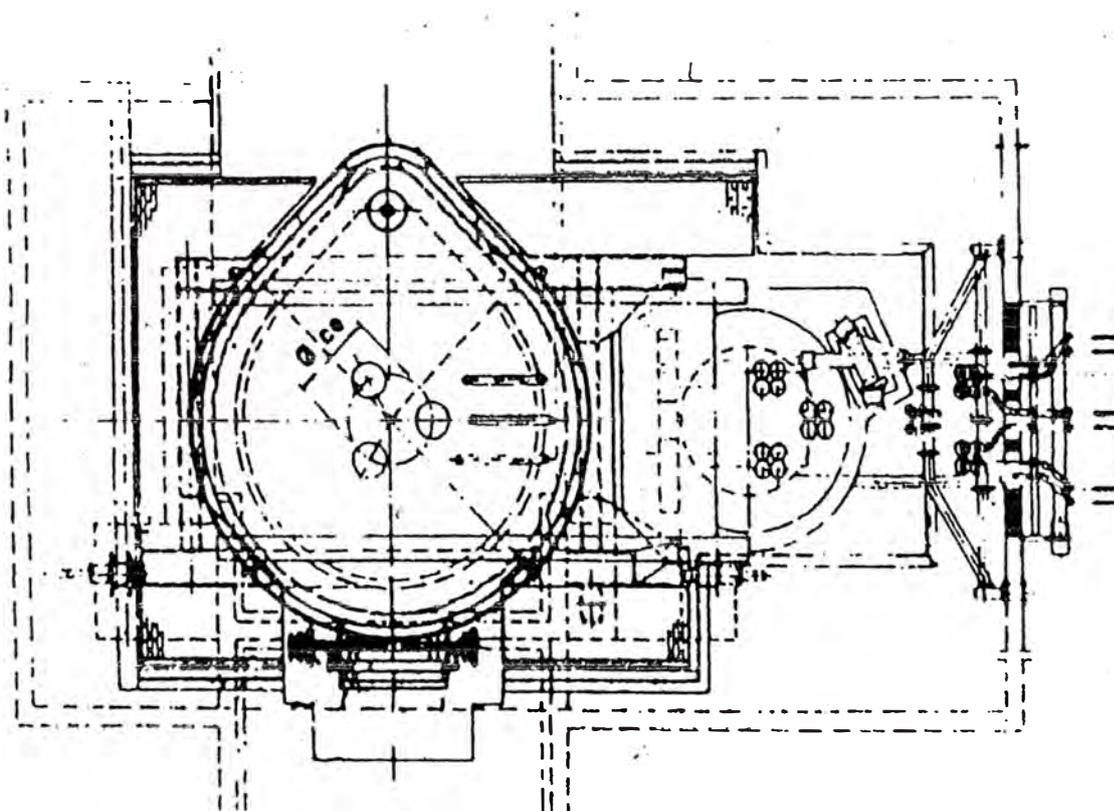


Fig. 4.6 Disposición Triangulada Del Embarrado Y Cables Secundarios (DANIELI)

Se calculan para una densidad de corriente de 6-10 A/mm y su longitud y , por tanto, su resistencia eléctrica se ha reducido al introducir en el horno la colada por el fondo. Anteriormente, con el vaciado del horno por el pico de colada se requería un ángulo de 40-42°. Actualmente con la colada del horno es suficiente un ángulo de basculación 15°

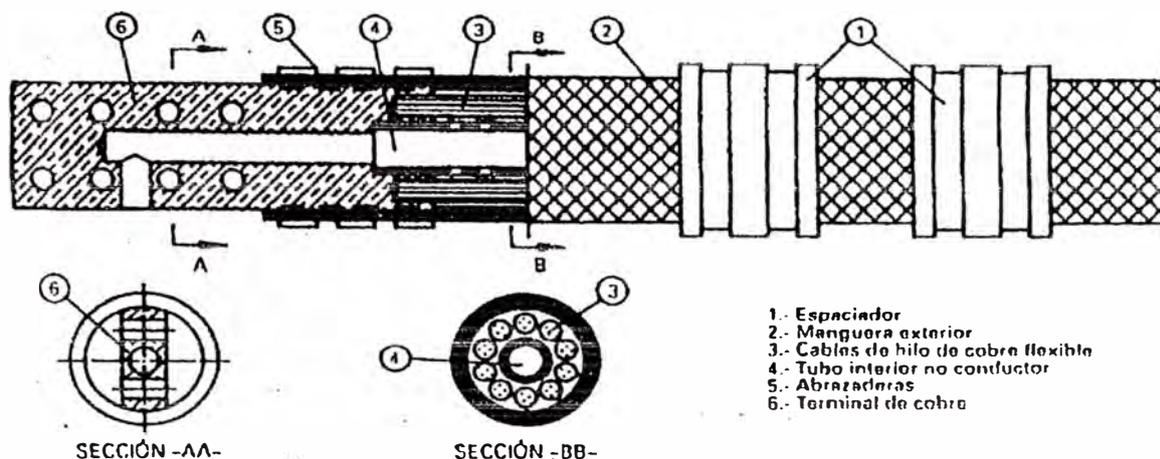


Fig. 4.7 Cable Refrigerado Por Agua

4.4 Equipo de Control

4.4.1 Generalidades

En el funcionamiento normal del horno eléctrico de arco las variables eléctricas que pueden controlarse son, únicamente, la tensión secundaria del transformador principal y la posición de los electrodos y, como consecuencia de ambas, la intensidad. La tensión secundaria corresponderá a la toma del transformador elegida y su cambio se produce en contadas ocasiones a lo largo de un proceso de fusión, afino y colada completo.

La potencia y la intensidad en el arco vienen dadas por las expresiones:

$$P_a = 3 \cdot I^2 \cdot R_a = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_a}{Z^2} = \frac{3 \cdot U^2 \cdot R_a}{(R + R_a)^2 + (X + X_a)^2} \quad (4.1)$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + R_a)^2 + (X + X_a)^2}} \quad (4.2)$$

Donde:

- P_a = Potencia en el arco,
- I = Intensidad por fase en el circuito secundario
- R = Resistencia equivalente del secundario,
- R_a = Resistencia del arco

- X = Reactancia equivalente del secundario
 X_a = Reactancia del arco
 Z = Impedancia total del secundario y arco.

Elegida una tensión secundaria (Entre fases = $\sqrt{3} - U$, siendo U la tensión entre fase y neutro), la intensidad depende de la impedancia Z que, para un horno determinado, con R y X constantes, es función de la longitud del arco, es decir, de R_a y X_a . En la potencia influye además el valor de R_a . Por tanto, un equipo de regulación trata de mantener el electrodo en una misma posición respecto del baño para lo que, a partir de medidas de tensión e intensidad debe mantener Z en un valor :

$$Z = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

El electrodo se encuentra en reposo cuando $U = k \cdot I$

Si $U - k \cdot I > 0$ hace subir el electrodo. Normalmente se introduce en la expresión un término constante k_1 tal que:

$$U = k \cdot I + k_1 \quad (4.4)$$

de modo que, en caso de corte en el suministro eléctrico ($U = I = 0$) el Electrodo sube automáticamente.

4.4.2 Sistemas De Control De Impedancia

Aunque el principio de funcionamiento de los reguladores es siempre el mismo, existen varios sistemas que se diferencian por el método de amplificación de la señal y por el método en que la señal de error se trasmite al electrodo. Los métodos basados en amplidinas y amplificadores magnéticos han quedado totalmente obsoletos y actualmente únicamente se utilizan los dos siguientes:

- A) Sistema enteramente eléctrico y electrónico en el que las señales de tensión e intensidad se amplifican electrónicamente y la señal de error correspondiente se envía a un acoplamiento magnético colocado entre un motor de corriente-

alterna, que gira continuamente a 1.500 r.p.m. y un reductor. A la salida del reductor se dispone el tambor de arrollamiento del cable, que actúa sobre las comunas y brazos porta electrodos, como se muestra en la Fig. 4.8

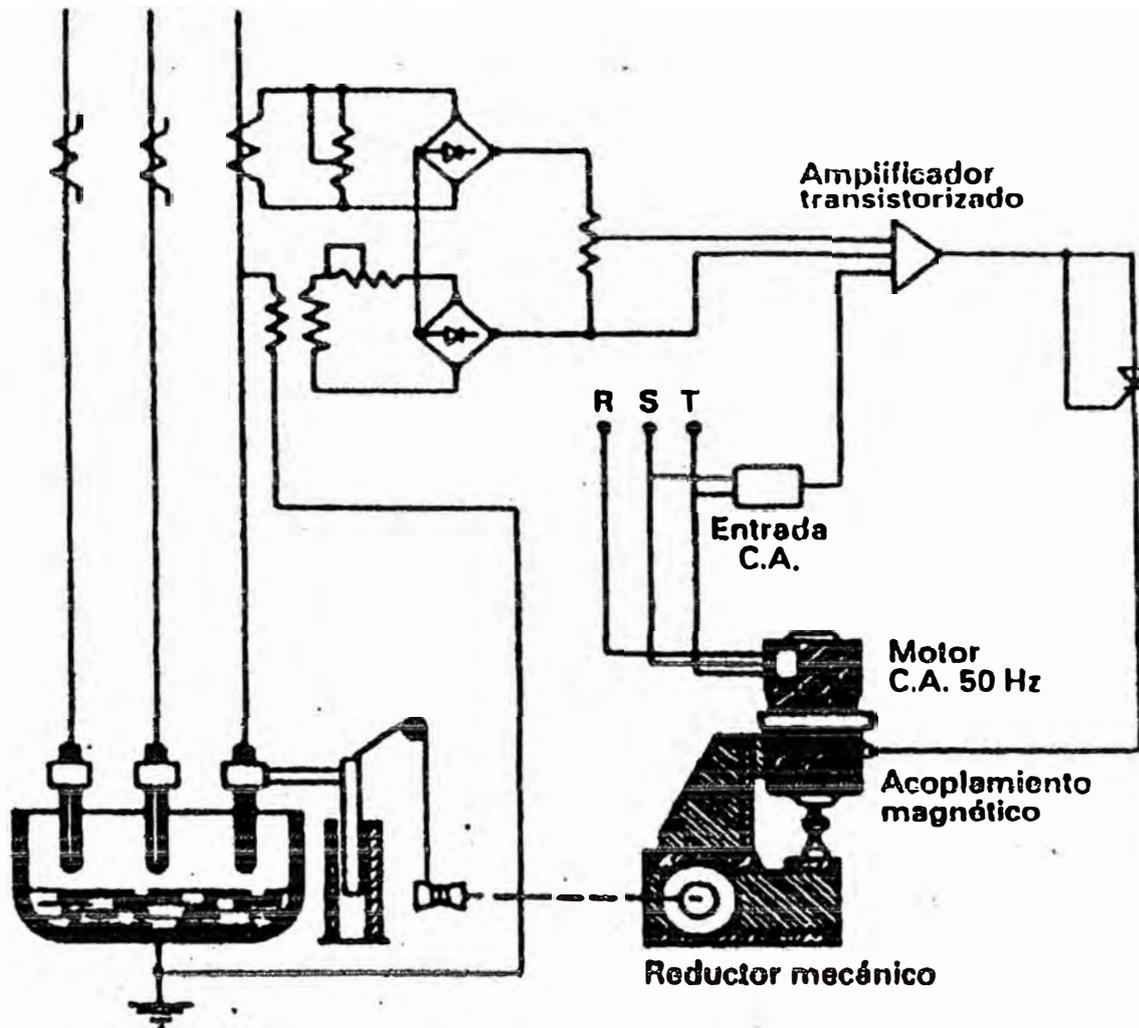


Fig. 4.8 Sistema Eléctrico De Control De Electrodos (ABB)

También se emplean, como alternativas más recientes, un convertidor de C.C. más un motor de C.C. o un convertidor de frecuencia más un motor de C.A.

Si la señal que llega al acoplamiento magnético es tal que equilibra el peso del conjunto móvil-columnas y brazos porta electrodos con la fuerza de acoplamiento con el motor C.A. estamos en la condición.

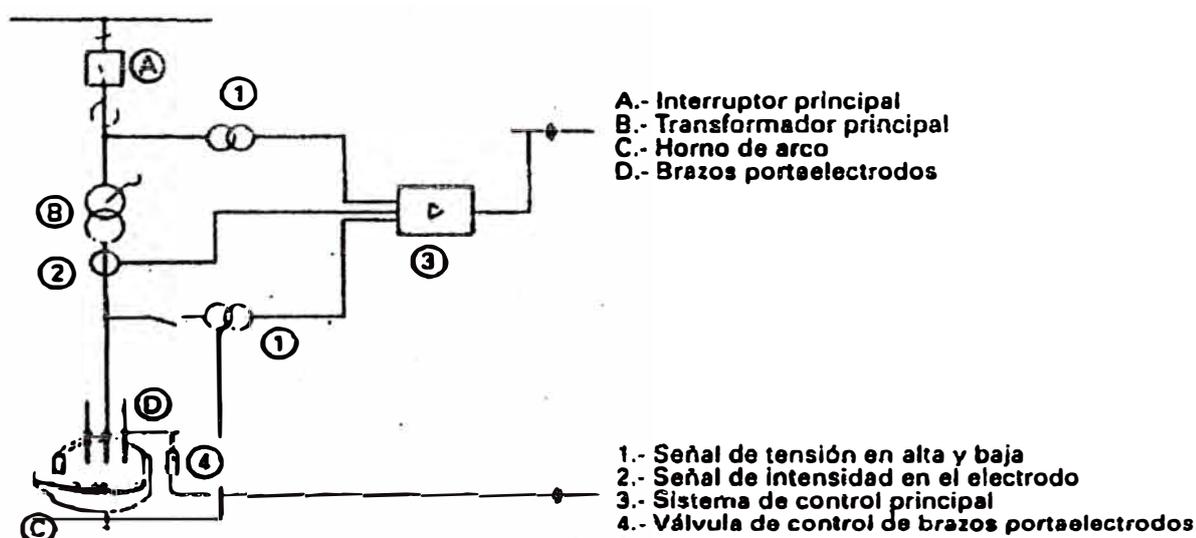
$$U = k \cdot I$$

(4.5)

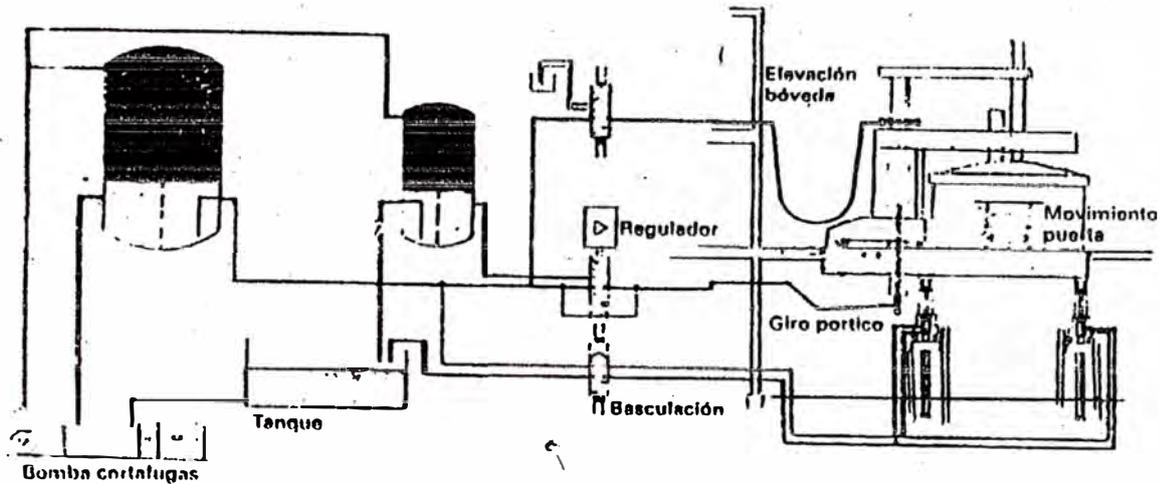
Si la señal es mayor, el electrodo asciende y, si es inferior, desciende. Las ventajas principales de este sistema son

- Inercia mecánica del sistema muy reducida ya que los elementos móviles se mueven a muy baja velocidad.
- Inercia eléctrica prácticamente nula, por estar el motor de C.A. girando continuamente a la misma velocidad y sentido y ser el resto componentes electrónicos.
- Gran robustez del conjunto sin elementos mecánicos delicados, siendo los más importantes el reductor de engranajes.

B) Sistema hidráulico y electrónico que esquemáticamente se muestra en la Fig. 4.9 El elemento fundamental es la válvula hidráulica de control que permite el paso de aceite del grupo hidráulico a los cilindros de accionamientos de columnas y brazos. En la Fig. 4.10 se muestra un grupo hidráulico completo para horno de arco que incluye los cilindros (1) de accionamiento de columnas y brazos porta electrodos sobre los que actúan las válvulas de control de la Fig. 4.9



**Fig. 4.9 Sistema Hidráulico Y Electrónico De Control De Electrodos
 (MANNESMANN DEMAG)**



**Fig. 4.10 Circuito Óleo-Hidráulico De Horno De Arco
(MANNESMANN DEMAG)**

El grupo óleo-hidráulico sirve también para accionamiento de los cilindros de:

- Elevación y giro de la bóveda
- Basculación del horno.
- Apriete entre electrodos y mordazas,
- Accionamiento de la puerta de desescoriado y
- Enclavamientos varios.

4.4.3 Sistemas De Control Por Ordenador

En los sistemas anteriores el operario podía actuar libremente sobre las tensiones secundarias y sobre los ajustes del sistema de control, es decir sobre la longitud del arco. En algunos casos, se limitaba la potencia P absorbida a un determinado valor y el siguiente paso fue el cambio automático y programado de las tomas del transformador. Finalmente, se ha integrado todo en unos sistemas de control por ordenador, una de cuyas posibilidades se muestra en la Fig. 4.11. Al ordenador, le llegan datos de la carga, de la temperatura de las paredes, del arco y , de acuerdo con un modelo metalúrgico de cada tipo de colada y otro modelo térmico de comportamiento del horno, envía señales requeridas para la elección más adecuada de

La toma de tensión.

La impedancia,

Los caudales de gas natural y oxígeno y

Las cantidades correctas de adiciones al baño y a la escoria

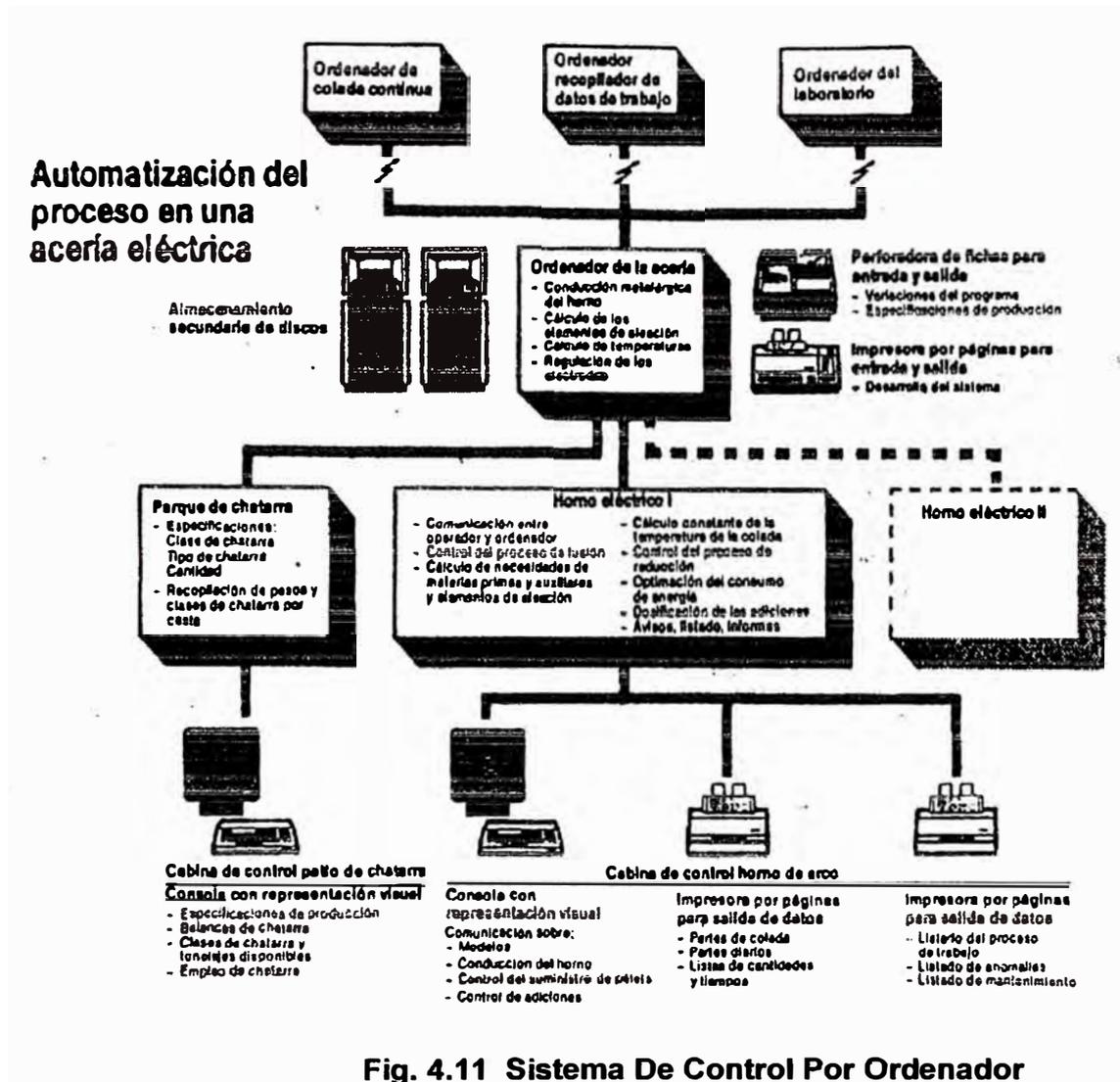


Fig. 4.11 Sistema De Control Por Ordenador (MANNESMANN DEMAG)

En el 2º Congreso Nacional de Tecnología Siderúrgica celebrado en Bilbao en 1989 se presentó el sistema ARMS (Automatic Rapid Melting System) que se muestra en la Fig. 4.12 y cuya descripción es como sigue:

A) Equipos :

Los equipos principales de que consta el ARMS son los siguientes:

- Microprocesador central, con la unidad central de proceso y las tarjetas para medición y gobierno de la operación.
- Impresora para la obtención de los partes eléctricos y de colada.
- Pantalla para el seguimiento de la operación
- Equipo de grabación en cinta magnética para tomar el registro de los datos de cada colada.
- Armario de control y pupitre de operación

B) Lógica Del Sistema

Esquemáticamente puede decirse que el sistema ARMS recibe unas señales, algunas de las cuales constituyen datos para su funcionamiento procesan estas señales y datos mediante las funciones que tiene incorporadas y, como consecuencia, da otras señales de salida que sirven para controlar el horno de arco.

Algunos de los aspectos principales del sistema se indican a continuación:

- 1) **Programa Principal.-El ARMS** puede memorizar simultáneamente nueve modelos de operación para el control del horno. Estos modelos se pueden definir en función de la mezcla de chatarras, de su densidad, etc.

Cada modelo de operación está formado por diferentes pasos, entendiéndose como tal a los diferentes objetivos de tensión e intensidad secundaria que se deben ir cumpliendo durante el desarrollo de la colada. Debemos mencionar también que se puede trabajar con diferentes valores de intensidad secundaria para una misma tensión secundaria.

El avance o progreso de la colada está relacionado con el consumo de energía eléctrica (Kwh.) en cada uno de los pasos definidos en el modelo.

- 2) **Carga De Chatarra.**- El modelo de operación seleccionado se adapta automáticamente, al conocerse la carga de chatarra, a los valores reales del peso de chatarra que se va a cargar en el horno.

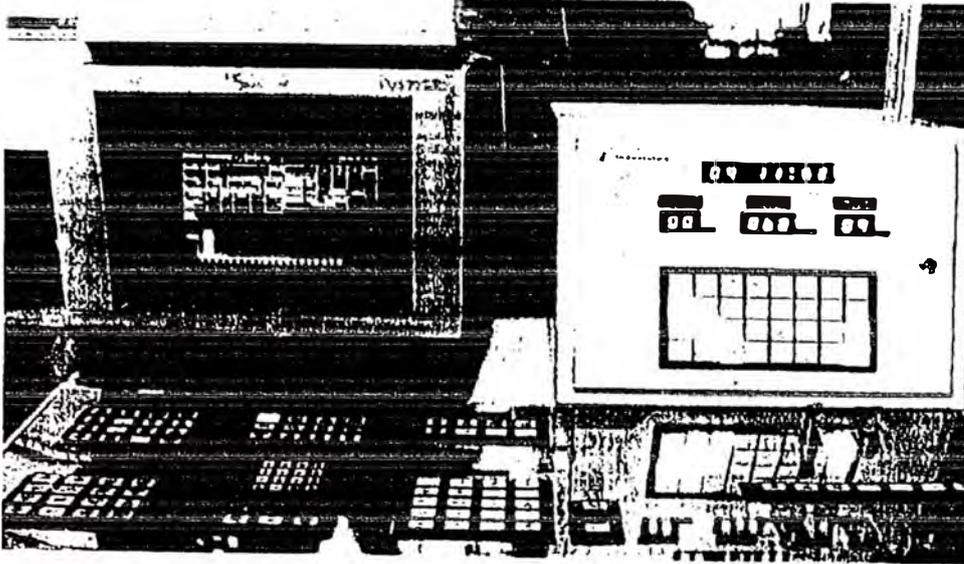


Fig. 4.12 Sistema De Regulación Y Control Por Ordenador Para La Optimización Del Consumo Energético Del Proceso De Fusión En Un Horno Eléctrico De Arco (INSERIALES)

- 3) **Control De La Operación.** - La tensión e intensidad secundaria en las que está trabajando el horno se miden, por medio del sistema especial incorporado al ARMS, y sus valores medios por minuto se visualizan en la pantalla.

El sistema ARMS compara estos valores reales medidos con los valores – objetivos de tensión e intensidad definidos en el modelo de operación seleccionado, con objeto de que la operación real refleje fielmente ese modelo ideal de operación.

La tensión secundaria es seleccionada y cambiada automáticamente por el ARMS, de acuerdo a las diferentes tensiones secundarias definidas en el modelo. La intensidad secundaria se controla por medio del regulador de electrodos, al cual envía el ARMS las correspondientes señales.

El ARMS compara la intensidad secundaria real de funcionamiento de cada electrodo con la intensidad secundarias-objetivo definida para cada uno de ellos,

En función de esta comparación , el ARMS calcula y envía al regulador de electrodos las señales convenientes para que cada electrodo trabaje con su intensidad secundaria-objetivo.

- 4) **Control De La Uniformidad De La Fusión.-** En ocasiones se produce una fusión no uniforme entre los tres electrodos, debido a las características físicas del horno, a los diferentes tipos de chatarra, etc.

El equipamiento de que dispone el ARMS va detectado el avance de la fusión de la chatarra entre los tres electrodos del horno, para conseguir una fusión uniforme. En líneas generales, las acciones a tomar se pueden resumir en:

- Aumentar la intensidad secundaria (disminuir el arco) en el electrodo cuya chatarra ha fundido o esta punto de fundir.
- Disminuir la intensidad secundaria (aumenta el arco) en el electrodo cuya chatarra esta aun sin fundir.

No se modifican la tensión secundaria ni la intensidad secundaria media, con objeto de que la potencia eléctrica aportada permanezca constante y la fusión, siendo uniforme, se realice en el tiempo establecido. Por otra parte, al mantenerse constante el valor de intensidad secundaria media se continúa trabajando en el punto de mínimo consumo.

- 5) **Correcciones Del Modelo Por Causa De Demoras.-** Durante la operación en el horno de arco se pueden producir demoras (averías roturas de electrodos, etc.) que afectan al modelo de operación. El ARMS permite identificar estas demoras, registrando el tipo de demora y su duración en el parte de colada. Asimismo, el ARMS va procesando todos los datos de las demoras habidas y corrigiendo automáticamente, en caso necesario, el modelo de operación a seguir.
- 6) **Control De Demanda.-** El sistema ARMS realiza el control de energía consumida en cada ciclo, en función del modelo de demanda existente, para aprovechar al máximo las posibilidades de las diferentes tarifas de consumo que ofrece la compañía suministradora de energía.

El control de demanda tiene en cuenta, además del máximo consumo eléctrico posible en el ciclo de demanda, la evolución de consumos y las potencias utilizadas por las diferentes instalaciones consumidores de la planta.

En el caso del horno del arco, el control de demanda también considera el modelo de operación que se va a seguir, de forma que se tengan en cuenta, para las estimaciones de consumo, las paradas programadas del horno (cargas de chatarra, etc.).

El ARMS permite memorizar simultáneamente ocho modelos de demanda diferentes, cada uno de ellos definido por las diferentes potencias contratadas durante las 24 horas de cada día. Asimismo, se puede identificar el modelo de demanda correspondiente a cada uno de los días del mes, con lo que el ARMS realiza automáticamente el control de demanda en el horno del arco durante un mes completo.

CAPÍTULO V

EFFECTOS ELÉCTRICOS SOBRE LA LINEA DE SUMINISTRO

Generalidades

La alimentación eléctrica de un horno de arco de alta potencia sufre unas variaciones en la potencia demandada que pueden ser brutales, sobre todo en la primera parte de la fusión. La tensión en el arco no es sinusoidal, sino rectangular, lo que introduce armónicos en el circuito. Asimismo, la intensidad en el circuito secundario tampoco es exactamente sinusoidal aunque la desviación es pequeña. En las figuras 4.14 y 4.14 se muestran los resultados de un estudio por ordenador para un horno de arco de 110 t de capacidad y 70 MVA de potencia, operando con arco corto a 280 V y con arco largo a 335V de tensión rectangular en el arco, suponiendo que la tensión en línea es sinusoidal.

Se observa el Angulo de desfase entre tensión e intensidad en el arco y la pequeña desviación periódica de la intensidad en el arco I_a , respecto a la componente fundamental sinusoidal I_{a1} .

Finalmente, se pueden producir en el circuito de alta tensión puntas de tensión en determinadas circunstancias que aconsejan la instalación de limitadores de tensión adecuados.

5.1 Armónicos De La Frecuencia Fundamental

Por la forma rectangular de la tensión en el arco se producen armónicos en el circuito secundario de orden 3°, 5°, 7°, 9°, siendo de poca importancia los de orden superior.

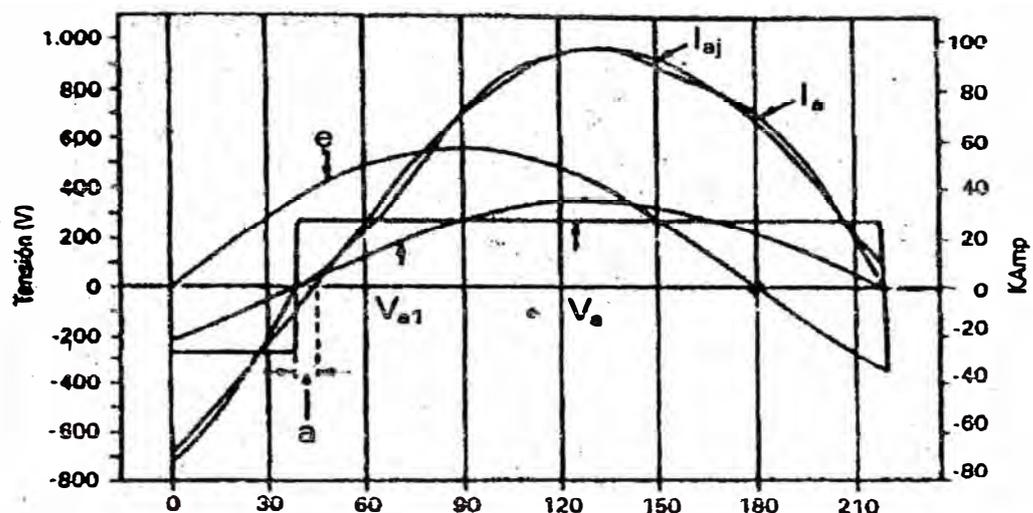


Figura 5.1 Parámetros Eléctricos Para Arco Corto

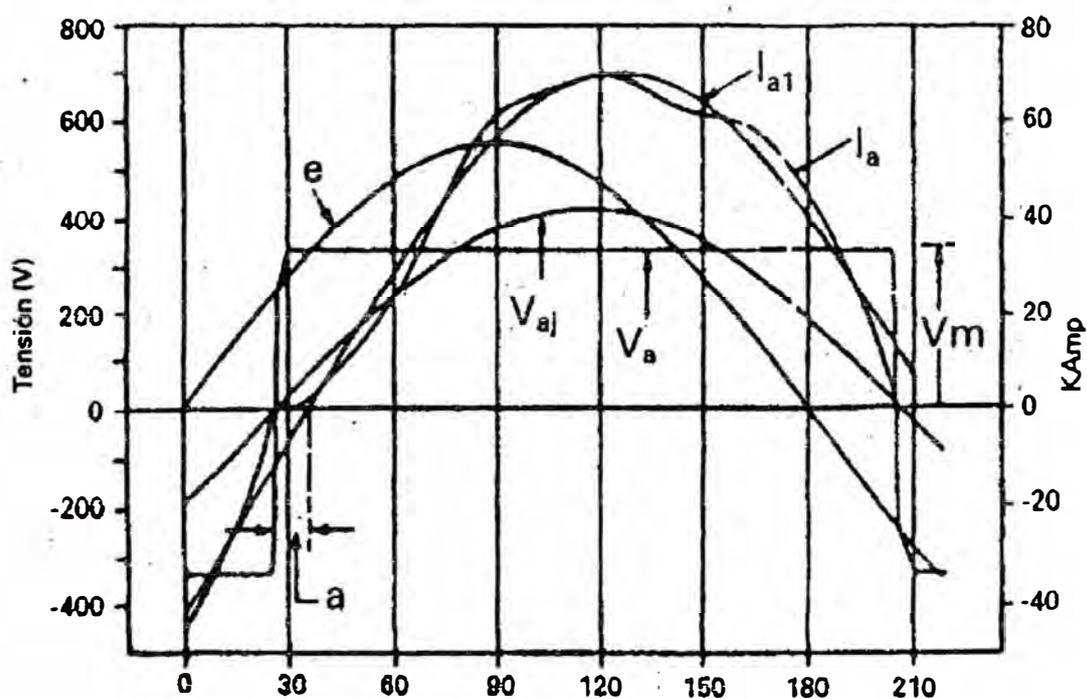


Figura 5.2 Parámetros Eléctricos Para Arco Largo

Como se explica en el Apartado 2.2.6, el arco comporta como si el baño estuviera sometido a una de triple frecuencia (véase Figura .6) un análisis de los armónicos de dicha tensión, de baño conduce en un caso concreto a los siguientes valores:

Armónico	1. ^{er} orden: tensión máxima	4,9 V
	3. ^{er} orden: tensión máxima	111,4 V

5° orden: tensión máxima	6,8 V
7° orden: tensión máxima	3,7 V
9° orden: tensión máxima	1,1 V

Esto da lugar a armónicos en la intensidad de la corriente. Sin embargo, al no existir línea de neutro en el circuito secundario quedan eliminados del primario del transformador (alta tensión de 10 a 40 kV) los armónicos de orden 3° y 9°, pasando únicamente los de orden 5° y 7°. Todo ello si las fases están perfectamente equilibradas.

La instalación de una reactancia en serie para aumentar la estabilidad del arco a tensiones de 1.000 – 1.100 V (arcos largos), reduce la importancia de los armónicos. Estos quedan, aun mas, reducidos en el transformador escalón que pasa, por ejemplo, de 30kV a 110 o 220 kV.

En caso necesario, es sencilla y no muy costosa la instalación de quipos del filtrado compuestos de reactancias y condensadores, forman un circuito resonante a la frecuencia requerida por el efecto de filtrado necesario.

5.2 Flicker

Las modificaciones imprevistas de la longitud del arco, al caer la carga, y el propio arco, al comienzo de la fusión, provocan fluctuaciones continuas de la tensión de alimentación y de la potencia absorbida, lo que puede dar lugar a perturbaciones en:

- El propio horno
- Otros equipos eléctricos de consumo elevado
- Las lámparas de alumbrado
- Los aparatos o pantallas de televisión
- Los ordenadores

Las lámparas de incandescencia, sobre todo, son sensibles a las variaciones de tensión de la red, ya que flujo luminoso varía muy rápidamente con la tensión de alimentación. Este fenómeno se denomina flicker.

En un horno de arco las variaciones de la intensidad durante el periodo de fusión pueden llegar al 30 – 50 por 100 del valor nominal. Si la red de alimentación no es muy estable, aparecen variaciones de tensión, de efecto apreciable en el alumbrado. Resultan

perceptibles unas variaciones de tensión de 0,35 – 05 por 100 a frecuencias de 5 – 10 Hz y, por encima de dicho porcentaje, pueden ser incluso molestas.

La línea de alimentación se caracteriza por una capacidad o potencia de cortocircuito P_{cc} que esta relacionada con la potencia nominal del horno de arco P_n por la expresión:

$$P_n \leq \frac{\Delta U}{\Delta I} \cdot P_{cc} \quad (5.1)$$

donde ΔU y ΔI son la variación de tensión que da lugar a una variación de intensidad. Como en todo receptor se verifica:

$$P_{cc} = \frac{U^2}{Z} \quad (5.2)$$

donde Z es la impedancia de fase de la red.

Para esta impedancia Z una variación de la corriente $m \cdot I$ da lugar a una variación de la tensión $m' \cdot U$, siendo:

$$Z = \frac{m' \cdot U}{\sqrt{3} \cdot m \cdot I} \quad (5.3)$$

Sustituyendo en la expresión (5.2) resulta:

$$P_{cc} = \frac{U \cdot m \cdot I \cdot \sqrt{3}}{m'} = \frac{m}{m'} \cdot P_n \quad (5.4)$$

O sea:

$$\frac{P_{cc}}{P_n} = \frac{m}{m'} \quad (5.5)$$

Si se conoce el valor máximo admisible de la variación de la tensión ($m' = 0,005$), el valor de la variación de la corriente en el horno (m , dado por el fabricante por el equipo) y el valor de P_n (potencia nominal del transformador del horno), se deduce la capacidad o potencia de cortocircuito requerida. Para $m = 0,5$ resulta:

$$P_{cc} = 100 \cdot P_n \quad (5.6)$$

En un horno de arco no de último diseño, operando con arcos cortos y medios, es recomendable el valor de 100. Para hornos de arco recientes, operando con arcos largos y, por tanto, con mayor reactancia del circuito secundario, se admite:

$$P_{cc} = 50.P_n \quad (5.7)$$

Dichos valores de P_{cc} expresan la capacidad requerida en la red para instalar un horno de arco de potencia nominal P_n .

Cuando la red no tiene capacidad suficiente de cortocircuito es necesario colocar un equipo de corrección del flicker. Los más utilizados son:

1.- Compensadores síncronos en paralelo sobre las fases de la línea de suministro. Su funcionamiento es simple:

- un aumento brusco de la intensidad hace que disminuya el factor de potencia (véase diagramas de funcionamiento, apartado .4). Esto supone un aumento de la potencia reactiva requerida que será facilitada por el compensador sincrónico sin afectar a la red de alimentación.
- En caso de disminución brusca de la intensidad el compensador sincrónico facilita una potencia reactiva capacitiva.

Es fundamental que el compensador tenga un sistema de regulación de la excitación de una constante de tiempo muy baja. Si embargo, al ser una máquina rotativa no se puede bajar de ciertos valores, debido a la constante de tiempo de la excitación relativamente alta (2-6 segundos)

2 Bancos de condensadores (corrigen hasta un 50 por 100 del flicker), provistos de equipos de desconexión en milisegundos a base de tiristores, partiendo de señales rápidas de la intensidad.

Es mejor de la solución de los bancos de condensadores ya que los compensadores síncronos tienen además los siguientes inconvenientes:

- Un coste de inversión mucho mayor
- Gastos de mantenimiento más elevados por tratarse de una máquina rotativa

- Perdidas activas mayores que en los condensadores
- No pueden compensar los desequilibrios de fases.

En ocasiones se instalan equipos combinados de filtrado de armónicos y reducción del flicker que se denominan generadores VAR. La experiencia demuestra que el propio horno arco puede ser victima de sus propios armónicos y flicker. Por las distorsiones de la onda, las lecturas de los aparatos no son correctas y pueden dar lugar a decisiones erróneas. Se ha demostrado en casos extremos, que, disminuyendo, la potencia al bajar la tensión aplicada (con lo que aumenta P_{cc}/P_n y disminuye, por tanto, el efecto flicker), se consiguió una fusión mas rápida y un menor consumo específico.

CAPÍTULO VI

EQUIPOS MECÁNICOS EN CORRIENTE ALTERNA

6.1 Componentes Del Equipo Mecánico

6.1.1 Conjunto De La Parte Mecánica

Se considera parte mecánica de un horno de arco para fusión de acero el conjunto de elementos de la instalación a partir de los cables secundarios descritos y comprende básicamente:

- ❑ El horno propiamente dicho se realiza la fusión
- ❑ Los elementos adicionales, tales como:
 - Las lanzas de aportación de O_2 y los quemadores oxi-gas
 - La aspiración y depuración de los humos, los precalentadores de chatarra, si existen
 - Las cestas de carga y las cucharas de colada.
- ❑ Los materiales refractarios dicho esta formado por muchos componentes que los agrupamos en:

A su vez, el horno propiamente dicho esta formado por muchos componentes que los agrupamos en:

1. Cuba y bóveda
2. Plataforma y superestructura
3. Columnas y brazos porta electrodos
4. Mecanismos de accionamiento

Aunque cada fabricante tiene su diseño propio con particularidades importantes y características específicas de cada uno, el conjunto de la parte mecánica fundamental del horno adopta en los fabricantes más conocidos una de las cuatro posibilidades siguientes:

- a) Cuba sobre plataforma basculante, con superestructura giratoria
- b) Cuba sobre plataforma basculante, con superestructura elevable
- c) Cuba sobre plataforma basculante, con superestructura en forma de pórtico.
- d) Cuba sobre plataforma basculante, con superestructura elevable independiente.

Hace 20-30 años el primer diseño tipo (a) era tradicional en Europa y el segundo, tipo (b), el normal en Estados Unidos y Japón. Desde hace 15 años este ha sido adoptado por dos fabricantes europeos con cobertura comercial mundial y uno de ellos presenta, como alternativa, el diseño tipo invertido (cuba fija y pórtico móvil) se utiliza frecuentemente en hornos cilíndricos de fusión de aluminio calentados por combustión de gas natural o fuel óleo en quemadores adecuados.

Los hornos del tipo (a) se construyen a partir de 6-8 t de capacidad hasta 350 t. Los del tipo (b) desde 12-14 t hasta 200 t y los del tipo (c) hasta 180-200 t. El tipo (d) es realmente una variable del tipo (b), en el que la superestructura se eleva y gira por un mecanismo independiente para la carga del horno, mientras que, durante el resto del proceso, se apoya sobre la cuba.

En la Figura 6.1 se muestra la parte mecánica de un horno de arco tipo (a). La cuba (1) con la bóveda (2) reposa sobre la plataforma (3). En un lado de la plataforma se dispone la superestructura (4) en la que se sitúan las columnas (5), unidas por la parte superior a los tres brazos porta electrodos (6). Cuando se precise abrir la cuba para cargar el horno, se actúa sobre el juego de palancas, dispuestas sobre vigas de suspensión de bóveda (8), esta se eleva y se puede girar el conjunto de bóveda, vigas y superestructura sobre el eje de giro (9), por medio de las rondanas (10) que ruedan sobre caminos de rodadura dispuestos sobre la plataforma.

En el diseño (b), representado en la figura 6.2, se eliminan los mecanismos de elevación de bóveda (2) y esta permanece rígidamente a las vigas de suspensión (8). La elevación y giro de bóveda para la carga vástago, el cual eleva el conjunto de la superestructura (4), con los de las vigas (8) y la bóveda (2), incluyendo en el conjunto , también, la columnas (5) y brazos porta electrodos (6).

Este diseño, mediante un desplazamiento adecuado de (11) y (12) respecto al eje transversal del, da lugar a una menor distancia del horno a la subestación y, por tanto, a una reactancia eléctrica del circuito secundario ligeramente inferior.

El diseño tipo (c) se muestra en la figura 4.3. la cuba (1) va dispuesta sobre un carro 82) que puede desplazarse sobre la plataforma (3), basculando el conjunto por medio de los cilindros (4). La bóveda (5) se eleva por un mecanismo similar al del tipo (a) desde el pórtico (6) que, rígidamente unido a la plataforma (3), en la cuba u bóveda del horno.

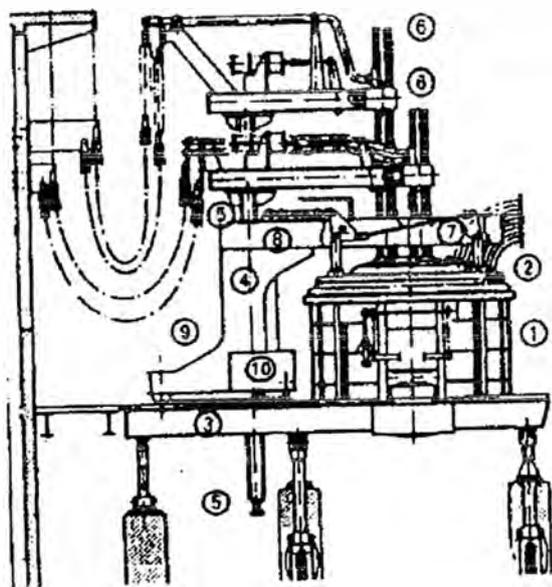


Figura 6.1 Conjunto De Horno De Arco tipo (a) (MAN-GHH)

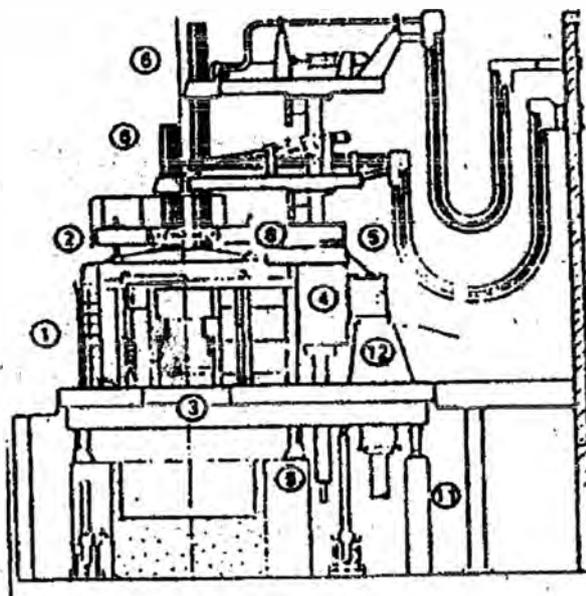
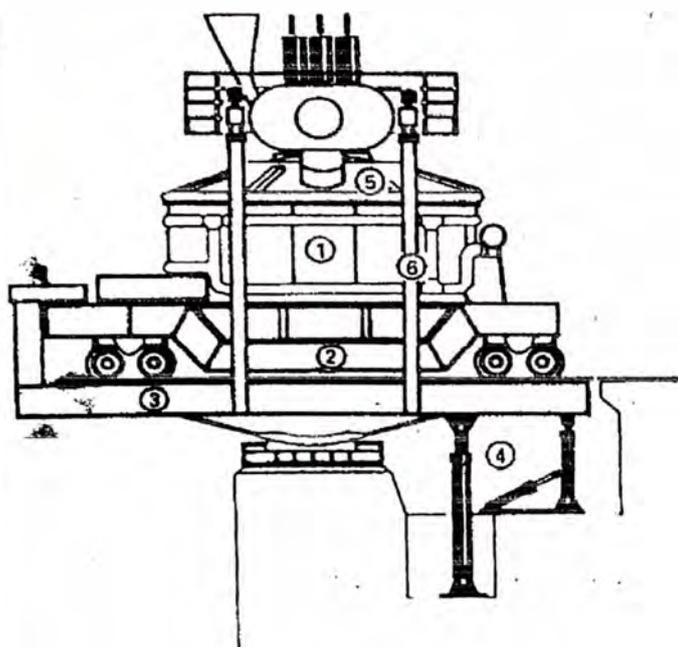


Figura 6.2 Conjunto De Horno Arco Tipo (b) (LECTROMELT)



- 1.- cuba
- 2.- carro
- 3.- plataforma
- 4.- cilindro de basculación
- 5.- bóveda
- 6.- poético

Figura 6.3 Conjunto De Horno De Cuba Desplazable, Tipo (C)

El horno tipo (d) de la figura 4.4 se adopta para capacidades inferiores a 25 t en los que, por su tamaño, las tensiones mecánicas a que está sometida la cuba son mucho menores y permiten que la superestructura (1) se apoye sobre la cuba (2), excepto durante la carga del horno. La elevación y giro de bóveda (3), unidas a las vigas de suspensión (4), se realiza por un mecanismo (5) de cilindro y vástago de gran robustez, situado fuera de la cuba y que no bascula con el horno. Los cilindros de basculación (6) están unidos por la parte superior a la cuba (2) y a la placa – base, situado en la obra civil de la fundación, por la inferior. Los cables eléctricos (7) de unión entre la subestación y el horno no están triangulados ni tampoco los tubos porta corrientes (10), situados sobre los brazos porta electrodos (8) entre los cables (7) y las mordazas porta electrodos (9). Dado que la miniacerasía está hoy equipada con hornos de capacidad no inferior a 50 t, no entramos en los detalles constructivos de este tipo de hornos sino en los tipos (a), (b) y (c) únicamente.

En la Fig. 4.5 se muestra esquemáticamente la parte mecánica de un horno, que puede ser del tipo (a) ó (b), en la que se han señalado sus componentes principales para familiarizarse con la terminología empleada.

6.1.2 Cuba Y Bóveda

La cuba es el elemento fundamental destinado a contener el baño de metal fundido. En los hornos con diseño de hace unos 15 años, en los que, la cuba estaba revestida en la suela y en las paredes laterales, se construía con chapas y perfiles que daban al conjunto una gran rigidez mecánica, aunque permitían la libre dilatación de los paneles laterales.

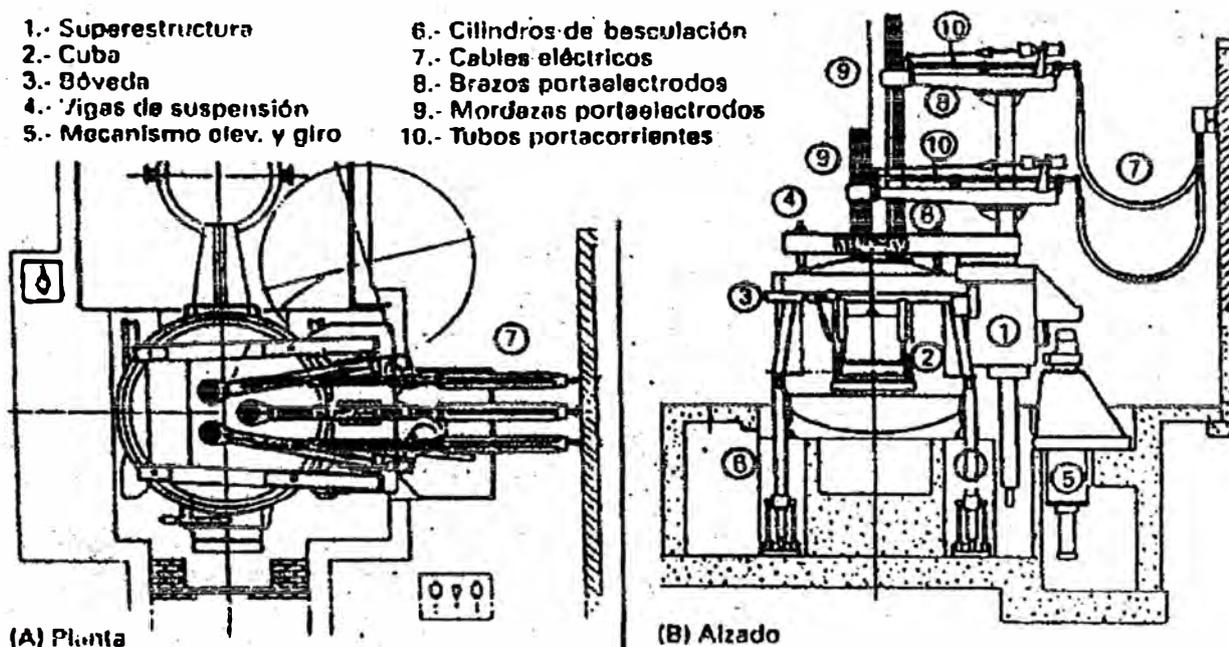


Fig.6.4 Conjunto De Horno De Arco Tipo (d) (LECTROMELT)

En los hornos construidos en los últimos años, la suela sigue un diseño similar, excepto en el sistema de colada, pero las paredes laterales son paneles, frecuentemente tubulares, fuertemente refrigerados por agua que, con una capa muy ligera de refractario, permiten un funcionamiento de meses sin paradas para la reparación del revestimiento.

La bóveda correspondiente a hornos con paredes revestidas con ladrillo se construía a partir unos anillos refrigerados por agua sobre los que colocaban los ladrillos refractarios que erraban la bóveda, dejando paso a los electrodos y al orificio de salida de humos (véase Fig. 6.6).

En la Fig. 6,7 se muestra una cuba con los paneles laterales tubulares refrigerados por agua, pero manteniendo una rígida estructura. Se aprecia La puerta de desescoriado, también refrigerada por agua, con su mecanismo de accionamiento óleo-hidráulico.

Enfrente de dicha puerta se dispone el pico de colada, aunque, actualmente, a partir de una capacidad de 50 t, se prefiere disponer en los hornos un orificio de colada por el fondo situado de forma excéntrica, como muestra en la Fig. 6.8.

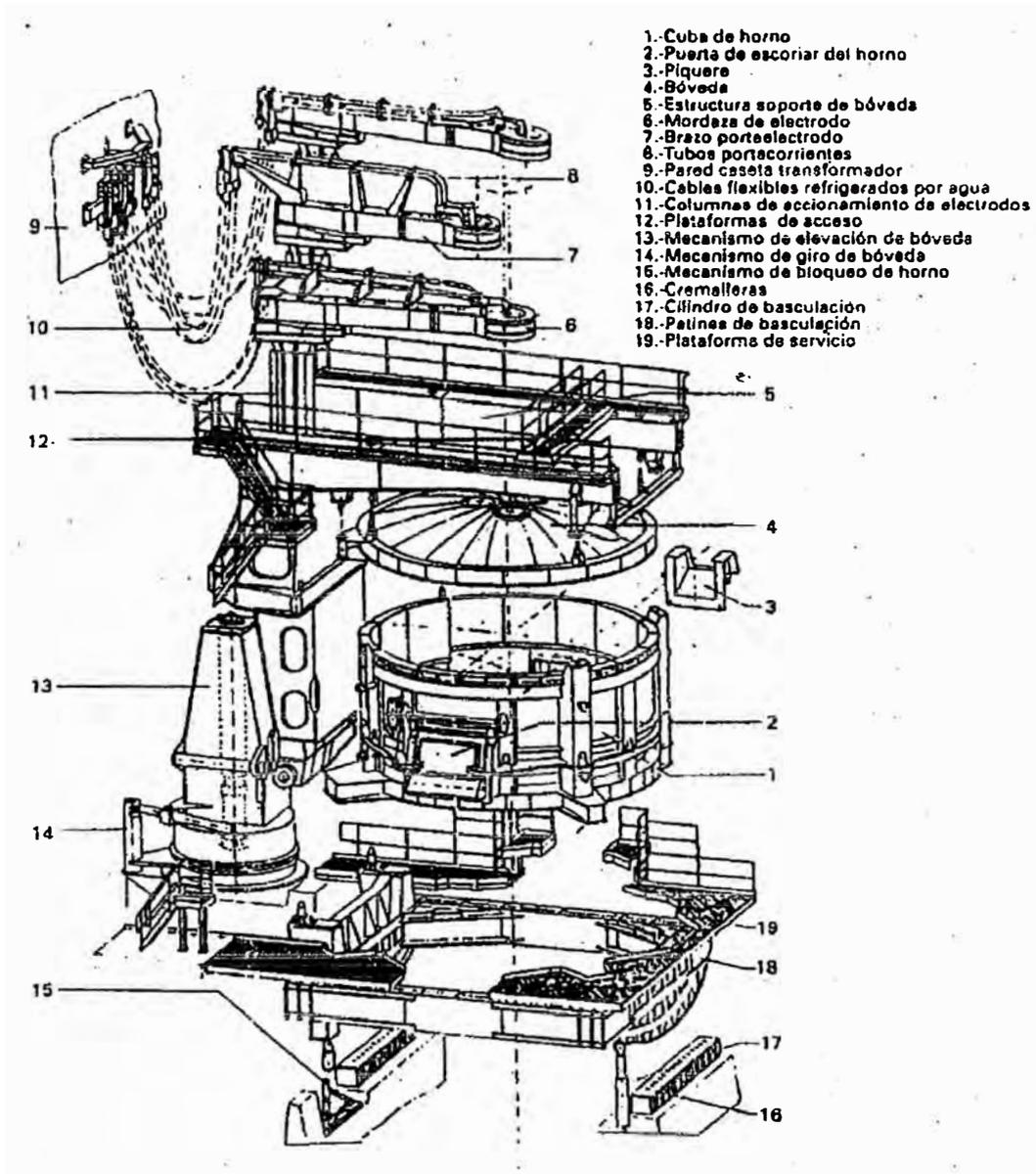


Fig. 6.5 Componentes De La Parte Mecánica De Un Horno De Arco (ABB)

En dicha figura se aprecia la bóveda refrigerada por tubos de agua (3), en forma similar a la paredes laterales de la cuba, excepto en la parte central, donde, para el paso de electrodos, se dispone una pieza moldeada especial (4) de material refractario. La

bóveda debe llevar unos puntos de enganche para unos tirantes que cuelgan de las vigas de suspensión de bóveda y que permiten su desplazamiento y retirada de encima de la cuba para cargar el horno con chatarra fría por la parte superior, operación que realiza tres o cuatro veces en cada colada.

La parte inferior de la cuba (1) revestida de material refractario, va dispuesta sobre la plataforma (5), sujeta firmemente por el lado de la sub estación eléctrica y permitiendo su libre dilatación, por el otro lado, Como se verá en el capítulo dedicado al funcionamiento de los hornos de arco es cada

vez más frecuente la inyección de gas (Ar, gas natural, O₂, N₂) por la suela y las paredes laterales de la cuba, colocar orificios para la entrada de lanzas de oxígeno y disponer los quemadores oxi-gas u oxi-fuel que en muchos casos, van instalados sobre la cuba o sobre la plataforma.

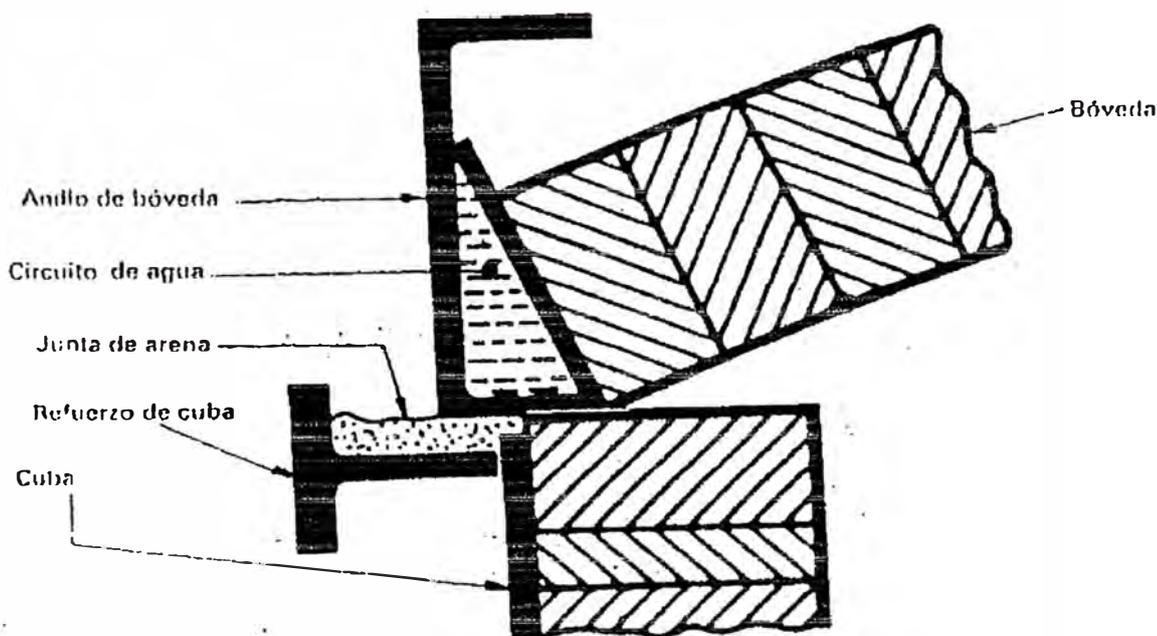


Fig. 6.6 Disposición Del Refractario Entre Cuba Bóveda.

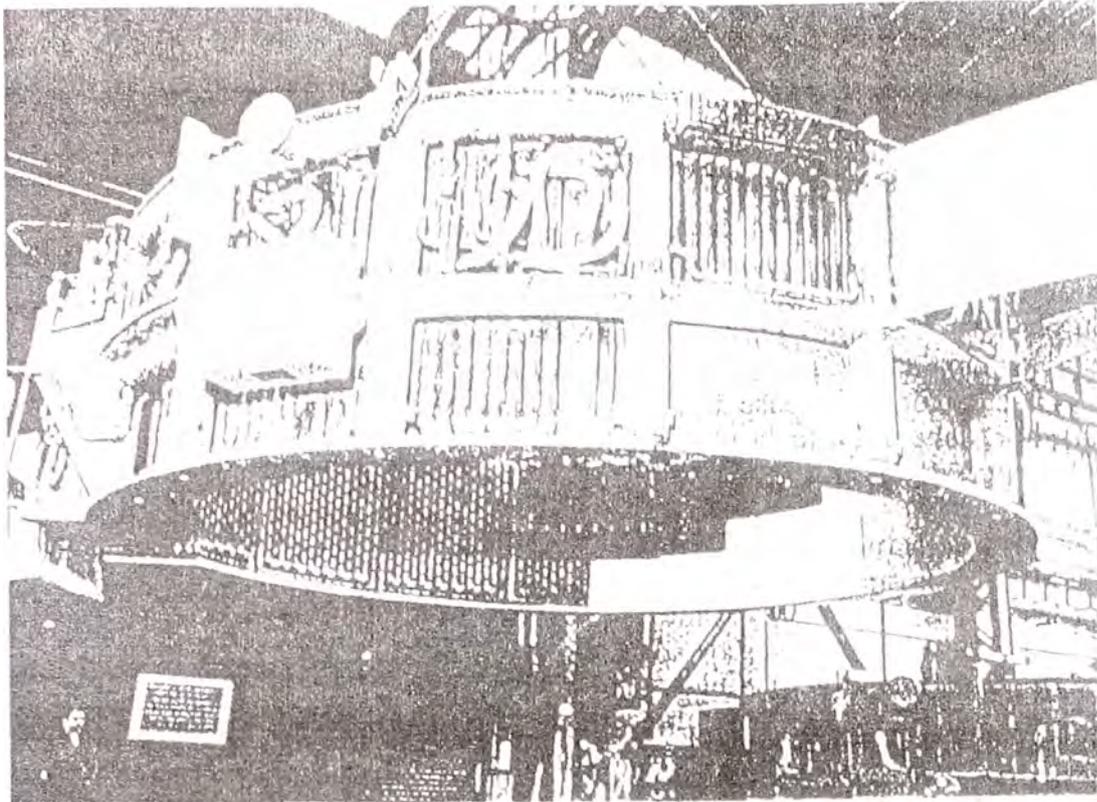


Fig. 6.7 Cuba Con Paneles Refrigerados Por Agua (MANESMANN DEMAG)

6.1.3 Plataforma Y Superestructura

La plataforma del horno tiene por objeto soportar la cuba con la bóveda y servir de base para la basculación del horno en las dos operaciones de colada y desescoriado. Su nivel coincide con el de la planchada de trabajo y lleva en su parte inferior unos patines de basculación (1) que se apoyan por un lado, en 1, cremalleras (2) dispuestas en la obra civil y, por el otro, en los cilindros de basculación (3). Véase Fig.6.9 .Como se ha indicado en el apartado anterior, debe permitir la libre dilatación de la cuba en sentido perpendicular a la pared de la subestación sin perder la alineación de basculación.

Durante la carga del horno con chatarra la cuba, y consiguientemente, la plataforma están sometidas a un gran esfuerzo mecánico por impacto. Por ello, la plataforma se apoya en cuatro puntos de gran rigidez, dos en la unión de los patines con las cremalleras y los otros dos en los calces (4). Durante la basculación para de escoriado, es necesario retirar previamente los calces (4) mediante los cilindros hidráulicos (5). Sobre la plataforma se dispone el mecanismo (6) para la apertura del tapón excéntrico e iniciar la colada.

Normalmente la basculación del conjunto de la parte mecánica del horno se realiza por medio de dos cilindros óleo-cilindros. Deben permitir la basculación en ambos sentidos, del orden de 15° para de escoriados y unos 30° para la colada, cuando ésta se realiza por el fondo en posición excéntrica.

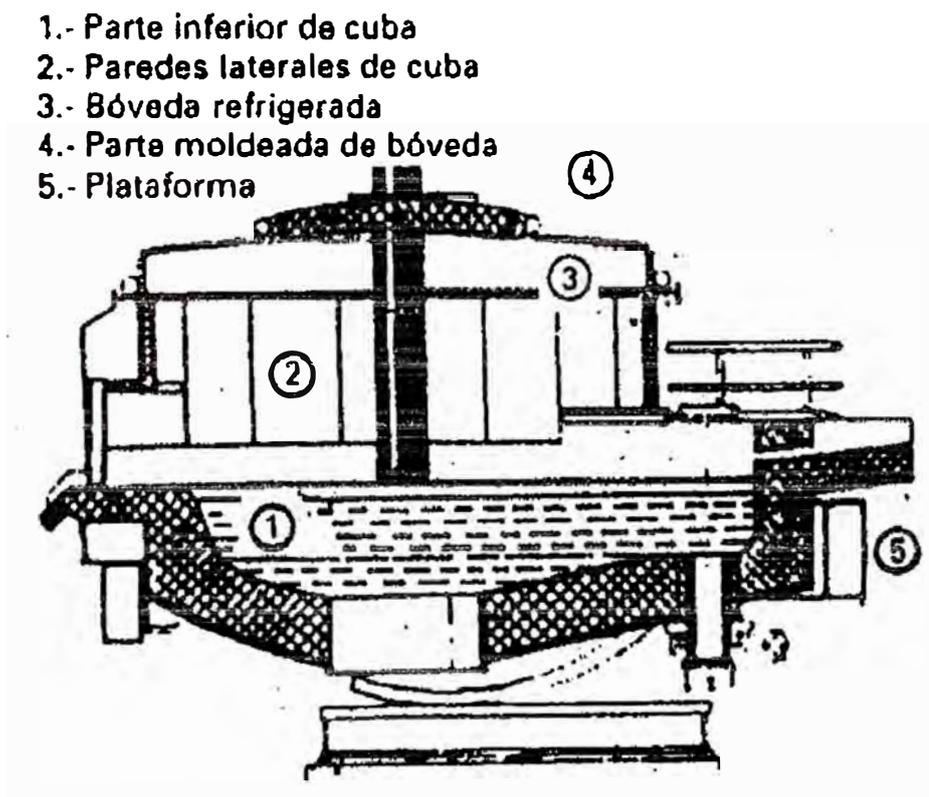


Fig.6.8 Disposición De Cuba Y Bóveda Refrigeradas Por Agua (MAN- GHH)

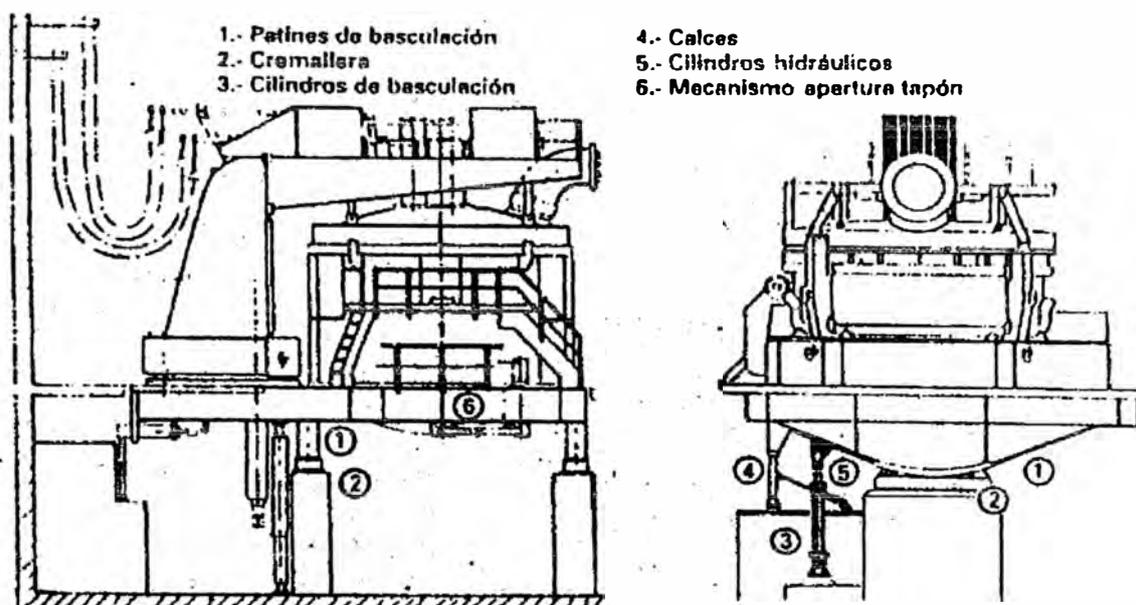


Fig. 6.9 Plataforma Y Superestructura (ABB)

Los cilindros de basculación están provistos de mecanismos de enclavamiento que impidan la caída de la plataforma, cuando se gira la bóveda normalmente hacia la nave de colada. Deben incluir dispositivos mecánicos o de otro tipo, que aseguren la vuelta automática a la posición horizontal después de la basculación y contra roturas de tuberías, fugas de metal fundido, topes de fin de recorrido, etc.

Como puede apreciarse en la Fig.6.10 la estructura de la plataforma es extraordinariamente robusta, dadas las condiciones de trabajo (carga de impacto, variación de temperatura, con las consiguientes dilataciones y contracciones, y unión a mecanismo de basculación que exigen cierta precisión a las que está sometida. Sobre la plataforma se dispone (en el mismo diseño tipo a explicado en el apartado 4.1.1., la superestructura que corresponde al 6 de la Fig. 6.8).

El objetivo fundamental de la superestructura es soportar excéntricamente los tres conjuntos de columnas, brazos porta electrodos y alojar los mecanismos de accionamiento correspondientes, que pueden ser electromecánicos o por cilindros óleo – hidráulicos (véase apartado 3.4.2.) En la superestructura se incluyen los dispositivos de seguridad necesarios al funcionamiento de los brazos porta electrodos (limitadores de carrera, secuencia correcta de elevación y giro de bóveda) y de la propia superestructura

(enclavamiento rígido a la plataforma durante la basculación y posicionamiento correctos en cuanto a límites de recorrido).

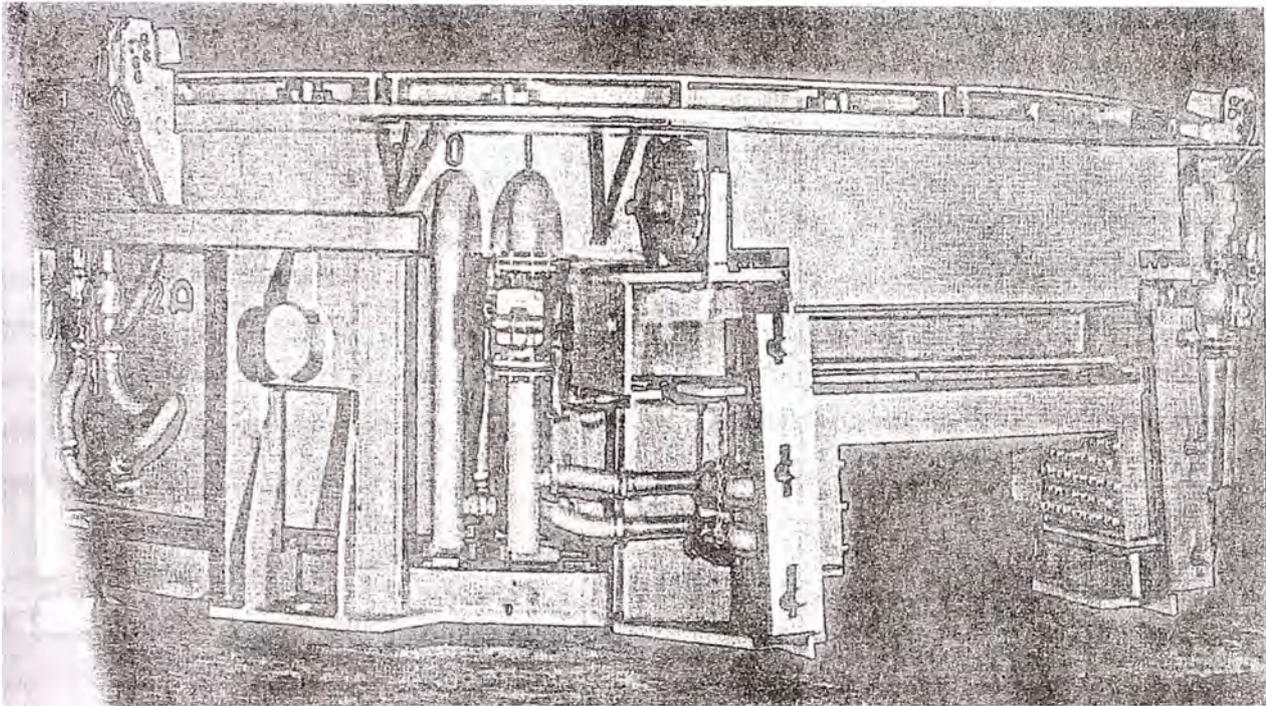


Fig. 6.10 Plataforma De Horno UAP De 120 T (MANNESMAN DEMAG)

A continuación o encima de la superestructura se disponen las vigas de suspensión de bóveda, rígidamente unidas por un lado y apoyadas en la cuba por el otro. Están normalmente refrigeradas por agua en su parte inferior y su robustez mecánica debe ser suficiente para soportar la bóveda completa con el codo de aspiración de humos del interior de la cuba, los elementos para realizar algunas adiciones al baño de metal fundido, los economizadores de mordazas, etc.

El mecanismo de elevación y giro de la bóveda depende del tipo de parte mecánica adoptado entre los descrito en el Apartado 4.1.1. En el que supone un mayor peso (tipo *b*) debe ser capaz de elevar.

- La superestructura donde se soportan los tres conjuntos de columnas brazos porta electrodos.
- La mitad de los cables refrigerados por agua,}- las vigas de suspensión de bóveda y

- La bóveda con todos los elementos adicionales.
- Una vez elevado este pesado conjunto deben girar hasta librar totalmente la cuba para introducir en ella carga de chatarra. En todos los tipos de hornos de capacidad superior a 50 t el accionamiento de este mecanismo es óleo-hidráulico.

En el tipo (a) se eleva únicamente la bóveda con sus elementos adicionales, lo que reduce el mecanismo al de giro, pero obliga a situar encima de la bóveda los mecanismo de elevación correspondientes, sujetos, por tanto, a la poco cómoda atmósfera de humos, polvo y llamas existente en dicha zona. En la Fig. 6.11 se muestra en planta un horno de este tipo con la cuba, provista de piqueta excéntrica por el fondo y se señala la posición de la bóveda girada para realizar la carga con cesta.

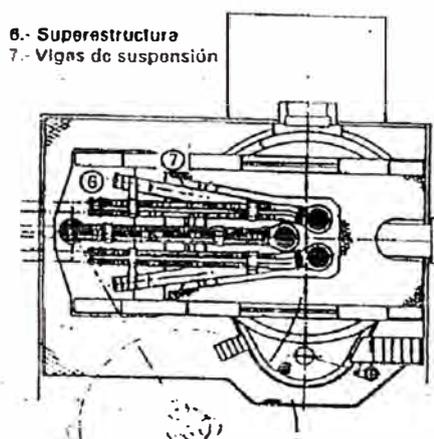


Fig. 6.11. Vista En Planta De La Superestructura Y De Cuba (ABB)

6.1.4 Brazos Porta Electrodo Y Columnas

En las Fig. 6.1, 6.2, 6.4 y 4.5 del conjunto de la parte mecánica se aprecian los brazos porta electrodo que comienzan, por un lado, en las mordazas de apriete de los electrodos, siguen en los tubos de cobre porta corriente soportados por la estructura de los brazos para terminar en la unión con los terminales de los cables refrigerados por agua .Véase Fig. 6.12.

Normalmente la estructura de los brazos es de acero y sección rectangular, disponiéndose en el interior un circuito de refrigeración por agua. Sobre dicha estructura se montan los soporte de los tubos conductores de la corriente con los aislamientos adecuados para evitar que se induzcan corrientes por circuitos magnéticos cerrados.

Las mordazas son de cobre refrigeradas por agua a través de un serpentín interior y en uno de los lados se dispone una zapata de acero no magnético accionada por un mecanismo neumático para aflojamiento y unos muelles de apriete en posición de reposo. Esto permite por una parte, conseguir un buen apriete entre la mordaza y el electrodo y por otra, el aflojamiento para deslizar el electrodo sobre la mordaza cuando es por preciso alargar la columna de electrodos por desgaste.

En los últimos años se ha desarrollado brazos porta electrodos que lo llevan los tubos conductores sobre la estructura de los brazos. En su lugar los brazos están construidos con chapas de cobre que forman la estructura y conducen la corriente eléctrica (véase Fig. 6.13) Se han construido también brazos de aluminio.

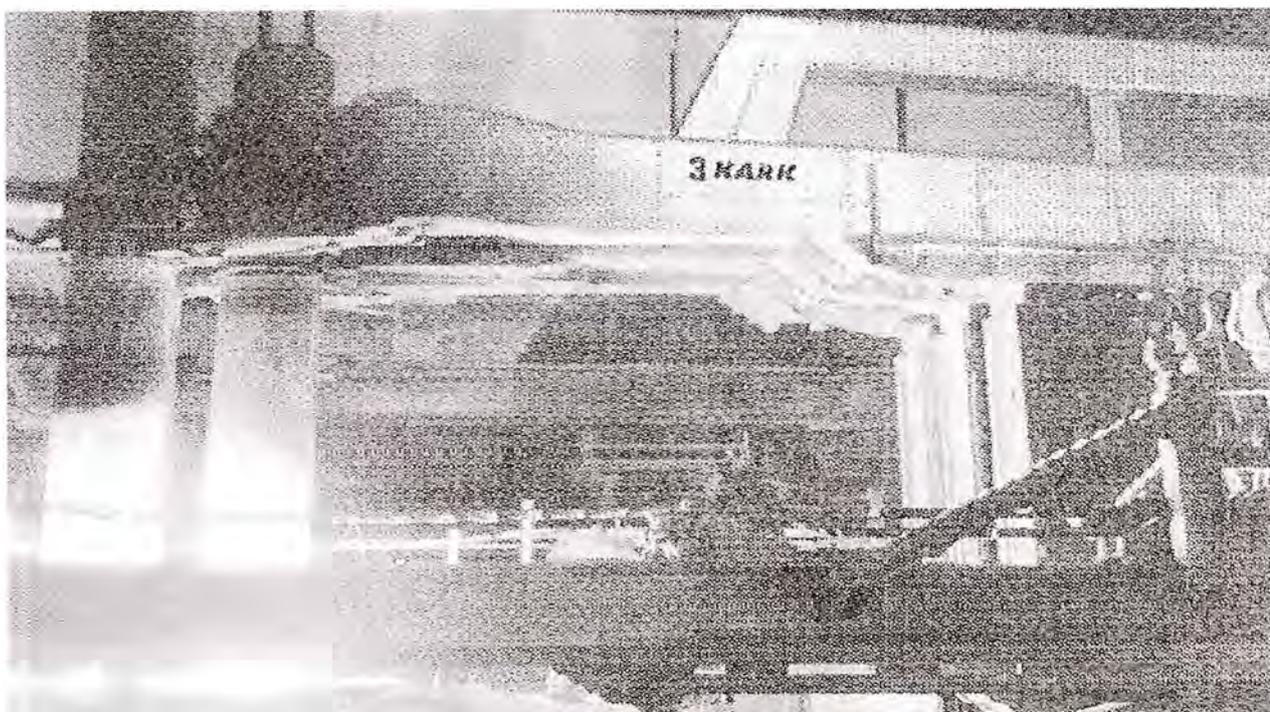


Fig. 6.12 Conjunto De Brazos Porta Electrodo Y Mordazas (ABB)

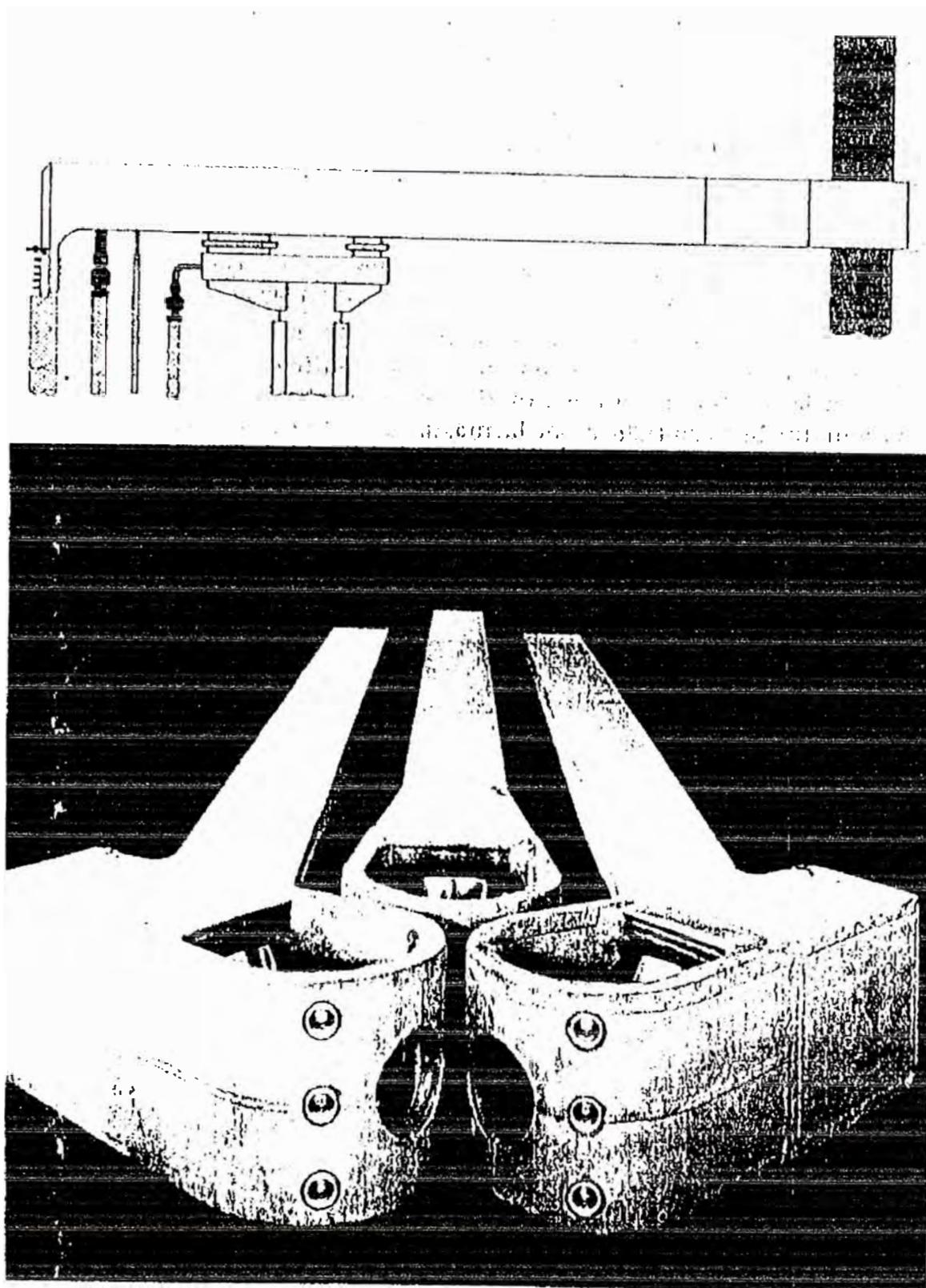


Fig. 6.13 Brazos Porta Electrodo Sin Tubos Conductores (MANNESMANN DEMAG)

En la Fig. 6.14 se muestran unas columnas de sección tubular con ocho rondanas de guiado para mantener una perfecta verticalidad. Se construyen también columnas de sección rectangular con únicamente cuadro rondanas de guiado. La unión de las columnas con los brazos debe ser muy rígida, pero también aislada eléctricamente lo que exige una construcción y montaje cuidadoso es y un mantenimiento adecuado.

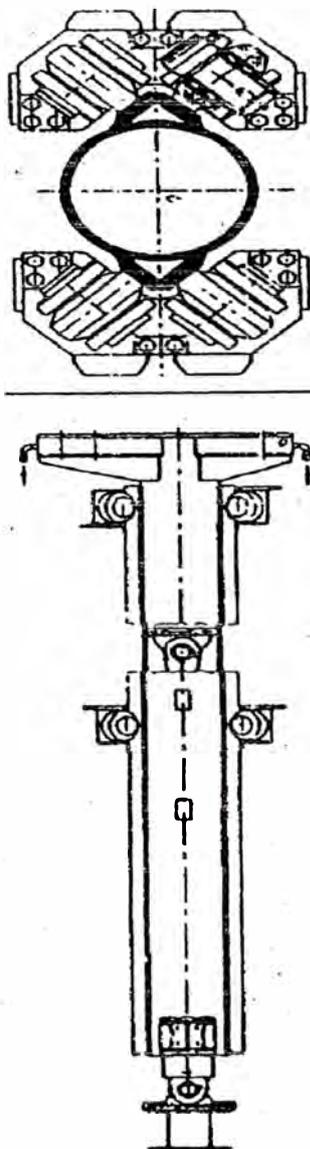


Fig. 6.14 Columnas (MANNESMANN DEMAG)

6.1.5 Mecanismos De Accionamiento

Dentro de la parte mecánica del horno se precisan los siguientes mecanismos de accionamiento para:

- Basculación del horno en la plataforma, descrito en 4.1.3
- Apertura y cierre de la puerta de la cuba
- Elevación y descenso, y en general, regulación de los electrodos descrito en 3.4.2
- Elevación y giro de bóveda para la carga del horno, descrito en 4.1.2 y 4.1.3
- Enclavamiento de plataforma al girar la bóveda, de superestructura al bascular el horno, etc.
- apriete y aflojamiento de mordazas con electrodos descrito en 4.1.4

Una gran parte de este accionamiento se realiza con un grupo óleo-hidráulico general, situado en una sola debajo o al lado de la del transformador principal, como el que muestra en Fig. 6.15 la presión de trabajo es del orden de 100-180 bar y el fluido mas frecuente es agua-glicol, cuyo manejo es sencillo y no es inflamable. Todas válvulas, bombas y filtros forman parte de la unidad central mandadas eléctricamente desde los pupitres de control situados en los emplazamientos adecuados, el accionamiento mas importante es el de la regulación de electrodos que puede ser también electromecánico(véase el apartado 3.4.2)

6.1.6 Electrodo

Constituyen el ultimo elemento conductor de la corriente antes del arco, son de grafito obtenido por un proceso bastante complejo y suministrados por unos pocos fabricantes mundiales, siendo muy escasa las diferencias entre ellos en las características mecánicas y eléctricas. Los diámetros mas utilizados en hornos de 50 a 150 t de capacidad son: 500, 550, 600 mm. La construcción de hornos de arco de corriente continua (C.C.) de mayor capacidad y potencia exigirá una mayor utilización de electrodos de 800 mm de diámetro, capaces de conducir intensidades de C.C, hasta de 150 kA. La longitud estándar es de 2.400 mm.

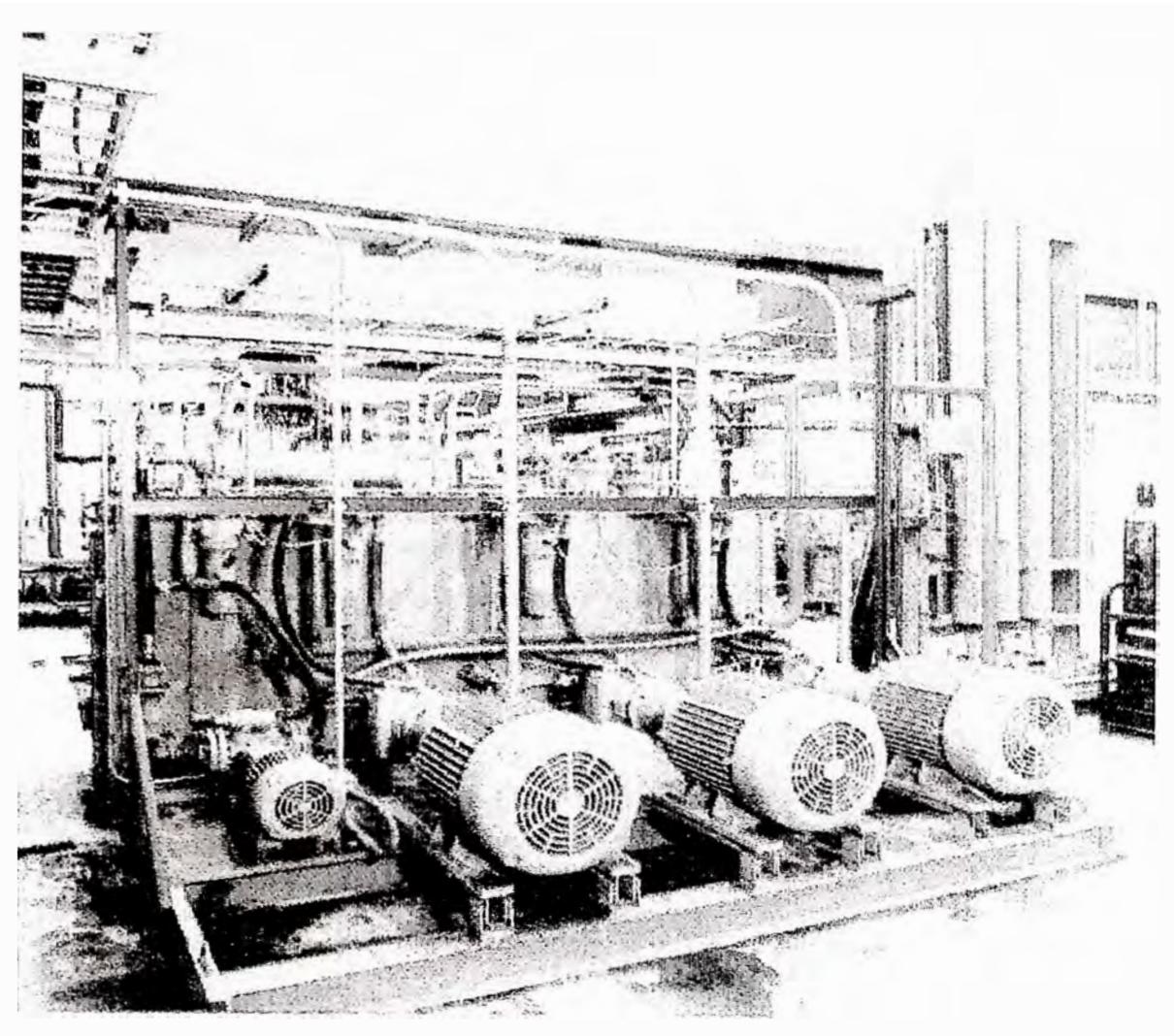


Fig. 6.15 Grupo Ole-Hidráulico De Accionamiento (MANNESMANN DEMAG)

Sus características mas importante son:

- A) Densidad. De acuerdo con el proceso de fabricación puede variar entre 1.550 a 1.750 kg/m^3 .
- B) Porosidad. De la misma forma varía entre 15 y 25 por 100
- C) Resistencia a la compresión. Variable entre 15 y 35 N/mm^2 .
- D) Resistencia a la flexión. Variable entre 6 y 25 N/mm^2 .
- E) Conductividad térmica. Interesa que sea elevada para extraer del interior el calor generado por efecto joule. A 30° C puede variar entre 120 y 300

W/mK. Para un valor base de 120 W/mK a 30° se reduce a 50 W/mK a 1.000° C y a 30W/mK a 2000° C.

- F) Resistividad eléctrica. Variable entre 4,5 y 12 $\mu \cdot \Omega \cdot m$. La resistencia eléctrica de contacto entre las mordazas de cobre y los electrodos depende de la presión de apriete. Unos valores típicos serían:

Presión:	1 N/mm ²	Resistencia:	2.10 ⁻³ Ω/cm ²
	2 N/mm ²		1,35 . 10 ⁻³ Ω/cm ²
	3 N/mm ²		0,80 . 10 ⁻³ Ω/cm ²

- G) Coeficiente de expansión lineal. En dirección axial entre 0,5 y 2,5 . 10⁻⁶ K⁻¹ en la gama de temperaturas de 20 a 200° C. En dirección radial de 1,8 a 3,5 . 10⁻⁶ K⁻¹. A 1.000° C se incrementan en 0,8 y a 2.000° C en 1,6 . 10⁻⁶ K⁻¹.
- H) Calor específico. Es del orden de 0,9 kJ/kg . K y aumenta a 1,6 a 1.000°C y a 1,8 kJ/kg a 2.000° C.
- I) Capacidad de corriente. Los valores señalados por un fabricante que pueden considerarse como típicos son:

<u>Diámetro</u>	<u>Normal</u>	<u>UAP(ultra-alta potencia)</u>
500 mm	17 – 27 kA	27 – 38 kA
500 mm	26 – 41 kA	41 – 55 kA
600 mm	40 – 60 kA	60 – 80 kA

El consumo de electrodos, factor importante en el coste del proceso se debe:

- Oxidación de la superficie
- Desgaste por el arco en la punta
- Roturas por fuerzas electromagnéticas y
- Fallos y grietas en los extremos roscados

Es muy importante la unión entre electrodos por medio de los biconos roscados a los que se denomina nipples. Los factores que intervienen directamente en el consumo de electrodos son:

- La intensidad de la corriente eléctrica
- La atmósfera oxidante en el interior del horno.
- La calidad y densidad de la chatarra de acero.

- El tiempo en el que el electrodo esta sometido a intensidad máxima y el tiempo desde una colada hasta la siguiente.

El consumo por oxidación superficial, que es el apreciable a partir de los 500° C, se ha tratado de reducir con recubrimientos de los electrodos y últimamente por refrigeración con ducha de agua. El desgaste por arco en las puntas se expresa por la formula empírica de Jordán:

$$C_{da} = 0,03 \cdot \sqrt{I^2} \cdot \frac{t}{\rho} \text{ (kg/t)} \quad (6.1)$$

Donde:

- C_{da} = consumo de electrodos por desgaste en el arco en kg/t
 I = intensidad de la corriente en kA
 t = factor de tiempo a plena potencia / tiempo de colada a colada,
 ρ = producción en t / h.

Suele suponer del orden del 50 por 100 de consumo total.

Quedan, finalmente las roturas por las fuerzas electromagnéticas que se producen entre electrodos al paso de la corriente que en hornos con incorrecto funcionamiento pueden ser importantes.

La fuerza electromagnética F entre dos conductores paralelos (véase Figura 6.16) viene dada por la expresión:

$$F = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{\mu \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d} = K \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (6.2.)$$

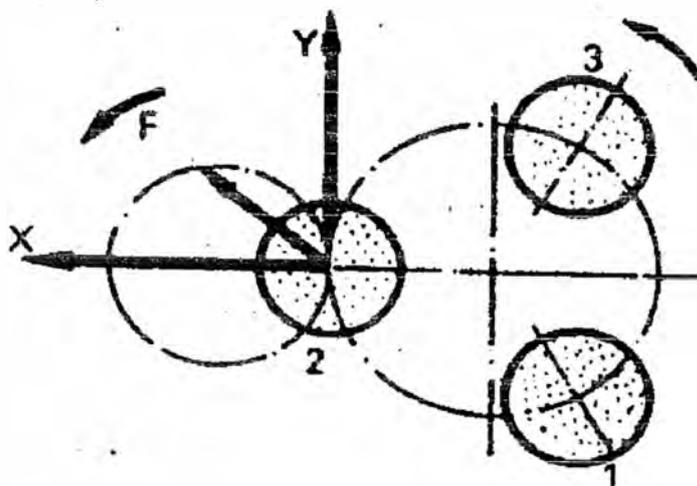


Fig. 6.16 Fuerzas Electrodinámicas Entre Electrodo

Donde:

i_1, i_2 = valores instantáneos de las intensidades que circulan por ambos conductores

μ = permeabilidad magnética del vacío = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

L = Longitud de los conductores

d = distancia entre conductores.

Para una disposición triangular de los electrodos, tomando como referencia la fase 2, resulta:

$$i_1 = I \cdot \text{sen}(\omega t - 120) \quad (6.3)$$

$$i_2 = I \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (6.4)$$

$$i_3 = I \cdot \text{sen}(\omega t + 120) \quad (6.5)$$

Donde:

I = valor máximo de la intensidad.

$\omega = 2\pi \cdot f$, siendo f la frecuencia de la corriente (50 Hz)

Las fuerzas sobre el electrodo 2 causadas por los electrodos 1 y 3 serán:

$$F_{21} = -k \cdot i^2 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t - 120) \quad (6.6)$$

$$F_{23} = -k \cdot i^2 \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t + 120) \quad (6.7)$$

Las componentes de ambas fuerzas, sumadas vectorialmente, resultan:

$$F_x = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot i^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (6.8)$$

$$F_y = k \cdot \sqrt{3} \cdot i^2 \cdot \text{sen } 2\omega t \quad (6.9)$$

Las fuerzas resultante es como un vector F que gira a una frecuencia doble (100Hz) y cuyo modulo es

$$|F| = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i^2 |\text{sen } \omega t| \quad (6.10)$$

de valor máximo:

$$F_{max} = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i^2 \quad (6.11)$$

de valor medio en dirección x:

$$F_{xm} = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot i^2 \quad (6.12)$$

de valor medio en dirección y:

$$F_{ym} = 0 \quad (6.13)$$

Se muestra la evolución de F en la Figura 6.17.

Para una variación sinusoidal de i siendo I el valor eficaz:

$$F_{xm} = k \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot I^2 \quad (6.14)$$

El par de torsión en la unión del electrodo con la mordaza será:

$$T = F_{xm} \cdot \frac{L}{2}$$

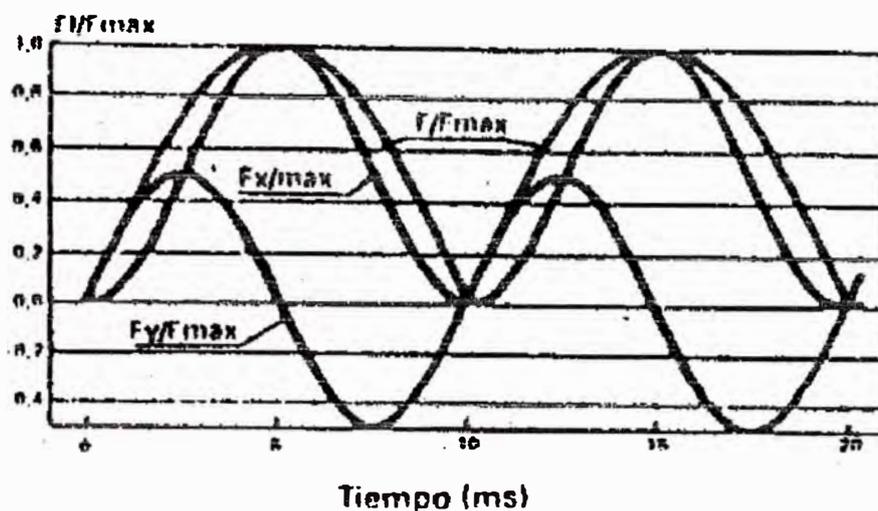


Fig. 6.17 Variación Con El Tiempo De Las Fuerzas Electrodinámicas

Y la carga de trabajo por torsión:

$$\sigma_1 = \frac{T}{M_r} = \frac{F_{xm} \cdot \frac{L}{2}}{\frac{\pi \cdot D_e^3}{32}} \quad (6.15)$$

Donde:

M_r = momento resistente

D_e = diámetro del electrodo

Se aprecia que, para columnas de electrodos largas (a veces superiores a 5m) y a altas intensidades, la carga de trabajo puede superar la resistencia del electrodo y producirse la rotura. Con arcos largos, que dan lugar a intensidades mas bajas, la carga de trabajo

disminuye drásticamente. Eran frecuentes hace 20 años valores de consumo de electrodos de 4 – 6 kg/t y se han reducido a 1,8 – 2,5 kg/t.

CAPÍTULO VII

MANTENIMIENTO DE LOS HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO

En la Fig. 7.1 podemos apreciar una disposición de una típica de un H.A.E. adicionalmente se puede apreciar , el circuito equivalente eléctrico y la disposición del brazo porta electrodos.

7.1 Circuito Primario Sub Estación De Los H.A.E.

Como sabemos una sub estación de un H.A.E. esta compuesta de:

7.1.1 Llave Seccionadora De Entrada (Aisladora)

Generalmente son usadas llaves seccionadoras trifásicas tipo palanca para seccionar el circuito sin carga , con la conexión a tierra en posición abierta, de tal manera de garantizar el mantenimiento de los demás componentes del circuito de la subestación del Horno.

Un mantenimiento mínimo requerido simple debe comprender, ver Tabla 7.1

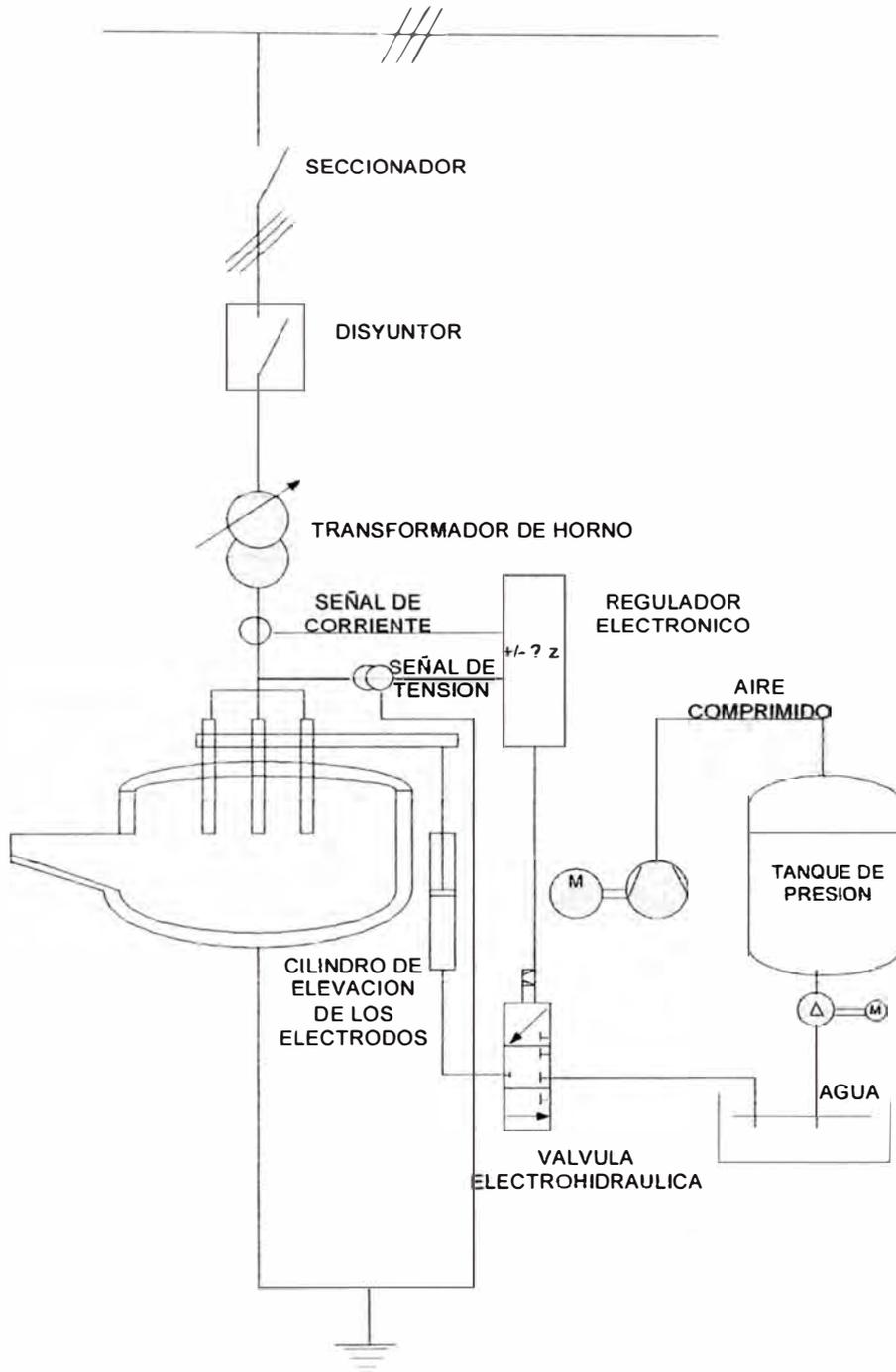


Fig. 7.1 DISPOSICION TIPICA DE UN HORNO DE ARCO ELECTRICO

Tabla 7.1

MANTENIMIENTO BASICO DE LA LLAVE SECCIONADORA		
frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Diario	Sistemático	Inspección visual del conjunto externo
Mensual	Preventivo(*)	Limpieza de todo el conjunto
Semestral	Predictivo energizado	Termografías de las cuchillas y de las conexiones (**)
Semestral	Preventivo(*)	Revisión de las conexiones Lubricación de las articulaciones Verificación de las palancas Verificación de los aterramientos Limpieza y revisión de los contactos auxiliares
Anual	Preventivo(*)	Medición de las resistencias de contacto

(*) Circuito desenergizado- disyuntor en la sub estación principal abierto y línea aterrada

(**) horno energizado, mediciones de las fases luego de un período de afino o de fusión

7.1.2 Disyuntor Del Horno

Los disyuntores de los H.A.E. operan en condiciones muy severas, debido al número elevado de operaciones diarias y principalmente con una carga altamente inductiva.

Una condición ideal seria que el disyuntor del H.A.E. no opere y abra por sobrecargas , pero esta operación es inevitable, actualmente se usan disyuntores con contactos de vacío para la conexión y desconexión del horno, por lo tanto es conveniente que las protecciones eléctricas estén antes del disyuntor del horno.

Para entender mejor el disyuntor del horno permite un número elevado de operaciones si es de baja capacidad de ruptura o de lo contrario un disyuntor con alta capacidad de ruptura y bajo numero de operaciones, la ventaja de los contactos de vacío es su poco mantenimiento requerido.

Los contactos de estos disyuntores se fijan dentro de cámaras de vacío que evitan la ionización del aire durante la operación de apertura, por lo cual los contactos no están expuesto al deterioro que sucede en otros mecanismos, normalmente vienen diseñados para 100.000 operaciones y su resistencia de contacto es inferior a los 200 $\mu\Omega$, un mantenimiento básico se aprecia en la tabla 7.2

Tabla 7.2

MANTENIMIENTO BASICO DE LOS DISYUNTORES DE VACIO		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Diario	Sistemático	Inspección visual del conjunto externo
	Preventivo	Revisión del número de operaciones
Mensual	Preventivo	Revisión del accionamiento y limpieza
Semestral	Predictivo	Termografía de los contactos

7.1.3 Para Rayos Fase-Fase Y Fase-Tierra

Los para rayos protegen de descargas y sobre tensiones a los transformadores causadas por las operaciones de apertura y cierre del Disyuntor bajo carga, un mantenimiento básico tabla 7.3

Tabla 7.3

MANTENIMIENTO BASICO DE LOS PARA RAYOS		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Semanal	Preventivo	Limpieza de los aisladores
Mensual	Preventivo	Revisión de las conexiones Controlar el numero de descargas
Semestral	Preventivo	Revisión de daños y perdidas de aceite

7.1.4 Transformadores de Tensión y Corriente (medición, regulación y protección)

Llamados también los transformadores auxiliares los transformadores de tensión y de corriente son los responsables de las señales de medición eléctricas (voltaje, amperaje y energía eléctrica), protecciones eléctricas de sobrecarga y de las señales de voltaje y corriente de la regulación.

Como sabemos estos dispositivos vienen encapsulados con resina de alta resistencia mecánica, por lo cual necesitan muy poco mantenimiento, y su mantenimiento básico en la Tabla 7.4

Tabla 7.4

MANTENIMIENTO BASICO DE LOS TRANSFORMADORES DE TENSIÓN Y CORRIENTE		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Mensual	Preventivo	Limpieza general Revisión de las conexiones Revisión de los contactos de los fusibles
Bi anual	Preventivo	Cambio de fusibles

7.1.5 Transformador de Horno de arco

Los transformadores de H.A.E. se caracterizan:

- por las fuertes corrientes secundarias, con frecuencias cortocircuitos
- Fuertes esfuerzos mecánicos de los arrollamientos , debido a las sollicitaciones electrodinámicas provocadas por los corto circuitos
- Necesidades de regulación de la tensión secundaria entre limites amplios y sobrecargas (cambiador de taps)

Estos Transformadores tienen el primario conectado en estrella y el secundario en triangulo.

La conexión triangulo del secundario puede ser ejecutado dentro de la cuba del transformador o externo, estos normalmente son dotados de transformadores de corriente y de tensión montados en el circuito del primario del secundario, de imagen térmica, rele de gas, conmutador de taps bajo carga instalado en compartimiento separado de la parte activa

En un transformador normal de fuerza, cuando ocurre un cortocircuito en la red eléctrica secundaria es raro, pero en un transformador de horno de arco es normal, debido principalmente a los contactos de los electrodos con la carga durante la fase inicial de la fusión, en este periodo el número de cortocircuitos que ocurre es elevado. Sabemos también que estos cortos circuitos, originan además inestabilidad del arco, lo cual provocan alteraciones muy rápidas de la corriente como consecuencia aparecen sobre tensiones frecuentes en las inductancias del circuito.

Por lo tanto los arrollamientos de los transformadores para hornos de arco esta sujeto a grandes esfuerzos electrodinámicos.

La tabla I muestra un plan preventivo de mantenimiento para transformadores de horno de arco.

Tanque Principal

Algunos ítem están relacionados con el transformador que requiere inspección y mantenimiento. Para la máquina completa se debe controlar que no haya fugas de aceite, despintado, sobrecalentamiento y cualquier cosa que no parezca normal. Es necesaria una limpieza regular de todos los ítem, incluyendo:

- Medidores de temperatura
- Dispositivos de alivio de presión
- Transformadores de corriente
- Válvulas
- Conectores de tierra

Medidores De Temperatura

Estos dispositivos miden la temperatura superior del aceite, con transformadores compensadores de corriente, la temperatura del devanado. Estos dispositivos no requieren mantenimiento pero se debe realizar un registro semanal para controlar altas temperaturas. Normalmente una aguja roja señala en el indicador de temperatura y permanece al nivel más alto alcanzado. Esta aguja roja debe ser llevada a su posición inicial después de cada lectura.

Dispositivos De Alivio De Presión

El dispositivo de alivio de presión actúa cuando la presión interna excede 10 psi (0.703 kg/cm²). Fallas dentro del tanque pueden causar una expansión de los gases que crean sobre presiones pudiendo activar el dispositivo de alivio de presión. Un interruptor de reposición manual también da una señal de disparo. Además, un indicador puede mostrar que dispositivo ha sido activado. Estos dispositivos no requieren mantenimiento; sin embargo se debe realizar un ensayo de funcionamiento anual.

Tabla 7.5 Ficha de mantenimiento preventivo de transformadores para hornos de arco

	Tarea	Mensual	Anual
Sistema por protección de alta tensión:	Limpieza general e		
Aisladores de AT	inspección de:		
Aisladores de BT	Conexiones flojas	x	
Descargadores	Fugas de aceite y sobrecalentamientos	x	
Componentes R/C	Lectura de los registros de los	x	
Contadores de descargas	contadores	x	
Tanque principal:	Fugas de aceite y sobrecalentamiento	x	
Tapa y válvulas	Lectura de los registros y reposición de los indicadores	x	
Medidores de temperatura	Ensayo de funcionamiento	x	x
Dispositivo alivio de presión	Control de conexiones flojas		x
Transformadores de corriente	Control sobrecalentamientos		
Conexiones de tierra			
Conservador:	Fugas de aceite	x	
Caños y conexiones	Inspección interna	x	6 años

Tanque	Ensayo de gases	x	x
Relé Buchholtz	Ensayo de lectura de indicadores	x	x
Indicador de nivel de aceite	Cambio de silicagel, si está rosada		
Respiradores			
Refrigeradores:	Control funcionamiento y flujo de aceite	x	
Bombas / motores		x	x
Tubos de enfriamiento	Limpieza e inspección	x	
Detector de fugas	Inspección por acumulación de agua		x
Termómetros	Lectura de los registros		
PT-100 Rtds	Ensayos de funcionamiento		
Conmutadores:	Inspección y ensayo control de motor		x
Unidad de conducción motriz		x	x
Ejes de transmisión	Inspección acoplamiento y eje conductor		x
Indicador de posición superior	Control interruptor de fin de carrera	x	x
	Verificar posición de tope superior		x
Cambiador tope fuera de carga	Registro número de operaciones		x
	Verificar enclavamientos		
Cambiador tope	Verificar enclavamientos	si necesario	

carga	eléctricos y mecánicos	x	
Selector	Control de operación para todos los demás topes	si necesario	
Instalación de filtro	Extracción muestra aceite para análisis de gases	x	x
Manómetro	Inspección de no funcionamiento		x
Gabinete de control	Inspección de los contactos internos		x
Relé RS	Cambio de aceite		
	Extracción de gas y aceite		
	Cambio filtros, lecturas de los 4 manómetros		
	Inspección de fugas de aceite		
	Ensayo de funcionamiento		
	Inspección y limpieza		
	Inspección y ensayo		
Ensayos eléctricos:			x
Resistencia de aislación – megger	Después de una reparación o trabajo en conmutador	si necesario	x
Relación de transformación	Todos los dispositivos de protección		
Tangente delta del aislamiento			
Ensayos de			

funcionamiento

Ensayos del aceite:

Análisis gas cromatográfico	Extracción de muestra con jeringa		6 meses
DGA	Tanque principal y selector cambio de topes		6 meses
Ensayos pantallas de aceite	Tanque principal y selector cambio de topes		6 meses
Control de diagnóstico:	Prueba durante 5 días		
	Control de armónicos transitorios		x
DIAMONS			
Ficha de lectura de datos:	Fase – fase y fase – tierra	x	
	Temperatura máxima del aceite	x	
Registro de impulsos de descargas	Temperatura máxima del devanado	x	
Indicadores de temperatura	Interno y externo del aceite y flujo de agua	x	
Termómetros	Registro del número de		x
Contador de la unidad conmutador	operaciones realizadas		
Ensayos de funcionamiento	Ensayos de los dispositivos de protección		

Válvulas

Sobre el tanque están montadas numerosas válvulas. Algunas se utilizan para el drenaje y llenado, y otras para extracción de muestras de aceite. Debe controlarse que las válvulas no tengan fugas y que estén limpias.

Conectores De Tierra

En la cuba del transformador hay conexiones para cable de tierra. Debe controlarse que estas conexiones no presenten sobrecalentamientos o que estén flojas. Una sobre elevación de temperatura o un sobrecalentamiento puede indicar la circulación de corrientes y deberá ser investigado.

Nota del traductor: aunque obvio debe controlarse la continuidad de la conexión a tierra y garantizar su eficacia.

Tanque Conservador De Aceite

Si el transformador está equipado con un tanque conservador de aceite se debe controlar el material deshidratador. Este material es importante para mantener el aire dentro del conservador libre de impurezas y de humedad. El material deshidratante absorbe la humedad y debe ser mantenido en buenas condiciones. El material cuando es nuevo es azul y cuando absorbe humedad se vuelve rosado.

Se debe realizar una inspección para controlar fugas de aceite y registrar periódicamente su nivel. El conservador puede tener más de un compartimiento y cada compartimiento debe poseer un respiradero. Se debe inspeccionar mensualmente que el conservador no presente fugas y registrar el color del material deshidratante. Reemplazar o reacondicionar el material deshidratante cuando se haya vuelto rosado.

Cada seis años se debe inspeccionar el interior del conservador (si no tiene diafragma).

Otras dos áreas del conservador requieren atención:

1. Relé Buchholtz
2. Medidores de nivel de aceite

Relé Buchholtz

Los relés Buchholtz son unidades multifuncionales utilizadas para detectar:

- Gas
- Un fuerte movimiento de aceite
- Bajo nivel de aceite

Gas – Las unidades detectan cualquier acumulación de gases en el aceite. Esto puede observarse por medio de un flotador visible a través de una ventana de vidrio o por medio de un disparo de una pequeña válvula ubicada en la parte superior del dispositivo. Normalmente la unidad envía una señal de alarma al tablero de control.

Un fuerte movimiento de aceite – Cualquier expansión grande de gas dentro del tanque impulsa al aceite a moverse hacia el tanque conservador, lo que mueve una válvula articulada y envía una señal de disparo.

Bajo nivel de aceite – Las unidades detectan pérdidas de aceite, y pueden enviar una señal de disparo.

Los relés Buchholtz son libres de mantenimiento. No obstante se deben controlar mensualmente para ver si hay acumulación de gas en la parte superior del dispositivo.

En la parte superior de la cámara se pueden acumular gases combustibles o aire y, cuando detectados, se debe investigar la causa. Un ensayo de funcionamiento anual se debe realizar utilizando un pistón de prueba ubicado en la parte superior del dispositivo.

Medidores De Nivel De Aceite

Estos indicadores muestran el nivel de aceite en el tanque conservador y envían una señal de alarma de alto nivel. Un nivel bajo de aceite envía una señas de disparo. Los medidores de nivel de aceite son libres de mantenimiento, pero se debe llevar un registro de las lecturas. Los niveles varían en función de la temperatura del aceite del transformador.

Se debe realizar anualmente un ensayo de funcionamiento.

Refrigeradores

Generalmente se utilizan refrigeradores forzados de aceite para los arrollamientos del transformador, y para la refrigeración del aceite agua o aire. Esto requiere la utilización de intercambiadores de calor con bombas de aceite. Los tubos internos de refrigeración (si se utiliza agua) requieren una limpieza periódica. Requieren una inspección anual, y una limpieza si la incrustación es excesiva. Las unidades bomba / motor de aceite no necesitan ser mantenidas pero deben ser inspeccionadas por posibles sobrecalentamientos o fugas de aceite.

Una falla en la circulación de aceite puede causar puntos calientes en los devanados del transformador. Por lo tanto deben utilizarse dispositivos de protección. Estos dispositivos envían señales de alarma o disparo. No requieren mantenimiento, pero si un control anual de su funcionamiento cuando se llevan registros. Los dispositivos de protección y sus funciones son:

1. Medidores de flujo de aceite / agua envían una señal si el flujo de aceite / agua no es suficiente.

2. Se utilizan detectores de fuga en refrigeradores de doble pared. El agua acumulada dentro de un tubo y un flotador activan un relé magnético de señalización.
3. En refrigeradores de simple pared se utilizan medidores diferenciales que funcionan si la presión de agua excede la presión de aceite.(Nota del traductor: se trata que la fuga sea aceite al agua y no al revés).
4. Medidores de presión de agua se utilizan conjuntamente con válvulas ajustables de presión para controlar que la presión de agua se encuentre a un nivel menor que la presión del aceite.
5. En la parte de entrada y salida del flujo de aceite y de agua están colocados los termómetros. Se deben realizar mensualmente registros en el manual de registros diarios para controlar la eficiencia de la refrigeración.
6. En la parte de entrada y salida del flujo de aceite y de agua están colocados PT-100 Rtds. Ellos envían una señal que muestran la temperatura existente en el tablero de control de instalación.

Conmutadores

Generalmente se utilizan dos tipos de conmutadores:

1. Bajo carga
2. No bajo carga (con el transformador desconectado)

En algunos casos se utilizan ambos en el mismo transformador. Ellos pueden tener un comando manual o mediante motor y deben ser anualmente llevados a todas sus posiciones.

Conmutadores Bajo Carga

Los conmutadores bajo carga (TCs) usualmente tienen compartimentos separados:

- Selector
- Cambiador de tope

Selector – El selector controla el arco de interrupción durante la operación y sus contactos requieren un ciclo de inspección regular y cambio. El ciclo de inspección depende del número de maniobras y puede encontrarse en el manual de mantenimiento

El aceite del compartimiento del selector está completamente separado del aceite del transformador (no se comunica) y si no es filtrado, debe ser cambiado regularmente (en función del número de operaciones).

Cambiador de topes – El cambiador de topes se encuentra dentro de un compartimiento separado (no completamente aislado) del tanque. No se presenta arco en los contactos, solamente desgaste mecánico. Estos contactos tienen la duración del transformador y no requieren inspecciones programadas.

El conmutador bajo carga está equipado con un relé RS y una instalación de filtro.

Relé RS – El relé RS (solamente en los conmutadores bajo carga) se utiliza para una señal de disparo que indica que una fuerte corriente de aceite está circulando hacia el tanque conservador. Una falla en el compartimiento del interruptor selector puede producir gases que fuerzan al aceite a moverse hacia el tanque conservador. Se deben realizar anualmente operaciones de limpieza y ensayos de funcionamiento.

Instalaciones de filtrado – Las instalaciones de filtrado (solamente en los conmutadores bajo carga) se utilizan para filtrar el aceite durante el funcionamiento del selector. El filtrado del aceite prolonga la vida de los contactos. El aceite se lo hace circular a través de cartuchos filtrantes (similar al filtro de aceite utilizado en los automóviles) durante un ciclo prescrito basado en el uso del conmutador. Este ciclo, que normalmente dura 10 minutos, se efectúa cada vez que el conmutador es movido. Un contacto en el convertidor activa un timer en el panel de control de las instalaciones de filtrado. Normalmente, un manómetro indica la contrapresión de la bomba, que podría indicar que el filtro está atascado o limpio, y éste fija una señal a una determinada presión. Esta señal puede enviarse para control o para indicar que se debe cambiar el filtro.

Se deben realizar inspecciones anuales para controlar si hay fugas y sobre todo las condiciones de la planta de filtrado. Se debe efectuar el control del panel y su limpieza si es necesario. Se deben inspeccionar los componentes eléctricos.

Nota del traductor: la instalación de filtrado es frecuente en estos transformadores debido a la gran cantidad de operaciones que el conmutador hace.

Conmutadores No Bajo Carga

Estos conmutadores solamente operan cuando el transformador está desenergizado. Se utilizan enclavamientos mecánicos y eléctricos para asegurar que la unidad motora impulsora (MDU) no pueda funcionar cuando el transformador está energizado. Estos enclavamientos se deben revisar anualmente.

Los contactos selectores normalmente están ubicados en un compartimiento separado dentro del tanque con una tapa de inspección lateral. Durante su accionamiento no hay arcos, y los contactos normalmente tienen una vida que supera la del transformador. Solamente se deben realizar inspecciones internas si se presentan dificultades con su operación.

Unidad motora impulsora

El MDU tiene un compartimiento protegido contra la entrada de agua y polvo y normalmente está equipado con resistencias calefactoras. El conmutador está conectado mediante ejes. La indicación de todas las posiciones se envían al gabinete del MDU, si los ejes impulsores no están conectados, el conmutador dentro del tanque físicamente no puede moverse, pero aún puede indicar la desconexión.

Es crítico realizar inspecciones regulares de los ejes.

El motor de impulsión tiene una protección de sobre corriente junto con controles de límites. El número de maniobras debe ser registrado regularmente en la lista de inspecciones.

El control de la indicación de posición del MDU se debe realizar con el indicador en la posición superior. Se debe consultar el manual de mantenimiento para mayores detalles, e inspecciones importantes o ajustes deben ser realizadas solamente por personal calificado. La inspección del gabinete de control con todos sus componentes se debe realizar anualmente.

Ensayos De Campo

Durante la vida del transformador se pueden presentar deterioros. Algunas fallas de los transformadores son atribuibles al colapso del aislamiento. Este colapso puede se

causado por muchos factores que son difíciles de predecir. Utilizando algunos procedimientos es posible determinar zonas de posibles problemas y adoptar acciones preventivas para prolongar la vida de la unidad. Se pueden realizar distintas clases de ensayos con este fin. Algunos de los ensayos que se indican en este artículo son:

- Ensayos eléctricos de los aisladores y devanados del transformador
- Ensayos del aceite
- Ensayo de filtrado de aceite del transformador
- Análisis de gases disueltos (DGA)
- Estudios de sistemas de diagnóstico y monitoreo.

Ensayos Eléctricos De Los Aisladores Y Devanados Del Transformador

Existen distintas escuelas que prescriben ensayos eléctricos para los transformadores en servicio. Sin embargo los ensayos siempre se realizan después de importantes reparaciones o después que actúan los dispositivos de seguridad. Si han sido previstos trabajos internos, se recomienda la realización de ensayos. Sin embargo el tipo de ensayos depende de la extensión del trabajo y de las condiciones bajo las cuales el trabajo ha sido realizado.

Dependiendo del programa de mantenimiento preventivo que el fabricante de acero necesita, anualmente se deben o no realizar ensayos. Se deben adoptar procedimientos de seguridad antes de realizar cualquier ensayo.

Algunos tipos de ensayos eléctricos incluyen:

- Resistencia de aislación
- Relación de transformación
- Medición del ángulo de pérdidas (tangente delta)

Resistencia de aislación – En el ensayo de resistencia de aislación (MEGGER) se aplica tensión continua (DC) con una fuente de pequeña potencia entre los devanados y tierra. El nivel de tensión normal es un múltiplo de 500 volts (por ejemplo, 500, 1000, 1500, 2000 y 5000). El dispositivo de medición de resistencia, normalmente indica su valor en una escala en megohm.

Relación de transformación – Se mide la relación de transformación de los devanados para distintos topes. Se puede realizar con un medidor de relación de transformación (TTR) o aplicando una tensión alterna reducida al primario y midiendo la tensión del secundario.

Medición del ángulo de pérdidas – Se mide el ángulo de pérdida del material aislante del sistema. Para ello se aplica tensión a los aisladores (2.5 a 10 kV) y se miden las pérdidas con un medidor adecuado. También puede usarse aplicando una baja tensión a los devanados y midiendo la corriente de excitación.

Existen otros tipos de ensayos, pero estos nos son tan comunes como los indicados. Los otros tipos de ensayos deberían utilizarse solamente en aplicaciones especiales.

Ensayos del aceite

Uno de los mejores métodos para determinar las condiciones de un transformador en aceite es el ensayo del medio en el cual funcionan las partes activas del transformador – el aceite.

El ensayo del aceite es probablemente una de las más importantes verificaciones que se pueden realizar con un transformador en aceite. Los resultados del ensayo pueden ayudar para determinar posibles deterioros del devanado y aislación principal, o determinar si ha ocurrido algún arco. Las muestras de aceite se obtienen a través de las válvulas de extracción de aceite utilizando adecuados dispositivos y depositando la muestra en recipientes no contaminados. Esto se hace para evitar influencias ambientales en el aceite. Las muestras deben ser enviadas a un laboratorio calificado para la realización de los ensayos, de acuerdo con los métodos establecidos por "American Society for Testing and Materials" (ASTM). American National Standards Institute (ANSI)/Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y International Electrotechnical Commission (IEC) indican los límites de los ensayos para aceites aislantes.

Básicamente existen dos tipos diferentes de muestras:

1. Ensayos para muestras de aceite de filtrado (tomadas en botellas limpias y secas) – Rigidez dieléctrica, humedad, ángulo de pérdida, tensión interfacial, peso específico, acidez y color.

2. Muestras para análisis de gases disueltos (DGA) (obtenidas mediante jeringas) – Miden en ppm: oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno, metano, etano, etileno y acetileno.

El resultado de estos ensayos puede ayudar para determinar las condiciones de las partes activas dentro del tanque, y laboratorios calificados pueden extender un protocolo de ensayos con recomendaciones basadas en los resultados de los ensayos. Muchas fábricas tienen sus propios laboratorios y pueden consultarse en el caso de aplicaciones especiales. Normalmente ellos tienen datos históricos que son de utilidad para interpretar los resultados de los ensayos.

Las muestras de aceite deben ser tomadas basándose en las condiciones de funcionamiento del transformador. Generalmente, en transformadores de hornos, que están sometidos a numerosas maniobras y condiciones de carga erráticas, las muestras se toman mensualmente. La frecuencia está determinada por estas condiciones. De cualquier modo, como mínimo, las muestras deben tomarse cada seis meses.

Nota del traductor: se puede iniciar con frecuencias mayores y luego según la tendencia reducir la frecuencia.

Ensayos De Filtrado De Aceite

Durante los ensayos de filtrado de aceite se prueban varios elementos:

- Rigidez dieléctrica
- Humedad
- Factor de potencia
- Tensión interfacial
- Peso específico
- Número de neutralización (acidez)
- Color

Rigidez dieléctrica – Existen dos métodos para controlar la rigidez dieléctrica del aceite ASTM D-877 y D-1816. La principal diferencia entre estos ensayos es la distancia entre los electrodos y el tipo de discos utilizado en la cuba de ensayo. Para D-877 se utilizan electrodos planos y para la D-1816 electrodos esféricos. Ambos ensayos controlan la rigidez dieléctrica del aceite y se miden en kilovolts. Los procedimientos de ensayo requieren una tensión de alterna con una velocidad de crecimiento prescrita. Otras

normas internacionales utilizan diferentes tipos de electrodos (esféricos y Rogowsky). Existen tablas que ponen en evidencia las diferencias. ANSI/IEEE fijan límites de aceptación basados en la clase de tensión del transformador y, en muchos casos, transformadores de hornos requieren límites de ensayo mayores de 30 kV.

Humedad – El contenido de agua se mide de acuerdo con ASTM D-1533, referida como al método de Karl Fischer. La presencia de agua en el aceite (medido en ppm) afecta la rigidez dieléctrica del aceite, y debe ser mantenida debajo de ciertos límites. Este límite está basado en la clase de tensión del transformador. En transformadores de hornos, se requiere menos de 20 ppm de agua. La deshidratación del aceite se realiza mediante un equipo de procesamiento de aceite para lograr un bajo contenido de humedad tanto con un aceite nuevo como con un aceite reciclado. Un equipo de deshidratación debe ser capaz de alcanzar un límite menor de 10 ppm de agua.

En las unidades que se transportan sin aceite, debe medirse el punto de rocío del aire / nitrógeno dentro del tanque. Existe una relación directa entre la temperatura del aire y el contenido de humedad, y se puede utilizar para determinar las condiciones internas de las partes.

Si el contenido de humedad es demasiado grande, puede ser necesario un proceso de secado antes de efectuar el vacío y llenado de aceite.

Estos procesos podrían secar las partes internas (basado en las tablas de temperatura / humedad) antes de colocar el aceite tratado dentro del tanque.

Factor de potencia – El ángulo de pérdidas del aceite se mide de acuerdo con ASTM D-924. El ángulo de pérdidas se mide como relación entre la potencia de pérdida y la potencia aplicada o como la relación entre la corriente de pérdida a la corriente aplicada. Normalmente se indica como porcentaje. Un factor de potencia igual o menor a 0.05 % a 25 °C es el límite deseado para transformadores de horno. Niveles más altos de factor de potencia pueden indicar contaminación o algún deterioro en el transformador.

Tensión interfacial – El método de ensayo ASTM D-971 se utiliza para determinar la fuerza necesaria para romper la película de aceite existente como superficie de contacto aceite / agua. Se mide en dinas por centímetro. La tensión interfacial mide los efectos de los contaminantes (sobre la resistencia de la película de aceite), que puede afectar la aislación y refrigeración de los devanados. Esta normalmente se denomina como barro.

Peso específico – Los ensayos prescritos por la ASTM D-1298 para determinar el peso específico del aceite, se pueden utilizar para medir el grado de contaminación. La mayoría de los transformadores para hornos utilizan aceite mineral. Este ensayo utiliza hidrómetros para determinar el peso específico. Son típicos niveles menores de 0.88.

Número de neutralización (acidez) – El número de neutralización está dado por la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio requerido para neutralizar el ácido en un gramo de aceite de acuerdo con ASTM D-974. ANSI/IEEE indican el nivel máximo de acidez como 0.03. El nivel de acidez (mediante otros resultados de ensayos de cernido) se pueden utilizar como guía para determinar cuando se debe recuperar o cambiar el aceite. El degradamiento de la celulosa puede suministrar oxígeno, el cual reacciona con el aceite para formar peróxidos. Estos se vuelven ácidos. Estos peróxidos pueden afectar la celulosa que constituye el papel aislante, que puede causar una sollicitación mecánica de la celulosa, de este modo acorta la vida del transformador.

Color – La ASTM D-1500 presenta muestras de color calibradas con las cuales se compara la muestra de aceite. Una serie de 15 pasos se utiliza que parte de 0.5 (aceite nuevo) hasta 8, el color se oscurece a medida que el número se incrementa. Es común que el aceite se oscurezca con el tiempo. Sin embargo, un aceite oscurecido en un corto período de tiempo puede ser signo de contaminación o deterioro, y otro conjunto de parámetros de ensayo de filtrado puede ser necesario para determinar el estado del aceite.

Estos ensayos de filtrado de aceite pueden dar alguna indicación de la condición de las partes internas del transformador, pero un completo análisis con DGA permite obtener una más completa imagen. De esta información se pueden obtener predicciones de problemas internos y soluciones posibles.

Análisis De Gases Disueltos (DGA)

El ciclo de trabajo de un transformador de horno es peor que aquellos de la mayoría de otros transformadores. Con numerosas maniobras y cargas inestables, el transformador está expuesto a muchas condiciones adversas. Estas circunstancias requieren una estrecha vigilancia, y se recomiendan ensayos regulares de DGA.

El transformador generará gases debido a las descargas graduales del aceite y del material aislante. Adicionalmente, arcos (alta energía), sobrecalentamiento, puntos calientes y chisporroteos (baja energía) causarán gases con descomposición del aceite y

el aislamiento. El análisis del tipo de gases y su cantidad pueden dar indicaciones de las condiciones internas. La interpretación del DGA durante un período de tiempo puede conducir a adoptar acciones correctivas para prolongar la vida de la unidad. En algunos casos se recomienda, retirar la unidad de servicio antes de que se produzca una falla catastrófica. Paradas programadas son siempre menos costosas que una salida imprevista.

La siguiente es una lista de los tipos de gases generados en un transformador. Los niveles de funcionamiento de IEEE se indican solamente con fines informativos. En transformadores con corrientes altas, la generación de gases otra vez se toman como guía para determinar los niveles de funcionamiento. Estos niveles pueden determinarse también en base a la experiencia de quien los utiliza.

Acetileno (C_2H_2) – Este gas es generado por alta temperatura superior a 500 °C y es causado por un falla con presencia de arco. Esto podría ser razón de alarma, si la generación de gas resulta grande en un período corto de tiempo. En algunos casos, transformadores con altas corrientes pueden causar arcos en los componentes de acero, y un análisis total de los gases se requiere antes de realizar cualquier trabajo.

Metano (CH_4) – Este gas se produce debido a descargas parciales o descomposición térmica del aceite y no es común en transformadores con corrientes altas. Sin embargo, en base a datos históricos es importante determinar el grado de producción.

Etano (C_2H_6) – Este gas normalmente se genera por descomposición térmica del aceite.

Etileno (C_2H_4) – Este gas normalmente se genera por descomposición térmica del aceite o el aislamiento.

Hidrógeno (H_2) – Este gas se genera en cualquier incipiente falla, tanto con descargas de baja o alta energía con electrólisis de agua. En descargas de alta energía, los principales gases son acetileno e hidrógeno, normalmente en relación 1 a 2.

Monóxido de carbono (CO) – Este gas puede indicar envejecimiento térmico o descargas en partículas de la aislación celulósica.

Dióxido de carbono (CO_2) – El dióxido de carbono se genera por envejecimiento térmico o descargas en partículas del material aislante. Si la relación de CO_2 a CO es mayor de 11, algún sobrecalentamiento está afectando el aislamiento celulósico.

Totalidad de gases combustibles – La totalidad de gases combustibles se indica como porcentaje de la totalidad de gases. Niveles aceptables varían con el tipo de transformador y su ciclo de trabajo. Por tanto, las tendencias son importantes, y son necesarios datos históricos para determinar acciones a seguir. Niveles que exceden 5 % requieren incrementar la frecuencia de extracción de muestras. Se aconseja en este caso consultar al fabricante para una interpretación de algún dato cuestionable.

Existen numerosos métodos disponibles para asistir la interpretación de los datos de gases disueltos en el aceite. Generalmente, se utilizan las relaciones de los diferentes gases. Las relaciones de Rogers (Tabla 7.6), Dorenborg, IEC y Duval Triangle son algunos de los métodos utilizados. Estos métodos dan alguna indicación de las posibles áreas involucradas. Muchos laboratorios utilizan estos métodos para la interpretación del ensayo de DGA y dan sus recomendaciones en los protocolos. Se requieren generalmente datos históricos para dar una más precisa visión de los gases generados, y su acumulación durante algunos ciclos tienen una significativa influencia en los análisis. En consecuencia, se requiere repetir las muestras para un análisis completo.

Tabla 7.6 - Mantenimiento preventivo de transformadores para hornos – Método para evaluar e interpretar la presencia de gases de falla basado en la relación de Rogers

Relación de gases	Tipo de gas	Rango	Código
(A) CH ₄ /H ₂	Metano/hidrógeno	< 0.1	5
		0.1 a 1	0
		1 a 3	1
		>3	2
(B) C ₂ H ₆ /CH ₄	Etano / metano	<1	0
		>1	1
(C) C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆	Etileno / etano	<1	0

				1 a 3	1
				>3	2
(D)		Acetileno / etileno		< 0.1	0
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄				0.1 a 3	2
(A)	(B)	(C)	(D)	Características de la falla generalizada	
0	0	0	0	Ninguna falla; deterioro normal	
5	0	0	0	Descargas parciales de baja densidad de energía; posible fisura; controlar los niveles de CO	
5	0	0	1	Descargas parciales de alta densidad de energía; posible fisura; controlar los niveles de CO	
0	0	0	1	Descargas parciales de alta densidad de energía; posible fisura; controlar los niveles de CO	
0	0	1	> 0	Descargas de baja energía; contorno sin potencia	
0	0	2	>0	Descargas de baja energía; chisporroteo continuo a potencial flotante	
0	0	1	0	Descargas de alta energía; arco con potencia a través del aislamiento del conductor con calentamiento localizado	
1	0	0	0	Sobrecalentamiento de la aislación del conductor	
> 0	1	0	0	Falla térmica de bajo rango de temperatura (< 150 °C)	
1	0	1	0	Falla térmica rango de temperatura de	
> 0	0	2	0		

	<p>100 a 200 °C</p> <p>Falla térmica rango de temperatura de 150 a 300 °C; con sobrecalentamiento del conductor</p> <p>Falla térmica de alta temperatura (300 a 700 °C); contactos defectuosos, núcleo, corrientes de circulación en el tanque, etc.</p>
--	--

Estudios De Diagnóstico Y Pruebas - Sistema (DIAMONS)

Operar en forma confiable y segura un sistema eléctrico de transformadores de horno de arco es esencial para lograr un proceso exitoso de fabricación de acero.

Sobre tensiones de maniobra y otros transitorios de alta tensión se presentan con las demandas de servicio pesado y pueden provocar fallas en los transformadores. Las tensiones transitorias que aparecen durante la operación de un sistema de hornos de arco puede estar influenciada por los cables de la red de tierra, interruptores y llaves de maniobra, corrección del factor de potencia, circuitos SVC (static var compensator), capacitores, descargadores y el transformador. Un sistema de pruebas puede poner en evidencia posibles problemas con estos componentes.

El sistema DIAMONS consiste en un registrador automático de transitorios que produce un informe desarrollado por ABB Kraft National Transformer, que permite supervisar un sistema eléctrico de hornos de arco. El sistema DIAMONS suministra inmediatamente, y a veces anticipadamente, advertencias de condiciones adversas, de modo tal que se pueden realizar acciones correctivas para prevenir fallas de los equipos.

El mantenimiento preventivo de los equipos de alta tensión es sumamente importante para una operación segura de hornos de arco. Se deben realizar pruebas continuas o periódicas de los transformadores, interruptores o llaves, componentes R/C y descargadores utilizando el equipo DIAMONS.

La experiencia realizada con el sistema de pruebas ha ayudado a prevenir fallas de componentes y ha determinado acciones correctivas cambiando alguno de los componentes para un conveniente mejoramiento del sistema.

La presencia de armónicos puede influenciar las tensiones de operación y pueden provocar condiciones adversas en los transformadores. El equipo DIAMONS puede determinar que frecuencia es la predominante debiendo introducirse circuitos de filtro para mejorar las condiciones.

Las Fig. 7.2 y 7.3 muestran informes producidos por el equipo DIAMONS que ilustran algunas situaciones típicas que se presentan en los transformadores de hornos de arco.

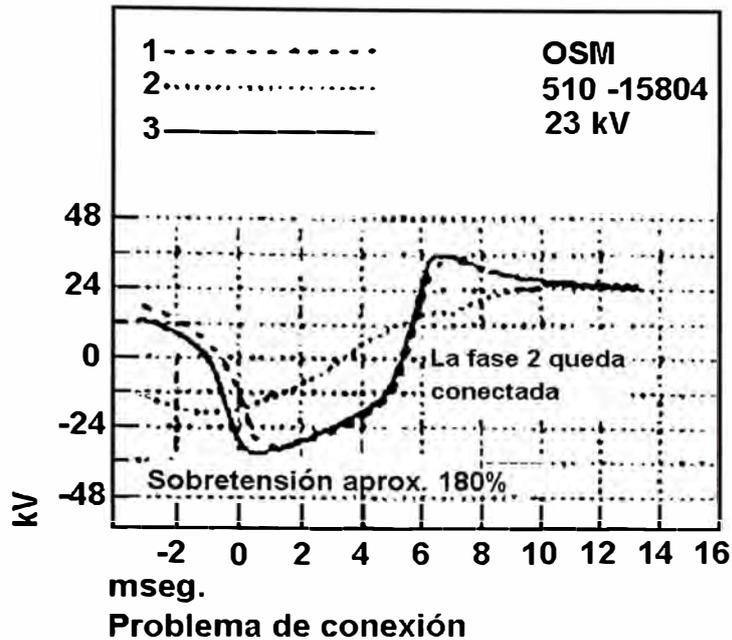


Fig 7.2 El informe DIAMONS muestra los efectos de la apertura de un interruptor de vacío de un transformador de horno de 45 MVA.

Conclusiones

El personal de operación es siempre el más importante factor para asegurar que cualquier mantenimiento preventivo resulte exitoso. Hablar resulta de poco valor. Las acciones deben prevalecer. Se deben realizar serias consideraciones para alcanzar un sistema de mantenimiento por encima del nivel de "Lo arreglaremos cuando se rompa". Este es un pensamiento arcaico y la experiencia ha mostrado que cuanto mejor es el programa de mantenimiento preventivo utilizado, se tendrá mejor éxito.

7.2 Circuito Secundario

El circuito secundario de un H.A.E. esta constituido básicamente por los cables eléctricos refrigerados flexibles que conducen la energía eléctrica de la salida del transformador hacia los brazos del horno y desde este punto a los electrodos a través de conductores tubulares.

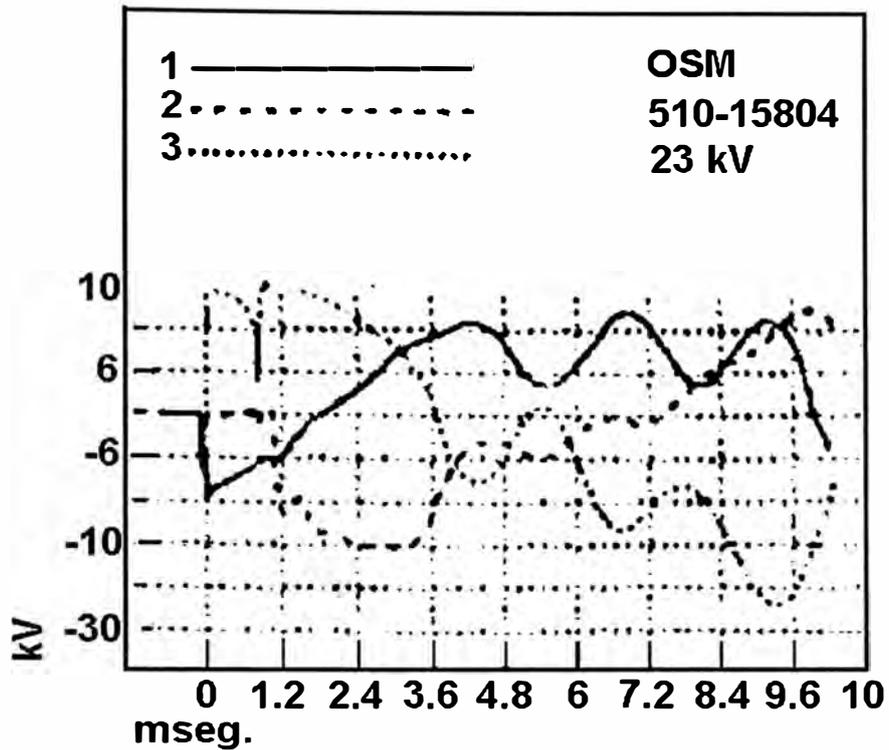


Fig 7.3 El informe DIAMONS muestra los efectos del cierre de un interruptor de vacío de un transformador de horno de 45 MVA.

Los interruptores se cierran juntos, sin embargo, el contenido armónico fijo de barrido de la fase 3 es superior a lo niveles normales - 26 kV (p.p.).

Un mantenimiento se debe de realizar , principalmente para obtener una prolongada vida útil de estos mismos, tal como los cables refrigerados, el circuito de refrigeración del agua, se inicia en los terminales del lado del secundario del transformador y termina en las grampas del Power clamp.

7.2.1 Cables Flexibles Refrigerados.

Teniendo presente las grandes fluctuaciones de corriente eléctrica I que esta sujeto el circuito del H.A.E., una densidad de corriente admisible en los cables flexibles refrigerados por agua es de 4 a 5 A/mm².

Estos cables son protegidos exteriormente por un tejido de fibra de vidrio y unas anillos de jebe que sirven para prevenir:

- Choque mecánico entre cables
- Fricción entre cables
- Residuos de metal o escoria liquida

La energía térmica generada por el cable debido al paso de la corriente eléctrica es disipada por un conductor interno, por donde circula el agua, para garantizar un

Buen funcionamiento del cable eléctrico refrigerado el agua no debe sobrepasar un temperatura máxima de 60°.

Para poder calcular la elevación de la temperatura del agua de refrigeración, se puede hacer uso de la siguiente expresión:

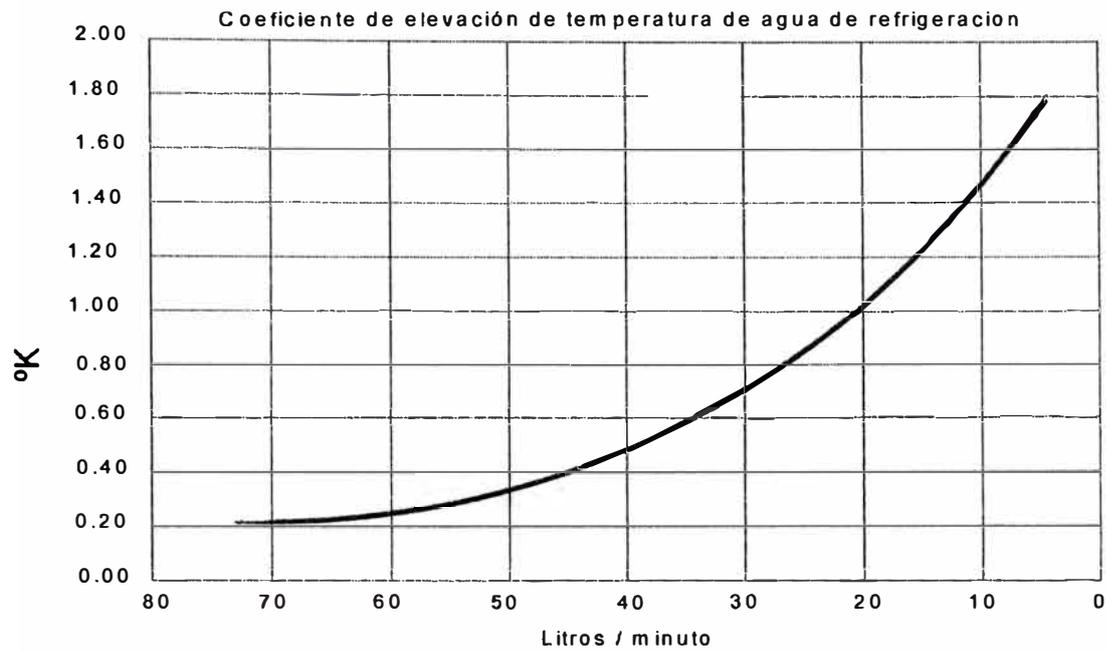


Fig. 7.4 Coeficiente Térmico

$$\Delta^{\circ}C = \frac{R \times I^2}{1000} \times K$$

$\Delta^{\circ}C$ = Elevación de la temperatura del agua en grados Celsius

R = Resistencia eléctrica del cable en ohms

I = Corriente eléctrica en kA

K = Coeficiente térmico conforme Fig. 7.4

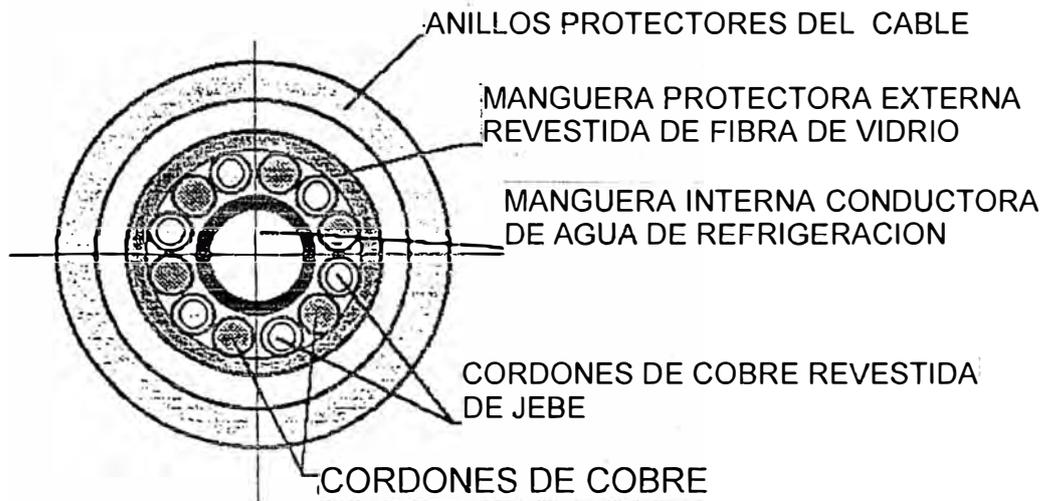


Fig. 7.5 Vista En Corte De Un Cable Refrigerado Típico

Mantenimiento

Una composición básica de un cable refrigerado como se muestra en la Fig.7.5

- Terminales
- Cordones de cobre
- Manguera de circulación de agua
- Protección externa

El punto mas crítico del cable es en la unión entre los terminales y los cordones de cobre, con el uso y el tiempo los hilos de cobre se revientan por fatiga, adicionalmente las mangueras se produce un desgaste por rozamiento y calentamiento.

Un mantenimiento básico comprende, ver tabla 7.7

- Diario, una inspección visual
- Semanal revisión del estado de los terminales
- Semestral termografía de los terminales

Tabla 7.7

MANTENIMIENTO BASICO DE LOS CABLES REFRIGERADOS		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Diario	Preventivo	Inspección visual Revisión de la temperatura de salida del agua de refrigeración
Semanal	Preventivo	Revisión de los terminales
Semanal	Predictivo	Termografía de los terminales
30 meses	Preventivo	Cambio de terminales Cambio de las mangueras protectoras Cambio de las mangueras de agua de refrigeración Cambio del forro de fibra de vidrio

7.2.2 Brazos Porta Electrodo

Un brazo porta electrodo (uno por fase) esta constituido por una estructura metálica con perfil circular o rectangular, donde están situados los soportes antimagnéticos de las barras bus.

En el extremo del brazo se encuentra el power clamp que contiene la grampa que sujeta al electrodo y al otro extremo se encuentran los cables refrigerados, todo el circuito eléctrico del brazo se encuentra refrigerado, el agua de refrigeración circula por los conductores tubulares (son de cobre electrolítico) y el power clamp también, el brazo porta electrodo esta aislado de las estructura por medio de aisladores en los puntos de fijación.

Tabla 7.8

MANTENIMIENTO BASICO DEL BRAZO PORTA ELECTRODO		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Diario	Preventivo	- Inspección visual - Limpieza diaria de la zona de contacto -Monitorear la temperatura de operación de las diversas partes.

Semanal	Preventivo	-Limpieza general e inspección visual buscando puntos de sobrecalentamiento - Revisión de las grampas - Revisión del estado de los aisladores - Revisión de la presión de ajuste de la grampa - Revisión del ajuste de los pernos y tuercas del sistema de fijación - Lubricación de las partes móviles y rodamientos
Mensual	Preventivo	Realizar la inversión del flujo de agua de refrigeración
Anualmente	Preventivo	Limpieza química de todo el circuito de refrigeración
Anualmente	Preventivo	Cambio de power clamp Cambio de aisladores

7.2.3 Sistema De Regulación Y Control De Posicionamiento De Los Electrodo

La mayoría de los hornos de arco eléctrico moderno el sistema de regulación de los electrodos, esta compuesto de los siguientes elementos (componentes)

Traductores de presión

Regulador Electrónico

Control eléctrico

Válvula hidráulica Reguladora Proporcional

El movimiento ascendente y descendente de los electrodos es ejecutado a través de cilindro hidráulico, montado en la súper estructura del homo, utilizando un fluido hidráulico llamado glicol y controlada por la electro válvula proporcional.

La electro válvula proporcional, una por fase es comandada por señales eléctricas enviadas por el controlador electrónico (PLC) que hace aumentar o disminuir el volumen del fluido hidráulico en el cilindro, lo cual a su vez incrementa o disminuye la velocidad del

cilindro., el movimiento descendente es realizado por el propio peso del brazo porta electrodo, siendo controlada la variación con la presión hidráulica.

La unidad hidráulica esta compuesta por bombas centrífugas, tanque de alta presión con un blade de nitrógeno, tanque de almacenamiento , la lectura de las variables eléctricas son capturadas por los transformadores de tensión y de corriente, instalados en el circuito primario y secundario del transformador del horno, estas señale son convertidas dentro del procesador y este a su vez generan señales eléctricas que actúan sobre las electro válvulas., la función del procesadores básicamente la de mantener el arco o cortarlo dentro de los parámetros prefijados para que este se mantenga , aunque se presenten los siguientes casos:

- Corto circuito provocado por contacto de electrodo-carga
- Interrupción brusca del arco electrico(materials aislantes)
- Movimiento del baño y escoria
- Diferencia de tipo de chatarra
- Variaciones de la tensión de alimentación
- Adición de aleaciones.

Los sistemas de regulación hidráulica por lo general funcionan, como se muestra en la Fig. 7.6, y tiene las siguientes características:

- Buena dinámica de regulación (Tiempo x respuesta)
- Amplias posibilidades de ajustes y afino
- Ajustes individuales por fase
- Ajuste al límite máximo de la corriente eléctrica, a fin de evitar interrupciones por sobre-carga
- aumento la potencia media del horno, debido al menor inestabilidad del arco eléctrico.

El regulador electrónico ajusta los valores teóricos de impedancia para una determinada fase del proceso.

Un menor error $\pm\Delta Z$, el regulador electrónico corrige rápidamente a través de la unidad hidráulica una nueva posición del electrodo, y así sucesivamente hasta obtener una estabilidad.

Para entender un poco más sobre el funcionamiento sobre la regulación del horno, partimos del circuito equivalente de horno Fig.7.7

$Z_0 = R_0 + jX_0$ esta es la impedancia en vacío del transformador del horno

$U_p =$ Tensión primaria

$R1, X1$ = Resistencia y reactancia del primario del transformador

$R2, X2$ = Resistencia y reactancia del secundario del transformador, referido al primario

$R3, X3$ = Resistencia y reactancia de las barras de alta corriente, referido al primario

Rf, Xf = Resistencia y reactancia de la placa de contacto, electrodo, power clamp, carcasa del horno, referido al primario.

Ru = Resistencia útil del horno, esto es una parte donde el paso de corriente eléctrica va a producir un calor útil. Ru esta compuesta por la resistencia del arco y la carga.

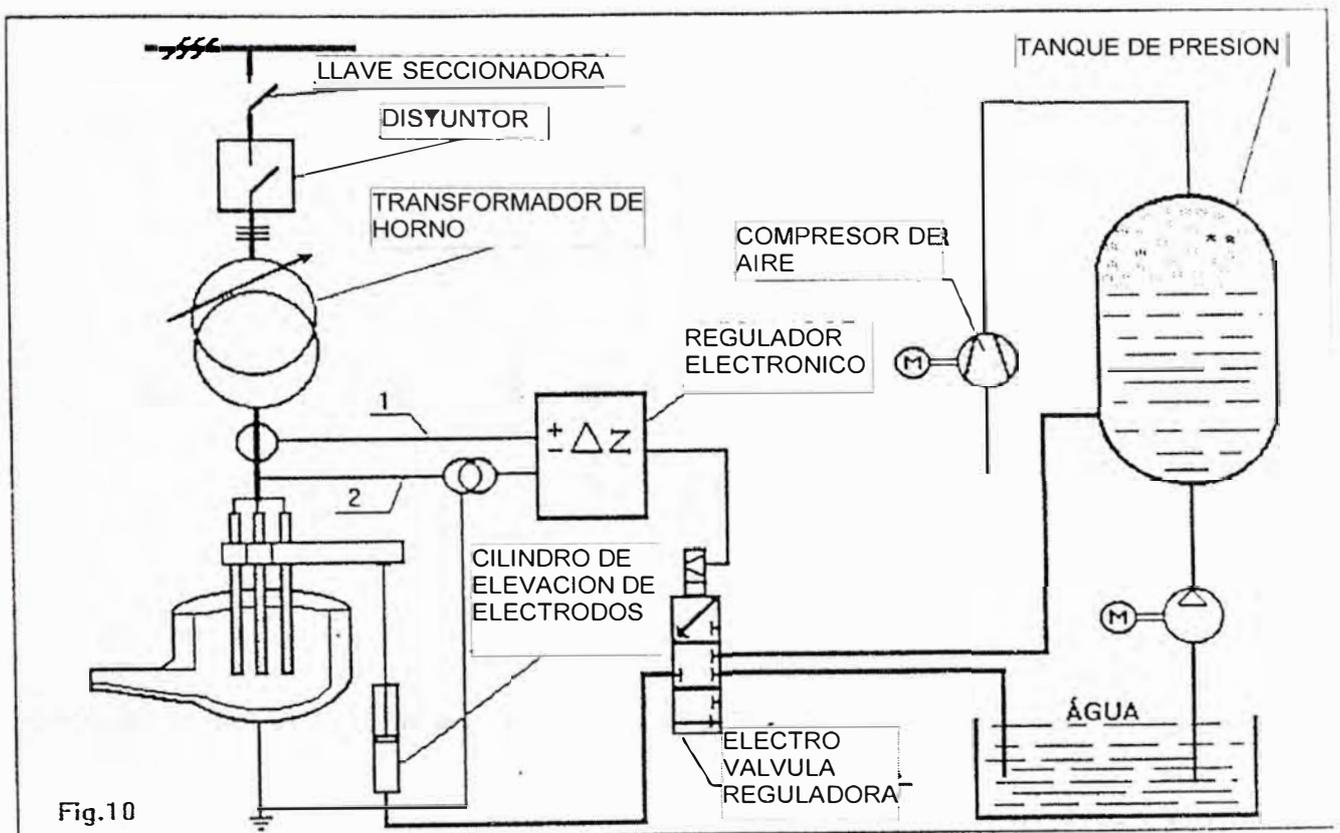


Fig. 7.6 Esquema De Un Sistema De Regulación Hidráulico Típico

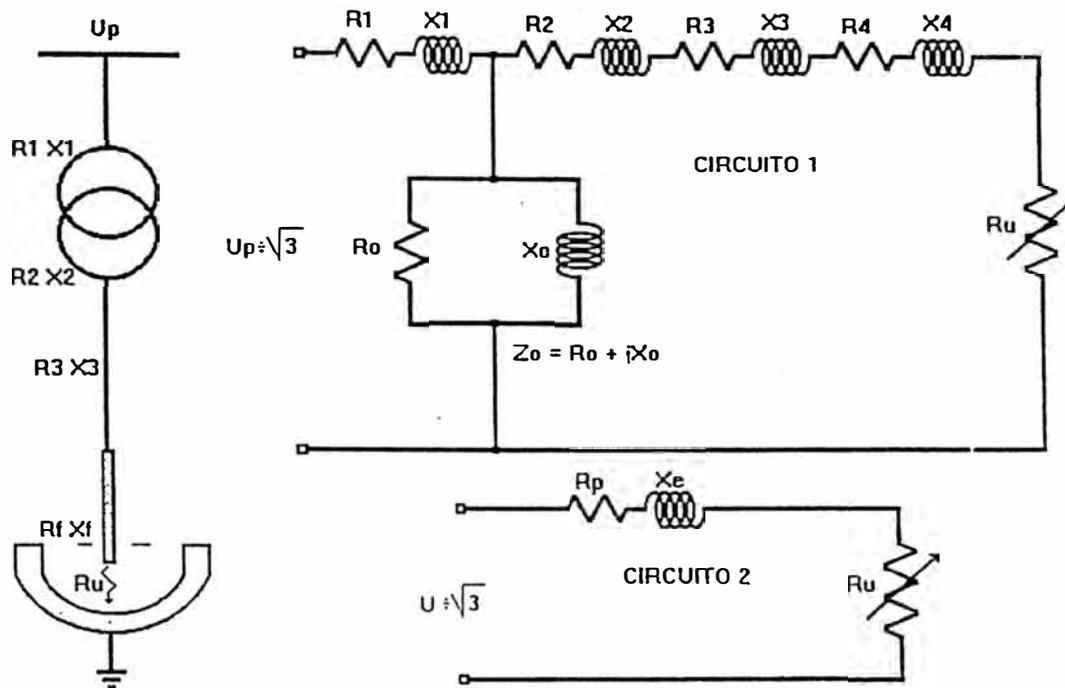


Fig. 7.7 Esquema Eléctrico Básico Del Horno De Arco

El arco eléctrico genera calor debido al efecto Joule:

$$Q = R \times I^2 \times T \text{ (calorías)}$$

Como la corriente en vacío del transformador del horno es muy pequeña en relación a la corriente en plena carga, podemos considerar:

$Z_0 = \infty$ entonces la resistencia equivalente del horno será:

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3 + R_f + R_u$$

Siendo estas llamadas la resistencia pasiva y parciales

$R_1 + R_2 + R_3 + R_f$, que son resistencias fijas del circuito

La reactancia equivalente del horno será:

$$X_E = X_1 + X_2 + X_3 + X_f$$

A partir de la cual trazamos un circuito equivalente simplificado del horno.

La potencia absorbida por el horno será:

$$P = U \times I \times \cos\Phi; \quad I = \frac{U}{Z} \quad Z^2 = (R_E)^2 + (X_E)^2 \quad (7.1)$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_E)^2 + (X_E)^2}} \quad (7.2)$$

Donde concluimos que:

$$I = \frac{U}{R_E} \times \text{Cos}\Phi = \frac{U}{X_E} \times \text{Sen}\Phi \quad y \quad (7.3)$$

$$P = \frac{U^2}{R_E} \times \text{Cos}^2 \Phi = \frac{U^2}{X_E} \times \text{Sen}\Phi \times \text{Cos}\Phi \quad (7.4)$$

La potencia reactiva será:

$$Q = U \times I \times \text{Sen}\Phi = \frac{U^2}{X_E} \times \text{Sen}^2\Phi \quad (7.5)$$

La corriente de corto circuito será:

$$R_u = 0 \quad I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{(R_p)^2 + (X_E)^2}} \quad (7.6)$$

De la formula

$$P = \frac{U^2}{X_E} \times \text{Sen}\Phi \times \text{Cos}\Phi \quad (7.7)$$

Concluimos que la potencia de un horno es directamente proporcional al cuadrado de la tensión e inversamente proporcional a la reactancia equivalente.

En un proyecto de horno esta definidos los valores de U y X_E , quedando como variable para la regulación el ángulo Φ , el factor de potencia de un horno es una variable para la regulación del comportamiento del arco con el cual es directamente proporcional, mantenimiento básico ver tabla 7.9

Tabla 7.9

MANTENIMIENTO BASICO DEL SISTEMA DE REGULACION		
CONTROLADOR		
Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Diario	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> -Revisión de fugas de aceite en la unidad hidráulica -Revisión de fugas de aceite en los cilindros hidráulicos -Revisión de la presión del tanque de alta presión. -Revisión de la temperatura del aceite hidráulico -Revisión del sistema de alarma por alta y baja presión - Revisión de la operación de los sistemas de refrigeración.
Semanal	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> -Revisión de los transductores de presión -Revisión de los valores de las señales de voltaje y corriente -Revisión de las temperaturas de las tarjetas electrónicas -Revisión
Mensual	Preventivo y Predictivo	<ul style="list-style-type: none"> -Revisión de los valores de voltaje seteados de acuerdo al manual -Revisión de las fuentes de voltaje, buscando sobrecalentamientos - Ajustes de los cables en la borneras -Revisión de los aislamientos y protección de los cables y conectores -Limpieza del sistema de refrigeración -
Trimestral	Preventivo y Predictivo	<ul style="list-style-type: none"> -Cambio de filtros del sistema de alta presión -Cambio de filtros del sistema de baja presión o de retorno -Análisis del aceite hidráulico -Rellenado del Blade de Nitrógeno , para garantizar el nivel de alta presión - Cargar el programa del sistema de control
Semestral	Preventivo	<ul style="list-style-type: none"> -Cambio del aceite del tanque hidráulico -Cambio de los sellos de los cilindros hidráulicos de los brazos porta electrodos -Desmontaje y limpieza del intercambiador de calor del tanque hidráulico

Frecuencia	Tipo de mantenimiento	Mantenimiento
Anual	Preventivo	-Mantenimiento de las electro bombas -Cambio de mangueras hidráulicas - Prueba de la operatividad de los sensores de temperatura y alarmas -Revisión del funcionamiento de las válvulas limitadoras de presión -Revisión del funcionamiento de los reguladores de presión -Mantenimiento de los tableros eléctricos de control

7.3 Teoría del Mantenimiento

El objetivo fundamental de este capítulo es transmitir la evolución del Mantenimiento en las Plantas Industriales, su importancia y su carácter no de gasto sino de inversión, así como dar las claves fundamentales de elaboración e implantación de un Sistema de Mantenimiento Preventivo y Predictivo encaminado a aumentar la disponibilidad de las instalaciones reduciendo el número de averías y su duración.

También es objeto de este capítulo reseñar la importancia del Sistema de Información de Mantenimiento para tener un apropiado sistema de recogida de datos, procesado de los mismos y elaboración de la información para la toma de decisiones, así como del flujo de la misma dentro de la empresa.

Asimismo se quiere destacar la importancia y prestaciones de la Gestión informatizada del Mantenimiento, fundamental para la captación y proceso de los datos, posibilitando así tener la información y el control de la gestión del Mantenimiento.

El mantenimiento preventivo en la industria

Las estrategias convencionales de "reparar cuando se produzca la avería" ya no sirven. Fueron válidas en el pasado, pero ahora se es consciente de que esperar a que se produzca la avería para intervenir, es incurrir en unos costes excesivamente elevados (pérdidas de producción, deficiencias en la calidad, etc.) y por ello las empresas industriales se plantearon implantar procesos de prevención de estas averías mediante un adecuado programa de Mantenimiento.

Evolución del mantenimiento y la calidad.

La evolución del Mantenimiento se estructura en los cuadros siguientes Fig. 7.8 generaciones:

		4ª Generación	
		3ª Generación	
		2ª Generación	
1ª Generación			
Mantenimiento Correctivo Total Se espera a la avería para reparar.	Se empiezan a realizar tareas de Mantenimiento para prevenir averías. Trabajos cíclicos y repetitivos con una frecuencia determinada.	Se implanta el Mantenimiento "a condición" es decir se realizan monitorizaciones de parámetros en función de los cuales se efectuarán los trabajos propios de sustitución o reacondicionamiento de los elementos.	Se implantan sistemas de mejora continua de los planes de Mantenimiento Preventivo y Predictivo, de la organización y de la ejecución dl Mantenimiento. Se establecen los grupos de Mejora y seguimiento de las acciones. Sistemas del tipo T.P.M.

Fig.- 7.8

La analogía con la calidad es total a lo largo del tiempo.

En una primera generación se incurría en costes de no-calidad al tenerse que reprocesar productos (algunos cuando el cliente advertía el defecto) hasta que se vio que controlar la calidad costaba menos que las consecuencias de no hacerlo Así nacieron los controles de calidad en los procesos (equivalente a la 2ª generación del Mantenimiento).

Más adelante se comprobó que el coste de estos controles era muy alto y se pasó al control de calidad por procesos y al control estadístico de calidad (corresponde a la 3ª generación del Mantenimiento).

La evolución posterior ha sido la creación de círculos de calidad y grupos de mejora continua con objetivos de alcanzar la calidad total e integración del personal (equivalente a los modelos de organización tipo T.P.M., o sea la cuarta generación del Mantenimiento).

El mantenimiento como fuente de beneficios

Es preciso disponer de un sistema de mejora continua para tratar de distanciarse de los competidores y así mejorar nuestra posición en el mercado. En cuanto a Mantenimiento se refiere, las únicas estrategias válidas hoy en día son las encaminadas tanto a aumentar la disponibilidad y eficacia de los equipos productivos, como a reducir los costes de Mantenimiento, siempre dentro del marco de la seguridad y el medio ambiente.

Garantizar la disponibilidad y eficacia requerida de los equipos e instalaciones, asegurando la duración de su vida útil y minimizando los costes de Mantenimiento, dentro del marco de la seguridad y el medio ambiente.

Los medidores fundamentales de la gestión de Mantenimiento son la Disponibilidad y la Eficacia, que van a indicarnos la fracción de tiempo en que los equipos están en condiciones de servicio (Disponibilidad) y la fracción de tiempo en que su servicio resulta efectivo para la producción (Eficacia), ver Fig. 7.9.



Fig. 7.9

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo disponible para Producción}}{\text{Tiempo de Producción requerido}}$$

$$\text{Eficacia} = \frac{\text{Tiempo de Producción efectiva}}{\text{Tiempo de Producción requerido}}$$

La mejora en estos dos ratios y la disminución de los costes de Mantenimiento suponen el aumento de la rentabilidad de la empresa y por tanto tiene influencia directa sobre los beneficios.

$$\text{Rentabilidad} = \frac{\text{Eficacia} - \text{Costes de Mantenimiento}}{\text{Activos de Mantenimiento}}$$

El análisis de riesgos como referencia en la elaboración de los planes de mantenimiento

El análisis de riesgos, es un paso previo a la realización de un plan de Mantenimiento, en él se estudian los distintos fallos que se suelen producir y las consecuencias de los mismos. La primera premisa del Análisis de Riesgos es reconocer la imposibilidad de realizar un plan de Mantenimiento que prevenga o evite todos los fallos en las máquinas o instalaciones, ya que esto supondría realizar un Mantenimiento con coste "infinito" (absoluta disponibilidad de recursos tanto técnicos como humanos, logísticos, etc.).

Por eso el Análisis de Riesgos es consciente de que se han de definir unos límites bajo los que se desea estar y en función de ellos diseñar los Planes de Mantenimiento para ceñirnos a ellos.

El análisis de riesgos aplicado a Mantenimiento se basa en estudiar las consecuencias producidas por los fallos en las máquinas, en los cuatro marcos siguientes:

- Consecuencias Operacionales, en las que el fallo produce trastornos en la producción o en la calidad que al final se traducen en tiempos perdidos en el proceso productivo.
- Consecuencias en la Seguridad, en las que el fallo puede afectar en mayor o menor medida a la seguridad del personal de fábrica.
- Consecuencias Medio ambientales, en las que el fallo pueda afectar al Medio ambiente o al entorno, considerando las disposiciones legales que existan al respecto.
- Consecuencias en los Costes, son las propias de la reparación que el fallo trae consigo y que en ocasiones pueden ser de extraordinaria importancia.

Para ello el proceso a emprender se centra en dividir la Planta en partes funcionales y en ellas definir una matriz de riesgos Fig. 7.10, para cada una de las cuatro consecuencias, de la siguiente manera:

- Para esa línea sección o máquina, se determina de forma general una escala de gravedad de las consecuencias (desde Insignificantes hasta Catastróficas) cuantificando cada una de las partes de la escala con las unidades de medida correspondientes.
- Se determina también una escala de probabilidad o frecuencia de ocurrencia de fallos en el tiempo (desde muy improbable hasta muy frecuente).

Muy frecuente				
Frecuente				
Ocasional				
Remoto				
Improbable				
Imposible				
Probab. gravedad	Insignificante (i)	Moderado (m)	Critica (c)	Catastrófica (t)

Fig. 7.10

- Teniendo en cuenta la combinación gravedad - frecuencia de los fallos y empezando por los más graves y más remotos se determina la aceptabilidad o no aceptabilidad de las consecuencias de dicho fallo, estableciendo así (después de haber recorrido toda la escala de gravedad) una línea denominada perfil de riesgo que separa la zona de admisibilidad de la de no admisibilidad de las consecuencias de los fallos.
- Ahora estamos en situación de ir estudiando los fallos y las consecuencias de los mismos, y según sea su combinación gravedad - frecuencia, así estará situado dentro de las matrices correspondientes.
- Una vez caracterizados los fallos dentro de la matriz, veamos las diferentes zonas en las que se divide:
 - **Zona H:** Es la zona inadmisibles de las consecuencias de los fallos, situada en la parte superior derecha de la matriz, bien por la severidad de los mismos o bien por la frecuencia que tengan de ocurrir. No podemos admitir un fallo cuyas consecuencias queden en esta zona, por eso esta zona es la de mayor prioridad de actuación. Hemos de eliminar o disminuir sus consecuencias por tanto aquellos puntos situados en ella deben ser objeto de actuaciones de Mantenimiento para tratar de, o bien disminuir su frecuencia de ocurrencia, o bien minimizar las consecuencias del fallo, de manera que logremos "sacarlo" de esa zona.

- **Zona L:** Situada en la parte inferior izquierda de la matriz. Aunque corresponde a fallos con consecuencias aceptables, estamos dispuestos a aceptar que tengan unas consecuencias mayores. Si estamos realizando algún tipo de tarea de prevención para conseguir que las consecuencias de una fallo estén en esta zona, podríamos plantearnos el gastar menos en dichas tareas, pues estaríamos dispuestos a aceptar una severidad mayor (desplazándose hacia la derecha de la matriz), o una probabilidad de ocurrencia mayor (desplazándose hacia arriba en la matriz de riesgo), o ambas cosas al mismo tiempo. Dentro de la zona admisible es la de bajo riesgo.
- **Zona M:** Situada en la zona central, entre las dos líneas dibujadas en la matriz. Corresponde a los fallos con consecuencias aceptadas. El óptimo sería que todos los fallos tuviesen sus consecuencias dentro de esta zona, pues representa la relación óptima desde el punto de vista consecuencias - coste.

Probabilidad

A		ZONA H		
B				
C		ZONA M		
D				
E				
F		ZONA L		
	IV	III	II	I Severidad

El siguiente paso es el diseño de un plan de Mantenimiento que elimine las consecuencias indeseables, optimizando además costes tanto de intervención (mano de obra, repuestos, etc.) como de pérdidas de producción.

Como podemos ver, la situación óptima sería que todos los fallos tuvieran sus consecuencias en la zona M. Pero no debemos olvidar que el proceso es dinámico y que

se ha de adaptar a las circunstancias cambiantes del entorno. Por ello, cuando el entorno cambia, puede cambiar también el perfil de riesgo y desplazarse hacia la esquina inferior izquierda (en el caso de que aumente la demanda), o hacia la esquina opuesta, la superior derecha (en el caso de que la demanda decrezca). Ante estos cambios en el perfil de riesgo, puntos que antes estaban en una zona, se desplazarán a otras zonas distintas (aunque ellos sigan estando en la misma casilla), y las políticas de mantenimiento que antes eran adecuadas pueden ahora dejar de serlo.

Recordemos que lo que queremos eliminar son las consecuencias inaceptables de los fallos, para cada uno de los cuatro tipos:

- Tengan consecuencias Operacionales
- Afecten a la Seguridad
- Afecten al Medio Ambiente
- Sólo afecten al coste de la Reparación

Diseño De Planes De Mantenimiento Predictivo Y Preventivo

La elaboración de los planes de Mantenimiento se basa además de en el Análisis de Riesgos, en las técnicas del Análisis de Fiabilidad de las instalaciones.

Estructuración

El análisis de fiabilidad consta de dos partes fundamentales:

- La información: donde se recaban los datos correspondientes a los equipos sobre los que va a realizar el análisis.
- La decisión: donde en esencia se tratan de establecer tareas de prevención (técnicamente factible y económicamente rentable) de las consecuencias de los modos de fallo.

Información

En la fase de información se determinan las distintas *funciones* (principales y secundarias) de cada elemento del equipo que se esté analizando en su contexto operacional, posteriormente se determinan para cada función los fallos de función, es decir la forma en que se manifiesta la incapacidad del elemento para desarrollar la función correspondiente.

El paso siguiente es determinar los *modos de fallo*, que son los fallos que realmente apreciamos en el equipo (lo normalmente conocido como avería), una vez hecho esto es necesario determinar la causa raíz del fallo sobre la que estudiaremos su solución.

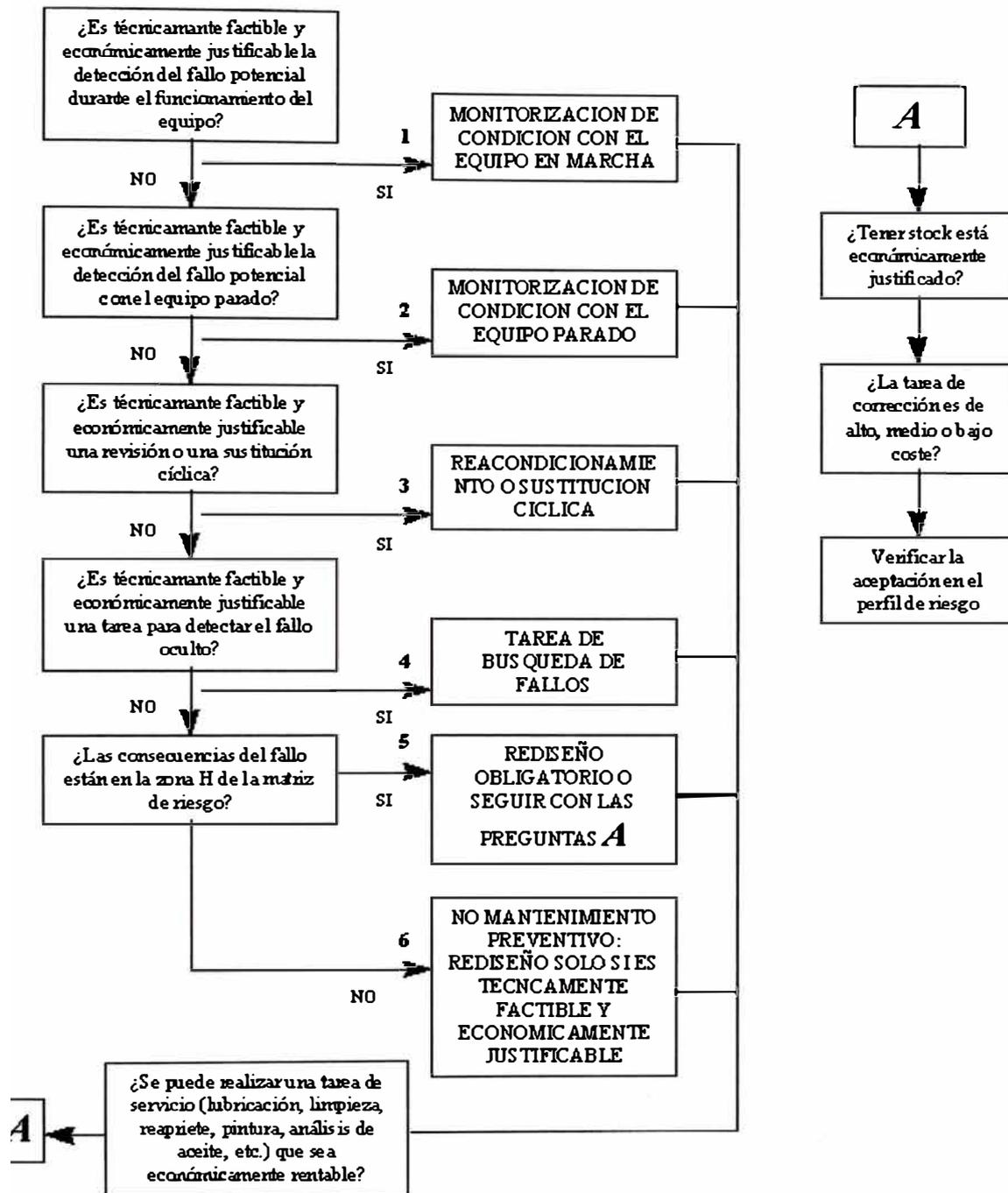
Con todos estos datos se realiza la evaluación de las consecuencias de cada fallo en cada una de las escalas (Operacional, Seguridad, Medio ambiente y Coste) y se sitúa en la matriz de riesgo en el lugar correspondiente según sean la severidad y la probabilidad del fallo.

Una tabla podría ser usada para registro de datos en esta fase de información:

Decisión

En la fase de decisión, apoyados en el diagrama de decisión y en la curva P-F, se determinan para cada causa raíz la tarea de Mantenimiento a realizar, la frecuencia con que se va a llevar a cabo, quién la va a ejecutar, así como el stock a mantener y el nuevo riesgo resultante al aplicar este plan de Mantenimiento.

DIAGRAMA DE DECISION



Plan De Mantenimiento Preventivo / Predictivo

De la hoja de decisión se genera el plan de mantenimiento de prevención y los rediseños a llevar a cabo, así como las decisiones sobre tener stock o no y la importancia de las tareas de corrección que hay que hacer tras descubrir algo mal en las instalaciones, como consecuencia de la realización de las tareas de prevención. En la figura se muestra el criterio para determinar las tareas de mantenimiento Predictivo, que son las primeras

que se tratan de establecer (diagrama P-F). El intervalo P-F, es el tiempo del que se dispone desde que se detecta la avería, hasta que el sistema deja de funcionar. En este intervalo tendremos que llevar a cabo el mantenimiento del equipo.

La Mejora De Las Intervenciones De Mantenimiento

Se seleccionan (en primer lugar) las tareas correspondientes a la zona A para mejorar su mantenibilidad y, por tanto, reducir los costes asociados a ellas. Para ello se usan los criterios de mantenibilidad y las técnicas Lean Manufacturing (Poka Yoke y SMED), junto con los criterios aportados por el Análisis del Valor

El proceso básico de aplicación tiene como objetivos reducir los costes y aumentar la eficacia de los equipos. Para ello se dividen las tareas en:

- **Con valor añadido.** Son aquellas por las cuales el cliente está dispuesto a pagar. A su vez se dividen en:
 - **Externas:** Se pueden realizar con el equipo en marcha.
 - **Internas:** Se han de realizar forzosamente con el equipo parado.

- **Sin valor añadido.** Son todas aquellas que en caso de no hacerse no influirían sobre el valor del producto ó servicio. A su vez se dividen en:
 - **Necesarias.** Hoy por hoy son necesarias, aunque no añadan valor al producto o servicio, debido a los medios de que disponemos normalmente. Por ejemplo, los transportes de elementos no añaden valor, pero puede que hoy por hoy sean necesarios, ya que no disponemos de otro sistema para ponerlos en su lugar.

A su vez se dividen en:

- **Externas:** Las que se pueden realizar con el equipo en marcha.
- **Internas:** Las que por fuerza se han de realizar con el equipo parado.

- Inecesarias. No hacerlas no influye para nada en el producto o servicio y sí representaría una disminución de costes.

El precio de un producto o servicio puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$\text{Precio} = \text{Margen} + \text{Coste}$$

A su vez, el coste está formado por los siguientes conceptos:

$$\text{Coste} = \text{Valor Añadido} + \text{Despilfarro}$$

La metodología de Mejora de la Mantenibilidad pretende:

- Clasificar las operaciones en "con valor añadido" y "sin valor añadido".
- Las operaciones "sin valor añadido" clasificarlas en necesarias e innecesarias.
- Eliminar todas las operaciones innecesarias que podamos (Con lo cual, estamos disminuyendo costes y aumentando la eficacia).
- Transformar en externas todas las operaciones "sin valor añadido" internas que podamos (con lo cual aumentamos la eficacia).
- Transformar en externas todas las operaciones "con valor añadido" internas que podamos (con lo cual aumentamos la eficacia).
- Reducir al máximo los recursos (tiempo y costes) de las operaciones internas (con lo cual estamos reduciendo costes, aumentando la eficacia y reduciendo el valor añadido).
- Reducir las operaciones externas (con lo cual reducimos costes).

El Sistema De Información De Mantenimiento

Al hablar de un Sistema de Información no nos referimos únicamente al Software informático, sino a la captación de datos, elaboración, preparación de la información y al flujo, tratamiento y aprovechamiento de la misma, así como de los receptores y emisores de informes, además de sus contenidos.

Los Tres Niveles De Información

La información que se necesita gestionar en el proceso de Mantenimiento se divide en tres niveles:

- La información para la Dirección, para la que se deben elaborar informes sobre:

- Costes de Mantenimiento (Orígenes, composición, distribución por centros de coste, etc.)
 - Objetivos y seguimiento presupuestario
 - Ratios y resultados económicos (Seguimiento y análisis para generar actuaciones)
- La información para las operaciones, para cuya gestión diaria se ha de poseer información de:
 - Ordenes de trabajo (Conocimiento de los parámetros fundamentales de la ejecución de los trabajos)
 - Ratios de Disponibilidad y Eficacia (Conocimiento del impacto de la Gestión diaria sobre los indicadores fundamentales)
 - Análisis de averías y equipos críticos (Conocimiento y explotación de la base de datos de averías para la determinación de las actuaciones preferentes de mantenimiento de cara a mejorar la situación y criticidad de los equipos)
- La información para el puesto de trabajo
 - Sistema de incentivos
 - Necesidades de formación (***Detección de las necesidades de formación*** del personal de cara a la introducción de procesos de mejora continua)
 - Control de resultados para la contribución a canalizar las mejoras
 - Realimentación de la información

Entre las diferentes unidades de proceso hay que conseguir un Sistema de Información lo más fácil y sencillo posible.

Se debe transferir sólo la información necesaria y con la más directa, estructurada y simple forma de transmisión.

Necesidades del sistema de información de mantenimiento

El diseño del sistema de información está encaminado a recoger y procesar los datos precisos para satisfacer las necesidades de información que lleven a alcanzar los objetivos básicos de la gestión de Mantenimiento, que son el aumento de la Eficacia y la disminución de Costes.

- Para el aumento del ratio Eficacia:

- Tiempos de Mantenimiento programado
 - Tiempos y número de averías
 - Paradas de Producción debido a cambios de útiles
 - Tiempo medio entre fallos (MTBF)
 - Tiempo medio de reparación (MTTR)
 - Capacidad y producción realizada
 - Etc.
- Para la reducción de Costes:
 - Costes de mano de obra propia y subcontratada de cada una de las intervenciones
 - Reparaciones realizadas por servicios externos
 - Coste de los repuestos utilizados
 - Coste del stock de repuestos

Con estos datos se tienen los elementos precisos para elaborar la información Necesaria Para La Gestión.

Fiabilidad Del Sistema De Captación De Datos

Los datos utilizados en la elaboración de la información que posteriormente será analizada deben ser lo más fiables posible, es decir el diseño de la hoja u orden de trabajo de Mantenimiento ha de ser tal que los operarios y encargados la encuentren sencilla y estándar, ya que sólo así se podrán obtener datos útiles y fiables. Este problema de diseño es básico para el funcionamiento del sistema. Lo mismo ocurre con el resto de documentos de captación de datos que componen el sistema.

También, lógicamente, es necesario impartir formación y concienciar al personal que va a contribuir a esta captación de datos, para que esta fiabilidad y eficiencia que se han comentado se vean reflejadas en la práctica diaria.

Datos E Información Del Sistema De Mantenimiento

- Hoja de costes de Mantenimiento:

El objetivo de esta hoja es tener toda la información para la gestión del Departamento, tanto a nivel centro de costes como a nivel de máquina e incluso componente.

Para cada nivel de detalle incluye:

- Costes totales y su composición:
 - Mano de obra propia
 - Mano de obra contratada
 - Trabajos externos
 - Repuestos
- Imputación de los costes
 - Preventivo y Predictivo
 - Correctivo
 - Mejoras, modificaciones o inversiones
- Comparación con el presupuesto

Ratios De Costes, Eficacia Y Disponibilidad

Los medidores fundamentales de la gestión de Mantenimiento son la Disponibilidad y la Eficacia, que van a indicarnos la fracción de tiempo en que los equipos están en condiciones de servicio (Disponibilidad) y la fracción de tiempo en que su servicio resulta efectivo para la producción (Eficacia).

Del tiempo total se deducen las partes correspondientes a:

- Mantenimiento programado
- Averías
- Paros de producción por cambios de útiles, microparadas, etc.
- Ineficiencias (defectos de calidad, malos rendimientos, etc.)

Información Sobre La Mano De Obra

- Capacidad Propia:
 - Número de operarios y encargados de cada sección para la obtención de tablas de presencia e índices de ejecución de Mantenimiento

- Capacidades del personal, a fin de poder realizar una evaluación y así poder ajustarlo a las tareas donde se puedan desenvolver mejor
 - Rendimientos obtenidos del personal
- Capacidad Contratada:
 - Costes horarios
 - Disponibilidad de personal y capacidad de respuesta, que junto con los costes horarios permiten efectuar el análisis de cada una de las contrataciones
 - Capacidades del personal (de la misma forma que para el personal propio)
 - Rendimientos
- Trabajos externos:
 - Calidad del servicio (evaluación de parámetros como agilidad en la presentación de ofertas, bondad de las reparaciones efectuadas, garantías de las mismas, etc.)
 - Plazos de entrega, que son de los parámetros más importantes en la gestión actual
 - Costes

Informatización Del Mantenimiento

A continuación expondremos los motivos por los que se hace necesaria la implantación de un sistema informatizado para la Gestión del Mantenimiento.

- Disponibilidad de Información para la toma de Decisiones. A la hora de tomar decisiones sobre la gestión, ya sea sobre control de centros de coste, como sobre equipos críticos, repuestos, proveedores, personal o sobre cualquier otro parámetro relevante, es necesario tener un Sistema que elaborando los datos que recoge sea capaz de proporcionar información útil y rápida en la que apoyarse.
- Sistematización, orden y control de las acciones. Para poder gestionar los recursos del Departamento, llevar a cabo planificaciones de trabajos y poder controlar la ejecución del Mantenimiento es necesario un Sistema, que a tiempo

real contenga información y posea la versatilidad propia para reasignar recursos y optimizarlos según se vayan dando las circunstancias diarias.

El objetivo de Mantenimiento es maximizar la Productividad general de la empresa, y esto dicho de forma directa se resume en dos puntos:

1. Aumentar la Disponibilidad y Eficiencia de las Instalaciones
2. Reducir los costes de Mantenimiento

Sin un Sistema Informatizado de Gestión de Mantenimiento no será posible realizar un captura de datos fehaciente y por ende tampoco se podrá tener una información útil, ya que sin recursos informáticos no es posible llegar a manejar tal cantidad de parámetros.

Sin un Sistema Informatizado de Gestión de Mantenimiento no será posible llevar un control eficiente de los recursos que posee el Departamento, ni planificar trabajos de manera eficaz, ni realizar redistribuciones de personal, etc.

Las principales características operativas que debe tener cualquier Sistema Informatizado de Gestión de Mantenimiento son:

1. Poseer una base de datos de las instalaciones, con todos los datos técnicos, situación operativa y valor del inmovilizado.
2. Permitir almacenar y analizar los datos más relevantes de cada trabajo mediante un histórico, además de un control exhaustivo de los tiempos de paro de máquina.
3. Disponer de contadores que permitan llevar un seguimiento directo sobre parámetros concretos, pudiéndose establecer niveles de alarma para ellos.
4. Poseer un módulo de planificación interactivo, para obtener el máximo rendimiento de los recursos. Además, poder controlar el almacén de repuestos de forma sencilla.
5. Posibilidad de estructurar las instalaciones de forma jerárquica.
6. Sencillez y versatilidad de codificación.
7. Consultas sobre costes de cada línea, máquina o componente.
8. Estado de cada Orden de Trabajo y Planificación de trabajos a tiempo real.
9. Análisis de la carga de trabajo por operario para optimizar recursos.
10. Control de la ejecución de los programas de Preventivo.
11. Visión de los stocks para la planificación.
12. Obtención de cualquier tipo de consultas e informes de las Ordenes de Trabajo, con criterios múltiples de selección.

13. Análisis pormenorizado de cada intervención de Mantenimiento (Fechas, duraciones, costes, operarios, máquinas, repuestos, etc.).
14. Gestión completa de almacén.
15. Emisión de solicitudes de compra de material.
16. Avisos de niveles de stock bajo mínimos.
17. Históricos de repuestos.
18. Posibilidad análisis de los fallos.
19. Registros causa-efecto.
20. Comportamiento de equipos críticos.
21. Seguimiento e impacto del Mantenimiento Preventivo.
22. Informes de ratios de equipos.
23. Informes de personal.
24. Informes de costes.
25. Informes de compras y almacén.

Gestión De Stocks De Repuestos

Funciones De Los Stocks.

En cualquier tipo de sector industrial, las empresas satisfacen con su actividad una demanda de productos.

Su respuesta a esta demanda se realiza con criterios de eficiencia (rentabilidad), que suelen incluir:

- Mínimos costes
- Máxima satisfacción del cliente

Esto, traducido a Mantenimiento, sería minimizar el inventario de repuestos, garantizando una disponibilidad de máquinas.

La complejidad de los sistemas hace que la satisfacción de ambos criterios sea difícil, e incluso a veces contrapuesta.

La falta de estabilidad de la demanda hace que las entradas de material a almacén no se ciñan a ella. Además, existen los problemas de los plazos de entrega y la fiabilidad de los proveedores, pero siempre estará presente el factor coste del stock inmovilizado, que trataremos de minimizar.

A la luz de todo esto podemos ver la importancia del inventario de repuestos, ya que supone un alto coste de almacenamiento cuando se tiene, y cuando no se tiene puede acarrear costes de indisponibilidad de máquina tremendamente altos.

Por ello podemos asegurar que hay que disponer de herramientas que permitan reducir al máximo el nivel de stocks de repuestos sin ver comprometida la capacidad de respuesta de Mantenimiento de cara a mantener el nivel deseado de disponibilidad y eficiencia de las instalaciones.

Herramientas Para La Gestión De Stocks De Repuestos

El objetivo es reducir el valor inmovilizado en stock de repuestos. Para ello se aprovechará la información proveniente de la Matriz de Riesgo, al determinar qué repuestos son críticos (en función de las consecuencias del fallo del elemento al que pertenecen), así como la información que proporciona el análisis de fiabilidad sobre la tarea de prevención a llevar a cabo y la detección de la condición de aviso (punto P) y el tiempo que transcurre hasta el fallo funcional del equipo (cuyas consecuencias son lo realmente importante para nosotros).

En el análisis posterior se aplicarán conceptos de reducción de inventario y gestión de stocks, como por ejemplo:

- Acuerdos con proveedores para las entregas
- Focalización en los recursos importantes (ABC), ya que normalmente no es rentable investigar todas las referencias que se tienen en almacén. Con mucha frecuencia, un pequeño porcentaje de referencias es el responsable de la mayor parte del valor inventario (el valor en inventario de una referencia es el número de ellas multiplicado por su valor unitario). Al hacer la clasificación descendente por valor de inventario se dividen en tres categorías (A, las que contienen el 80% del valor total; B, las que contienen el 15% del valor total y C, el resto). La clase A contiene normalmente el 10% del total de las referencias, la clase B el 20% y la C el 70%, con lo cual si actuamos en la clase A, lo estaremos haciendo sobre el 80% del coste del inmovilizado gestionando sólo el 10% de las referencias.
- Clasificación de referencias. Identificación de obsoletos. El inventario contiene referencias con distinta importancia en su uso, frecuencia de consumo, plazos de entrega, etc. Por ello es conveniente clasificarlas en:

- Críticas: Piezas de extraordinaria importancia para el proceso y normalmente de gran valor y alto plazo de entrega.
- Consumibles: Elementos con una vida útil clara y que no son reutilizables. Son piezas de alta rotación y plazos de entrega cortos.
- Recuperables: Pueden ser reparadas después de haber sido utilizadas durante cierto tiempo, suelen ser piezas de cierto valor y plazos de entrega largos.
- Obsoletas: Debemos hacerlas desaparecer del inventario.

- Bajos consumos y repuestos críticos
- Plazos de entrega de proveedores y cobertura. Es importante hacer un análisis de la cobertura (cantidad en stock dividido por consumo anual) ya que es una medida de la eficiencia de la gestión de inventarios. Algunos elementos precisan una gran cobertura, por ser difíciles de obtener o por tener plazos de entrega muy largos, otros, sin embargo son componentes con plazos de entrega cortos, por lo que su cobertura será mínima.
- Niveles de stock en función del intervalo P-F, es un criterio de decisión para los stocks, ya que condiciona la cadencia de intervenciones de Mantenimiento y por tanto el consumo de repuestos para las tareas correspondientes.

Resumen De Conceptos Clave

1. La evolución del Mantenimiento ha sido muy importante en los últimos años pasándose del Correctivo puro al desarrollo de complejas técnicas de Mantenimiento Predictivo con los equipos en operación, pasando por los mantenimientos preventivos cíclicos.
2. Actualmente el Mantenimiento es visto como una fuente o una oportunidad de crear beneficios en la empresa, no como un gasto (que era como se veía antes).
3. Existen desarrolladas técnicas avanzadas de elaboración de Planes de Mantenimiento tanto Predictivo como Preventivo, basadas en el Análisis de Riesgos y Fiabilidad. Además, también existen técnicas para mejorar las intervenciones de Mantenimiento basadas sobre todo en los conceptos de Análisis del Valor y Técnicas SMED.
4. Uno de los Sistemas de organización implantación, ejecución e integración del Mantenimiento más modernos es el T.P.M.

5. El diseño de un adecuado Sistema de Información y la selección de un Software para la gestión de Mantenimiento son dos puntos claves para el éxito en la consecución de los objetivos de la empresa

CONCLUSIONES

1.- Los Hornos de Arco Eléctrico (H.A.E.), desde el punto de vista de la electrotecnia son maquinas estáticas, en las cuales se pueden apreciar los efectos de las variables eléctricas (Voltaje, Corriente, Potencia) ya que en su operación se observan las siguientes efectos y maniobras

- A. Se opera con grandes magnitudes de corriente en el lado de baja del transformador, 30.000, 40.000, 50.000, etc. Amperios, dependiendo de la capacidad del horno en toneladas, y por ende un falso contacto en las conexiones y terminales, genera la destrucción total de estos, por eso el mantenimiento preventivo diario es muy importante para prevenir paradas del equipo por reparación

El transformador en el lado de Media Tensión (10.000, 13.000, 30,000 , etc Voltios) se energiza mediante un disyuntor (interruptor de vacío), el cual esta sujeto a 200 operaciones de apertura y cierre con carga cada 24 horas, y teniendo un comportamiento resistivo-inductivo se producen sobre tensiones de maniobra, las cuales deben ser absorbidas por los para rayos y condensadores, debido al número operaciones, el envejecimiento de estos disyuntores depende mucho del mantenimiento preventivo que se les haga, que consiste básicamente en monitorear con un puente de resistencias adecuado la resistencia del contacto, que deber inferior a $180 \mu\Omega$ la cual se regula controlando la presión de los contactos, adicionalmente también se debe de monitorear la tensión de ruptura de la atmósfera dentro de la ampolla el cual se mide con la ayuda de una fuente de voltaje de 15KV, estos interruptores, también cuenta con dispositivos de seguridad y el programa de mantenimiento,

de estos últimos dispositivos debe ser controlado, para que no se destruyan en operación y comprometan otros equipos en la sub estación eléctrica del H.A.E.

- C. El sistema de protección en el lado de alta del transformador (rele de sobrecarga) debe ser seleccionado y coordinado, teniendo en cuenta que estos transformadores trabajan parcialmente durante su operación EN CORTO CIRCUITO, y por ende no deben activarse la protección en la Sub Estación Eléctrica Principal de la Planta, la cual contempla otras instalaciones de servicio y fuerza de menor consumo, así como los servicios auxiliares.
- D. Una de las particularidades de los cables eléctricos en el lado de baja y que están directamente conectados a la carga es que son refrigerados por agua, lo cual les permite , aumentar su densidad de corriente de 2 A/mm^2 a 4.5 A/mm^2 , pero como los cables están sometidos a esfuerzos mecánicos y altas temperaturas, durante su operación, y como son fabricados con hilos de cobre muy finos , para facilitar su manipulación estos se van rompiendo y van aumentando la resistividad e los cables, los cuales a su vez comprometen a otros cables que trabajan en paralelo, por eso es necesario renovarlos anualmente, para evitar paradas de equipo, que a la larga resultan mas caras , que el reemplazo de los mismos.
- E. Gran parte del recorrido de los conductores eléctricos a parte de los cables refrigerados, son en base a barras bus ó tubos de cobre refrigerados por agua, estos van montados en el mismo horno y sujetos por aisladores, los cuales esta sometidos a altas temperaturas (400 a 500^a C) y altos esfuerzos electrodinámicos, estos aisladores deben ser revisados continuamente, pues son puntos muy vulnerables y por ende se producen descargas a tierra, muy destructivas para el H.A.E.

2.- Desde el punto de vista de la Seguridad e Higiene Industrial, en la operación de los H.A.E. debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- A. Las grandes magnitudes de corriente eléctrica que se generan, producen también intensidades de campo magnético (H) de niveles bastantes altos para lo cual no existe una normatividad en el país para

trabajar en este tipo de ambientes, para entender un poco mejor la preocupación, vale decir que el si por el conductor están pasando 35.000 amperios, a medio metro se encuentra parado el trabajador expuesto al campo magnético.

- B. Los interruptores de vacío que actúan en el lado de alta tensión del transformador, según sus propios manuales hacen mención a que la probabilidad que estos interruptores generen rayos X es bastante alta, para lo cual tampoco existe una normatividad en el país, y no tengo conocimiento si en las empresas de distribución eléctrica, donde tan bien se usan estos interruptores tengan alguna normatividad para el uso de esto, en salvaguarda de sus trabajadores.
- C. Las fundiciones normalmente cuentan con instalaciones en Baja, Media y Alta Tensión, el personal de mantenimiento eléctrico debe de trabajar diariamente en estos tres niveles de Tensión, lo cual debido al a experiencia en este tipo de trabajo, se ha podido observar que el personal esta mas expuesto a los peligros de la corriente eléctrica, por lo cual se recomienda que las empresas del ramo Metalúrgico, cuenten con personal eléctrico de mantenimiento para cada nivel de tensión en salvaguarda de la vida de los trabajadores y de los equipos.

3.- Desde el punto de vista del Desarrollo Económico de un País la producción de acero es un indicador del crecimiento económico de una nación , por lo tanto:

- A. El Estado de promover la inversión en la producción de acero liquido, en base a los Hornos de Arco Electrico, cuya tecnología y manejo no es complejo.
- B. Las Universidades del país deben incluir dentro de su estructura curricular la difusión de este tipo de Hornos, que son maquinas netamente eléctricas las cuales así como contribuyen al desarrollo de un país, también implican el uso de tecnologías que disminuya su efecto nocivo en lo sistemas eléctrico, debido a la generación de armónicos y al efecto flicker, en general tiene que ver mucho con la calidad de energiza eléctrica dentro de una región.
- C. Siendo el Perú un país donde la actividad minera influye mucho sobre la economía y las empresas mineras demandan gran tonelaje de piezas fundidas para sus instalaciones, debemos de dar las facilidades tributarias y comerciales, para la comercialización de los

insumos importados que se utilizan en la fabricación de moldes y
Ferro aleaciones.

Anexo A

**Conelse Perú
S.A.C.**

Conelse Ingeniería S.A.C.

Informe de Calidad de Potencia Eléctrica

Según NTCSE

Para

MEPSA Metalúrgica Peruana S.A.

Informe

Agosto del 2000

1. DATOS GENERALES.

- 1.1 Empresa: MEPSA - Metalurgía Peruana S.A.
 1.2 Dirección: Av. Vía Evitamiento - Lima
 1.3 Objetivos: Medición de los parámetros Eléctricos de Calidad de servicio según la NTUSE (norma técnica de calidad de servicios eléctricos).

Evaluar la calidad de energía eléctrica en el punto de entrega de la empresa eléctrica. El presente informe evalúa principalmente las características de los parámetros relacionados con las armónicas de tensión y el Flicker.

2. DATOS TÉCNICOS.

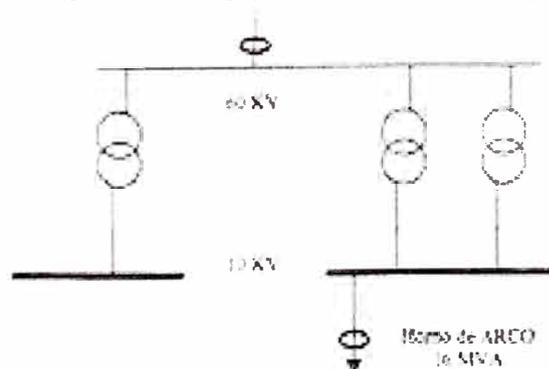
Suministro:	MEPSA
Tanda:	AT
Concesionaria:	EDEGEL S.A.A.
Relación de transformación:	Tensión 60 KV / 100 V, (600)
	Corriente 300 A / 5 A, (60)
Sistema de medida:	Instalaciones de MEPSA

3. LUGAR Y FECHA DE MEDICIÓN.

La medición se efectuó en el circuito de medición de MEPSA, el cual se encuentra ubicado en la SET de MEPSA, para la medición y registro se instaló un equipo Analizador - Registrador de calidad de energía, iniciándose el día 03/08/2000 a las 12:00 hrs. y culminando el día 11/08/2000 a las 14:00 hrs.

Se instalaron dos equipos marca TOPAS, fabricados por la empresa LEM. Los equipos se instalaron en 60 KV en el punto de entrada de energía y en 10 KV, en el punto de entrada del Horno de ARCO de 18 toneladas.

La siguiente figura muestra los puntos donde se instalaron los equipos de medida.



4. METODO DE MEDICIÓN.

Se registraron las magnitudes de tensión, armónicos de tensión y flicker a través del transformador de tensión de su circuito de medición y registro, con el equipo TOPAS 1000. Los parámetros fueron registrados de la siguiente manera:

- Registro permanente de una semana para conocer las variaciones de tensión en función del tiempo, con registros a intervalos de 15 minutos de duración.
- Registro permanente de 1 semana para conocer las variaciones de tensión en función del tiempo de la distorsión total armónica (THD) y componentes armónicas individuales de la tensión, con registros a intervalos de 10 minutos de duración.
- Registro permanente también de una semana para conocer las variaciones en función del tiempo del flicker (Pst) con registros a intervalos de 10 minutos de duración.

5. CONCEPTOS GENERALES.

5.1 Norma Técnica de Calidad de Servicios eléctricos.

Se requiere limitar el contenido armónicos por los siguientes motivos:

- Controlar la distorsión de corriente y tensión en un sistema eléctrico a niveles que las componentes asociadas puedan operar satisfactoriamente, sin ser dañadas.
- Asegurar a los usuarios que puedan disponer de una fuente de alimentación de calidad aceptable.
- Prevenir que el sistema eléctrico interfiera en la operación de otros sistemas (Protección, Medición, Comunicación y/o Computación).
- Limitar las perturbaciones que las cargas puedan introducir a la RED.

En el Perú se está ejecutando la segunda etapa de la NTCSE. La coyuntura actual ha hecho que se prorrogue la segunda etapa hasta el mes de diciembre del 2000, siendo que las empresas para poder limitar la generación de perturbaciones en sus cargas deben invertir un gran cantidad de recursos, en filtros o cambios de topología de sus redes internas y otras soluciones de ingeniería más sofisticadas.

5.2 Las Armónicas

Idealmente, tanto la tensión como la corriente deberían ser ondas senoidales, lo que en la realidad no ocurre. La corriente de entrada se distorsiona debido a las cargas no lineales, principalmente aquellas que contienen electrónica de potencia (tiristores, IGBT, GTO, diodos, etc.). Desde el punto de degeneración de la energía eléctrica hasta el punto de entrega del cliente existe una impedancia equivalente de la línea, si por dicha impedancia circula una corriente distorsionada, la caída de tensión producida por esta corriente distorsionada provocará una forma de onda de voltaje



distorsionada, es por este motivo que cuando la impedancia de la red es menor disminuye la caída de tensión armónica y del mismo modo los niveles de THDv decrecen.

La fórmula para calcular el THD de voltaje es la siguiente:

$$THD_v = \sum_{i=2,3,\dots,40} \sqrt{(V_i^2 / V_n^2)} \times 100$$

n: Voltaje nominal del punto de entrega en 60 Hz.
 I: Voltaje de cada una de las armónicas hasta la n° 40.
 THDv: Distorsión total armónica de voltaje.

La Fórmula para determinar el límite de voltaje de las distintas armónicas es la siguiente:

$$V_i (\%) = (V_i / V_n) \times 100$$

Vi: Voltaje de cada armónica en volts.

5.3 Flicker

El flicker es una variación en la envolvente de la forma de onda de tensión, donde el valor máximo de la onda senoidal varíe a frecuencias entre 1 Hz y 32 Hz. Esta variación en el valor máximo de la tensión provocará que las luminarias cambien de un nivel de iluminación constante a un nivel de iluminación variable en función de las variaciones de voltaje.

La variación de iluminación hace que afecte a las personas fisiológicamente, provocando perturbaciones en el ánimo y dolores de cabeza dentro de los efectos más comúnmente encontrados. Este es el principal motivo porque es necesario controlar el flicker.

Las cargas eléctricas que producen flicker son los hornos de arco, ascensores de considerable potencia, donde la partida y parada de los motores hacen que el voltaje disminuya con la corriente de partida para luego volver al valor nominal de voltaje en estado estacionario, etc.

El índice con que se mide el flicker es el Pst, que es un valor calculado estadísticamente. Pst se calcula para un periodo de 10 minutos, según la norma IEC 868. El máximo valor de Pst que establece esta norma y también la NTCSE del Perú es de 1.

Análisis de los resultados Obtenidos

1. VOLTAJE

1.1 Voltaje de 60 KV:



Según los registros obtenidos, este parámetro se encuentra dentro de los límites establecidos por la NTCSE, por lo que no se encontraron valores fuera de los rangos establecidos.

El rango de valores permitidos para valores de tensión es:

Valor nominal: 60 KV
Valor Máximo: $60 \text{ KV} + 5\% = 63 \text{ KV}$
Valor mínimo: $60 \text{ KV} - 5\% = 57 \text{ KV}$

1.2 Voltaje de 10 KV:

Según los registros obtenidos, este parámetro se encuentra dentro de los límites establecidos por la NTCSE, por lo que no se encontraron valores fuera de los rangos establecidos.

El rango de valores permitidos para valores de tensión es:

Valor nominal: 10 KV
Valor Máximo: $10 \text{ KV} + 5\% = 10,5 \text{ KV}$
Valor mínimo: $10 \text{ KV} - 5\% = 9,5 \text{ KV}$

2. THD de Voltaje y Armónicas de Voltaje

2.1 THD de Voltaje en 60 KV y 10 KV.

El THD de voltaje en 60 KV está dentro de lo que establece la NTCSE, por lo que MEPSA no debería incurrir un pago por este ítem cuando se establezcan las multas según la NTCAS. Este parámetro no es un problema para MEPSA ya que los valores más altos están debajo del 1.9 % en 60 KV, específicamente el valor más alto fue de 1,9 % y se registró el día miércoles 09.08.2000 a las 13:50 hrs. En los anexos se presenta un detalle día a día del comportamiento de las armónicas.

El valor máxima tolerado por la NTCSE de THD de voltaje para niveles de tensión iguales o inferiores a 60 KV es de 8 %.

En 10 KV se observan valores ligeramente mayores que no representan ningún problema a las cargas conectadas en estos puntos, por deficiente calidad de energía por THD. Los puntos registraron valores máximos menores de 4 %.

En 10 KV se observan valores exageradamente altos de THD de voltaje en los instantes que la potencia entregada al horno de arco tiende a ser cero. El motivo de porqué existen tan altos valores de THDv es producto de inducción magnética, lo que queda de manifiesto al observar los valores de la componente fundamental de tensión.



2.2 Armónicas de Voltaje en 60 KV y 10 KV

Las armónicas de voltaje en 60 KV se encuentran dentro de lo permitido, lo que se puede verificar en los gráficos anexos, mientras que en 10 KV se encontraron valores pasando el límite en la armónica N° 10.

Los valores límites para las distintas armónicas en 60 KV y 10 KV son:

Orden de Armónica	Límites de Armónicas de Tensión en 10 KV	Límites de Armónicas de Tensión en 60 KV
2	200	1200
3	500	3000
4	100	600
5	600	3600
6	50	300
7	500	3000
8	50	300
9	150	900
10	50	300
11	350	2100
12	20	120
13	300	1800
14	20	120
15	30	180
16	20	120
17	200	1200
18	20	120
19	150	900
20	20	120
21	20	120
22	20	120
23	150	900
24	20	120
25	150	900
26	20	120
27	20	120
28	20	120
29	63,10	378,62
30	20	120
31	60,32	361,94



32	20	120
33	20	120
34	20	120
35	55,71	334,29
36	20	120
37	53,78	332,70
38	20	120
39	20	120
40	20	120

Estos valores son de acuerdo a lo establecido en la NTCSE, en la tabla N° 5 de la respectiva norma.

Las armónicas de tensión que más contribuyen al THDv e tensión en 60 KV son la 5ª y la 7ª, donde ambas se encuentran bajo lo establecido por la NTCSE. Los valores máximos que alcanzan son 1.76 % y 1.01 % respectivamente.

En 10 KV las armónicas más representativas, de igual manera son la 5 y la 7, y sus máximos valores son 174 V y 140 V respectivamente

Debe hacerse notar que en los instantes donde se observan altos valores de THD de voltaje en 10 KV, son perturbaciones sin transferencia de energía, es solo ruido.

3. Flicker

El valor límite establecido según la norma técnica de calidad de servicios eléctricos establece como máximo valor del índice Pst = 1, que se fundamenta en la norma IEC 868.

3.1 Flicker en 60 KV

Los valores de Pst registrados para este periodo de medición, muestran que la medición se encuentra en un 58,02% del tiempo de medición fuera de rango, sobrepasando el 5% de tiempo permitido. En el anexo de gráficos se entregan las respectivas curvas de flicker, reflejadas por el índice Pst.

El valor máximo de flicker (Pst) fue de 2.2 y se registró el día viernes 05.08.2000 a las 15:00 hrs.

3.2 Flicker en 10 KV

Los valores de Pst registrados para este periodo de medición, muestran que la medición se encuentra en un 95,15% del tiempo de medición fuera de rango, sobrepasando el 5% de tiempo



permitido. En el anexo de gráficos se entregan las respectivas curvas de flicker, reflejadas por el índice Pst.

El valor máximo registrado del índice del Pst es de 11,5 y se registró el 06-08-2000 a las 4:30 hrs.

Conclusión

No se transgreden las tolerancias establecidas en la NTCSE para los armónicos de tensión y para el THD de tensión.

Se transgreden las tolerancias para flicker en 60 KV.

La norma IEEE 519-92 menciona diversas formas de reducir el "flicker":

- 1) conectándose a una fuente de suministro eléctrico mas potente
- 2) condensadores serie
- 3) compensadores estáticos de reactivos con tiristores
- 4) reactores shunt saturables
- 5) condensadores shunt controlados por tiristores

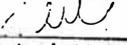
La empresa ya habria optado por la primera opción y queda por determinar si esto es suficiente, pero a criterio personal, al elevar el voltaje y aumentar la potencia de cortocircuito en la barra, la empresa no tendria problemas de flicker, para establecerlo con exactitud es necesario un análisis mas exacto.

Comparando el flicker en 60 KV y 10 KV nos queda aún mas claro que podemos alcanzar la meta de un Pst menor a 1, al aumentar el nivel de voltaje.

Atte.


José Vásquez Lago
 Gerente de Operaciones

CONELSE PERU S.A.C.


 Ing. José Vásquez Lago
 Gerente de Operaciones

UCAR FLUCTUACION DE VOLTAJE -FLICKER- EN EL H.A.E.

El incremento del número de mini-acerías en los países en desarrollo ha generado un renovado interés sobre las precauciones que se deben de tomar con el impacto de la operación de los hornos eléctricos en los sistemas de generación de energía eléctrica. Las empresas generadoras de electricidad se enfrentan con el reto de proporcionar un sistema de alimentación de energía estable, rígido y de calidad; con una alta capacidad de corto circuito para minimizar los efectos de las cargas de los hornos eléctricos de alta potencia. Uno de los principales puntos, en la operación de los hornos eléctricos, que se caracterizan por ser cargas eléctricas variables, debido a las diferentes etapas del proceso (profundización, fusión, afinado), es la fluctuación del voltaje de alimentación (*flicker*). El problema se agudiza con acerías de varios hornos eléctricos. En la etapa de la Ingeniería Básica de un proyecto de acería eléctrica se utilizan diferentes métodos y "reglas de dedo" para estimar la capacidad requerida de los sistemas de generación de energía para alimentar a los hornos y evitar problemas de *flicker*.

El flicker o fluctuación de voltaje es una forma de contaminación para la vista, que se detecta en el alumbrado de las lámparas incandescentes. Este fenómeno de fluctuación de voltaje se divide en dos categorías generales: *CICLICO* y *NO-CICLICO*. El flicker cíclico es el efecto de las fluctuaciones de voltaje periódicas como por las que pueden ser causadas por la operación (del embolo) de un compresor. El flicker no-cíclico corresponde a las fluctuaciones de voltaje ocasionales tales como las causadas por el arranque de un motor de gran capacidad. La operación del Horno de Arco Eléctrico, cuya carga es variable en el tiempo, causa fluctuaciones de voltaje que pueden ser considerados como una mezcla de los dos tipos de flicker (cíclico y no cíclico). Durante el inicio de una operación del horno, el arco es muy inestable, con los extremos desde corto circuito con la chatarra hasta la extinción del arco (corriente = 0). La consecuencia de esto es la fluctuación de voltaje (*flicker*) en la planta de generación de energía eléctrica. La aplicación de circuitos compensadores de reactivos (capacitores o condensadores síncronos) proporciona la corriente reactiva requerida por el horno durante estos periodos extremos para disminuir el *flicker*. Las compañías generadoras de energía eléctrica, generalmente establecen límites de flicker para usuarios específicos, como las acerías eléctricas, debido a los efectos que producen a otros usuarios.

El *flicker* se cuantifica en función de la variación del voltaje raíz cuadrático medio (*RMS*) y la frecuencia a la que ocurre dicha variación. Esta frecuencia puede ser una sola o una banda de frecuencias. El flicker usualmente se expresa como el cociente del valor *RMS* de la forma de onda del voltaje de modulación dividido por el valor *RMS* del voltaje fundamental. La forma práctica de medir el flicker, es dividir el cambio de voltaje por el voltaje nominal.

Pruebas de laboratorio han determinado que el ojo humano es muy sensitivo a frecuencias de modulación en el rango de 8 a 10 Hz. con variaciones de voltaje cuyas magnitudes están comprendidas entre 0.3 y 0.4 % en estas frecuencias. Es importante mencionar que no existe una norma industrial establecida que defina el nivel de flicker aceptable, en el continente americano. Ninguna norma se ha utilizado de manera consistente o uniforme, sin embargo, existen y se han publicado una variedad de curvas, que se utilizan como una guía para definir si un determinado valor de flicker está "dentro o fuera de límite". Los factores que afectan la determinación de un límite de flicker pueden incluir: los niveles de alumbrado del ambiente, tamaño y tipo de lámpara incandescente, color y decoración del ambiente (cuarto o estancia), duración y brusquedad de la variación de voltaje, condiciones físicas del observador, etc.

Algunas Normas Industriales sobre *FLICKER*, son:

- 1.- IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". April 12, 1993.
- 2.- IEEE Std 141-1993, "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants". © 1994. (denominado el libro rojo)
- 3.- Distribution Systems, Electric Utility Engineering Reference Book, Volume 3, © 1959-1965 by the Westinghouse Electric Corporation, East Pittsburgh, PA.

Entre la literatura existente sobre el tema de flicker, se recomiendan los siguientes:

- 1.- M.K.Walker, "Electric Utility Flicker Limitations" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, N° 6 Nov/Dec 1979.
- 2.- E. J Reynolds, et al "Control of Flicker Caused by an Electric Arc Steelmaking Furnace". Journal of Electrical and Electronics Engineers, Australia. June, 1991, Vol.11 N° 2.
- 3.- A.R. Oltrogge, "Arc Furnace Voltage can be Critical". Electrical World, December, 1994

UCAR Carbon Mexicana S.A. de C.V.
 Nuestros Teléfonos de Servicio:
 (8) 3861150, 3861122
 (5) 2277979 Claves SKYTEL
 5289541 y 42

Agradeceremos cualquier comentario o sugerencia, así como sus colaboraciones a los teléfonos de servicio o a la dirección remitente.

Atte.

UCAR Carbon Mexicana S.A. de C.V.

FLICKER.... (cont.)

FLICKER.- Fórmulas.

$$(A) \text{ Voltaje RMS de la Onda de Modulación} = \frac{\Delta V}{2 \times (2)^{1/2}} = \frac{V_{2pk} - V_{1pk}}{2 \times (2)^{1/2}}$$

$$(B) \text{ Voltaje RMS Promedio} = \frac{V_{2pk} + V_{1pk}}{2 \times (2)^{1/2}}$$

$$(C) \text{ Porcentaje (\%) de Flicker} = \frac{A}{B} \% \\ = \frac{V_{2pk} - V_{1pk}}{V_{2pk} + V_{1pk}} \times 100$$

$$\text{FLICKER} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta Q}{S_{CC}}$$

En corriente alterna (CA):

$$S_{CC} > 100 S_H$$

En corriente Directa (CD):

$$S_{CC} > 55 S_H$$

En donde :

 V_{1pk} = Voltaje rms mínimo V_{2pk} = Voltaje rms máximo

Q = Potencia Reactiva

 S_{CC} = MVA de Corto Circuito en el punto de acoplamiento mutuo. S_H = MVA equivalente del(los) horno(s).

Remite:

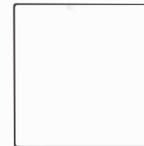
UCAR CARBON MEXICANA S.A. DE C.V.

Carr. a Miguel Alemán Km. 20 N° 600 OTE.

Zona Industrial, 66600

Apodaca, Nuevo León

México.

**Boletín Técnico UCAR**

AÑO 3. NUMERO 8. AGOSTO, 1995.

FLUCTUACION DE VOLTAJE -FLICKER- EN EL HORNO DE ARCO
ELECTRICO.

Ing. Hiroshi S. Sawabe

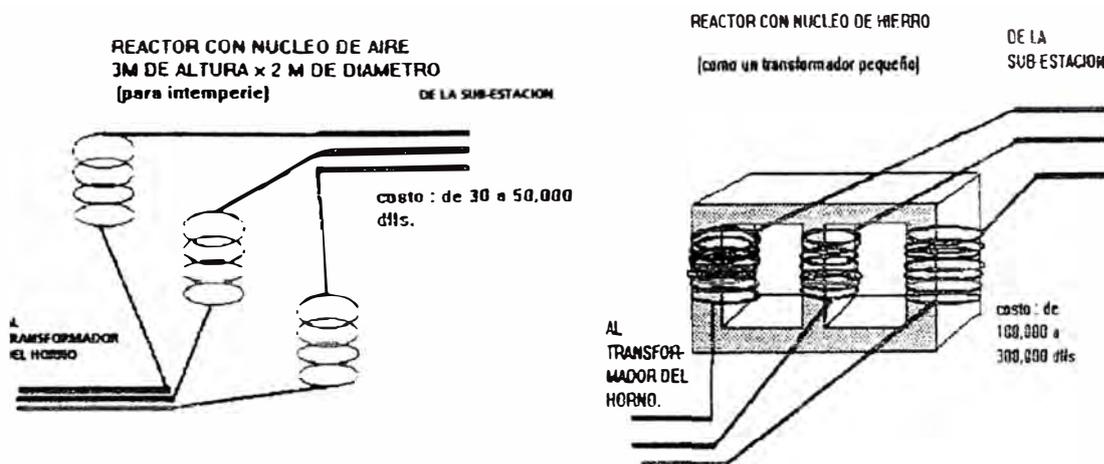




Hornos de Arco Eléctrico de Alta Reactancia.

La tendencia mundial en la Tecnología del Horno de Arco Eléctrico, es trabajar con transformadores de alto voltaje en el secundario - del orden de 900 a 1200 volts -, sin embargo se ha topado con el inconveniente de una operación extremadamente inestable principalmente durante el inicio de la fusión, haciendo imposible utilizar las derivaciones del transformador (taps) de alto voltaje debido a la excesiva resonancia mecánica e inestabilidad del sistema.

Para evitar esta inestabilidad se han efectuado varias modificaciones en los sistemas de regulación y mástiles del equipo mecánico para amortiguar la resonancia, con resultados importantes y promisorios pero no satisfactorios. La solución ha sido la incorporación de una reactancia adicional (REACTOR SUPLEMENTARIO) en la línea de alimentación al transformador del horno. Los efectos han sido dramáticos: *operación con arcos largos con menor corriente de operación y de corto circuito, reducción de pérdidas eléctricas I^2R , disminución en el consumo de electrodos, menor parpadeo (flicker), menor consumo de energía eléctrica, menor tiempo de colada y mayor productividad.*



HORNOS CON ALTO VOLTAJE Y REACTANCIA SUPLEMENTARIA

HORNO	CAPACIDAD TONS.	VOLTAJE MAXIMO	REACTANCIA TOTAL (mΩ)
A	170	1200	5.3
B	130	1070	6.3
C	75	1000	5.4
D	110	960	4.6
E	140	960	3.6
F	120	950	4.2
G	115	825	4.8
H	115	901	4.5
I	80	900	5.7

Agradecemos cualquier comentario o sugerencia, así como sus colaboraciones a los teléfonos de servicio o a la dirección remitente

Atentamente.

UCAR Carbon Mexicana, S.A. de C.V.

Teléfonos de Servicio:
(8) 3861122, 3861150, 3861362
(5) 2277979 Claves SKYTEI
5289541 y 42.

La reactancia normal de los hornos de arco eléctrico, es alrededor de 3 mili-ohms; el término ALTA REACTANCIA se refiere a valores entre 4 y 7 mili-ohms.

Ejemplo :

Datos de instalación:

- a) Planta de Generación con 10,000 MVA_{cc}
138 KV. $Z = 1.9044 \Omega/\phi$
- b) Transformador de sub-estación .-
90 MVA - % Z = 5 - 138 KV/34.5 KV
 $Z = 10.58 \Omega/\phi$
- c) Transformador de horno .-
90 MVA - % Z = 4 - 34.5 KV/1000 V.
 $Z = 0.529 \Omega/\phi$
- d) Impedancia del circuito secundario .-
(base 1,000 volts)
 $Z = (0.45 + j 2.80) \times 10^{-1} \Omega$

Los valores de reactancia referidos al secundario (1,000 volts), serán :

- A) 0.09 m Ω
- B) 0.509 m Ω
- C) 0.483 m Ω
- D) 2.800 m Ω

TOTAL = 3.882 m Ω

El valor del reactor suplementario se obtiene de acuerdo a la reducción en corriente que se desee. Se pueden tener distintas derivaciones con valores de % de X_{sup} .

Suponiendo un valor total de $X_{sup} = 2.0 \Omega$, y tomando un 75 % (1.5 ohms) que referidos al secundario, (1,000 V.) serían 1.26 m Ω . lo que daría una reactancia total de $3.882 + 1.26 = 5.142 \times 10^{-1} \Omega$, es decir, un 32.5 % de incremento en reactancia, suficiente para una mejora considerable en la operación del HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.

remite :

JCAR CARBON MEXICANA, S.A. DE C.V.
Carr. a Cd. Miguel Alemán Km. 20 N°. 600 Ote.
Zona Industrial
Apodaca, Nuevo León, 66600
MEXICO.



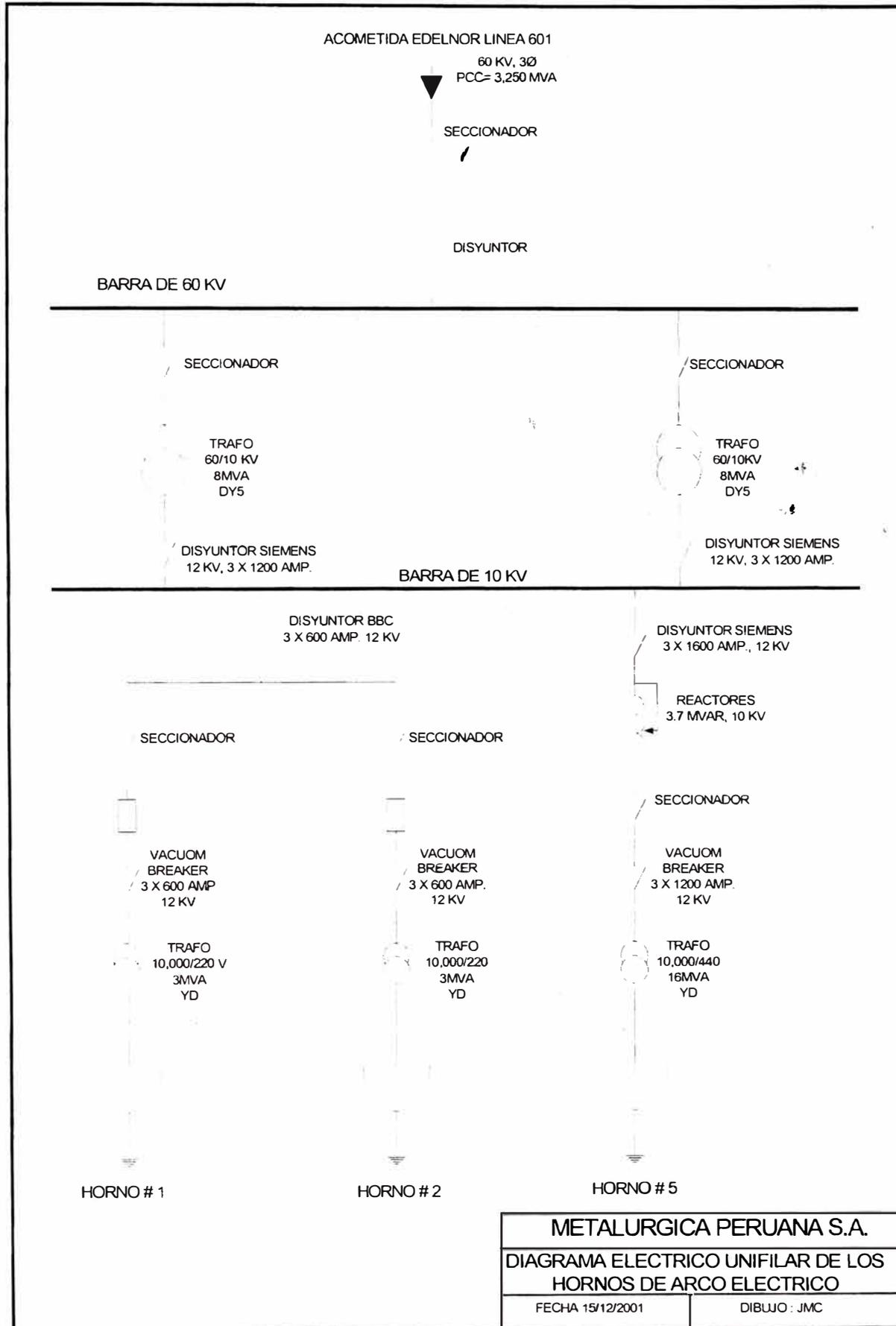
Boletín Técnico UCAR

AÑO 2, NÚMERO 10. OCTUBRE 1994.

HORNOS DE ARCO ELECTRICO DE ALTA REACTANCIA.

Ing. Hiroshi S. Sawabe





Anexo B



TRANSFORMADORES PARA HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.- MANTENIMIENTO PREVENTIVO.(I)

El tiempo improductivo es muy costoso, y el tiempo dedicado al mantenimiento preventivo ayuda a evitar y disminuir los paros no programados. Se deben de seguir las instrucciones de los manuales de mantenimiento del fabricante del transformador del horno de arco eléctrico. El programa de mantenimiento preventivo debe de contener cuando menos lo sugerido en la tabla que se presenta en este boletín, y aplicado a cada transformador en particular por parte del personal de Mantenimiento. Los dispositivos que deben de estar bajo un programa estricto de mantenimiento preventivo, son: SISTEMA DE PROTECCIÓN EN ALTO VOLTAJE, TANQUE PRINCIPAL, CONSERVADORES DE ACEITE, SISTEMA DE ENFRIAMIENTO, CAMBIADOR DE TAPS, PRUEBAS ELÉCTRICAS, PRUEBAS AL ACEITE, MONITOREO DIAGNÓSTICO Y REGISTRO DE LECTURAS

DISPOSITIVO/EQUIPO	MANTENIMIENTO/TAREA	FRECUENCIA
SISTEMA DE PROTECCION EN ALTO VOLTAJE		
TERMINALES (BUSHINGS) DE ALTO VOLTAJE	LIMPIEZA GENERAL	MENSUAL
TERMINALES (BUSHINGS) DE BAJO VOLTAJE	E INSPECCION Y REVISION DE :	MENSUAL
APARTA RAYOS	CONEXIONES FLOJAS	MENSUAL
COMPONENTES DE FILTROS R/C	FUGAS DE ACEITE:DAÑO FISICO.SOBRE CALENTAMIENTO	MENSUAL
CONTADOR DE INTERRUPCIONES	REGISTRO DE LECTURAS DEL CONTADOR	MENSUAL
TANQUE PRINCIPAL		
CUBIERTA Y VALVULAS	REVISION DE FUGAS DE ACEITE SOBRE CALENTAMIENTO	MENSUAL
INDICADORES DE TEMPERATURA	REGISTRAR LECTURAS Y RESTABLECER INDICADORES	MENSUAL
RELEVADORES DE PRESION SUBITA	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO (SIMULACION)	ANUAL
TRANSFORMADORES DE CORRIENTE	REVISAR CONEXIONES FLOJAS	ANUAL
TERMINALES DE TIERRA	REVISAR SOBRE CALENTAMIENTO CONTACTO EFECTIVO	MENSUAL
CONSERVADORES DE ACEITE		
EN LA TUBERIA Y CONECTORES EN EL TANQUE	REVISAR FUGAS DE ACEITE	MENSUAL
EN EL RELEVADOR BUCHHOLTZ	INSPECCION VISUAL:APARIENCIA INTERNA	6 AÑOS
EN LOS INDICADORES DE NIVEL DE ACEITE	INSPECCION:REVISION:PRUEBA DE GAS	MENSUAL - ANUAL
EN LOS RESPIRADEROS DE AIRE	REGISTRO DE LECTURAS:PRUEBA	MENSUAL - ANUAL
	CAMBIAR "SILICA GEL" SI EL COLOR ES ROSA	MENSUAL
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO		
MOTORES Y BOMBAS	COMPROBAR OPERACION Y FLUJOS DE ACEITE	MENSUAL
TUBERIA DE ENFRIAMIENTO E INTERCAMBIADOR	LIMPIEZA E INSPECCION	ANUAL
DETECTORES DE FUGAS DE AGUA	REVISAR ACUMULACION DE AGUA	MENSUAL
TERMOMETROS	REGISTRAR LECTURAS	MENSUAL
PT-100 RTD's	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	ANUAL
CAMBIADOR DE TAPS		
UNIDADES MOTORIZADAS	REVISION Y PRUEBA DE CIRCUITOS DEL MOTOR	ANUAL
EJES Y COPLES	INSPECCION DE COPLES Y FLECHAS, LIMIT SWITCHES	MENSUAL - ANUAL
INDICADOR DE POSICION MAXIMA	POSICION, INTERLOCKS,REGISTRO DE OPERACIONES	MENSUAL - ANUAL
CAMBIADOR SIN CARGA	INTERLOCKS MECANICOS Y ELECTRICOS, TAPS, DGA	MENSUAL - ANUAL
CAMBIADOR BAJO CARGA	INSPECCION BASADA EN NUMERO DE OPERACIONES	AL NECESITARSE
MANOMETRO	CHECAR LECTURAS Y FUNCIONAMIENTO	ANUAL
SISTEMA DE FILTROS	INSPECCION Y CAMBIO DE FILTROS, FUGAS DE ACEITE	MENSUAL
GABINETE DE CONTROL	INSPECCION Y LIMPIEZA	ANUAL
RELEVADORES RS	INSPECCION Y PRUEBA	ANUAL
PRUEBAS ELÉCTRICAS		
(AISLAMIENTO,RESISTENCIA-MEGGER	APLICACION DE CD ENTRE DEVANADOS Y TIERRA	ANUAL
RELACION DE VUELTAS (N ₁ /N ₂)	TTR O CA EN EL PRIMARIO Y LECTURA DEL SECUNDARIO	ANUAL
FACTOR DE POTENCIA EN EL AISLAMIENTO	PRUEBA DE PERDIDA DE ENERGIA EN EL MATERIAL AISLANTE	3 AÑOS
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	OPERACION DE TODOS LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCION	ANUAL
PRUEBAS AL ACEITE		
ANALISIS CROMATOGRÁFICO DE GASES	TOMAR MUESTRA CON JERINGA	SEMESTRAL
ANALISIS DE GAS DISUELTO (DGA)	DEL TANQUE PRINCIPAL Y	SEMESTRAL
FILTRADO DE ACEITE	DEL CAMBIADOR DE TAPS	SEMESTRAL
MONITOREO - DIAGNÓSTICO		
	5 DIAS CONTINUOS DE MONITOREO VERIFICANDO:	2 AÑOS
	TRANSITORIOS,ARMONICAS,FLICKER	
REGISTRO DE LECTURAS/DATOS - BITACORA		
CONTADOR DE DESCARGAS/INTERRUPCIONES	REGISTROS FASE/FASE Y FASE/TIERRA	MENSUAL
TERMOMETROS	TEMPERATURA MAXIMA DE ACEITE Y DEVANADOS	MENSUAL
MOTOR/CONTADOR DEL CAMBIADOR DE TAPS	REGISTRAR NUMERO DE OPERACIONES	MENSUAL
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	OPERACION DE TODOS LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCION	ANUAL

UCAR Carbon Mexicana S.A. de C.V.
 Nuestro Teléfono de Servicio:
 (8) 3861362. Fax (8) 3861364
 e-mail : vtafucar@sdm.net.mx
hiroshi.sawabe@ucar.com

Agradeceremos cualquier comentario o sugerencia, así como sus colaboraciones al teléfono, Fax de servicio, Correo electrónico o a la dirección remitente.

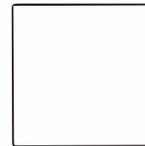
UCAR Carbon Mexicana S.A. de C.V.

TRANSFORMADORES.- MANTENIMIENTO PREVENTIVO (I)....

- 1.- **SISTEMA DE PROTECCION EN ALTO VOLTAJE.**- La interrupción y conexión produce altos voltajes transitorios que afectan al aislamiento de los devanados, para proteger al transformador, se utilizan los aparta-rayos y capacitores, el mantenimiento de éstos es mínimo, pero requieren limpieza e inspección
- 2.- **TANQUE PRINCIPAL.**- Requiere inspección y limpieza a todos los dispositivos instalados en éste
- 3.- **CONSERVADOR DE ACEITE.**- La condición del material absorbedor de humedad es de primordial importancia. Este material es azul cuando está seco o en buenas condiciones y rosa cuando absorbe humedad
- 4.- **SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.**- La importancia primordial está en los dispositivos de protección: indicadores de flujo agua/aceite, detectores de fugas, indicadores de presión diferencial (presión del agua < presión del aceite), termómetros en entrada y salida de los circuitos de circulación de agua y aceite para registrar la eficiencia de enfriamiento y los PT-100 Rtd's localizados en las entradas y salidas de las tuberías de agua y aceite para monitorear (controlar) la temperatura instantánea del sistema
- 5.- **CAMBIADOR DE TAPS.**- Esta unidad está independiente del aceite del transformador y se debe de tratar como si fuera otro transformador con las mismas precauciones desde el punto de vista del mantenimiento del aceite
- 6.- **PRUEBAS ELECTRICAS.**- Incluyen aislamiento y resistencia, relación de vueltas, factor de potencia, de aislamiento de los devanados y el funcionamiento de todos los dispositivos de protección
- 7.- **PRUEBAS AL ACEITE.**- Incluyen humedad, resistencia dieléctrica, factor de potencia, gravedad específica, tensión de interfase, acidez y apariencia (color). Análisis de gas disuelto (DGA), muy importante debido a la generación de gases internos
- 8.- **MONITOREO-DIAGNOSTICO.**- Para prevenir fallas deudas a transitorios y monitorear la generación de armónicas y parpadeo (flicker) en la línea de alimentación

Remite:

UCAR CARBON MEXICANA S.A. DE C.V.
Carr. a Miguel Alemán Km. 20 N° 600 OTE.
Zona Industrial, 66600
Apodaca, Nuevo León
México.



Boletín Técnico UCAR

AÑO 6, NÚMERO 3, OTOÑO 1998.

MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE TRANSFORMADORES PARA HORNOS DE ARCO ELECTRICO. (1a. Parte)

Ing. Hiroshi S. Sawabe



UCAR[®]
TRANSFORMADORES PARA HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO. MANTENIMIENTO PREVENTIVO (III).
GRAFTECH
 GrafTech International Ltd.

Como continuación del Boletín Técnico N° 3 de Otoño 2004, y siguiendo con el Mantenimiento Preventivo de los Transformadores para Hornos de Arco Eléctrico, abundaremos sobre los **PARAMETROS** que se deben controlar y el **ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS** dentro del transformador. Recordemos que para la Aciería, es uno de los dispositivos más importantes, ya que la falla en este produce paradas totales cuya duración depende de la magnitud de la falla, y en ocasiones de la disponibilidad de una unidad de repuesto. De aquí la importancia de considerar la adquisición de unidades de repuesto para disminuir los tiempos de paro, cuando ocurran las fallas imprevistas.

PARAMETROS POR MANTENER BAJO CONTROL	FRECUENCIA DE CONTROL O REGISTRO	POR MEDIO DE EQUIPO UTILIZADO	
VOLTAJE DE ALIMENTACION	REGISTRO CONTINUO POR HORA	TABLERO ELECTRICO	<p>Los transformadores para Hornos de Arco Eléctrico forman parte de un grupo especial del transformadores con características muy peculiares, ya que su ciclo de trabajo depende de:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 - El número de coladas por día, que se relaciona directamente con el número de interrupciones por día 2 - Soportar los transitorios de voltaje y corriente causados por los interruptores (al vacío) 3 - La saturación del circuito magnético, como consecuencia normal de las operaciones de interrupción 4 - Las diferentes etapas del proceso de la colada. 5 - La aplicación de carga eléctrica súbita, hasta valores que llegan al doble del nominal (durante las caídas de chatarras en las etapas metálicas de fusión) 6 - La fluctuación de los niveles de alta corriente durante la etapa de fusión (con arco largo) 7 - El número elevado de operaciones del cambiador de taps bajo carga (OLTC) debido al arco eléctrico con el material de carga durante la profundización - fusión 8 - La temperatura promedio del agua de enfriamiento, frecuentemente en los límites superiores de los rangos recomendados. 9 - Un punto muy importante es el relacionado con la generación de armónicas, que afectan considerablemente al rendimiento en el servicio, particularmente en los transformadores para Hornos de Corriente Directa. Este aspecto frecuentemente no es considerado al solicitar la compra de un transformador para Horno Eléctrico, por lo que es recomendable que el diseñador de la aciería especifique detalladamente el espectro real de armónicas, comunicándolo al fabricante del transformador. <p>En la tabla siguiente, se muestran los valores del contenido de gases de las normas, ANSI IEEE C67.104 -para todo tipo de transformadores-, IEC 60599 diferenciando los transformadores de sub-estación con los transformadores para Horno de Arco Eléctrico-, y la nueva propuesta o recomendación de los fabricantes de transformadores para H.A.E., debido principalmente a las condiciones más severas en las que opera el transformador de Aciería Eléctrica.</p> <p>La técnica del CLAP, en adición al DGA convencional, puede ser de mucha ayuda al investigar los casos de degradación del papel del aislamiento, para la detección de los contenidos de <i>Furan</i>, aunque este método está en sus etapas iniciales.</p>
CORRIENTE DE OPERACION	REGISTRO CONTINUO POR HORA	TABLERO ELECTRICO	
SOBRE VOLTAJES	REGISTROS DE TODOS LOS TURNOS	CONTADOR DE SOBRE VOLTAJES	
% DEL DEVIADO	REGISTRO CONTINUO POR HORA	RELEVAADOR TERMINAL DE MANTEN	
% DE ACEITE	REGISTRO CONTINUO POR HORA	TERMOMETRO SUPERIOR	
OPERACIONES DEL CAMBIADOR DE TAPS	REGISTROS DE TODOS LOS TURNOS	CONTADOR DEL MECANISMO MOCORIZADO	
MONITOREO DE GASES EN EL ACEITE	REGISTRO CONTINUO DE TENDENCIA	DISPOSITIVO HIDRAN O EQUIVALENTE	
ANÁLISIS DE GAS DISUELTOS (DGA)	SEMESTRAL	MUESTRAS DE ACEITE DEL TRAFIO	
CROMATOGRAFIA LIQUIDA DE ALTO RENDIMIENTO (CLAP)	BI-ANUAL DEPENDE DE LA RELACION CO ₂ /CO	MUESTRAS DE ACEITE DEL TRANSFORMADOR	
DETERMINACION DE PARTICULAS	BI-ANUAL	MUESTRAS DE ACEITE DEL TRANSFORMADOR	
OBSERVACION/ BARRIDO TERMICO EXTERNO	BI-ANUAL	DISPOSITIVO INFRA-ROJO	

ANSI IEEE C67.104
(1991)IEC 60599
(1999)

TIPO DE GAS	VALORES PARA TODO TIPO DE TRANSFORMADORES (ppm)	VALORES PARA TRANSFORMADORES DE SUB-ESTACION (ppm)	VALORES PARA TRANSFORMADORES DE HAÉ. (ppm)	NUEVA RECOMENDACION (PROPUESTA) (ppm)
ACETILENO (C ₂ H ₂)	35	3 - 50	-	50
METANO (CH ₄)	120	40 - 110	150	200
ETANO (C ₂ H ₆)	65	50 - 90	150	1500
ETILENO (C ₂ H ₄)	50	60 - 280	200	300
HIDROGENO (H ₂)	100	60 - 150	200	400
CO	350	590 - 900	800	1000
CO ₂		5100 - 13000	6000	25000

* Agradecimiento: Al Ing. Hiroshi S. Sawabe de Consultoría Técnica Siderúrgica, por su apoyo en la elaboración de este Boletín Técnico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Julio Astigarraga Urquiza, "Horno de Arco para fusión de Acero", Mc Graw-Hill, 1995
2. Boris Christoff, "Fundamentos de los Hornos de Arco Eléctrico" BAC- Ingeniería y Consultoría, 2002
3. Boris Christoff Operación de los Hornos de Arco Eléctrico", Asociación Brasileira de Metales 1987.
4. Instituto Latinoamericano del Fierro y del el Acero 1, Acería Eléctrica ILAFA 1987
5. IFES (Instituto de Formación y Estudios Sociales, Andalucía) "Estudio De Análisis De Las Necesidades Del Mantenimiento Industrial ", 2001