

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

TESIS

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JHONY ARÍSTIDES SANDOVAL ESPINO

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 1997.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los conceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 12 de septiembre de 1996.


Jhony Arístides Sandoval Espino

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
VOCAL 1	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
VOCAL 2	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano
VOCAL 3	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez
VOCAL 4	Br. Victor Rafael Lobos Aldana
VOCAL 5	Br. Wagner López Cáceres
SECRETARIO	Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN

GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Juan Fernando Morales Mazariegos
EXAMINADOR	Ing. Julio Roberto Urdiales Contreras
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

Guatemala, 2 de abril de 1,997

Señor Coordinador
Ing. José Luis Herrera Gálvez
Area de Electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

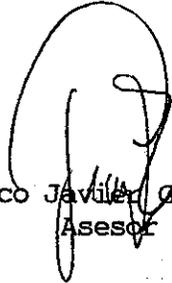
Señor Coordinador.

Me permito informarle que, habiendo asesorado al señor Jhony Aristides Sandoval Espino, en el desarrollo de la tesis titulada: Horno de arco eléctrico y llenando ésta los objetivos trazados, extendiendo la aprobación de la misma.

Por tanto, el autor de esta tesis y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de la misma.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted,

Atentamente,


Ing. Francisco Javier González López
Asesor

FJGL/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

Guatemala, 10 de abril de 1,997

Señor Director
Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director.

Me permito dar aprobación al trabajo de tesis titulado: Horno de arco eléctrico, desarrollado por el señor Jhony Arístides Sandoval Espino, ya que considero cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Luis Herrera Gálvez
Coordinador Área Electrotecnia

JLHG/sdem.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de
conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area,
al trabajo de tesis del estudiante Jhony Aristides Sandoval Espino, titulada:
Horno de Arco Eléctrico, procede a la autorización del mismo

Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra
Director

Guatemala, 29 de abril de 1,997.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



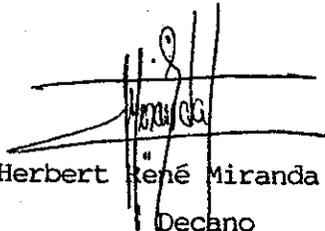
FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
y Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de tesis: **Horno de Arco Eléctrico**, del estudiante **Jhony Aristides Sandoval Espino**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
Decano

Guatemala, 7 de julio de 1,997.





100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento a mi asesor, Ingeniero Francisco Javier González López, quién a lo largo de toda mi carrera universitaria, me proporcionó su apoyo y asesoramiento, además por la colaboración prestada para la realización del presente trabajo de tesis

Así mismo a todo el personal de Siderúrgica de Guatemala, que colaboró de alguna manera para obtener datos técnicos requeridos; especialmente al Ingeniero Rudy Haroldo Nájera Sagastume, por la gran oportunidad brindada.

DEDICATORIA

- A DIOS Padre de todo conocimiento
- A MIS ABUELOS Rogelio Sandoval (Q.E.P.D.)
Carlota Nájera de Sandoval
Miguel Angel Espino
Herlinda Sandoval de Espino
- A MIS PADRES Amilcar René Sandoval Nájera
Edna Haydee Espino de Sandoval
- A MIS HERMANAS Ena Karina (Alexandra y Renecito)
Gladis Azucena
- A MI ESPOSA Glenda Danileth Rodríguez de Sandoval
- A MI HIJA Joseline Gabriela Sandoval Rodríguez
- A MI FAMILIA EN GENERAL
- Y A USTED, ESPECIALMENTE



INDICE

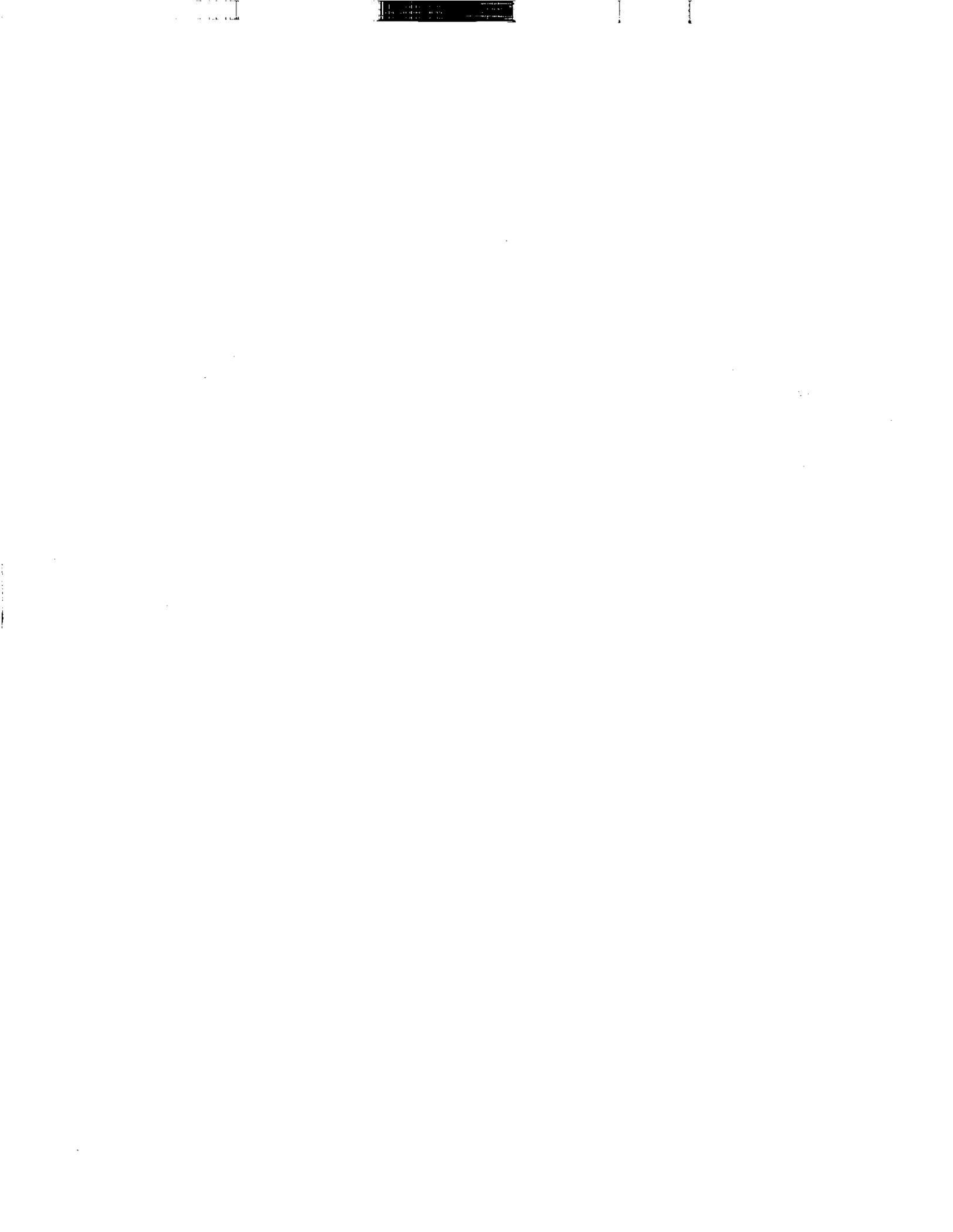
INDICE	i
INTRODUCCION	vi
1 TRANSFORMADORES DE POTENCIA	
1.1 INTRODUCCIÓN A TRANSFORMADORES	1
1.2 CARACTERÍSTICAS DE CONEXIÓN DELTA-DELTA EN HAE	3
1.3 CARACTERÍSTICAS DE CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA EN HAE	4
1.4 CÁLCULO DE CAPACIDAD PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO HAE	4
1.5 IMPORTANCIA DE LA REACTANCIA DEL CIRCUITO SECUNDARIO ...	5
1.6 ESPECIFICACIONES EN LA ADQUISICIÓN DE UN TRANSFORMADOR PARA HAE	6
1.7 IMPEDANCIA DE UN TRANSFORMADOR PARA HAE	7
1.7.1 CÁLCULO DE LA REACTANCIA DE UN TRANSFORMADOR	7
1.8 SOBRECARGA EN TRANSFORMADORES PARA HAE	8
1.9 TIPOS DE CABLEADOS DE CONEXIÓN (REFRIGERADOS)	10
1.10 CURVAS DE POTENCIA EN TRANSFORMADORES PARA HAE	12
1.10.1 CURVA DE POTENCIA ÚTIL (MW_a)	12
1.10.2 CURVA DE PÉRDIDAS DEL CIRCUITO ($I^2 \cdot R$)	13
1.10.3 CURVA DE POTENCIA ACTIVA (MW)	14
1.10.4 CURVA DE POTENCIA REACTIVA (MVar)	14
1.10.5 CURVA DE POTENCIA APARENTE (MVA)	15
1.10.6 CURVA DE LONGITUD DEL ARCO (L_a)	16
1.11 VARIABLES DE TAPS	16
1.12 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS	20
1.12.1 NÚCLEO	20

1.12.2	ARROLLAMIENTOS	21
1.11.3	TANQUES Y ACCESORIOS	21
1.13	PROTECCIONES MÍNIMAS	22
2	ARCO ELÉCTRICO	
2.1	CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO ..	25
2.1.1	DISPONIBILIDAD DEL HORNO	26
2.1.2	TIEMPO DESCONECTADO POR COLADA	26
2.1.3	ENERGÍA ELÉCTRICA -KWH/TON- DE CARGA	27
2.2	CÁLCULO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EQUIVALENTE	28
2.3	PRODUCTIVIDAD DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	30
2.4	ANÁLISIS DEL ARCO ELÉCTRICO	32
2.5	COMPONENTES SIMÉTRICAS	33
2.5.1	POTENCIA EN COMPONENTES SIMÉTRICAS	35
2.6	FALLAS ASIMÉTRICAS	36
2.6.1	FALLA DE LÍNEA A LÍNEA (DOS ELECTRODOS HACIENDO ARCO)	37
2.6.2	FALLA ENTRE LAS TRES LÍNEAS (TRES ELECTRODOS HACIENDO ARCO)	39
2.7	LONGITUD DEL ARCO ELECTRICO	40
2.8	FLUCTUACIONES DE VOLTAJE EN HAE (FLICKER)	42
2.9	OPTIMIZACIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO	45
2.10	OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN CON ARCO EN AC	48
2.10.1	INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESCORIA ESPUMOSA.	50
2.10.2	INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DE LOS METALES	53
2.10.3	INFLUENCIA DE LA IMPEDANCIA EN EL PUNTO DE CONTROL Y LA REGULACIÓN DEL ELECTRODO	54
2.10.4	CONSUMO DE ELECTRODOS	56

2.10.5	ANÁLISIS DE COSTO	56
2.11	COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE UN ARCO EN AC Y UN ARCO EN DC.	58
2.11.1	BASES PARA LA COMPARACIÓN	58
2.11.2	EFICIENCIA ELÉCTRICA	58
2.11.2.1	FUSIÓN EN AC	58
2.11.2.2	FUSIÓN EN DC	59
2.11.3	EFICIENCIA TÉRMICA	59
2.11.4	COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA	60
2.11.5	CONSUMO DE ELECTRODOS	64
2.11.6	"FLICKER"	66
2.11.7	COMPARACIÓN DE LAS FLUCTUACIONES DE MVar	70
2.11.8	CAMPO MAGNÉTICO	73
2.12	CONCLUSIONES DE HORNOS EN AC Y HORNOS EN DC	74
2.12.1	DIFERENCIA ENTRE AC Y DC	75
2.12.2	VENTAJAS POTENCIALES DE HORNOS EN DC	75
2.12.3	DESVENTAJAS POTENCIALES DE HORNOS EN DC	76
3	REGULACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELECTRICICO	
3.1	SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL	77
3.2	ANÁLISIS MATEMÁTICO DE REGULACIÓN	79
3.3	MÁXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN HAE	83
3.4	INFLUENCIA DE CONTROL DEL ELECTRODO Y DISEÑO DEL HORNO EN PROBABILIDAD	84
3.5	REQUERIMIENTOS OPERACIONALES EN DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO	85
3.5.1	PERÍODO DE FUSIÓN	85
3.5.2	REFINACIÓN DE LA CARGA	86

3.5.3	PERÍODO DE TRANSICIÓN	86
3.5.4	MEDICIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ARCO	87
3.5.5	PARÁMETROS DE CONTROL	91
3.5.6	CARACTERÍSTICAS DE CONTROL A LAS FASES DE FUSIÓN	92
3.5.7	UNIDAD DE PUNTO DE CONTROL DIGITAL	95
3.5.8	ROMPIMIENTO EN CORTO CIRCUITO	95
3.6	SELECCIÓN DE ELECTRODOS (ELÉCTRICAMENTE)	97
3.6.1	FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS	103
3.7	ENFRIAMIENTO DE ELECTRODOS (ANILLOS)	103
4	MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS	
4.1	MEDICIÓN DEL SISTEMA 230 KV, CON HORNO FUERA DE LÍNEA ..	107
4.2	MEDICIÓN DEL SISTEMA 230 KV, CON HORNO EN LÍNEA	116
4.3	MEDICIÓN DE ARMÓNICAS CON HORNO FUERA DE LÍNEA, CON HORNO EN ROMPIMIENTO DE CHATARRA Y CON HORNO EN BAÑO PLANO ...	125
4.4	ANÁLISIS DE GRÁFICAS	170
4.5	CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA	171
4.6	TIPOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA UTILIZADOS EN HAE	181
4.6.1	MEDICIÓN DE TEMPERATURA POR EL COLOR	181
4.6.2	TERMÓMETROS POR EXPANSIÓN METÁLICA	182
4.6.3	TERMÓMETROS POR EXPANSIÓN LÍQUIDA	182
4.6.4	TERMÓMETROS POR PRESIÓN DE GAS O VAPOR	183
4.6.5	TERMÓMETROS POR RESISTENCIA	183
4.6.6	PIRÓMETRO TERMOELÉCTRICO	183
4.6.7	PIRÓMETRO DE RADIACIÓN	185
4.7	SUBESTACIÓN ELÉCTRICA	185
4.8	IMPORTANCIA DEL FILTRO O REACTOR	187

5	CLASIFICACIÓN DE ACEROS	
5.1	CLASIFICACIÓN DEL ACERO	190
5.2	ACEROS ALEADOS	191
5.2.1	PROPÓSITO DE LA ALEACIÓN	191
5.3	MATERIALES METÁLICOS	193
5.3.1	COBRE	193
5.3.2	ALUMINIO	194
5.3.3	MAGNESIO	194
5.3.4	NIQUEL	195
5.3.5	PLOMO	196
5.3.6	ZINC	196
5.4	CONTACTOS ELÉCTRICOS	196
5.5	REQUERIMIENTOS DE ACEROS EN SIDEGUA	197
5.6	CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	199
5.6.1	AGUAS	199
5.6.2	GASES	200
	CONCLUSIONES	xii
	RECOMENDACIONES	xv
	BIBLIOGRAFIA	xvii
	ANEXO	
	DATOS TÉCNICOS DE AISLAMIENTO	xix



INTRODUCCIÓN

En la producción de un Horno de Arco Eléctrico, intervienen una gran variedad de procesos auxiliares que codyuvan en forma directa o indirectamente, a llevar a cabo todas las funciones requeridas; tales como el recargue de chatarra, las grúas para su transporte, el sistema de enfriamiento del horno a base de agua debidamente tratada, la generación de oxígeno, el precalentamiento de ollas que transportarán el acero líquido, el previo recubrimiento con refractarios en las paredes del horno y en las ollas, etc.; todo ello solamente conglomerado en el proceso de producción.

Ahora bien, en cuanto al sistema eléctrico se refiere, encontramos inicialmente una subestación conectada a la barra de 230 KV, luego de la transformación de voltaje, una barra de 22.8 KV denominada de media tensión que alimenta los transformadores de potencia de 26 MVA cada uno para los hornos de fusión y de afino; asimismo dos transformadores de 2 MVA cada uno, utilizados para los servicios generales de la planta.

En sí, para realizar un proceso completo desde la recopilación de chatarra, hasta darle forma a un lingote de acero, se realiza de la siguiente forma:

Primero es clasificada la chatarra según el tipo de estructura que presente, es decir láminas, hierros retorcidos, paquetes de latón, alambrones, etc. para que dependiendo de su volumen éstas se

puedan cargar en cestas que oscilan entre 7 y 15 toneladas cada una. Posteriormente cada cesta será transportada por una grúa que se encargará de hacer los recargues necesarios al horno, hasta brindarle cerca de 65 toneladas de chatarra, las cuales pudieran hacerse entre 5 u 8 recargues, dependiendo del tonelaje de cada una. El horno constantemente es enfriado por paneles donde circula agua, tratada químicamente, para evitar que las paredes externas del horno sufran un calentamiento excesivo y probablemente origine una perforación en el mismo.

A la fusión del contenido de cada cesta con chatarra, se le da aproximadamente 1 minuto con 30 segundos de arco eléctrico por cada tonelada de chatarra y así tener un estimado de cuánto tiempo necesita la fusión de cada cesta.

Luego de efectuado el último recargue se inicia el proceso de afino en dónde se toma el total de la chatarra depositada en el horno, y a la vez se le suministra al horno los aditivos necesarios para proporcionale un tipo de dureza acorde al grado de acero que se requiera. Para aumentarle la rapidéz de calentamiento se le suministra oxígeno, éste mismo se utiliza para oxidar o desoxidar la mezcla de acero líquido y con ello aumentar o bajar un elemento específico, así también se le suministra cal, coke calcinado, carbón, etc. ya que al elevarse a cierta temperatura estipulada la superficie de acero líquido se ve recubierta con escoria (desechos de plásticos, vidrios, etc.) que es una mezcla no deseada, la cual, al voltear un poco el horno es desechado del mismo.

Cuando el acero ya posee un porcentaje de elementos requeridos y una temperatura que oscila alrededor de los 1650 grados centígrados, es vaciado en una olla, la que montada sobre un riel (carro motorizado) es transportada al horno de afinado; el cual se encarga de verificar, en base a muestras de laboratorio, su composición y también el mantener la temperatura.

Luego la olla es transportada por una grúa hacia la máquina de colada continua, que es la encargada de darle forma al lingote de acero con medidas de ancho y largo requeridas; el acero líquido es depositado en distribuidores en los cuales el acero toma líneas de recorrido, en cada línea primeramente hay un motor oscilador que condensa el acero y evita que en la barra exista algún vacío, luego un motor enderezador que le da rectitud al lingote y finalmente un motor cizalla que es la encargada de realizar los cortes a la barra de acero con medidas pre-establecidas; a lo largo de toda la línea también existe enfriamiento por agua químicamente tratada para éste fin, con el objetivo de evitar que se rompan los moldes por el excesivo calentamiento y a la vez para empezar a enfriar el lingote.

Por último, los lingotes son transportados hacia un patio de bodega para terminar su enfriamiento al aire libre y luego ser transportados a dónde se requiera.

Las metas de productividad en la operación del horno de arco eléctrico se establecen comunmente en base al sistema eléctrico. La verdad en, muchos casos, es que la relación de TONS/HORA y sistema de potencia no se cumplen en forma rigurosa. LA PRODUCTIVIDAD ES UNA

FUNCIÓN DIRECTA DE CÓMO SE UTILIZA EL HORNO Y CÓMO ESTÁ AJUSTADO EL SISTEMA DE REGULACIÓN. Estos tienen un efecto mayor, en la eficiencia de fusión, que la aplicación de la potencia eléctrica.

Esto no significa que la potencia eléctrica no sea importante, sino que el **CONOCIMIENTO Y CONTROL** de ésta cuando se aplica a un horno de arco eléctrico, es un contribuyente importante hacia la reducción de costos y la utilización efectiva del equipo. El sistema eléctrico total para un horno de arco eléctrico está formado por dos componentes principales que son: el sistema de potencia y el sistema de regulación y control.

El sistema de potencia empieza en la empresa generadora de energía que alimenta al sistema de potencia de la acería, y continúa hacia el transformador del horno y concluye en el arco, en las puntas de los tres electrodos (en un sistema trifásico). Es muy importante contar con transformadores de distribución adecuados, en la subestación, y que estos tengan suficiente capacidad para alimentar al transformador del Horno, con el fin de obtener la máxima potencia sostenida para condiciones óptimas de fusión.

Lo anterior requiere de ciertas consideraciones no solo en el tamaño del transformador en la subestación, sino también en su capacidad de proporcionar la potencia óptima bajo condiciones adversas que pueden limitar la eficiencia del Horno, como son: operación con varios Hornos, distribución y tipo de carga, capacidad de enfriamiento del transformador y la capacidad de corto circuito en el punto de acoplamiento común del sistema de generación de energía.

El corazón para el control de un horno de arco eléctrico es el SISTEMA DE REGULACIÓN (y el variador de taps), ya que este es parte del transformador y es manejado por un operador o una computadora que determina la cantidad y calidad de potencia aplicada al horno, estableciendo la longitud del arco. Los hornos de arco eléctrico, modernos, operan con un solo tap durante toda la colada, utilizando la máxima capacidad del transformador y por medio del sistema de regulación se establece y cambia la longitud del arco, de acuerdo a los requerimientos de operación (profundización, fusión, calentamiento, refinación, etc.).

Una vez que se han establecido los parámetros eléctricos en un ambiente mantenido adecuadamente, solo se requieren cambios menores y rutinas para mantener una operación óptima y con bajos costos de operación. Las demoras de operación y mantenimiento, tienen efecto en los costos de operación, mayor; que en los cambios en los parámetros eléctricos. A continuación se muestra un cuadro sinóptico del proceso en general de la producción, mostrando tanto el sistema eléctrico como los factores auxiliares involucrados en el mismo.

x1

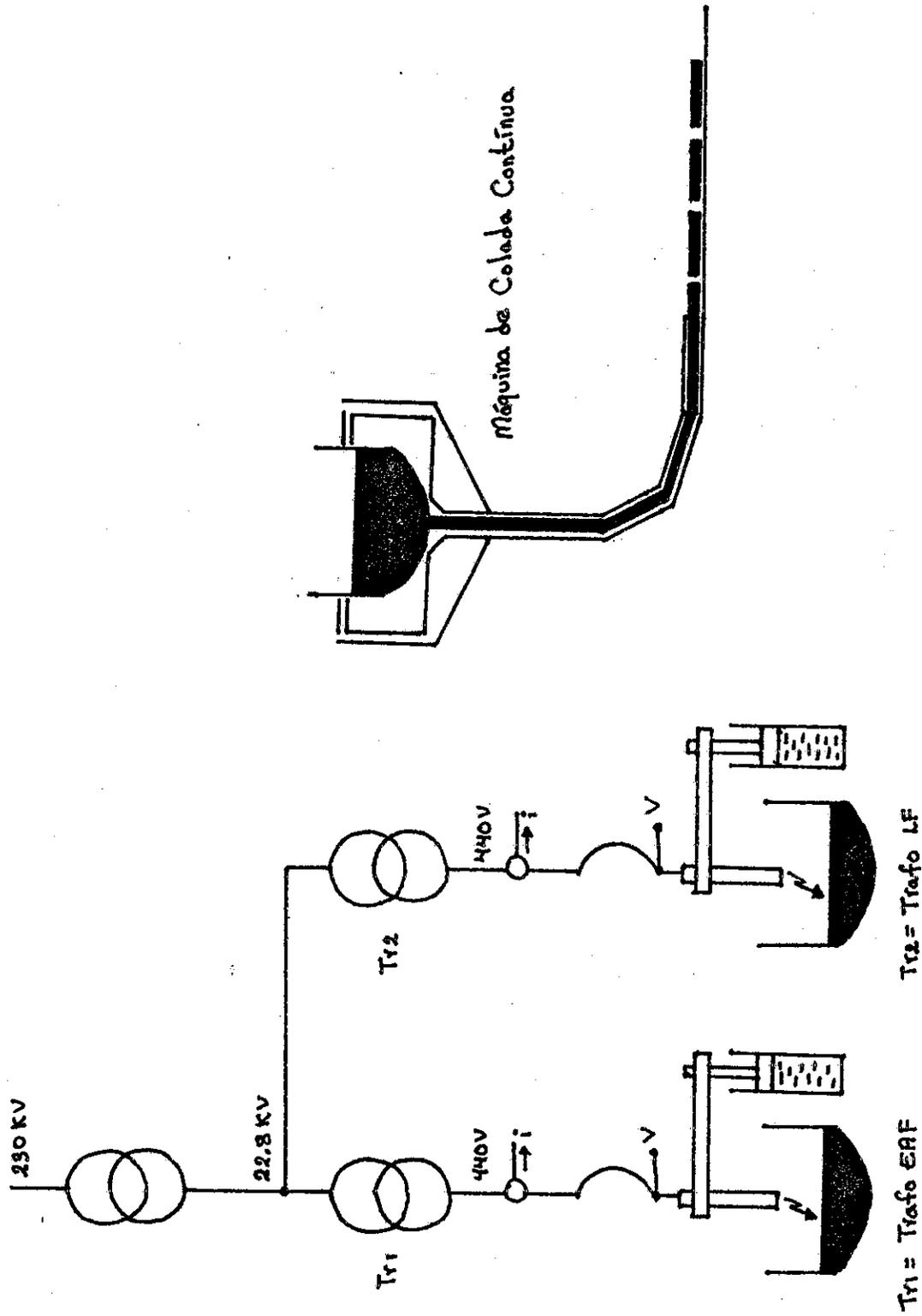
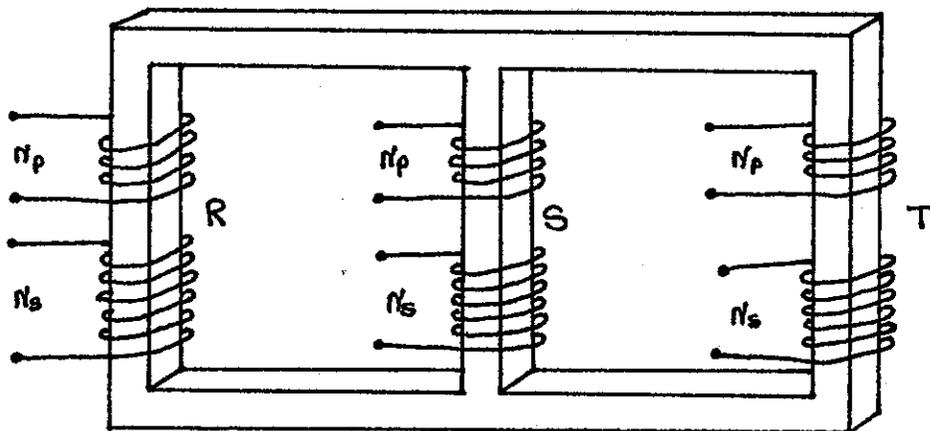


Fig. No. 1

1 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN A LOS TRANSFORMADORES

El transformador es un dispositivo que convierte cierto nivel de voltaje a otro nivel de voltaje (alterno). Uno de los devanados se conecta a la fuente (primario) y el otro se conecta a la carga (secundario). En el horno de SIDEGUA, se cuenta con un transformador de potencia trifásico (22.8 / 0.419 KV) del tipo acorazado, en el cual, el devanado primario (devanado interior) al igual que el secundario (devanado exterior) están colocados sobre la misma columna con variador de tap,s en el primario y con un secundario que posee una salida con láminas de cobre (en forma de galleta) para soportar las altas magnitudes de amperajes. En la siguiente figura se muestra un núcleo de este tipo.



Tipo acorazado

Fig. No. 2

Los transformadores necesitan una corriente de excitación que es del orden del 5% de la corriente a plena carga, con todo ello se originan pérdidas en el mismo; tales como las originadas en el cobre, por calentamiento que son de tipo resistivo; las producidas por las corrientes de Foucault, que son por calentamiento de tipo resistivo en el núcleo; las pérdidas por Histéresis, asociadas con el reagrupamiento de los dominios magnéticos en el núcleo; flujo por dispersión, que son los flujos que abandonan el núcleo. El diagrama eléctrico equivalente de un transformador se muestra en la siguiente figura.

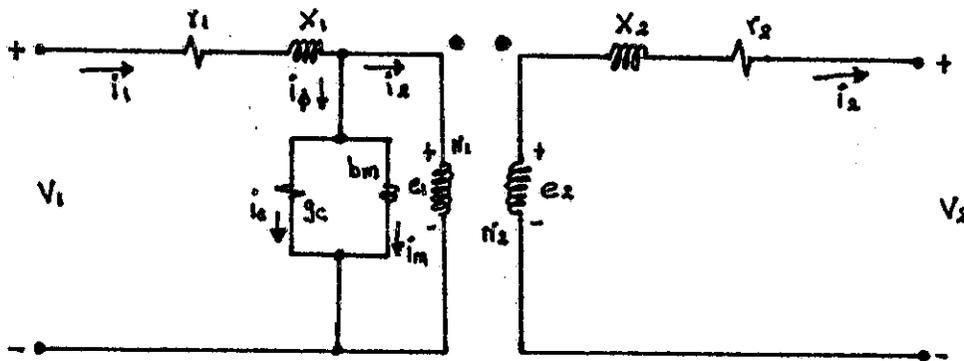


Fig. No. 3

En condiciones normales de operación los transformadores van a soportar dos tipos de sobrevoltajes: transitorios de muy alta magnitud y corta duración (descargas atmosféricas) y sobrevoltajes de operación (por pérdida de carga o similares). En la fábrica, donde se contruyan los transformadores, deben realizársele pruebas antes de instalarse en el horno, tales como:

a) Pruebas de impulso.

1.- Onda completa.

- 2.- Onda recortada.
 - 3.- Frente de onda.
- b) Pruebas de aislamiento.
- c) Pruebas de relación de transformación.
- d) Pruebas del aceite.
- 1.- Rigidez dieléctrica (mínimo 30 KV).
 - 2.- Tensión interfacial (mínimo 20 dinas/cm).
 - 3.- Acidez (< 0.3 mg-KOH/g).
 - 4.- Color (no mayor a 4).

1.2 CARACTERÍSTICAS DE CONEXIÓN DELTA-DELTA EN HAE

Se utiliza cuando la carga es trifásica, debido a que la regulación de voltaje es excelente. En este tipo de conexión la carcasa del transformador se debe aterrizar. En los transformadores de potencia utilizados para un horno de arco eléctrico, con variador de taps, que por capacidad de amperaje en los cableados internos se hace en el primario en la conexión delta-delta, consiste en acoplar o desacoplar en paralelo las bobinas y así aumentar la capacidad de corriente que pueda fluir por la misma.

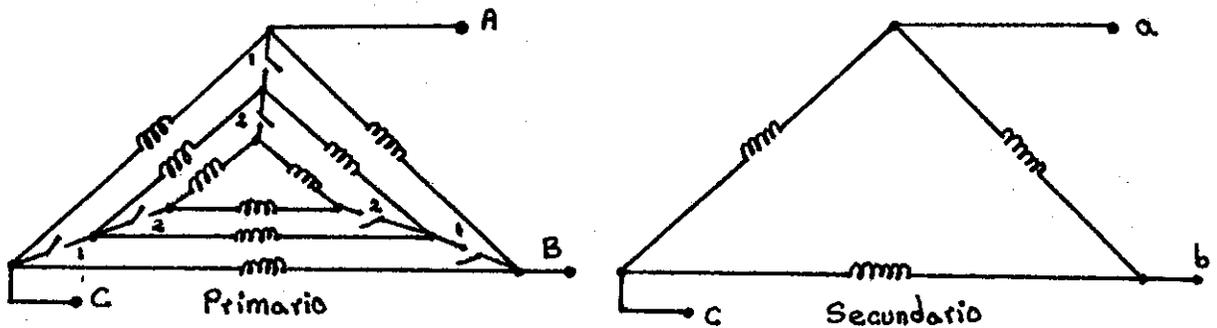


Fig. No. 4

1.3 CARACTERÍSTICAS DE CONEXIÓN ESTRELLA-DELTA EN HAE

La más segura de las conexiones estrella-delta, es cuando el neutral del primario y del secundario (si es que hubieren) no se conecten directamente a tierra; para evitar que si existiera una pérdida de fase en el primario, no opere como estrella-abierta / delta-abierta. La carcasa del transformador sí se debe aterrizar. El primario del transformador es posible conectar en delta o en estrella, pero usualmente se conecta el primario en estrella debido a que el nivel de aislamiento en transformadores conectados de esta forma es menor. La norma ANSI estipula que para conexiones estrella-delta o delta-estrella requiere que los fasores de línea a neutro del primario estén adelantados 30 grados eléctricos, en relación con los fasores de línea a neutro del secundario. Al tener una estrella sin aterrizar en el primario pudiera generarse ferrorresonancia, pero esto no ocurre, ya que la carga en un H.A.E. es netamente inductivo; adicionalmente este tipo de transformadores es de gran capacidad, con lo cual se eliminaría.

1.4 CÁLCULO DE CAPACIDAD PARA UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (H.A.E.)

Los transformadores para los hornos de arco eléctrico deben ser diseñados con especificaciones más rígidas que los de distribución debido a los esfuerzos a que son sometidos por la operación desbalanceada en la etapa de fusión de chatarra. Deben ser diseñados específicamente para soportar:

- a) Interrupciones frecuentes (de 75 a 100 operaciones diarias).
- b) Condiciones de corto circuito y operación en dos fases del secundario durante largos periodos de tiempo.
- c) Desbalances inherentes durante la operación normal; lo que ocasiona

esfuerzos internos.

- d) Calentamientos impredecibles PROPAGANDA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
Biblioteca Central. en la vecindad del sistema eléctrico de potencia.

Antes de especificar un transformador para horno de arco eléctrico se deben tomar algunas consideraciones, como: producción requerida, tipo de acero por producir, materia prima (chatarra, pre-reducidos, arrabio, etc.), rigidez del sistema eléctrico de la compañía que proporciona la energía eléctrica, características eléctricas y mecánicas del horno, metalurgia secundaria, voltaje del circuito primario, etc. Para calcular la capacidad nominal (MVA base) de un transformador, se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{MVA} = [\text{Tons} * (\text{KWH} + \text{TON}) * 1.08 * 60] + (T * 0.7071 * 1000) \quad \text{Ecc. No.1}$$

en donde: Tons = toneladas de acero líquido/colada

KWH/Ton = energía específica para fusión

T = tiempo en minutos

1.08 = factor de merma (carga/líquida)

0.7071 = factor de potencia

1.5 IMPORTANCIA DE LA REACTANCIA DEL CIRCUITO SECUNDARIO

A continuación se presentan algunas de las características referentes al tipo de reactancia del transformador, más adelante se muestran los cálculos necesarios; entre los cuales están:

- a) Un horno de alta reactancia opera con un factor de potencia menor al que operaría un horno de baja reactancia.
- b) En un horno de alta reactancia, la aplicación de la energía eléctrica es menos eficiente (mayor consumo de KWH/TON).
- c) Se requiere una mayor capacidad nominal (MVA) del transformador

para un horno de alta reactancia.

- d) Los voltajes del secundario del transformador de un horno de alta reactancia, son mayores.
- e) El sistema de compensación de Potencia Reactiva o el control estático de "VAR", es mayor en hornos de alta reactancia.

1.6 ESPECIFICACIONES EN LA ADQUISICIÓN DE UN TRANSFORMADOR PARA HAE

Para adquirir un transformador con el fin de utilizarlo en un horno de arco eléctrico deben de cumplir por lo menos con las siguientes especificaciones:

- a) MVA a 55°C de incremento.
- b) Capacidad de MW para los MVA de placa (especificando el punto de medición de MW).
- c) Temperatura del agua del sistema de enfriamiento.
- d) Ciclo de carga (en operación).
- e) Voltaje en el primario.
- f) MVA de corto circuito de la red de alimentación (35 veces los MVA de placa).
- g) Accesorios del transformador, tales como: transformadores de corriente del primario y el secundario, relevador de presión súbita, indicador de temperatura de "punto caliente" del devanado, aparta-rayos y capacitores de supresión, intercambiador de calor con detector de fugas doble (agua/aceite), diagramas esquemáticos completos y exactos, documentación certificada de las pruebas del transformador, etc.
- h) Impedancia del transformador (% Z).
- i) Voltajes del secundario (definiendo el número de taps).
- j) Tipo de cambiador de taps (bajo carga o sin carga).

- k) Construido y diseñado de acuerdo a normas ANSI y NEMA.
- l) Aislamiento tipo H.

1.7 IMPEDANCIA DE UN TRANSFORMADOR PARA H.A.E.

El transformador, es uno de los componentes más importantes del sistema del horno de arco eléctrico, ya sea técnicamente o como costo de inversión. Debe de estar diseñado y construido para soportar las corrientes de operación (y de corto circuito) y desbalances inherentes durante la etapa de fusión de la carga metálica. Normalmente los fabricantes de los transformadores, para ser usados en instalaciones de horno de arco eléctrico, proporcionan la información de porcentaje de caída de impedancia del transformador por surtir, o cuando menos el % Z en base a la capacidad del mismo. Para conocer el porcentaje de impedancia (% Z) de las distintas derivaciones de voltajes (taps) y KVA'S de operación, es necesario calcularlos por medio de la siguiente ecuación.

$$\% Z_n = \% Z_{np} \left(\frac{V_{\text{máx}}}{V_n} \right)^2 * \left(\frac{MVA_n}{MVA_{np}} \right) \quad \text{Ecc. No. 2}$$

dónde: % Z_n = % de impedancia en el tap "n"

% Z_{np} = % de impedancia de placa del transformador

V_{máx} = voltaje de placa máximo del secundario

V_n = voltaje del tap "n"

MVA_n = MVA de placa para el tap "n"

MVA_{np} = MVA nominal del transformador

Las impedancias de los Tap's en conexión "estrella" se calculan multiplicando por $\sqrt{3}$ el valor de la conexión "delta" correspondiente.

1.7.1 CÁLCULO DE LA REACTANCIA DE UN TRANSFORMADOR:

$$X_{ft} = [\% X_{ft} * (KV_{sec})^2 * 10] \div MVA \quad m\Omega$$

Ecc. No. 3

Por ejemplo al tomar un transformador de 10 MVA, 375 Volts secundario, % Z = 4.5 y $X_{ft}/R_{ft} = 10$, entonces se obtiene:

$$\% X_{ft} = \% Z * \text{sen} [1 \div \tan (10)]$$

$$\% X_{ft} = 4.5 * 0.99504$$

$$\% X_{ft} = 4.478$$

Finalmente: $X_{ft} = (4.478 * (0.375)^2 * 10) \div 10$

$$X_{ft} = 0.630 \text{ m}\Omega$$

1.8 SOBRECARGA EN TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO ELECTRICO

La sobrecarga, es la condición de corriente superior a la nominal en un transformador de potencia. La sobrecarga se presenta cuando se exceden las siguientes normas (USA Standard C57.12.00 sección 2.4):

Un transformador debe ser capaz de:

- a) Operar a 105 % del voltaje secundario nominal mientras entrega su capacidad nominal en KVA'S, con un factor de potencia igual o mayor a 0.8 .
- b) Operar a 110 % del voltaje secundario nominal, sin carga.

Esto se debe a que la sobrecarga de un transformador ocurre bajo las siguientes circunstancias:

- 1.- Bajo condiciones normales el sistema debe ser capaz de permitir los límites establecidos por las normas.
- 2.- Durante el arranque y parada de los generadores, la sobrecarga puede ser causada por el efecto de reducción en la frecuencia, si no se reduce el voltaje de manera proporcional.
- 3.- Cuando ocurren fallas en la estación generadora, una variación en el voltaje y velocidad del generador pueden producir niveles de

sobrecarga excesivos.

- 4.- Cuando fallan algunos componentes del sistema, como relevadores, interruptores, reguladores, etc. o cuando se efectúan pruebas especiales en partes del sistema pueden originar sobrecarga.
- 5.- Condiciones de operación de emergencia, específicamente durante y después de un disturbio importante de potencia, que produzca desbalance entre la generación y la carga puede ocasionar una operación de baja frecuencia y/o sobrevoltaje.

La operación de baja frecuencia ocurre cuando la carga excede a la generación; la operación de sobrevoltaje ocurre al restablecer la energía después de una interrupción, como efecto del flujo de corriente de descarga de los capacitores de línea. El efecto principal de la sobrecarga en los transformadores de potencia es la degradación térmica del aislamiento debido a la generación de corrientes parásitas, (de fuga) seguido por la ruptura del aislamiento debido al sobrevoltaje. Los niveles de sobrecarga arriba de lo establecido por las normas, causa saturación en el núcleo del transformador.

El efecto de las corrientes parásitas, se traduce en calentamientos y pérdidas ($I^2 * R$) en los devanados conductores, terminales y partes estructurales. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocasionar daños irreversibles en los materiales aislantes del equipo. El transformador puede sufrir pequeñas sobrecargas sin que el operador del horno se percate, pero la degradación térmica resultante de sobrecargas continuas es acumulativa, el transformador puede soportar repetidas sobrecargas moderadas, antes de que ocurra la falla eléctrica. El porcentaje de sobrecarga se define

como el "voltaje nominal/hertz" aplicado al devanado primario bajo cualquier carga, tal como se muestra en la siguiente gráfica que se observa la relación de % sobrecarga vrs. el tiempo permisible.

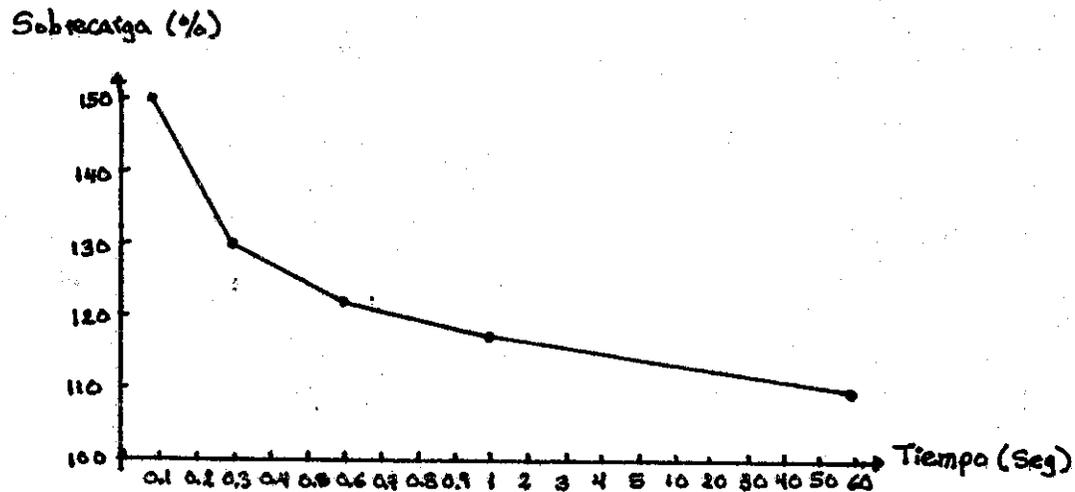


Fig. No. 5

1.9 TIPOS DE CABLEADOS DE CONEXIÓN (REFRIGERADOS)

En hornos de arco eléctrico, la capacidad de amperajes que circulan sobre los cableados que salen del secundario del transformador y que alimentan las mordazas que sujetan a los electrodos son muy elevadas; como por ejemplo para un horno de arco eléctrico con un transformador de 26 MW y con 440 Volts en el secundario tendrá un amperaje en los cableados de acuerdo a la ecuación siguiente.

$$I_n = P_n \div (\sqrt{3} * V_n * 0.8) \quad \text{Ecc. No. 4}$$

dónde: I_n = corriente nominal en el cableado

- P_n = potencia nominal
 $\sqrt{3}$ = ya que es trifásico
 V_n = voltaje nominal en el secundario
 0.8 = factor de potencia

Según la ecuación anterior obtenemos amperajes que oscilan alrededor de 42,500 amperios, con lo cual se tiene que utilizar varios cables por fase para dividir así la cantidad de corriente que pase por los mismos (14,000 amperios por cada uno, si fueren 3 cables). Para calcular el área mínima que debe tener el conductor aplicamos la siguiente fórmula

$$A_c = (\sqrt{3} * I_n * L_c) / (C_{Cu} * \% \text{ reg}) \quad \text{Ecc. No. 5}$$

- dónde:
- A_c = área del conductor (mm^2)
 - $\sqrt{3}$ = ya que es trifásico
 - I_n = corriente nominal a circular
 - L_c = longitud del cableado a utilizar
 - C_{Cu} = conductividad del cobre
 - $\% \text{ reg}$ = % de regulación de voltaje

El cable que deberá de ser de varios hilos (preferiblemente de cobre), para aprovechar la flexibilidad del mismo, ya que constantemente están en movimiento debido a la apertura de la bóveda para sus constantes recargues, así mismo deberá estar recubierto con forro de hule por el cual se hará circular agua para mantener enfriamiento en él, debido a la cercanía del horno; por último, el hule deberá tener una cubierta hecha a base de tela de asbesto u otro material, para protegerla del calor excesivamente alto.

1.10 CURVAS DE POTENCIA EN TRANSFORMADORES PARA H.A.E.

Las características que definen la operación del horno de arco eléctrico, son sus parámetros eléctricos, es decir, la impedancia (Z) la reactancia (X) y la resistencia (R). Estos tres elementos constituyen la oposición a los amperios (I) a través del circuito eléctrico del horno lo que genera las potencias (Aparente, Activa, Reactiva y Pérdidas). El conocimiento teórico de estas potencias, no es suficiente y es necesario que se presenten en forma gráfica, es por ello que se deriva la necesidad de hacer referencia a las curvas de potencia del horno de arco eléctrico. En las siguientes gráficas se presentan las relaciones de la corriente del arco, como variable independiente, con la potencia útil (MW_a), potencia reactiva (MVA_r), potencia aparente (MVA), potencia del primario (MW), pérdidas eléctricas ($I^2 * R$) y longitud del arco (L_a).

1.10.1 CURVA DE POTENCIA ÚTIL (MW_a):

Esta es la potencia del arco, que funde la carga. Cabe mencionar que esta potencia no es posible medirla directamente, sino en forma teórica, restando las pérdidas ($I^2 * R$) de la potencia referida al circuito primario del transformador del horno. La parte superior de esta curva muestra el rango de operación normal para el H.A.E. La máxima potencia del arco coincide con un factor de potencia ($\cos \theta$) entre 0.78 y 0.82 medido éste en el primario del transformador del horno.

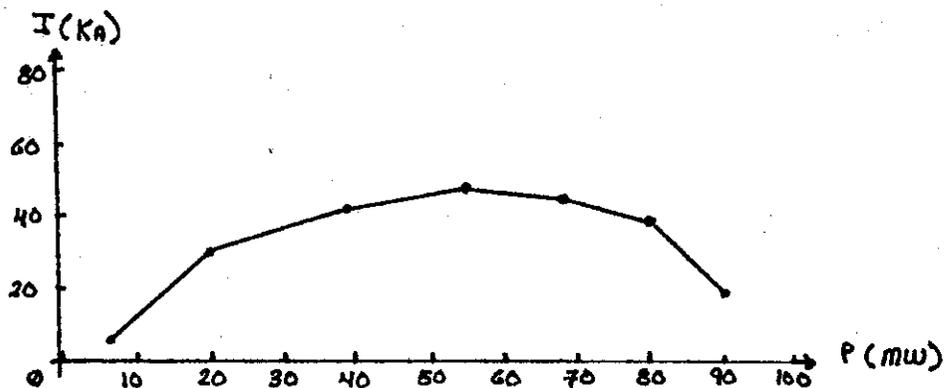


Fig. No. 6

1.10.2 CURVA DE PÉRDIDAS DEL CIRCUITO ($I^2 * R$):

La mayor porción de estas pérdidas están presentes en la columna de electrodos (la punta del electrodo es la zona de mayor resistencia), por lo tanto ($I^2 * R$), teóricamente es una pérdida que se aprovecha como calor útil del horno.

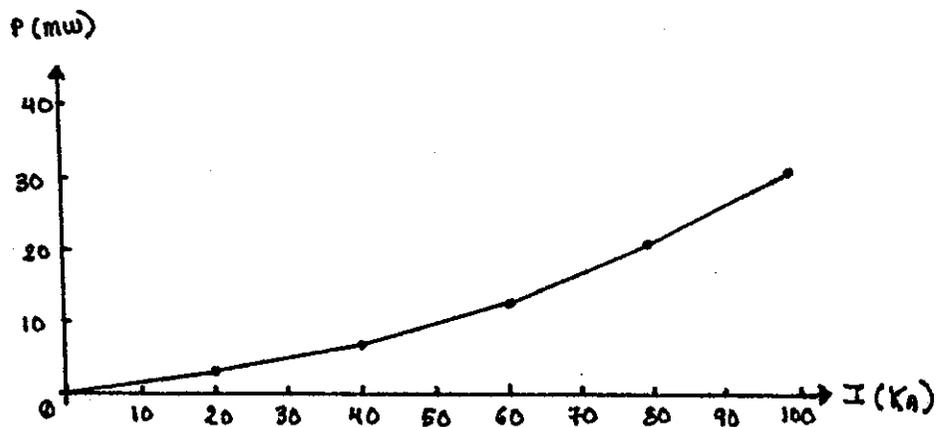


Fig. No. 7

1.10.3 CURVA DE POTENCIA ACTIVA (MW):

En esta curva se muestra la potencia media en el primario del transformador del horno. Al aumentar la corriente, la potencia se incrementa hasta que las potencias MW = MVAR, esto sucede a un factor de potencia de 0.707 medido en el primario del transformador del horno. En las prácticas de fusión rápida y principalmente en hornos de muy alta potencia, es un requisito la operación con $MW > MVAR$, es decir un arco largo y una escoria espumosa.

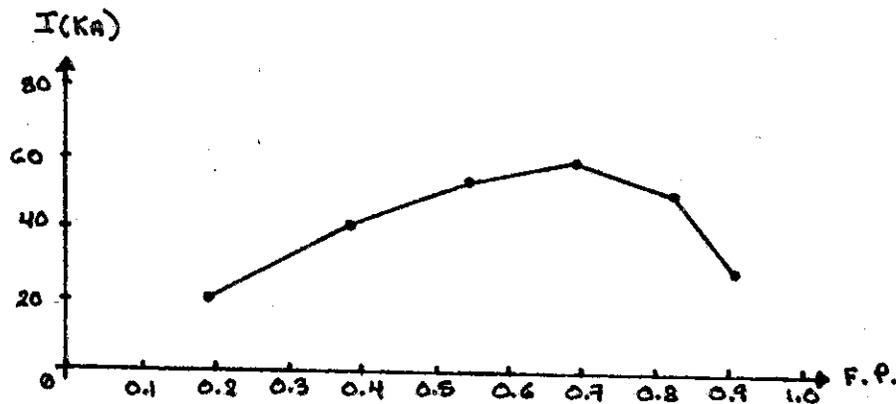


Fig. No. 8

1.10.4 CURVA DE POTENCIA REACTIVA (MVAR):

Esta curva muestra la potencia que se desarrolla en la reactancia de operación (X_{op}) y aumenta en forma parabólica al aumentar la corriente del arco. La curva de MVAR intersecta en el punto máximo a la de MW ($\theta = 45$ grados), punto de máxima transferencia de energía eléctrica en el circuito, pero no en el arco.

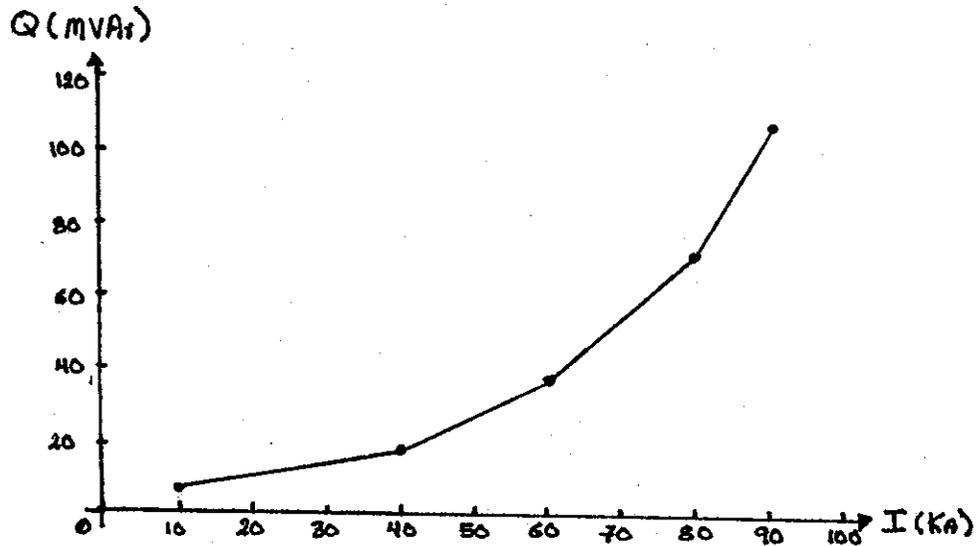


Fig. No. 9

1.10.5 CURVA DE POTENCIA APARENTE (MVA):

En la placa del transformador se especifican los MVA nominales del mismo. Cuando se llega a la condición de corto circuito, (los tres electrodos haciendo contacto directo en el acero líquido) es decir, corriente máxima, los MVA y MVar están a valores máximos y los MW al mínimo, con un factor de potencia alrededor de 0.15 aproximadamente.

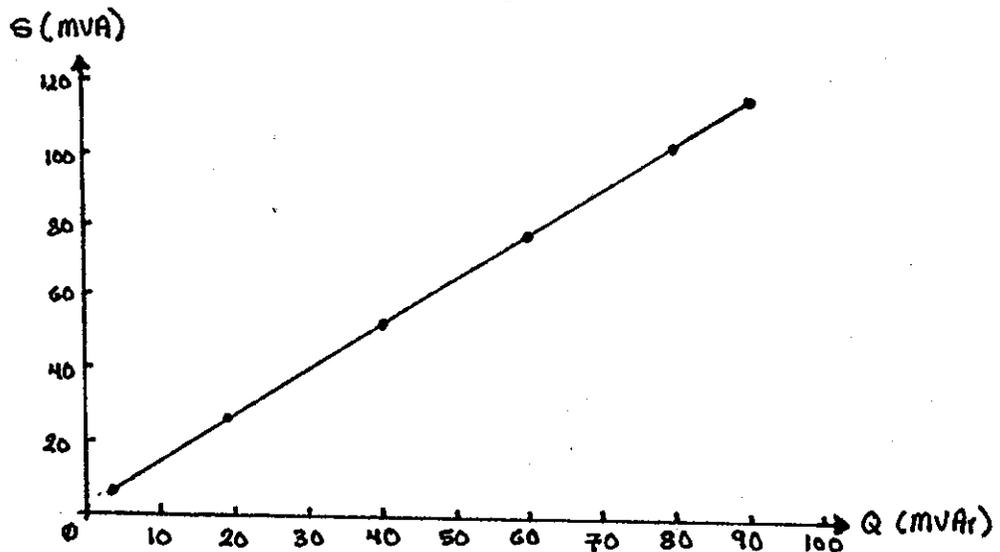


Fig. No. 10

1.10.6 CURVA DE LONGITUD DE ARCO (L_a):

Esta está relacionada directamente con el factor de potencia y con el voltaje del arco, que empiezan con un valor máximo cuando la corriente es nula y disminuye al aumentar la corriente. También, la longitud del arco está relacionada con la forma de puntas de los electrodos, y se debe buscar que las tres fases tengan las mismas formas de punta, para que en forma práctica se pueda tener el horno balanceado, es decir, potencias iguales por fase.

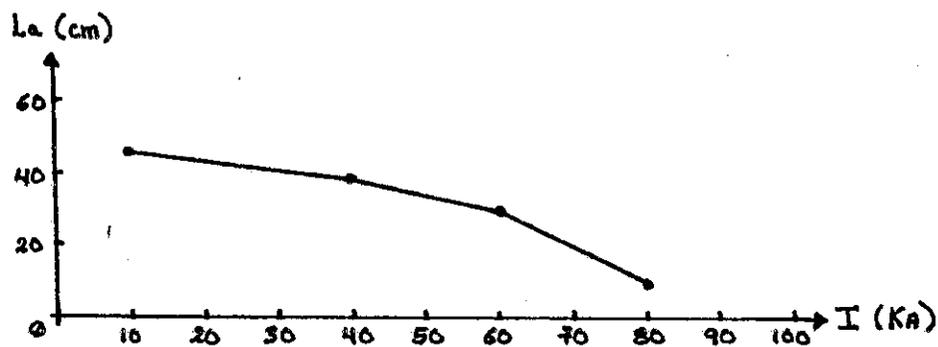


Fig. No. 11

1.11 VARIADORES DE TAPS

En la industria del horno de arco eléctrico lo que se persigue es la mayor eficiencia posible en el proceso de fusión de la chatarra; lo cual se consigue aplicando la máxima transferencia de potencia y con una óptima regulación. Esto implica obtener del transformador su mayor capacidad y con el mínimo de interrupciones; o sea, tratando de evitar parar el proceso para estar cambiando la derivación del transformador (tap), acorde al tipo de potencia a utilizar (para fusión, la

máxima potencia y para afino, se reduce a un 75 % aproximadamente. En vista de todo lo anterior lo recomendable es utilizar transformadores que su variador de TAP'S sea capaz de actuar bajo condiciones de carga, aunque esto implique una mayor inversión económica. Los transformadores que son considerados de gran potencia, el variador de tap's lo poseen en el lado primario, ya que aunque el nivel de aislamiento es mayor, económicamente es preferible controlar el aislamiento, a tener que variar bajo condiciones de altos amperajes, si lo tuviera en el secundario. A continuación se presentan los datos técnicos de un transformador de 26 MVA, 22 KV/440 V (delta-estrella / delta), OFWF, fabricado en Italia en 1974 y sus correspondientes variaciones de tap's, utilizado en H.A.E.

Tap	Conexión	Vprim	Iprim	Vsec	Isec
ALTA POTENCIA					
1	D-2	22KV delta	686 A	418 V	36.1 KA
1	D-3	22KV delta	686 A	395 V	38.2 KA
1	D-4	22KV delta	686 A	375 V	40.2 KA
1	D-5	22KV delta	622 A	340 V	40.2 KA
2	E-4	22KV delta	686 A	375 V	40.2 KA
2	E-5	22KV delta	622 A	340 V	40.2 KA
2	E-6	22KV delta	546 A	298 V	40.2 KA
3	F-5	22KV delta	622 A	340 V	40.2 KA
3	F-6	22KV delta	546 A	298 V	40.2 KA
3	F-7	22KV delta	453 A	248 V	40.2 KA
4	G-6	22KV delta	546 A	298 V	40.2 KA
4	G-7	22KV delta	453 A	248 V	40.2 KA
4	G-8	22KV delta	379 A	207 V	40.2 KA

Tap	Conexión	Vprim	Iprim	Vsec	Isec
MEDIANA POTENCIA					
5	D-2	22KV	estrella 396 A	241 V	36.1 KA
5	D-3	22KV	estrella 396 A	228 V	38.1 KA
5	D-4	22KV	estrella 396 A	216 V	40.2 KA
5	D-5	22KV	estrella 359 A	196 V	40.2 KA
6	E-4	22KV	estrella 396 A	216 V	40.2 KA
6	E-5	22KV	estrella 359 A	196 V	40.2 KA
6	E-6	22KV	estrella 315 A	172 V	40.2 KA
7	F-5	22KV	estrella 359 A	196 V	40.2 KA
7	F-6	22KV	estrella 315 A	172 V	40.2 KA
7	F-7	22KV	estrella 262 A	143 V	40.2 KA
8	G-6	22KV	estrella 315 A	172 V	40.2 KA
8	G-7	22KV	estrella 262 A	143 V	40.2 KA
8	G-8	22KV	estrella 219 A	119 V	40.2 KA

Cuadro No. 1

En la figura No. 12 se muestran las conexiones del primario y del secundario del transformador, así como su conexión interna de las terminales de acoplamiento para elegir la capacidad del mismo; en la figura No. 13a se presenta un cuadro sinóptico de la conexión delta y en la figura No. 13b un cuadro sinóptico de la conexión estrella.

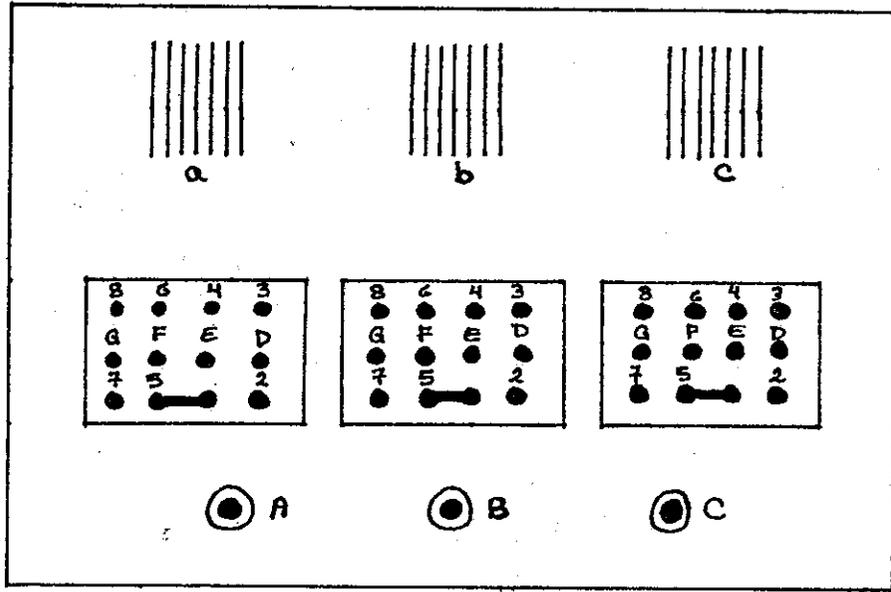


Fig. No. 12

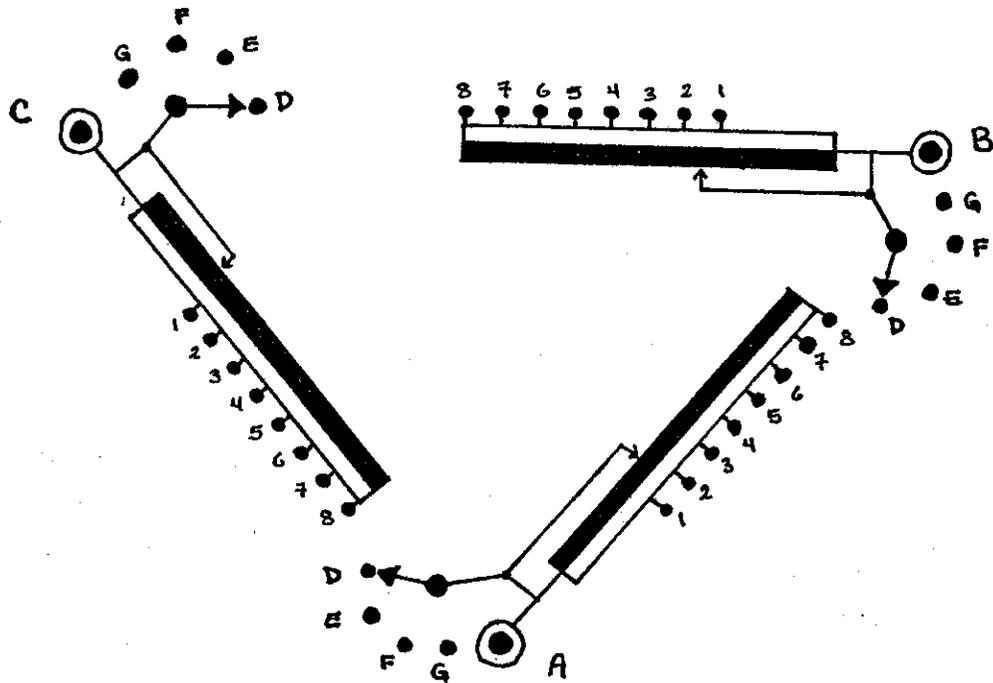


Fig. No. 13a

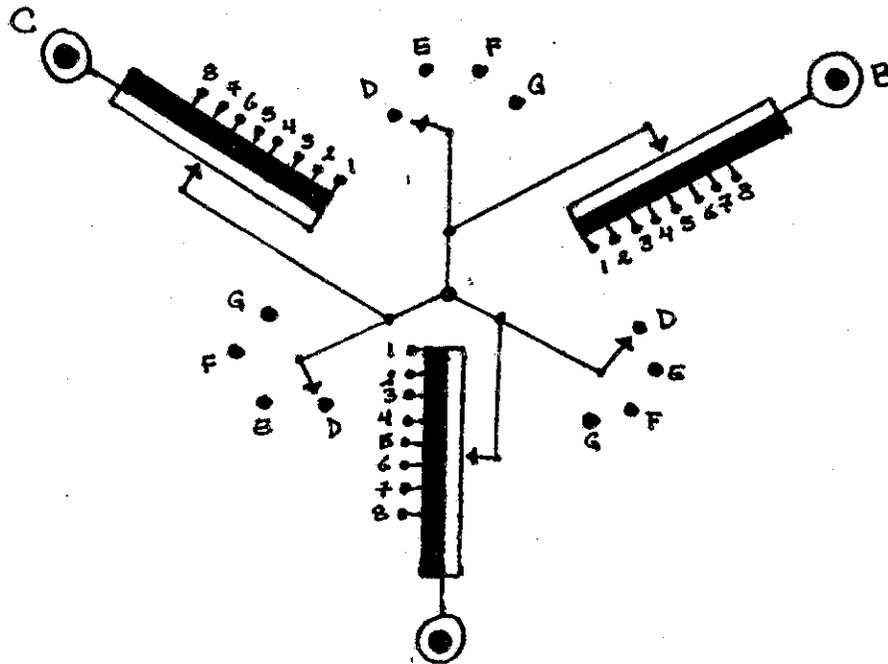


Fig. No. 13b

1.12 CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS

1.12.1

NUCLEO:

Para transformadores de alta potencia es muy utilizado el transformador tipo núcleo con chapas de acero silicio de alta permeabilidad, laminadas en frío. Las juntas son a 45 grados y debidamente espaciadas para evitar concentración del flujo; los núcleos no tienen tornillos pasantes a la rigidez mecánica se consigue con cinchos de cinta de fibra de vidrio impregnada con resina. La temperatura máxima obtenida en el núcleo es controlada con el uso de canales de refrigeración paralelos o transversales a las laminaciones. Las chapas usadas son dispuestas radialmente e impregnadas con resina de tal modo que se logra conformar un conjunto monolítico.

1.12.2 ARROLLAMIENTOS:

Los conductores empleados son aislados con papel kraft especial, del tipo termoestabilizado; cuando esté especificado o requerido por norma. El barniz es utilizado solamente para la aislación entre los conductores elementales y en el caso de máximas sollicitaciones mecánicas, son del tipo cementable. La resistencia a los cortocircuitos también se consigue utilizando cobre de mayor resistencia mecánica.

El nivel de tensión de impulso, define si los discos son simples o entrelazados. El aislamiento entre arrollamientos es del tipo multicanal con cilindros de cartógeno.

1.12.3 TANQUES Y ACCESORIOS:

Los tanques y tapas son fabricados con chapas de acero adecuados para soldar, con vigas de soporte y refuerzos adecuadamente dimensionados y ubicados. La terminación de las superficies internas y externas, cuando no esté especificado otra cosa, es realizado con pintura a base de poliuretano.

Las bobinas individuales y posteriormente el conjunto de ensamblado completo con los aislantes son tratados para eliminar la humedad y alcanzar las dimensiones de proyecto. Después de introducir las columnas de bobinas en el núcleo y una vez concluidas las conexiones, la parte activa es secada fase a fase; el proceso es cuidadosamente monitoreado para asegurar el completo secado de las aislaciones, luego del cual se realiza la impregnación bajo vacío con aceite aislante previamente tratado.

Luego de la colocación de la parte activa en el tanque, se hace un nuevo tratamiento para eliminar la humedad que eventualmente se hubiere absorbido durante el contacto con el ambiente. Todas las áreas de fabricación de bobinas y montaje, están sometidas a presión positiva mediante la inyección de aire filtrado.

1.13 PROTECCIONES MÍNIMAS

El transformador, por ser uno de los equipos de mayor costo de inversión, y el que proporciona la potencia necesaria en los parámetros establecidos de voltaje y corriente, se le debe de proveer la máxima seguridad posible. En un horno de arco eléctrico, al transformador se le debe de proteger por lo menos con lo siguiente:

- a) Relevador Buchholtz, éste lo protege de sobrepresión súbita de gases generados por la degradación interna del aceite como consecuencia de una falla interna (rompimiento de aislamiento).
- b) Relevador de temperatura, es un termómetro de mercurio incorporado a la carcasa del transformador, al cual se le determina una temperatura máxima permisible.
- c) Fluviómetro de aceite, éste se encarga de verificar la constante fluidez del aceite para el enfriamiento del mismo.
- d) Fluviómetro de agua, éste verifica el caudal mínimo de agua utilizado para su enfriamiento.
- e) Nivel a aceite, está incorporado en el tanque de compensación y verifica los niveles del mismo.
- f) Relevador de máxima corriente, éste se gradúa de tal forma que al sobrepasar un nivel establecido de corriente, colocado uno por fase, dé la orden de apertura del interruptor del transformador, éste se coloca en el primario (los CT's) debido a que el nivel

de amperaje en él es menor.

- g) Relevador de mínimo y sobre voltaje, actúa en el momento en el cual la tensión del transformador disminuye o sube, fuera del rango establecido nominalmente (temporizado y de impulso).
- h) Aparta-rayos, se encarga de enviar a tierra un sobrevoltaje que afecte la línea de alimentación, como consecuencia en un disturbio en el sistema de alimentación o una descarga atmosférica.
- i) Bloqueo por maniobra del variador; si el transformador no está habilitado para maniobrar bajo carga, éste debe bloquear la alimentación principal del transformador en el momento de querer hacer una variación en el tap, si no está bien posicionado.
- j) Interruptor desabilitado, dependiendo del tipo de interruptor; eléctricos, mecánicos, neumáticos, etc., que por lo común para este tipo de maniobras es neumático (más no el mejor), y por seguridad del transformador, de una buena maniobra, se debe proteger la existencia de presión mínima de aire que alimenta al interruptor, si es al vacío; verificar las cámaras.

Estos dispositivos de protección actúan en serie, es decir con al menos uno que muestre una anormalidad, el interruptor deberá permanecer abierto o si estuviere cerrado emitir una orden de apertura; exceptuando al aparta-rayos que opera independientemente; en sistemas modernos las protecciones están acopladas a Programadores Lógicos Controlables (PLC), para una mejor protección. Los interruptores que vayan a ser utilizados en transformadores para hornos de arco eléctrico, es recomendable que posean la cualidad de que, en el momento de efectuar una maniobra de apertura contengan un set de resistencias y capacitores, en el cual se disipe la sobrecarga originada por la apertura en el arco, ya que éste trata de permanecer en el momento de

la apertura, y con ello se evitan daños al transformador que en ese momento se encuentra muy fatigado por su tipo de utilización (la inductancia, la resistencia y la capacitancia, entran en resonancia).

Para un interruptor neumático de cuchillas pudiera tener un valor de aproximadamente 30 ohms, en el cierre se encuentra desabilitado y en la apertura se habilita y aterriza la descarga (del transformador).

Hay que recordar que la tensión de alimentación y la tensión residual del transformador tratan de permanecer enlazados en el momento de la apertura (aunque previo a la apertura del interruptor se levantan los electrodos y ya no exista arco eléctrico, pero si la corriente de magnetización); esto conlleva un efecto nocivo al transformador, más aún cuando se hace una apertura del interruptor con carga (presencia de arco), ocasiona daños al aislamiento del transformador y también a los puntos de contacto del interruptor.

Es conveniente, también, que cuando por alguna razón el interruptor se abra con carga, se deba descargar el transformador antes de volverlo a energizar (si es que el interruptor que se tuviera no contenga un sistema de aterrizaje en el momento de la apertura, como se describió anteriormente) ya que pudiera existir tensión remanente en el mismo, y el interruptor vea una diferencia de tensión entre el transformador y la fuente de alimentación (en el recierre), la cual pudiera ser mayor a la que pueda soportar entre sus extremos. Esta apertura abrupta puede ser originada por maniobra no deseada o porque cualquiera de las protecciones que posea le dé apertura; como la de máxima corriente.

2 ARCO ELÉCTRICO

2.1 CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

El seleccionar un horno adecuado es uno de los pilares del éxito en el rendimiento del mismo, ya que de no hacerlo correctamente se reflejará en los excesivos costos de producción y el desgaste innecesario del equipo y del personal de trabajo. Para el cálculo de productividad de un horno de arco eléctrico, se utiliza la siguiente ecuación.

$$\text{Tons de Carga/Hora} = (A) \div (\# \text{ Hornos} * B * C * D * \text{Rend} * \text{Disp})$$

Ecc. No. 6

donde: A = Tons de acero líquido / año

B = # Horas / turno

C = # Turnos / semana

D = # Semanas / año

Rend = Rendimiento deseado

Disp = Disponibilidad requerida

De la ecuación anterior se puede observar que para seleccionar el equipo deseado es un requisito la cantidad de acero que se desee producir al año, así como el tamaño de la colada, las dimensiones del horno (o de los hornos), si se va a operar con la práctica de acero líquido remanente "hot heel", calidad o grado de acero por producir, materiales de carga (chatarra, fierro, esponja, arrabio, etc.),

metalúrgia secundaria (L.F.). La disponibilidad del horno dependerá tanto de la calidad del equipo como del mantenimiento que se proporcione (típicamente del orden del 90 %). Otro concepto importante es el tiempo sin energía durante la colada, cuyo promedio industrial es del orden de 15 minutos.

2.1.1 DISPONIBILIDAD DEL HORNO:

Definido como el porcentaje del tiempo en el cual el horno está en condiciones de trabajar durante un período programado de producción. Este porcentaje varía considerablemente en las instalaciones de hornos eléctricos y depende de las condiciones del equipo y la disponibilidad de energía por parte de la empresa generadora de la misma, en algunos países se tienen períodos de corte de suministro energético en las horas de alta demanda (por ejemplo en nuestro país " Guatemala ", normalmente las horas típicas de mayor demanda en el sistema nacional corresponden entre las 18:00 hrs y las 22:00 hrs, con lo cual en algunas ocasiones se ven en la necesidad de trabajar en el horno con menor potencia). Por lo anterior se puede definir que la disponibilidad promedio varía entre 85 % y 95 % , es aún menor en instalaciones antiguas y con equipo relativamente obsoleto.

2.1.2 TIEMPO DESCONECTADO POR COLADA:

Es el tiempo acumulado durante la colada cuando no se aplica energía eléctrica. El promedio de tiempo desconectado varía entre 15 minutos (que corresponde a tiempos de recargue y vaciado, en acerías de clase mundial) y más de 40 minutos en operaciones más lentas.

Todas las demoras operacionales deben estar incluidas en este concepto.

2.1.3 ENERGÍA ELÉCTRICA -KWH/TON- DE CARGA:

La energía eléctrica aplicada durante la operación del horno eléctrico es solo una componente del total de la energía requerida para producir una tonelada de acero. Esta puede variar significativamente dependiendo de la eficiencia (velocidad, regulación, calibración, balance, etc.) del horno y la aplicación de energía química por medio de oxígeno, quemadores y otros dispositivos de precalentamiento suplementario.

La calidad de la carga (chatarra), así como el porcentaje de unidades de fierro alternas, como hierro de reducción directa o pre-reducidos, también afecta las necesidades energéticas del proceso. Típicamente el consumo de energía eléctrica en la operación de los hornos de arco eléctrico, varía entre 300 KWH/TON a 600 KWH/TON.

Muchas instalaciones de mini-acerías, que utilizan entre 18 a 22 metros cúbicos de oxígeno por tonelada, operan con consumos de energía eléctrica que oscilan entre 380 KWH/TON a 420 KWH/TON.

El uso eficiente de oxígeno tiene un efecto importante en la eficiencia de la aplicación de la energía eléctrica. El uso adecuado de oxígeno puede producir ahorros de energía de hasta 3.5 KWH/TON por cada metro cúbico de oxígeno.

2.2 CÁLCULO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

Para determinar la capacidad de corto circuito en el punto de acoplamiento mutuo, es decir donde se conectan todos los usuarios de la red de la planta de generación de energía eléctrica, es necesario conocer la capacidad equivalente (MVA) de una acería eléctrica que cuente con uno o varios hornos.

Una forma de conocer el horno equivalente es utilizando el llamado " Método Jenkin ", desarrollado por F. Jenkin revisado y publicado por UIE/UNIPEDE (International Union for Electroheat / International Union of Producer and Distributors of Electrical Energy). El método Jenkin puede ser utilizado para calcular el efecto de una acería eléctrica con varios hornos.

Los pasos involucrados en el método Jenkin son:

- 1.- Determinar en una forma por unidad (p.u.), la capacidad de todos los hornos, en base al transformador de mayor capacidad.
- 2.- Calcular los momentos estadísticos (M1, M2 y M3).
- 3.- Calcular el número guía.
- 4.- Calcular el " factor de equivalencia " de la gráfica correspondiente.
- 5.- Calcular el transformador del horno equivalente.
- 6.- Calcular la caída de voltaje de corto circuito.

Como un ejemplo de la aplicación de lo anterior se analizará el siguiente enunciado, aplicando el método Jenkin:

Cuál sería la capacidad equivalente (SHEQ) de una acería eléctrica con ocho hornos eléctricos, con los siguientes transformadores: dos hornos de corriente directa de 80 MVA cada uno,

dos hornos de corriente alterna de 65 MVA cada uno y 4 hornos de refinación secundaria (LF) de 16 MVA cada uno ?

$$1.- SH_{Npu} = SH_n \div SH_m \quad SH_{1pu} = 1 \quad SH_{2pu} = 1 \quad SH_{3pu} = 0.8125$$

$$SH_{4pu} = 0.8125 \quad SH_{5pu} = 0.2 \quad SH_{6pu} = 0.2$$

$$SH_{7pu} = 0.2 \quad SH_{8pu} = 0.2$$

$$2.- M_1 = 0.1638 (1.0 + (SH_{2pu})^2 + (SH_{3pu})^2 + \dots)$$

$$M_2 = 0.0485 (1.0 + (SH_{2pu})^4 + (SH_{3pu})^4 + \dots)$$

$$M_3 = 0.0239 (1.0 + (SH_{2pu})^6 + (SH_{3pu})^6 + \dots)$$

$$M_1 = 0.5701 \quad M_2 = 0.1396 \quad M_3 = 0.0615$$

$$3.- b = (M_3)^2 / (M_2)^3 \quad b = 1.39$$

4.- Para $b = 1.39$ según gráfica $c = 3.15$

$$5.- SHEQ = SH_m * \sqrt{[M_1 + C * \sqrt{M_2}]} \quad SHEQ = 106 \text{ MVA}$$

El valor obtenido del transformador del horno equivalente, se utiliza para determinar la capacidad de corto circuito de la línea de alimentación en el punto de acoplamiento, y de esto calcular la caída de tensión de corto circuito (CVcc) que es una forma de cuantificar el FLICKER.

$$6.- CVcc = (\sqrt{2} * SHEQ) \div (MVA_{cc} + 100) \quad CVcc = 0.0141$$

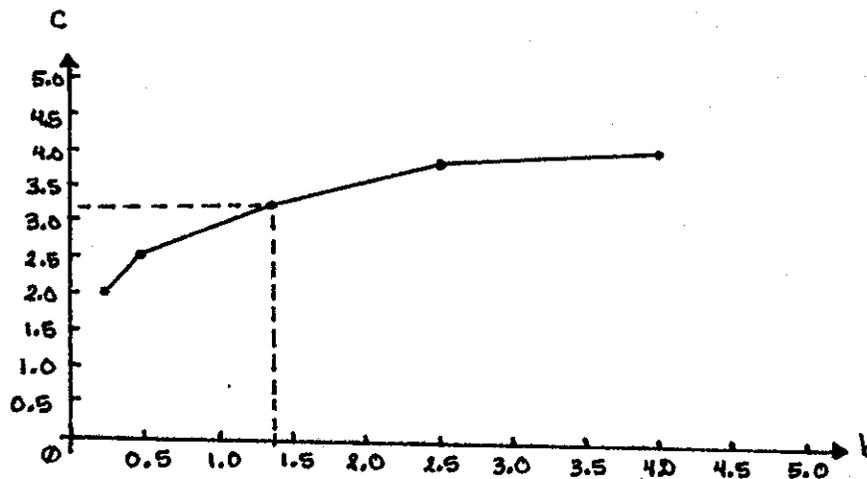


Fig. No. 14

2.3 PRODUCTIVIDAD DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

La evaluación del comportamiento de un horno de arco eléctrico, es decir, su PRODUCTIVIDAD, se relaciona directamente con el nivel de potencia promedio durante la colada, y el tiempo en el que se aplica esta potencia. Esta velocidad de producción se ve afectada por dos factores variables, que son: el uso de energía suplementaria, por medio de lanza de oxígeno y/o quemadores, y por las pérdidas térmicas, que dependen del tipo de rebestimimiento (refractario o paneles enfriados por agua en la bóveda y paredes del horno). Lo anterior se relaciona en base a la siguiente ecuación.

$$P = (Fe * MW * TU) - Fp \quad \text{Ecc. No. 7}$$

dónde: P = toneladas de carga por hora

MW = nivel de potencia promedio

Tu = tiempo de utilización (conectado- vaciado)

Fe = factor de energía (2.196 2.727)

Fp = factor de pérdidas térmicas (2.73 ... 8.18)

La energía específica teórica requerida por el proceso es de 400 KWH/Toneladas de Carga Metálica, que con una eficiencia eléctrica de 90% se traduce en 444.44 KWH/TCM, es decir 2.250 TCM/KWH.

- a) El efecto energético del uso de oxígeno durante la operación del horno es tal que por cada metro cúbico de oxígeno, se reduce la aplicación de energía eléctrica en 3.5 KWH.
- b) El impacto energético de los quemadores en la operación del horno, es tal que por cada metro cúbico de gas, se reduce la aplicación de energía eléctrica en 10 KWH.

Los valores de la constante de energía Fe, utilizada para la generación del grafito de productividad adjunto son:

- 2.250 = sin quemadores ni oxígeno (90 % de eficiencia eléctrica)
- 2.196 = valor mínimo (solo chatarra sin hierro esponja)
- 2.318 = valor típico con lanza de oxígeno y quemadores
- 2.727 = valor máximo de oxígeno y quemadores

Los valores estimados para el factor de pérdidas Fp, dependen del tipo de refractario o sistema de enfriamiento de la bóveda y las paredes, los cuales son:

- 2.73 = con bóveda 100 % de refractario
- 5.45 = con bóveda y paredes enfriadas por agua
- 8.18 = operación con alto nivel de pérdidas

Para que ésta relación de PRODUCTIVIDAD-POTENCIA-TIEMPO, se cumpla es un requisito que el sistema de regulación y control esté ajustado y balanceado para tener potencias iguales por fases. En la siguiente gráfica se muestra una relación de toneladas/hora en función del porcentaje del tiempo utilizado, y la potencia consumida

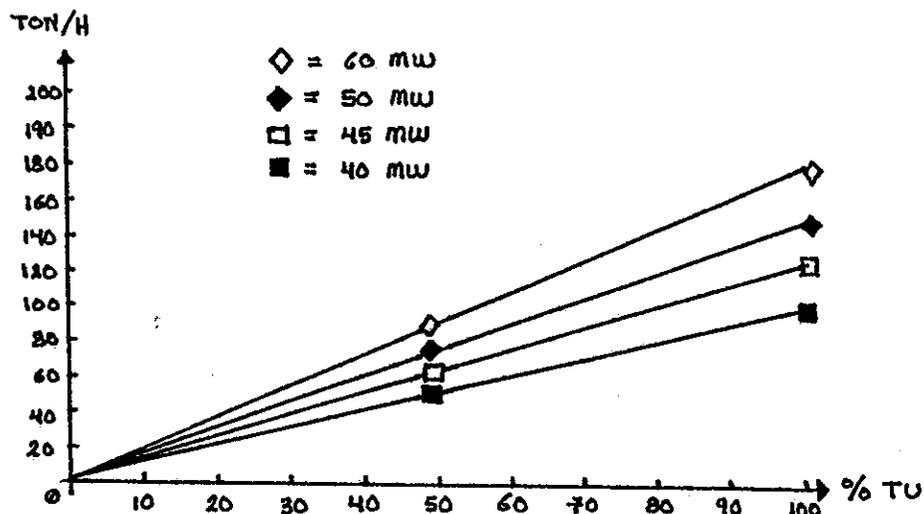


Fig. No. 15

En el siguiente cuadro se mostrará una clasificación de los hornos en función de su productividad, según UCAR CARBÓN MEXICANA, S.A. DE C.V.

HORNOS ELÉCTRICOS DE ALTA PRODUCTIVIDAD

ACERIA	TONS	MVA	MW	KWH/TON	KWH/OXIG	REACTOR	TONS/HORA
A	120	90	75	430	81	si	125
B	120	80	82	390	130	no	130
C	100	80	70	440	130	no	115
D	115	80	77	480	130	si	100
E	115	80	70	500	90	no	100
F	100	80	76	490	90	no	100
G	100	80	67	485	45	no	100
H	125	96	65	410	135	si	105
I	90	75	60	390	135	si	105
J	80	55	40	310	215	no	100
K	140	120	65	460	100	si	100
L	110	96	65	455	90	si	100
M	90	80	50	370	135	si	89
N	115	90	60	430	80	si	110

Cuadro No. 2

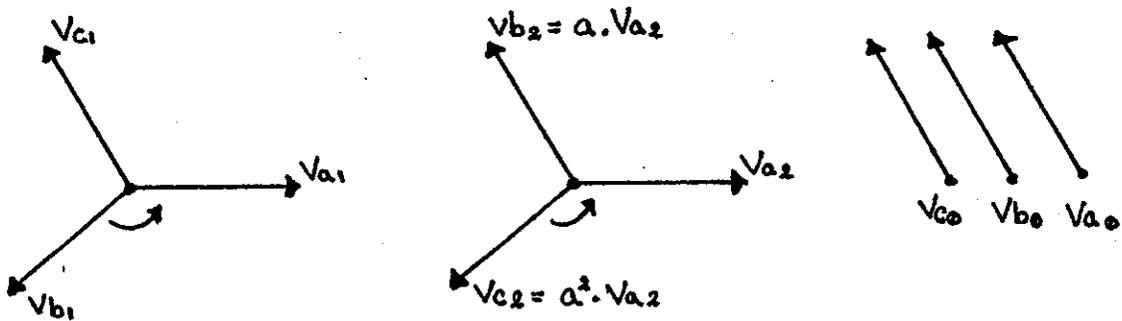
2.4 ANÁLISIS DEL ARCO ELÉCTRICO

En el horno de arco eléctrico se presenta una gran variedad de fenómenos eléctricos, es decir, que en el momento del arco pudiesen existir todas las variantes en cuanto a las componentes simétricas o las componentes asimétricas (que en su mayoría corresponden a éste tipo). Por tal motivo analizaremos ambas, así como las secuencias en

las mismas dependiendo del tipo de conexión en los transformadores que alimentarán la falla (el arco eléctrico).

2.5 COMPONENTES SIMÉTRICAS

El teorema de FORTESCUE dice que "un sistema desequilibrado de n vectores relacionados entre si, pueden descomponerse en n sistemas de vectores equilibrados denominados componentes simétricas de los vectores originales". Estos se agrupan en tres tipos de componentes que son: secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero; las cuales se muestran en la siguiente figura.



Secuencia Positiva

Secuencia Negativa

Secuencia Cero

Fig. No. 16

Como un auxilio matemático se utiliza un operador "a", el cual se define como $1 \angle 120^\circ$, es decir que:

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j 0.866$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j 0.866$$

$$a^3 = 1 \angle 360^\circ = 1.0 + j 0.0$$

Al utilizar el operador anterior se pueden relacionar las fases entre las distintas secuencias, de tal forma que la sumatoria sea igual a cero, y con ello cumplir con el teorema de Fortescue; es decir:

$$V_{b1} = a^2 \cdot V_{a1} , V_{c1} = a \cdot V_{a1} , V_{b2} = a \cdot V_{a2} , V_{c2} = a^2 \cdot V_{a2}$$

planteando las ecuaciones de componentes simétricas quedarán entonces

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{b0} + V_{b1} + V_{b2}$$

$$V_c = V_{c0} + V_{c1} + V_{c2}$$

sustituyendo el operador "a"

$$\begin{array}{l} V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b = V_{a0} + a^2 \cdot V_{a1} + a \cdot V_{a2} \\ V_c = V_{a0} + a \cdot V_{a1} + a^2 \cdot V_{a2} \end{array} \quad \begin{array}{l} |V_a| \\ |V_b| \\ |V_c| \end{array} = \begin{array}{ccc} | 1 & 1 & 1 \\ | 1 & a^2 & a \\ | 1 & a & a^2 \end{array} \cdot \begin{array}{l} |V_{a0}| \\ |V_{a1}| \\ |V_{a2}| \end{array}$$

definiendo como la matriz A los operadores

$$A = \begin{array}{ccc} | 1 & 1 & 1 \\ | 1 & a^2 & a \\ | 1 & a & a^2 \end{array} \quad 1/A = (1/3) \cdot \begin{array}{ccc} | 1 & 1 & 1 \\ | 1 & a & a^2 \\ | 1 & a^2 & a \end{array}$$

finalmente las componentes de secuencia positiva, negativa y cero quedará como:

$$V_{a0} = (1/3) \cdot (V_a + V_b + V_c)$$

$$V_{a1} = (1/3) \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c)$$

$$V_{a2} = (1/3) \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c)$$

Si la suma de los vectores desequilibrados es cero, entonces no hay componentes de secuencia cero. De igual forma las corrientes de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero se definen de la misma forma, es decir se representarán como:

$$I_{a0} = (1/3) \cdot (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = (1/3) \cdot (I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c)$$

$$I_{a2} = (1/3) \cdot (I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c)$$

En un sistema trifásico la suma de las corrientes en las líneas es igual a la corriente en el retorno por el neutro; pero en un sistema en donde la carga está conectada en delta, no tiene retorno y por lo tanto no tiene componente de secuencia cero.

2.5.1 POTENCIA EN COMPONENTES SIMÉTRICAS:

La potencia total transmitida en un circuito trifásico por tres líneas definidas como a, b y c; viene dado por:

$$S = P + jQ = (V_a \cdot I_a^*) + (V_b \cdot I_b^*) + (V_c \cdot I_c^*)$$

$$S = \begin{vmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{vmatrix}^*$$

$$S = (3) \begin{vmatrix} V_{a0} & V_{a1} & V_{a2} \\ | I_{a0} | \\ | I_{a1} | \\ | I_{a2} | \end{vmatrix}^*$$

finalmente $S = (3 \cdot V_0 \cdot I_0^*) + (3 \cdot V_1 \cdot I_1^*) + (3 \cdot V_2 \cdot I_2^*)$

En un horno de arco eléctrico al ocurrir el fallo (arco para fusión del metal), intervienen: la impedancia de la línea de alimentación, la impedancia del transformador de la subestación, la impedancia del transformador del horno; y la resistencia propia del metal.

Por lo tanto, y considerando que la conexión de los transformadores tendrán al menos una delta en la conexión de la carga en el sistema trifásico, preferentemente en el secundario, solamente existirá componentes de secuencia positiva y componentes de secuencia negativa, mas no así las de secuencia cero, ya que ésta necesita un retorno por tierra para que ocurra y en la conexión delta no es factible.

Es conveniente recordar que la impedancia en la secuencia positiva será igual que la impedancia en la secuencia negativa.

2.6 FALLAS ASIMÉTRICAS

La mayor parte de las fallas son asimétricas, éstos se presentan como fallas de línea a tierra (un electrodo haciendo arco con la carcasa de la bóveda); fallas de doble línea a tierra (dos electrodos haciendo arco con la carcasa de la bóveda); fallas de triple línea a tierra (tres electrodos haciendo arco con la carcasa de la bóveda); fallas de línea a línea (dos electrodos haciendo arco entre sí); y fallas entre las tres líneas (tres electrodos haciendo arco entre sí) que es el procedimiento normal en la fusión en hornos de arco eléctrico ya que cuando realiza arco con dos electrodos se genera un fallo de secuencia negativa en el sistema, (con lo cual si se tuviere un

relevador de protección de este tipo, constantemente sacaría del sistema de alimentación al circuito de potencia del horno).

Por lo común; fallos de línea a tierra, doble línea a tierra y triple línea a tierra no se presentan en hornos de arco eléctrico, debido a que toda la carcaza de la bóveda, a pesar de que está aterrizada y que los sistemas de enfriamiento se comunican con mangueras estrictamente de material no conductor (hules).

Las paredes del mismo están recubiertas con material refractario el cual no permite la descarga eléctrica a tierra, concentrándose solamente en las secuencias positivas y negativas; en donde éstas últimas ocurren cuando uno de los tres electrodos no hace contacto con la chatarra debido a que algunas veces quedan vacíos en el interior de la bóveda o cuando el sistema de regulación no está calibrado correctamente y ello hace que unos electrodos respondan a los movimientos más rápidamente que otros.

2.6.1 FALLA DE LÍNEA A LÍNEA (DOS ELECTRODOS QUE HACEN ARCO):

En un fallo de línea a línea en un sistema de potencia, es decir, en el horno de arco eléctrico que dos electrodos hacen arco, las tres líneas de alimentación en las cuales dos de ellas hay un camino directo (corto circuito) y se deben de cumplir con las siguientes condiciones, mostradas en la presente figura:

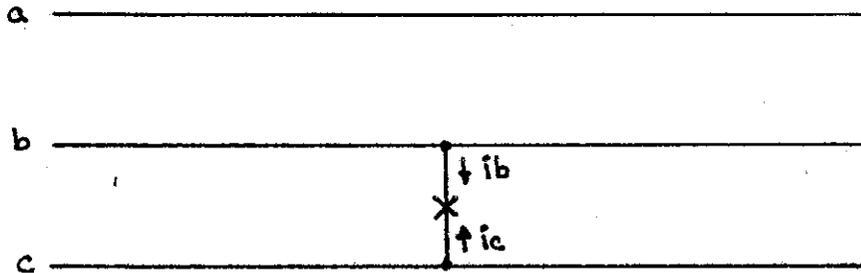


Fig. No. 17

donde: $V_b = V_c$ $I_a = 0$ $I_b = -I_c$

Para este tipo de fallo no existe las componentes de secuencia cero, ya que la conexión no está bajo ninguna circunstancia aterrizada (ni las líneas, ni la conexión secundaria del transformador de potencia que por lo general será delta); con lo cual únicamente quedará las componentes de secuencia positiva y las componentes de secuencia negativa partiendo de ello: $V_{a_1} = V_{a_2}$, finalmente se concluye que

$$I_{a_1} = V_f \div (Z_1 + Z_2) \quad \text{Ecc. No. 8}$$

dónde: I_{a_1} = magnitud de corriente del arco

V_f = tensión de alimentación del fallo

Z_1 = impedancia de secuencia positiva

Z_2 = impedancia de secuencia negativa

La magnitud de Z_1 será igual a la magnitud de Z_2 , y dependerá únicamente de la resistencia de los cables de alimentación hacia los electrodos, los electrodos propiamente (dos en éste caso)

y de la resistencia de la chatarra.

2.6.2 FALLA DE LAS TRES LÍNEAS (TRES ELECTRODOS HACIENDO ARCO):

En un sistema de potencia no es muy común el que se dé este tipo de fallo, pero en un horno de arco eléctrico es lo que se pretende, o sea que los tres electrodos se mantengan haciendo arco mutuamente, tal como se ve en la siguiente figura:

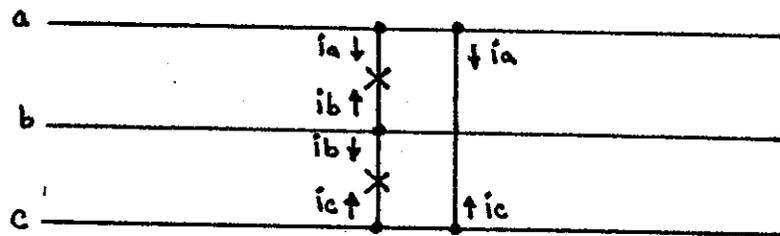


Fig. No. 18

En este tipo de fallo solamente circulan corrientes de secuencia positiva, y la impedancia de falla es igual para todas las fases; con lo cual la magnitud de la corriente por cada fase se determina por:

$$I_{a_1} = V_f \div Z_1 \quad \text{Ecc. No. 9}$$

dónde: I_{a_1} = magnitud de corriente por fase

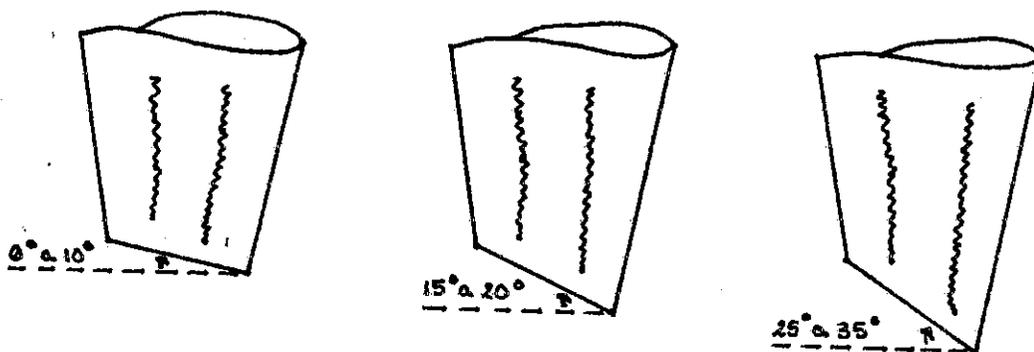
V_f = magnitud de tensión que alimenta

Z_1 = impedancia de secuencia positiva

En esta ocasión la impedancia de secuencia positiva la comprenden: los cableados de alimentación, los tres electrodos y la resistencia propia de la chatarra.

2.7 LONGITUD DEL ARCO ELÉCTRICO

Durante la operación de los hornos de arco eléctrico, se presentan varios tipos de longitudes del arco, en el cual los operadores del horno se basan en datos prácticos de niveles de corriente y la forma de la punta del electrodo (forma de desgaste del mismo), conjuntamente con el factor de potencia y la relación de MW y MVAR, pero con ello no se obtiene un dato exacto de la longitud del arco. Para analizar el comportamiento y balance del horno de arco eléctrico, es necesario conocer, además de los parámetros de KA, MW, MVAR, Cos θ y V; el valor de la longitud del arco (L_a) y graficar ésta en función de la corriente de operación. Una forma de verificar ópticamente la longitud del arco se muestra en la siguiente figura, en la cual se observa el tipo de desgaste en la punta misma del electrodo dependiendo de cuán largo es el arco.



a) Arco Corto

b) Arco Medio

c) Arco Largo

Para calcular la longitud del mismo se deben considerar los siguientes parámetros:

- 1.- Volts/cm = 12 (gradiente de tensión)
- 2.- Caída de tensión (anódica + catódica) = 30 volts

Entonces el voltaje del arco será:

$$V_a = 30 + (12 * L_a) \quad \text{Ecc. No. 10}$$

La potencia en el arco será:

$$P_a = 3 * I * V_a \quad \text{Ecc. No. 11}$$

Sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 11, entonces:

$$P_a = 3 * I * [30 + (12 * L_a)] \quad \text{Ecc. No. 12}$$

Finalmente, despejando la longitud del arco (L_a) quedará:

$$L_a = [P_a \div (36 * I)] - 2.5 \quad \text{Ecc. No. 13}$$

Este valor de (L_a) es en el punto de máxima transferencia de potencia o sea con el $\text{Cos } \theta = 0.707$, para obtener el valor a diferentes factores de potencia, la ecuación general quedará como:

$$L_a = [(\text{Cos } \theta \div 0.707) * (0.85 * P_a \div 36 * I) - 2.5] \quad \text{cms}$$

Ecc. No. 14

2.8 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE EN HAE (FLICKER)

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 de Arco Eléctrico de alta potencia.

Uno de los puntos principales en la operación de los Hornos Eléctricos es que se caracterizan por sus cargas variables, debido a las diferentes etapas del proceso (profundización, fusión, afino); es la fluctuación de voltaje de alimentación (FLICKER). El problema se agudiza con acerías que posean varios hornos eléctricos. 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 voltaje se divide en dos categorías generales: cíclico y no cíclico. El "flicker" cíclico es el efecto de las fluctuaciones de voltaje periódicas como las que pueden ser causadas por la operación (del émbolo) 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" (cíclicos y no cíclicos).

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 en la planta de generación de energía eléctrica.

La aplicación de circuitos compensadores de potencia reactiva (capacitores o condensadores síncronos) proporcionan la corriente reactiva requerida por el horno durante estos periodos extremos para disminuir el flicker. El "flicker" se cuantifica en función de la variación del valor eficaz del voltaje (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 dividido por el valor del voltaje fundamental. La forma práctica de medir el "Flicker" es dividir el cambio de voltaje por el voltaje nominal.

$$\text{FLICKER} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \div V_n = (Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}) \div S_{\text{cc}} \quad \text{Ecc. No. 13}$$

dónde: V_{max} = voltaje RMS máximo

V_{min} = voltaje RMS mínimo

V_n = voltaje nominal

Q_{max} = potencia reactiva máxima

Q_{min} = potencia reactiva mínima

S_{cc} = MVA de corto circuito en el acoplamiento

$$A = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \div (2 * \sqrt{2}) \quad \text{Ecc. No. 14}$$

donde: A = voltaje RMS de la onda

$$B = (V_{\text{max}} + V_{\text{min}}) \div (2 * \sqrt{2}) \quad \text{Ecc. No. 15}$$

donde: B = voltaje RMS promedio

$$\% \text{ Flicker} = (A \div B) * 100 = [(V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \div (V_{\text{max}} + V_{\text{min}})] * 100$$

Ecc. No. 16

El análisis de corriente alterna determina que los MVA de corto circuito en el punto de acoplamiento mutuo deben ser al menos mayor a 100 veces a los MVA equivalente de los hornos (si hubieran mas de 2).

El análisis de corriente directa determina que los MVA de corto circuito en el punto de acoplamiento mutuo deben ser al menos mayor a 55 veces a los MVA equivalentes de los hornos (si hubieran mas de 2). En la siguiente gráfica veremos la relación de la caída de voltaje en corto circuito (CV_{cc}) en el punto de conexión conjunta o múltiple como una función de la capacidad equivalente ($Sheq$) para determinar si una instalación de horno de arco eléctrico causa problemas de fluctuación de voltaje (FLICKER) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CV_{cc} = (\sqrt{2} * Sheq) \div MVA_{cc} \quad \text{Ecc. No. 17}$$

dónde: CV_{cc} = caída de voltaje por corto circuito

$Sheq$ = MVA equivalente de los hornos

MVA_{cc} = MVA de corto circuito de los hornos

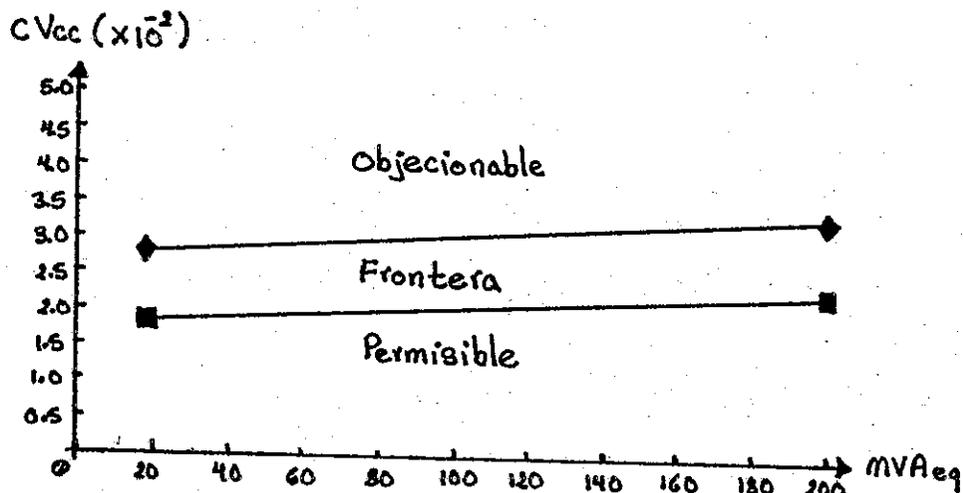


Fig. No. 20

Pruebas de laboratorio han determinado que el ojo humano es muy sensitivo a frecuencias 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 Flicker aceptable. 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 del límite.

2.9 OPTIMIZACIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO

La filosofía de operación de los hornos de arco eléctrico modernos es la fusión rápida, que implica: ARCOS LARGOS, escoria espumosa, máxima potencia en el arco (un solo tap durante toda la colada), uso de energía suplementaria (oxígeno y quemadores) y metalurgia secundaria (Horno-Olla).

Cada uno de los conceptos anteriores tiene su peso específico en la práctica de la fusión rápida, tanto cuantitativa como cualitativamente. No siendo así, en el caso de los arcos largos, que es un tanto experimental; con la necesidad de efectuar evaluaciones en base a prueba y error, y así determinar la longitud de arco óptimo para cada instalación de horno eléctrico en particular.

La potencia activa en Megawatts, que es la que se desarrolla en la resistencia total del circuito del horno al circular una corriente promedio por fase de I Kiloamperios, se define como $3 \cdot I^2 \cdot R$, siendo R la resistencia promedio de las tres fases. En el punto de cruce de las potencias activa y reactiva (MW = MVar) se tiene un factor de potencia de 0.7071. Este es el punto de máxima transferencia de potencia en el circuito total del Horno Eléctrico.

La resistencia total (R) está formado por la resistencia del circuito (Rc) más la del arco (Ra), en donde se desarrollan las pérdidas del circuito ($3 \cdot I^2 \cdot Rc$) y la potencia en el arco ($3 \cdot I^2 \cdot Ra$) respectivamente. En el promedio de los hornos eléctricos, la potencia del arco es del orden de 85 % de la potencia activa (que se mide en el circuito primario del transformador del Horno).

La máxima potencia en el arco se tiene con un factor de potencia mayor a 0.7071, en donde la potencia activa, medida en el circuito primario del transformador es mayor que la potencia reactiva, con ello las pérdidas eléctricas disminuyen al disminuir la corriente de operación, que a su vez incrementan la longitud del arco. El punto óptimo de operación del Horno Eléctrico se obtiene con arcos largos, con un rango de corriente tal que se tenga el mayor daño a las paredes de refractario o paneles enfriados por agua. El daño a las paredes (Rf) se puede calcular a través de la siguiente ecuación:

$$Rf = (E^3 * F) \div (Xop * a^2) \quad \text{Ecc. No. 18}$$

donde:

R_f = daño a las paredes (VW/cm^2)

$F = 0.1708 * [\text{Cos}^2 (\theta) * \text{Sen} (\theta) - 2 * \text{Sen}^2 (\theta) * \text{Cos} (\theta) \div \text{Tan} (\alpha) + \text{Sen}^3 (\theta) \div \text{Tan}^2 (\alpha)]$

E = voltaje secundario entre fases en operación, desde el primario

a = distancia del arco (punta del electrodo) a la pared (cms)

θ = ángulo de fase en el primario del transformador (grados)

α = ángulo de fase en el primario del transformador cuando el electrodo es cortocircuitado en el baño plano (grados)

X_{op} = reactancia de operación por fase, medida en el primario durante la etapa de baño plano ($j \Omega$)

generalmente $X_{op} = (1.05 \dots 1.25) * X_{cc}$

dónde:

X_{cc} = reactancia senoidal con electrodos en corto circuito en el baño plano ($j \Omega$)

Al relacionar las curvas de potencia y parámetros eléctricos con las formas de punta de los electrodos se encuentra que para los distintos niveles de corriente de operación se tiene en forma relativa que a mayor corriente es el arco corto, con un factor de potencia igual a 0.7071; a mediana corriente es arco medio, con un factor de potencia mayor a 0.7071 (0.747); y a menor corriente es arco largo, con un factor de potencia mayor a 0.7071 (0.848).

Es interesante analizar la curva de daño a las paredes (R_f), durante la etapa de fusión con arco largo, que de acuerdo con su efecto, se convierte con el índice de daño a la chatarra (CHF), ya que en esta etapa las paredes del horno están cubiertas por una

pantalla de chatarra. Esta energía por unidad de superficie (de chatarra.) hace que se tenga una mayor velocidad de fusión, razón por la cual el criterio para OPTIMIZAR la operación del horno de arco eléctrico sea con arco largo, en el punto de máximo daño a la pared (chatarra).

En este punto óptimo de proceso, es decir cuando teórica y prácticamente el daño a la pared (chatarra) tiene su valor máximo, los distintos parámetros del horno se observarán como:

- 1.- Mayor longitud de arco.
- 2.- Mayor factor de potencia.
- 3.- Menor corriente por fase.
- 4.- Menores pérdidas eléctricas.
- 5.- Menor consumo de energía eléctrica.
- 6.- Menor consumo de electrodos.
- 7.- Mayor productividad.

Es muy importante que conforme avance la fusión y se llegue a la etapa de baño plano o refinación, se tenga un arco cubierto por una capa de Escoria Espumosa para que la transferencia de calor al metal sea eficiente, sin dañar las paredes del Horno.

2.10 OPTIMIZACIÓN DE OPERACIÓN CON ARCO EN AC

La influencia de factores como la escoria espumosa hirviente, el punto de control de electrodos y la composición de la chatarra son examinadores de un excesivo alto poder en una fusión de arco, para sus efectos en el consumo de energía, productividad y costos de producción

El punto de trabajo del sistema de control de electrodos es oscilatorio, demostrando que una variación de impedancias del 10 % más alto que el promedio estandard, origina una reducción del nivel de corriente, aumenta la productividad, disminuye el consumo de energía y el costo del proceso.

El costo del acero producido con arco eléctrico es principalmente determinado por el costo de energía consumida, por lo cual uno de los factores que se persiguen es disminuir al mínimo las pérdidas en la fusión por arco; analizando los equipos y accesorios alrededor del Horno para balancear el consumo de energía. El daño ocasionado al refractario es un buen visor de la eficiencia con la cual se está operando el horno, ya que se observa en base el desgaste sufrido por él mismo, el nivel de transferencia de energía y a la vez el nivel de transferencia de calor hacia el baño de acero líquido.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por " Thyssen Stahl AG ", del 07 al 29 de agosto de 1990, realizadas a un transformador 135-t/96 MVA, tomando 93 puntos de prueba en los metales a fundir:

REGULACIÓN DE ELECTRODO		DATOS ELÉCTRICOS			CONSUMO DE ELECTRODOS	
Z/Zo	Impedancia mΩ	KA	Volts	MW (arco)	Calor por Electrodo	
1.00	6.5	64.1	350.7	62.5	11.30	
1.05	6.8	62.6	354.9	62.0	12.05	
1.10	7.2	59.8	363.3	61.0	13.30	
1.15	7.5	57.9	372.0	59.3	13.90	

Cuadro No. 3

2.10.1 INFLUENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LA ESCORIA ESPUMOSA:

Ciertas características del arco pueden describir la condición de la escoria que existe a su alrededor, usando equipo de medición previo a describir el arco de voltaje reactivo, se calcula la potencia reactiva de arco, la cual se usa para mostrar indirectamente la condición de la escoria. En la siguiente figura se muestra la relación entre las características de la escoria obtenida durante una larga observación de operación del arco sobre el metal. Las diferencias se muestran entre un arco cubierto con escoria viscosa (valuada a menor de 100 volts de arco reactivo) de una larga masa fuerte y salpicante; una escoria fluida (medida a mayor de 100 Volts de arco reactivo).

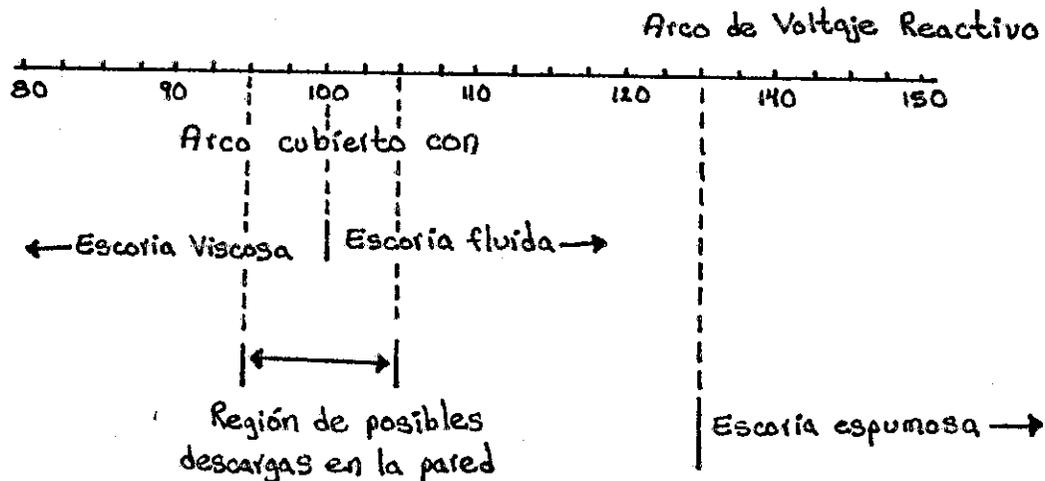


Fig. No. 21

En la siguiente figura se muestra que al agregarle oxígeno (3.5 KWH/mt³) y cierta energía eléctrica, sometido a una carga

completa es una función del tipo de escoria para varios puntos de la operación en la regulación.

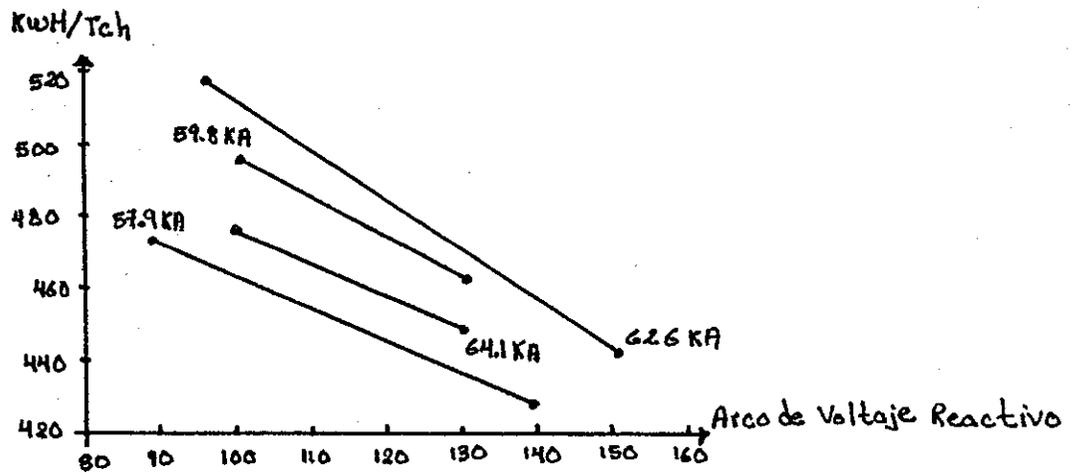


Fig. No. 22

La energía consumida decrece con el incremento de la actividad hirviente en el punto de operación esencialmente con una potencia constante, resultando en un aumento de la productividad, definido como una porción de la masa completa disuelta por minuto, tal como se ve en la siguiente figura:

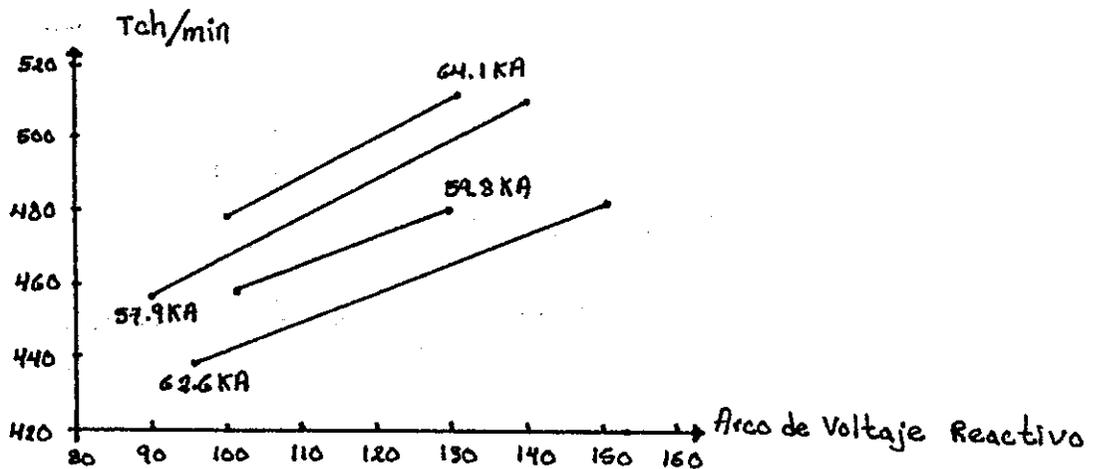


Fig. No. 23

Cuando el arco es completamente cubierto con una gran cantidad de escoria viscosa (valuado de 80 a 100 Volts de voltaje de arco reactivo) la transferencia de energía toma lugar en un volumen mediano sobre el electrodo. Para una buena operación del arco, no es necesario que esté completamente cubierto con una gran masa de escoria espumosa, sino, solamente lo necesario, teniendo el cuidado de no tener insuficiente porque se varían los parámetros.

En la figura siguiente se muestra la relación existente entre las temperaturas de la superficie cercanas al arco y las áreas de las paredes de la escoria hirviente. Con este comportamiento la diferencia de temperatura sobre la superficie del baño son significativamente reducidas y ofrecen una homogeneidad favorable.

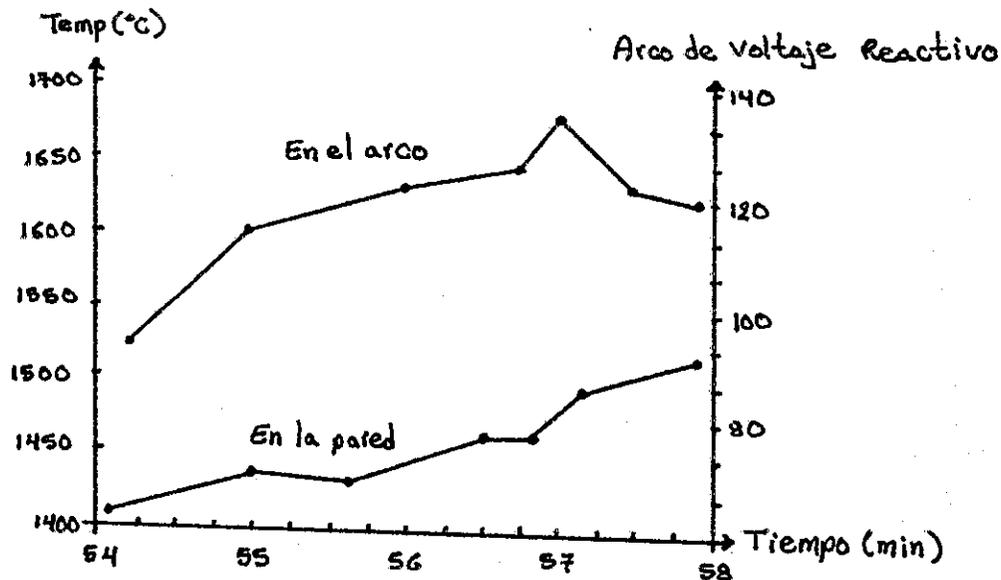


Fig. No. 24

2.10.2 INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DE LOS METALES:

En la realización de arco, la proporción de los metales varía considerablemente a causa de la condición misma de ellos, ya que en orden de optimizar la energía interna, es necesario considerar la influencia de varios grupos clasificados sobre el consumo propio y su productividad. Por ello, la impedancia en el punto de control ($Z / Z_0 = 1.15$) es muy utilizada. Para evitar los efectos de las variaciones en la condición de la escoria, solamente basta con calentarla en la parte inferior con valores entre 100 y 110 Volts de arco reactivo. En la figura siguiente se muestra que con un incremento en la porción de hierro, armazones o bultos del mismo, representa un considerable incremento en el consumo de energía con un decrecimiento en la productividad, así mismo un incremento en el consumo de electrodos.

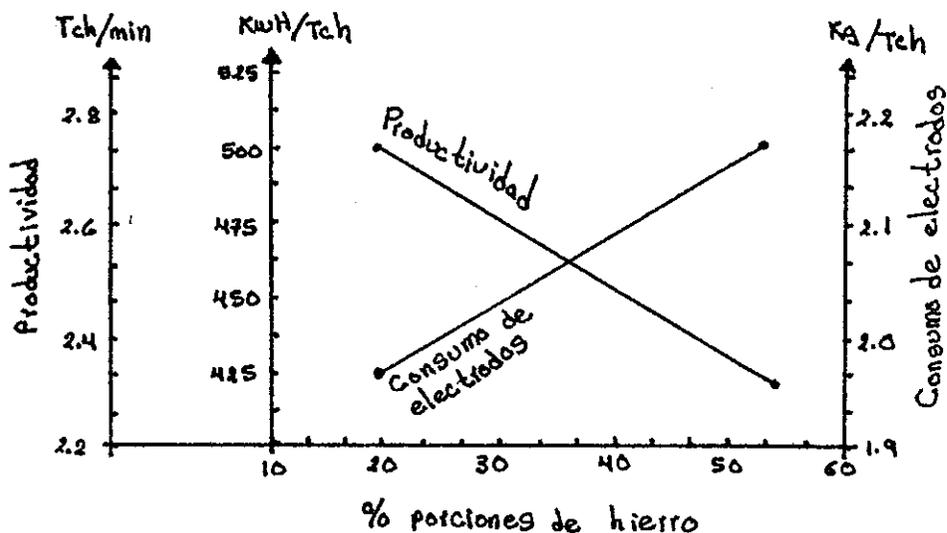


Fig. No. 25

2.10.3 INFLUENCIA DE LA IMPEDANCIA EN EL PUNTO DE CONTROL Y LA REGULACIÓN DEL ELECTRODO:

Un tercer parámetro que se puede variar es la resistencia del arco con un set de impedancias en el control de posición de los electrodos. Previamente se ha mencionado que se puede mostrar variaciones de energía entre el arco y trozos del metal, cuando la longitud del arco y la corriente son modificados. La vieja práctica de fusión con arcos de baja y alta corriente se ha reemplazado por la tecnología de escoria espumosa con mucha voluminosidad de operación de arco largo, bajas corrientes de arco, resultando en bajo consumo de electrodos. Usando el comportamiento hirviente de la escoria y manteniendo el control de la composición de los metales, el punto de trabajo de la regulación son favorables para el consumo de energía y la productividad. En el cuadro No. 3 mostrado anteriormente se pueden observar los puntos de operación en 4 pasos con una impedancia media valuada en $Z \div Z_0 = 1.0$ con 64.1 KA de corriente y un 15 % mas alto con una corriente relativamente baja de 57.9 KA.

Realizando estas pruebas con una adecuada temperatura en la escoria con una muestra estructural del 40 % con base en hierros, se manifiestan los resultados en las siguientes figuras. En la figura (26a) el bajo consumo de energía con una impedancia de $Z \div Z_0 = 1.1$, provoca un alargamiento de arco. La eficiencia eléctrica de el arco calculada para un radio de potencia del arco, a la potencia de fusión, es también un máximo para éste punto de operación, tal como se muestra en la figura (26b), con una impedancia del punto de control 10 % por encima del punto medio.

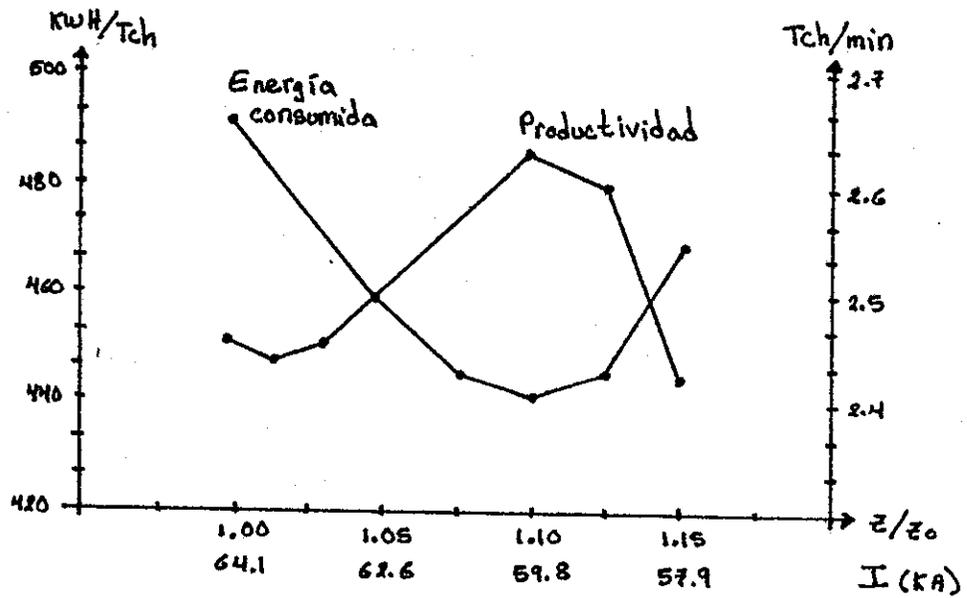


Fig. No. 26a

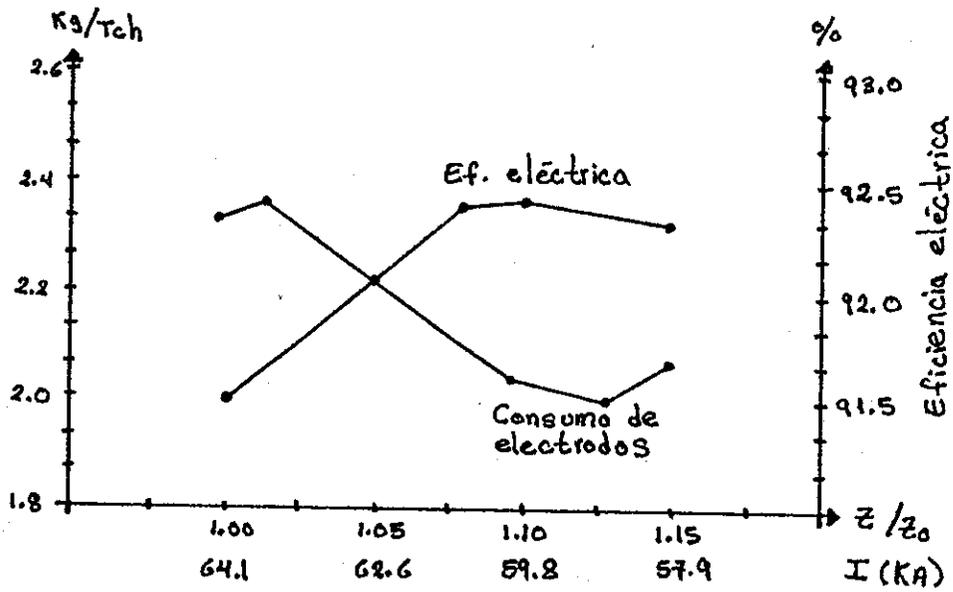


Fig. No. 26b

2.10.4 CONSUMO DE ELECTRODOS:

El consumo alcanzado de electrodos durante el proceso, tanto de rompimiento como de afino en la fusión, se debe a la utilización de varios puntos de control de impedancia, de los cuales dependen el tipo de consumo relacionado con las pérdidas de calentamiento I^2 . La forma de erosionar la punta del electrodo varía básicamente con la corriente; en esta condición los electrodos frecuentemente son anuentes a tener rupturas y ser dañados (por materiales sólidos) por la pérdida de rigidez en las regiones más calientes del mismo.

El arco formado en una región no deseada del electrodo también puede provocar rupturas, debido a los materiales lanzados en contra de la pared de fusión o contra los mismos electrodos cuando por alguna razón se provoque una reacción interna en el horno, es decir una explosión.

2.10.5 ANÁLISIS DE COSTO:

Al sumar los efectos de los varios puntos de fusión; como el costo de energía (incluyendo el oxígeno), electrodos de grafito y los trabajos auxiliares que conlleva la fusión; se ve claramente que el mayor costo proviene del consumo de energía, tal como se ve en la figura No. 27. En la figura No. 28 se observa el costo en función del control de la escoria, basado en el valor de la relación de impedancia, que como ya se ha mencionado anteriormente, es básico para reducir al mínimo las pérdidas eléctricas, en cuanto a fusión y puntos de operación y/o control se refiere.

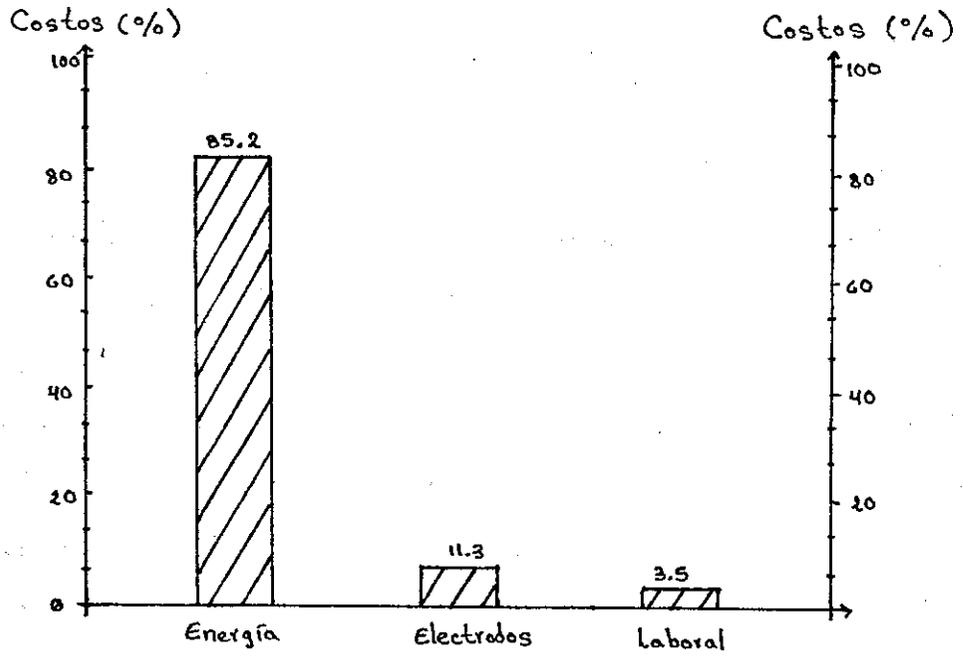


Fig. No. 27

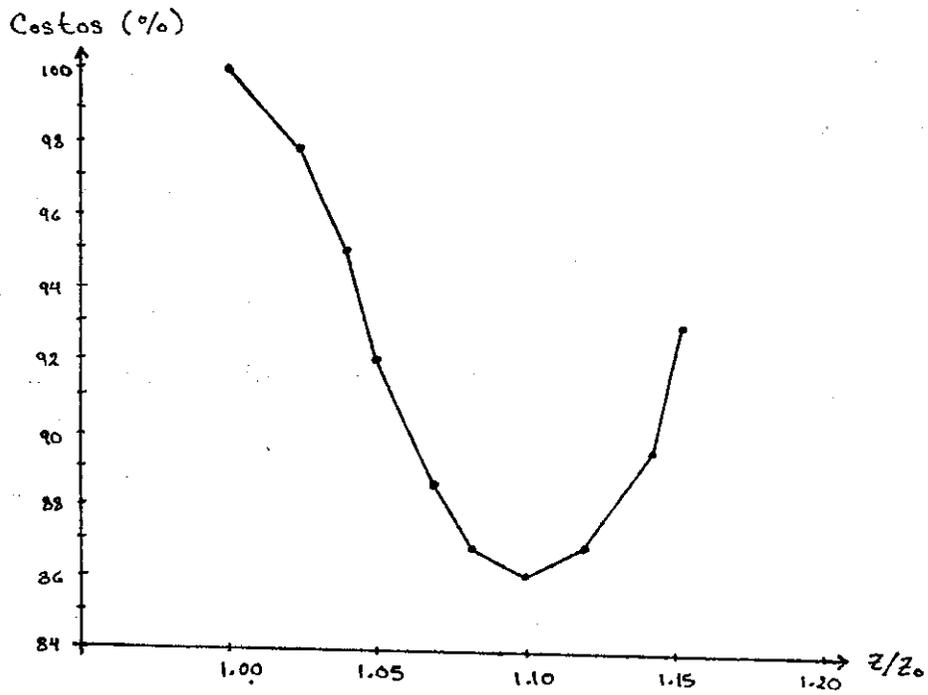


Fig. No. 28

2.11 COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE UN ARCO EN AC Y UN ARCO EN DC

2.11.1 BASES DE COMPARACIÓN:

El propósito de esto es hacer una comparación de la importancia técnica y características de la fusión en hornos de arco en AC y hornos de arco en DC. La fusión en AC tradicionalmente utiliza tres electrodos, mientras que la fusión en DC utiliza sólo un electrodo. Por lo general, los hornos de fusión por arco poseen rangos que oscilan de 50 a 120 toneladas, y entre los puntos a discutir estarán la eficiencia eléctrica y térmica, el consumo de energía, el consumo de electrodos, la fluctuación de voltaje, el consumo de potencia, campos magnéticos.

2.11.2 EFICIENCIA ELÉCTRICA:

La fusión de arco, ya sea en AC o en DC, poseen una alta eficiencia eléctrica que está por encima del 90 %. Es por lo tanto, fácil, hacer una comparación de sus parámetros, ya que involucran pérdidas pequeñas en la transmisión de potencia a la fusión. Para una fusión en AC las componentes principales de pérdidas ocurren en el transformador, cables, barras de potencia y partes del electrodo inutilizados. También hay pérdidas causadas por las corrientes de "Eddy" alrededor de la estructura metálica.

Para la fusión en DC son similares y adicionalmente hay pérdidas en el rectificador y por las altas corrientes, en el reactor. La potencia desarrollada en la parte caliente del electrodo y en la conexión a tierra (aterrizaje) del ánodo, son consideradas como potencia de entrada de fusión y no como pérdidas

2.11.2.1 FUSIÓN EN AC:

Al hacer varios cortos circuitos de prueba con fusiones en AC utilizando arcos alargados, más voltaje y menos amperaje. La resistencia de arco típicamente es del rango de 6 a 7 mΩ. Concurrentemente se han tenido tendencias a construir con bastante cobre (o aluminio) mezclado en proporciones, los brazos sujetadores de electrodos, esto ha reducido notablemente las pérdidas en las barras de potencia directamente del horno.

2.11.2.2 FUSIÓN EN DC:

Para una corriente suministrada, típicamente de 100 KA, son utilizados dos transformadores, ordenados de tal forma que se le coloquen a cada uno, uno o más rectificadores de pulsos, para tener la energía disponible en corriente directa. La corriente en DC es tres veces más tempestuosa que la corriente en una sola fase en AC, esto quiere decir que el límite de pérdidas resistivas en el cable, de niveles en AC, viene totalmente definido en la sección transversal del cable de cobre, e igualmente similares a la sumatoria de las secciones de las tres fases.

Por ejemplo; en la fusión en AC se necesitan 4 cables por fase, mientras que en DC se requieren casi 12 cables del mismo cable. Por ello esto no es usual de utilizarlo debido a las altas pérdidas en el cable al utilizar fusión en DC. La longitud total del recorrido de la barra de potencia es doblemente menor al recorrido de una sola fase en AC; si la densidad de corriente es similar para ambos (AC y DC), generalmente las pérdidas más altas son en DC, alrededor de un 30 a un 50 %.

En relación al límite de espacio requerido por los reactores en DC, son solicitados de tal forma que sean lo más compactos posibles; las pérdidas de resistencia total están en el rango de 100 a 200 KW. El rectificador presenta una caída de tensión de 2.2 Volts, independientemente del voltaje o la corriente de arco. En el siguiente cuadro se hará una comparación de las pérdidas de potencia tanto en AC como en DC.

Comparación de las pérdidas eléctricas en MW

	AC	DC
Transformadores	0.4 - 0.7	0.4 - 0.7
Cables	0.5	0.5 - 0.6
Barra de Potencia	0.6	0.7 - 0.9
Reactores	0.0	0.15
Rectificadores	0.0	0.22
Corrientes de Eddy	0.2	0.0
Punto de contacto de electrodos	0.55	1.0
TOTAL	2.25 - 2.55	2.97 - 3.57

Cuadro No. 4

En el cuadro anterior se muestran resultados, los cuales presentan pérdidas en un 4 % en el caso de fusión en AC y en un 5.5 % en el caso de fusión en DC. La diferencia más grande no es en la pérdida de energía, sino en lo dificultoso que es detectarlo

2.11.3 EFICIENCIA TÉRMICA:

Una vez más, la eficiencia térmica de la fusión de arco es totalmente alto, por encima del 50 %, y es más instructivo a

examinar las pérdidas por calentamiento. Las componentes principales de las pérdidas por calentamiento son: los excesivos gases, el enfriamiento con agua y la escoria. De éstos, solamente la pérdida por enfriamiento con agua puede razonablemente esperarse que difiera. Esto es frecuentemente para arcos en DC transfiriendo más calor a la superficie del ánodo que en el arco en AC; esto es verdadero pero desafortunadamente irrelevante.

Al comparar las fusiones no se pueden aislar los arcos, por ejemplo: durante el proceso de derretido de los metales, los arcos son cubiertos con trozos de metal que salpican y la eficiencia térmica es por lo tanto completa, es decir del 100 % y solamente la fuga de gases son los que permiten bajar la temperatura en éste momento; representando las únicas pérdidas. Al hacer una comparación ordenada, primeramente se examinan los periodos de calentamiento donde pueden haber diferencias calculadas. Las pérdidas de calentamiento por enfriamiento con agua en las paredes y el techo, son fuertemente dependientes de como se realiza la fusión, particularmente a lo que se refiere a la escoria.

Usando un derretimiento de metales con escoria regenerada conteniendo carbón e introduciéndole lanzas con oxígeno, es posible obtener una escoria capaz de cubrir el arco largo después de la perforación en fusión con AC. Al derretirse los metales hacia los puntos exteriores, de los tres puntos calientes (los electrodos en las tres fases) las paredes se ven salpicadas con escoria que a su vez salpican el arco, pero no agotando las

flamas de los arcos cubiertos. Antes de la llegada de esta práctica, mucha potencia era transferida al enfriamiento con agua al punto caliente, mientras los restantes metales eran derretidos. El resultado de la introducción de la práctica de la escoria en las pérdidas de calor, en las tres áreas de calor, son bastante reducidas en la fusión de AC. Hacia el final de la parte caliente, con arcos que son cubiertos con escoria espumosa, no son razón de esperar alguna diferencia en la transferencia de calor al enfriamiento con agua, entre fusiones de AC y DC. La transferencia de calor es denominada como una radiación y es dependiente de las emisiones térmicas de los metales y la escoria.

Para la fusión en DC son asumidos que los arreglos de las barras de potencia son similares a las anteriores designado como la eliminación de la deflexión de arco y la generación de puntos calientes. Sin embargo la longitud de arco en éste caso requiere la producción de una escoria profundizada a evitar una pérdida de radiación de arco en el enfriamiento con agua.

En la siguiente figura se pueden comparar los periodos típicos de 60 minutos de calentamiento, aunque la duración de éstos suelen aumentar hasta un máximo de 90 minutos. Esto permite una pérdida extra de 200 KW por metro cuadrado de pared de chatarra. Para una área de 4 metros cuadrados por cada uno de los tres puntos calientes, consume una pérdida de energía extra de 600 KWH por calentamiento o sea 6 KWH/TON.

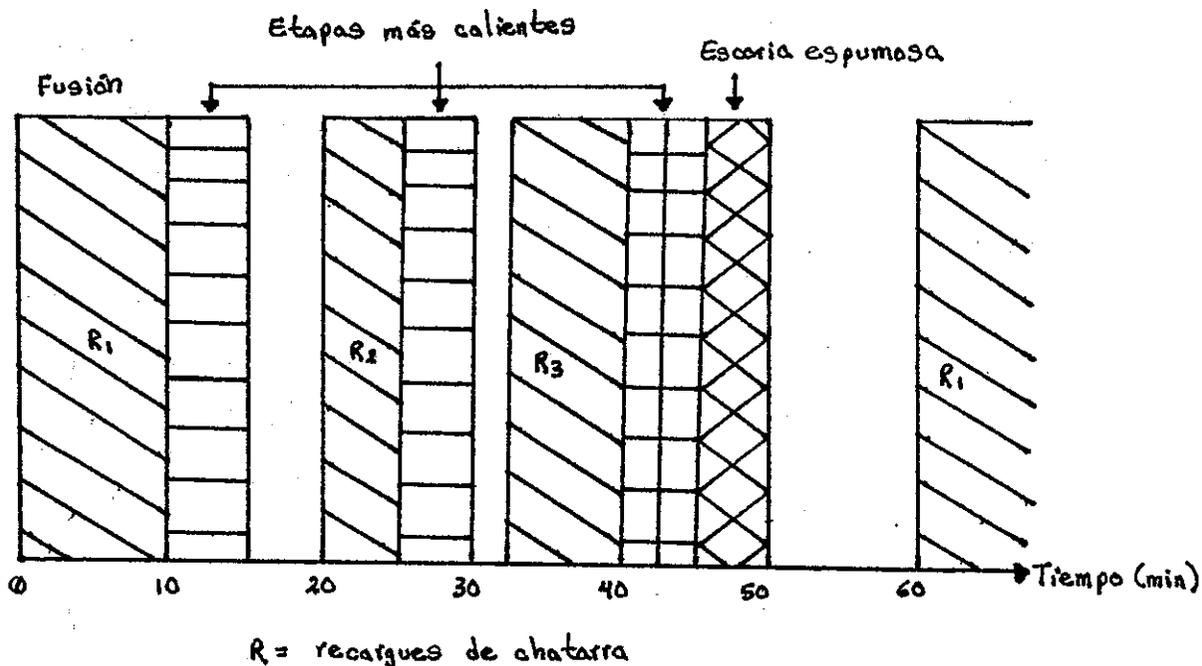


Fig. No. 29

2.11.4 COMPARACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA:

La comparación del consumo de energía es complicado, debido a las diferentes prácticas utilizadas, particularmente al cargar materiales que no son conductores de electricidad. Una comparación de las diferentes prácticas requiere estandarizar el uso y ordenar los cálculos de consumo de energía en las mismas bases de medición es decir cuantificarlo en KWH/TON, tal como se muestra en la siguiente cuadro:

Oxígeno = 4 KWH por metro cúbico.
 Aceite o Gas = 10.5 KWH por litro o metro cúbico.
 Precalentamiento = 25 a 40 KWH/TON, dependiendo de la eficiencia.

Cuadro No. 5

El oxígeno reacciona con el carbón, generando principalmente monóxido de carbón (CO), el quemador con gas también hace necesario la utilización de oxígeno. El total de incerteza estimado representa alrededor de (+/-) 15 KWH / TON. para la fusión. En la figura No. 30 se muestra la comparación del consumo total de energía para varias fusiones en AC y DC, agrupándolos en hornos "pequeños, medianos y grandes". La diferencia en el consumo total de energía es de aproximadamente 10 KWH / TON.

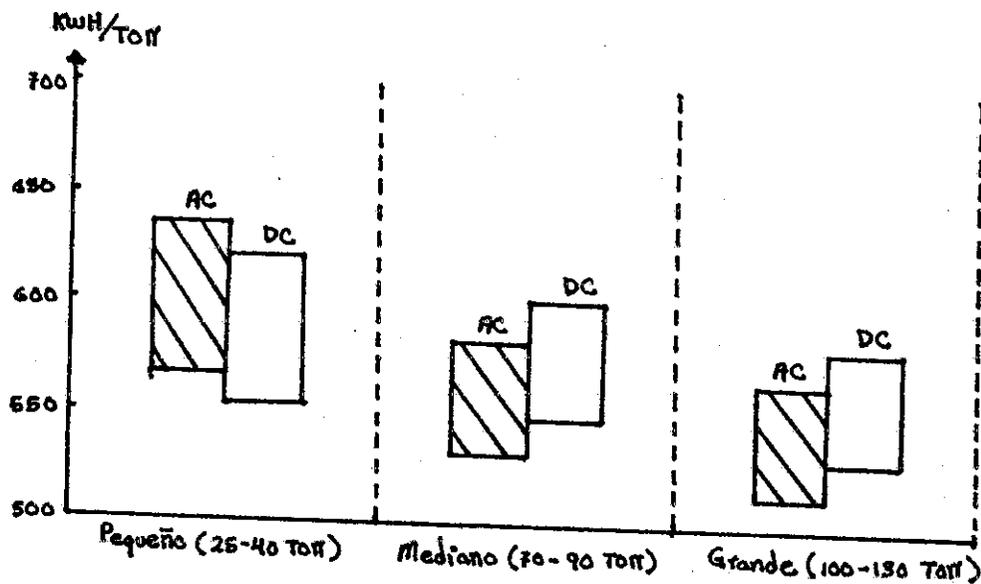


Fig. No. 30

2.11.5 CONSUMO DE ELECTRODOS:

* Punta del electrodo:

Algunas medidas en hornos de AC y hornos de DC, tal como se muestra en la figura No. 31, en donde el índice de pérdidas en la punta expresado en KG/Hora, es puntuado, dependiendo de la corriente, esto demuestra que:

- 1.- El índice de consumo es proporcional a la magnitud de la corriente.
- 2.- El índice en AC y DC caen sobre la misma curva.

Esto no quiere decir que el consumo en la punta del electrodo en Kg/Tonelada sea la misma, los dos tipos de fusiones usan diferentes combinaciones de voltajes de arco y corrientes, para llevar a cabo la misma potencia. Por ejemplo, si consideramos un promedio de 60 MW en la potencia del arco, un Horno en DC utiliza 105 KA con 571 Voltios de arco y un electrodo de 700 mm. La fusión en AC utiliza en los tres arcos (trifásico) 56 KA y 364 Voltios de arco con electrodos de 600 mm. Para un consumo eléctrico de 460 KWH/TON. de potencia consumido en un mismo tiempo de 46 minutos para un horno de 100 toneladas, reflejan un consumo en la punta del electrodo de:

DC	AC
0.845 Kg/Ton	0.721 Kg/Ton

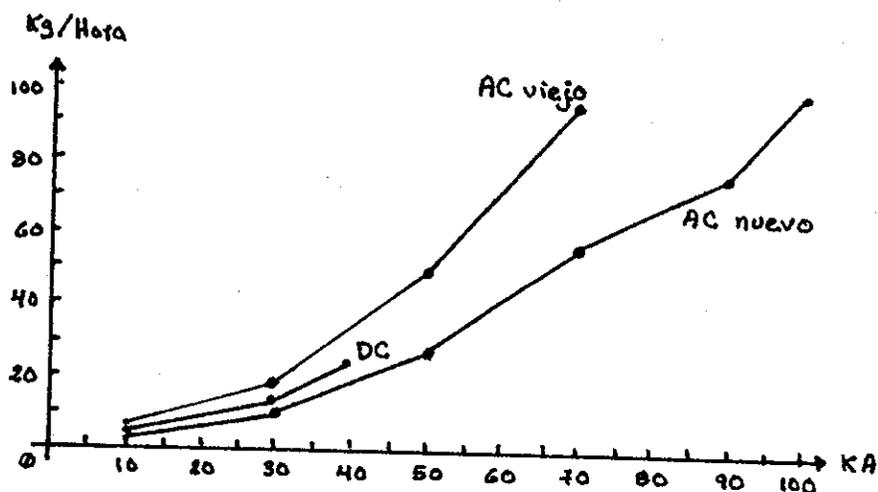


Fig. No. 31

* Consumo lateral:

Acorde a las mediciones del índice de oxidación, Kg/hm², es el mismo, sin importar el diámetro de los electrodos o el tipo de horno. Abajo de la zona de enfriamiento con agua, el índice de desgaste es de 6.0 Kg/hm². Por lo tanto para hornos de 100 toneladas fundiendo durante 65 minutos, recargue tras recargue, muestra el siguiente consumo:

DC	AC
0.398 Kg/Ton	0.919 Kg/Ton

* Rupturas de electrodos:

Esta es una ventaja obvia en la fusión con hornos en DC, las fluctuaciones en la fuerza magnética sobre los electrodos es mucho menor que en los de AC. Los electrodos generalmente vibran mucho menor y la posibilidad de resonancia se excluye. Por lo común para fusiones largas, con una o dos rupturas de electrodos por mes, el consumo es de aproximadamente de 1 a 2 %. En el siguiente cuadro se muestra el consumo total de los electrodos.

	100 TONELADAS DE FUSIÓN		Kg/ton
	AC	DC	
Punta del electrodo	0.721	0.845	-----
Alrededor del electrodo	0.919	0.398	-----
Rupturas de electrodos	0.020	0.010	-----
Total	1.660	1.250	0.410

2.11.6 FLICKER:

El flicker se refiere a las variaciones visibles en la

iluminación causadas por las fluctuaciones de voltaje del sistema de energía. Para tener una mejor percepción del flicker es necesario tomar lecturas y aceptar los límites establecidos, realizados por personal técnico de las industrias de suministro energético.

La sensibilidad humana a las fluctuaciones de la luz, es muy dependiente de la frecuencia, el rango es de cerca de 1 Hz por arriba de 25 Hz, con un pico en los rangos de 8.8 a 10 Hz, porque prevee líneas inductivas al arco del Horno, ambos AC y DC, absorben grandes cantidades de poder reactivo al variar MVAR a un rango de frecuencia de 1 a 25 HZ, que es lo que crea las fluctuaciones de voltaje en la línea de alimentación.

Las variaciones de MVAR son por la variación en el voltaje del arco, para comprender la fuente del parpadeo es necesario examinar las fluctuaciones de voltaje del arco. Muy pocas medidas de las fluctuaciones de voltaje del arco han sido publicadas, esto es porque el voltaje del arco por si mismo no es fácil de medir.

Para un Horno DC de 30 toneladas a 1 MW y un Horno AC de 80 toneladas a 30 MW, ambos con voltajes del arco de 250 a 300 voltios en una fusión de chatarra se observaron variaciones significativas en la comparación de sus efectos, que se muestran en la siguiente figura.

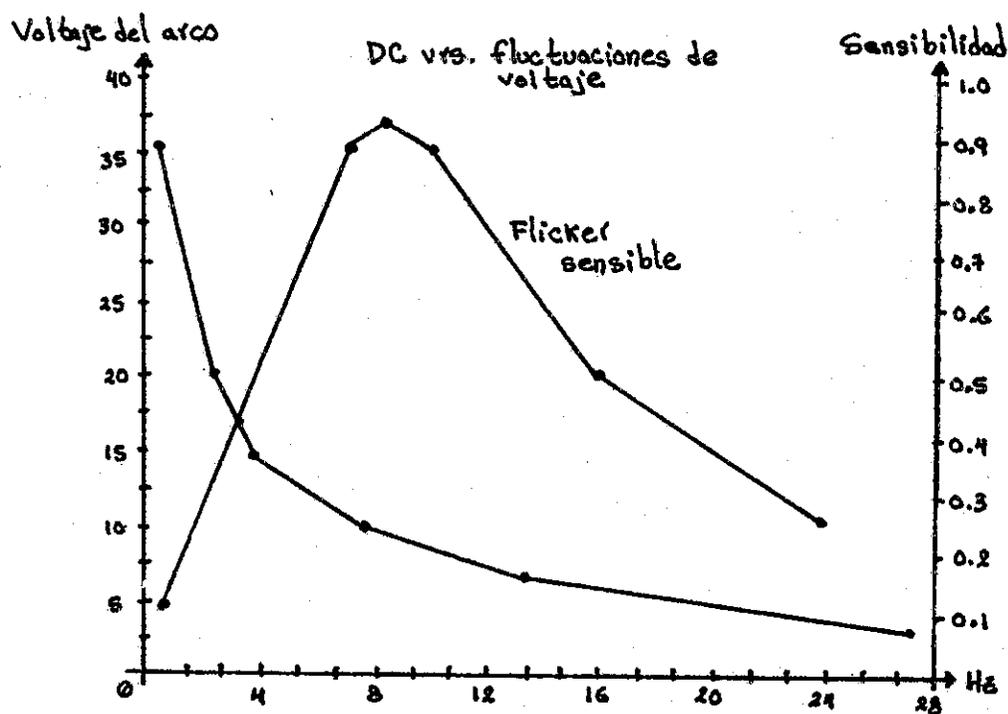


Fig. No. 32

Lo anterior muestra las medidas en DC por encima del rango de 1 a 30 Hz, junto con el parpadeo sensiblemente la curva del UIE. Las fluctuaciones caen en el rango de 30 a 40 voltios a 1 Hz abajo y cerca de 5 voltios a 30 Hz. Por comparación en la figura No. 33 para el Horno AC, muestra las curvas a bajo de 1 Hz en los rangos de 3 a 5 voltios y un pico muy alto sobre 40 voltios. Esta última curva fue medida durante el proceso secundario del horno en el momento de sufrir resonancia mecánica, junto a éstas dos curvas se muestran importantes características de la generación del parpadeo en los arcos AC:

- a) Cuando la resonancia ocurre las generaciones de fluctuación del voltaje en el rango de las frecuencias del parpadeo se incrementan por una gran cantidad, aproximadamente por un factor de 2 a 3.

- b) Si la resonancia no sucede las fluctuaciones del arco en AC bajan como en el de DC.

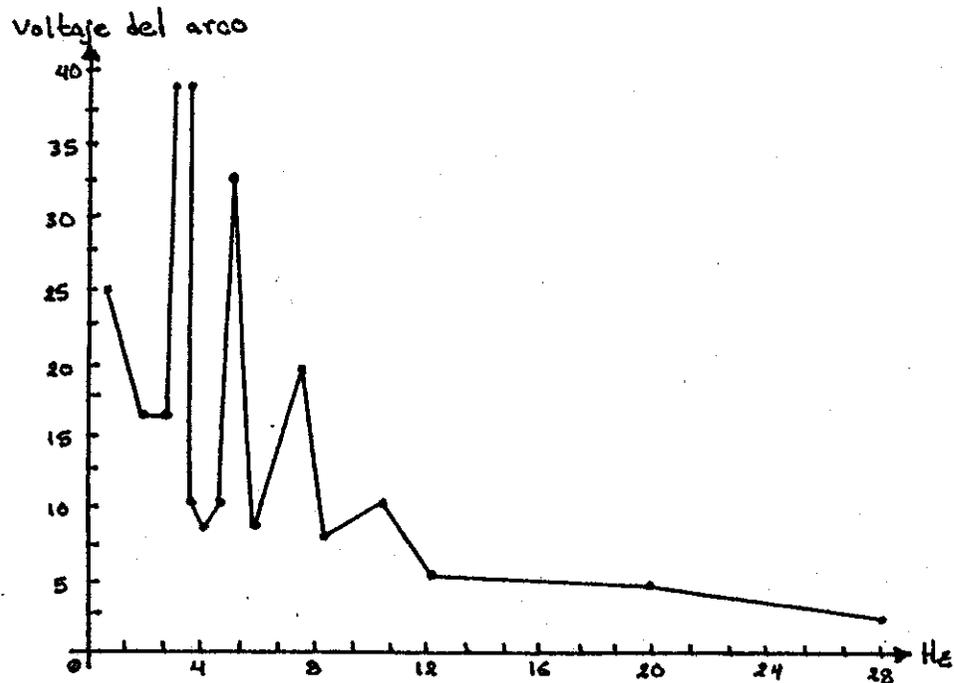


Fig. No. 33

En la figura No. 34 se muestra un circuito equivalente para un horno DC, en la cual la resistencia no es una resistencia real; sino que representa una caída (bajón) de voltaje en DC con el incremento en la corriente (éste factor depende del transformador y de la reactancia de las líneas en el caso de AC).

El reactor en DC es necesario para reducir las fluctuaciones de corriente con una respuesta rápida gobernada por tiristores, aunque éste no puede atenuar las frecuencias bajas. Un típico valor para el reactor es de 100 μH para 20 KA DC. Con dos sets paralelos a tener un suministro de 40 KA, la inducción

efectiva es de $50 \mu\text{H}$. A 10 Hz la reacción es por lo tanto de $3.14 \text{ m}\Omega$, similar a los arcos en AC. El control del ángulo de disparo del tiristor no es instantáneo, por ello es inevitable tener un retraso de disparo en el orden de milésimas de segundo (de 5 a 10 mSeg).

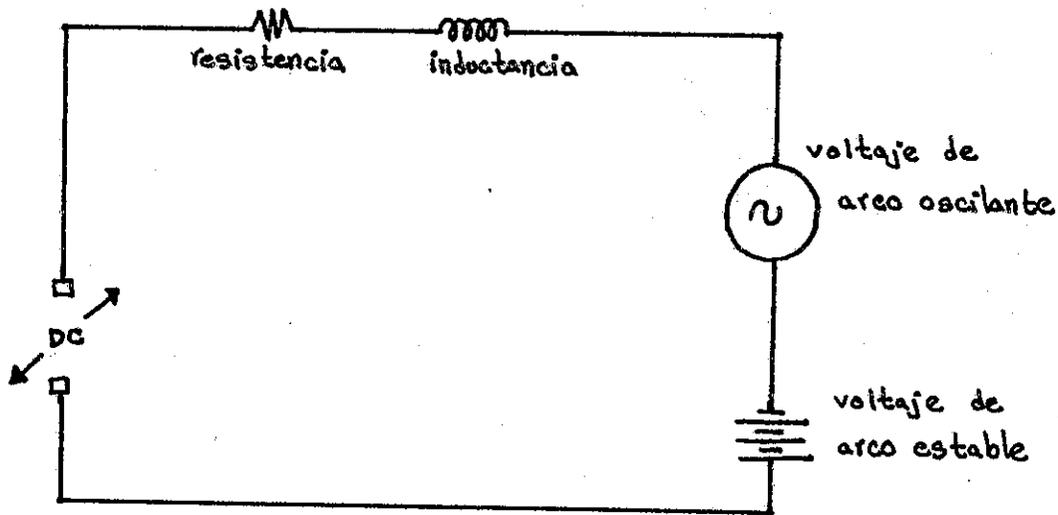


Fig. No. 34

2.11.7 COMPARACIÓN DE LAS FLUCTUACIONES DE MVAR:

En el horno AC, el ritmo de voltaje de los rangos del parpadeo son generados como modulaciones de una onda fundamental de 60 Hz . Las reacciones limitan los ritmos de corriente y es por lo tanto independiente de los parpadeos de frecuencia y es igual al total de la reacción de la fase. El horno AC produce menos parpadeo si la reacción es atenuada por un reactor, que puede estar en el lado primario del transformador donde las corrientes

son mucho más bajas. Usando el circuito equivalente del horno DC y las indicaciones de la figura No. 33, se puede hacer una comparación de los dos tipos de hornos en las frecuencias especificadas para ilustrar las características críticas, tal como se ve en el siguiente cuadro.

CONDICIONES A 10 HZ

		DC		AC con resonancia	
Voltaje de arco oscilante	Volts	9	3	7.5	
Reactancia del circuito	mΩ	3.14	3.5	3.3	5.0
Corriente oscilante	KA	2.9	0.87	2.2	1.5
Demora del tiristor	mSeg	5	10	---	---
Reducción del tiristor	%	69	39	---	---
Reducción de corriente	KA	0.9	1.8	---	---
Oscilación de MVAR	%	4.5	9.0	4.4	11

Cuadro No. 6

El propósito del cuadro anterior es ilustrar las características críticas, especialmente reacción y velocidad del tiristor. Mecánicamente un mono-electrodo del horno DC, es un simple horno AC, el acceso al horno por encima de la plataforma, es mucho mejor; el techo tiene bajo enfriamiento de agua directo y el acceso a los electrodos es mejor, éstas ventajas pueden mostrar una reducción en el mantenimiento mecánico, aunque el mantenimiento del fondo del refractario puede incrementarse.

Electricamente, sin embargo, en la complejidad de los tiristores, disparos de los circuitos, filtros y más transformadores complejos. No es posible evitar algunas incidencias de los cortos circuitos cuando la escoria cae en el electrodo, no es completamente posible evitar abrir los circuitos que usualmente ocurren después del rápido retiro del corto circuito.

Sin embargo hay una diferencia entre los hornos, porque en el DC hay un solo electrodo; para ambos casos de corto circuito o circuito abierto, el poder del arco es cero. En caso de AC, el corto circuito o el circuito abierto normalmente solo ocurre en una fase como resultado de la potencia no cae a cero; en realidad porque de la peculiaridad de los circuitos de 3 fases (trifásicos) un corto en una sola fase no afecta el total de MW, solo MVAR tal como se muestra en el siguiente cuadro.

EVENTO	AC		DC	
	MW	MVAR	MW	MVAR
Circuito Abierto	medio	medio	cero	cero
Corto Circuito	sin cambio	doble	poco	doble

Cuadro No. 7

Así el registro para el horno DC puede tener más de cero o casi cero incidencias, que un horno AC. Los hornos de AC solo cae a cero la potencia si ocurre una ligera sobrecarga transmitida sobre la línea de alimentación, pero esto puede fácilmente ser evitado.

2.11.8 CAMPO MAGNÉTICO:

Hay una gran diferencia en la magnitud y extensión de los campos magnéticos alrededor de los hornos. Los campos alternativos alrededor de los hornos AC dan aumento a las corrientes inductivas alrededor de los lazos encerrados, evidentemente por arcos de puntos de poco contacto, incrementando la erosión mecánica en algunas superficies. La magnitud de los campos son relativamente bajos, esto es porque la suma instantánea de los vectores de las tres corrientes siempre es cero (idealmente). El horno DC se caracteriza por un largo lazo en la corriente, produciendo un campo magnético de significativa distancia fuera de muchos metros alrededor del horno. El acero carbonizado, alrededor de 10 metros puede magnetizarse, esto puede ser inconveniente. Estrictamente de esto puede también ser alguna pérdida de inducción cada vez que ocurren cambios en la corriente pero se asume que son pequeños. En la figura No. 35 se observa el campo magnético en un Horno DC, así como el patrón de fusión en un horno AC; mientras que en la figura No. 36 se ven las características MW / MVAR, de AC vrs. DC.

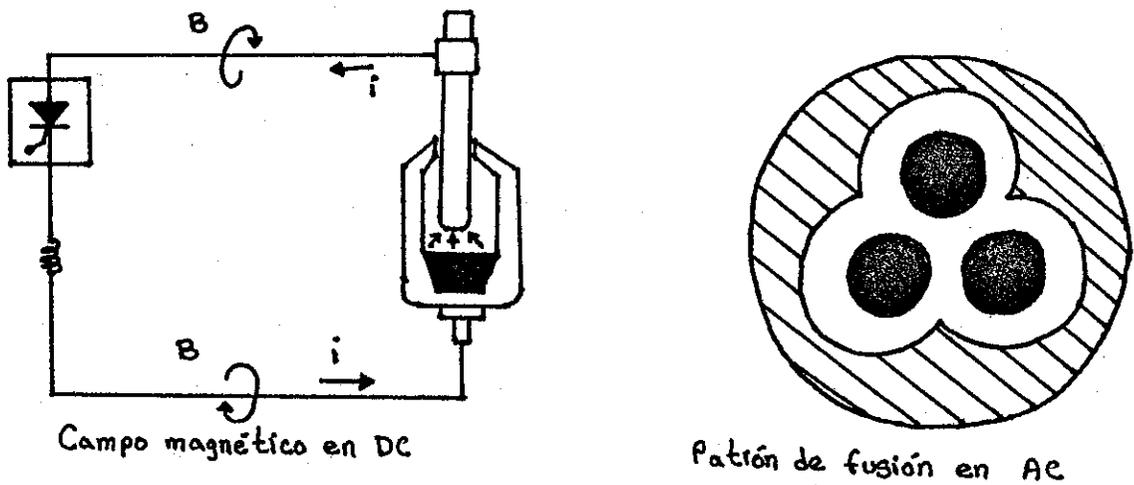


Fig. No. 35

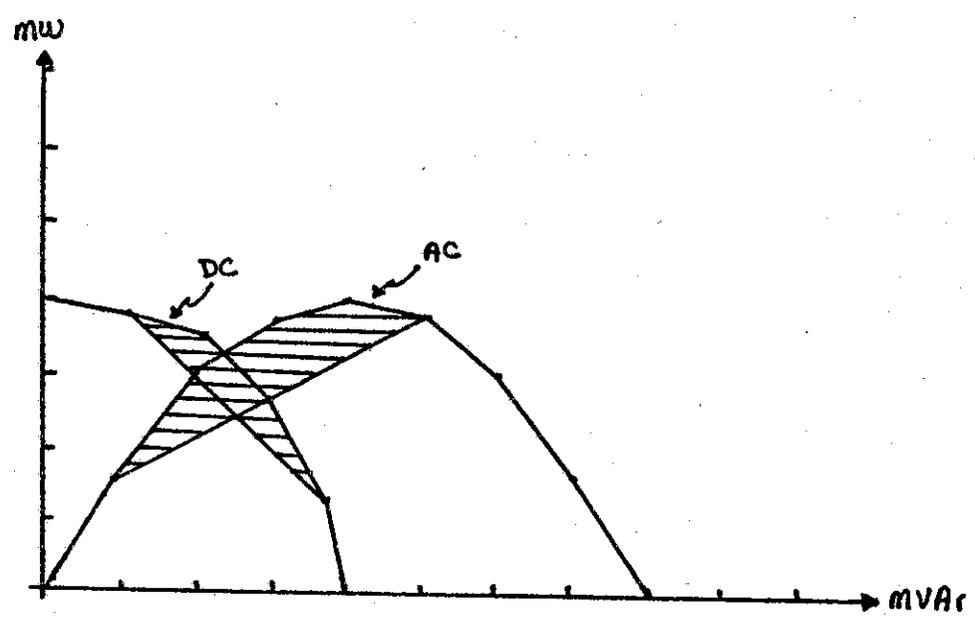


Fig. No. 36

2.12 CONCLUSIONES DE HORNOS EN AC Y HORNOS EN DC

La producción mundial de acero eléctrico se incrementa constantemente, de tal manera que en la actualidad se está produciendo el 40 % de la producción total de acero, eléctricamente. Este crecimiento se debe a la versatilidad del H.A.E. cuyos desarrollos tecnológicos se iniciaron con la operación de Ultra Alta Potencia (UHP), continuando el uso extensivo de oxígeno, operación con alto contenido de carbón, arco largo, escoria espumosa, post-combustión y así sucesivamente. Para lograr éstos, se desarrollaron conjuntamente los sistemas enfriados por agua, lanzas y quemadores (oxígeno/gas), manipuladores, insufladores de carbón, transformadores de alta reactancia y alto voltaje, etc. Parece que la operación con AC ha llegado a una etapa en la cual es muy difícil implementar mejoras sustanciales, teniendo la limitante que cuando se utiliza altas

que cuando se utiliza altas potencias y voltajes, surge el problema del parpadeo eléctrico (flicker). Una alternativa para éste problema eléctrico ha sido el uso de Corriente Directa en la operación de los Hornos de Arco Eléctrico.

2.12.1 DIFERENCIA ENTRE DC Y AC:

- 1.- Se requieren altos rangos de corriente (KA) para obtener niveles altos de potencia (MW).
- 2.- La operación con un solo electrodo permite:
 - * La eliminación del calor radiante de las tres fases.
 - * La eliminación de las pérdidas y calentamientos electromagnéticos de las tres fases.
 - * Menor incidencia de caídas de carga.
 - * Reducción de vibración.
 - * Disminución de esfuerzos térmicos y mecánicos.
- 3.- El arco largo y el flujo de corriente unidireccional permite:
 - * Que la punta del electrodo esté más alejada del acero líquido
 - * Que el electrodo actúe siempre como cátodo.
 - * Que el electrodo trabaje más frío.
- 4.- No existe el efecto "pelicular" en el electrodo:
 - * Permitiendo que la corriente fluya uniformemente a través de la totalidad de su sección transversal.
- 5.- El consumo total de energía, diferencia entre los tipos de Hornos en aproximadamente 10 KWH/TON.

2.12.2 VENTAJAS POTENCIALES DE HORNOS EN DC:

- 1.- Menor consumo de electrodos.
- 2.- Fusión uniforme de chatarra.

- 3.- Reducción de puntos calientes, el arco es centrado.
- 4.- Disminución del consumo de energía.
- 5.- Mejorar la agitación del baño plano (líquido).
- 6.- Reducción de los niveles de "flicker" y de ruido.
- 7.- Menor mantenimiento mecánico.
- 8.- Posibilidad de manejar mayores niveles de corriente.
- 9.- Diámetro mayor en la punta del electrodo.

2.12.3 DESVENTAJAS POTENCIALES DE HORNOS EN DC:

- 1.- Mayores costos de capital.
- 2.- Fuente de alimentación rectificada.
- 3.- Equipo eléctrico de filtrado.
- 4.- Necesita conexión del ánodo.
- 5.- Poca duración del electrodo inferior (ánodo).
- 6.- Mayor tiempo para cambiar electrodo inferior.
- 7.- Mayores longitudes del arco.
- 8.- Aumento de daños a las paredes del Horno.
- 9.- Menor duración del refractario del piso y la solera.
- 10.- Mayor mantenimiento del piso y la solera.
- 11.- Mayor mantenimiento eléctrico.
- 12.- Se deben disponer de grandes cantidades de electrodos.
- 13.- Se tienen limitaciones de corriente y potencia en el ánodo.
- 14.- Los campos magnéticos en DC son extremadamente largos y pueden inconvenientemente magnetizar mucho equipo.

3 REGULACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELECTRICO

3.1 SISTEMA DE REGULACIÓN Y CONTROL

Con la introducción de los últimos avances en la tecnología del horno de arco eléctrico modernos: arco largo, escoria espumosa, control de parpadeo (Flicker), transformadores de horno con altos voltajes secundarios, reactor primario, brazos conductores, Hornos de corriente directa, equipos automáticos de depuración de humos y polvos, controles de temperatura y de enfriamiento, etc. ; es necesario mejorar y actualizar los Sistemas de Regulación por medio de la adecuación de los Controladores Lógicos Programables (PLC) y el uso de la Inteligencia Artificial para controlar y optimizar la potencia aplicada al Horno en una forma más eficiente y de acuerdo a la tecnología moderna disponible.

La regulación de un horno de arco eléctrico consiste en colocar los electrodos (Regulación de posición) en una posición tal que mantenga una distancia entre la punta del electrodo y la carga, para que conjuntamente con la corriente y la diferencia de potencial entre la punta del electrodo y la carga, controle la cantidad de potencia generada por el arco. En controles modernos a base de PLC utilizan también señales de temperatura de los paneles de enfriamiento por agua de la bóveda y pared del horno para programar y controlar la potencia aplicada.

El sistema de regulación y control, juega un papel muy importante en el comportamiento y los objetivos que se persiguen en la operación de un horno eléctrico. Al estar interconectado con una computadora, se pueden obtener los índices de rendimiento instantáneos y mostrarlos en un monitor en la cabina de operación o en una estación remota (Oficina de producción). Los sistemas reguladores existentes en la actualidad, se pueden clasificar en:

a.- Tipo proporcional:

Utilizado en aplicaciones en donde no se justifica una eficiencia alta, como en el caso de pequeñas fundiciones de Hierro Gris o Maleable, con producción reducida.

b.- Control derivativo integral proporcional:

También conocido como PID, se obtiene un mayor amortiguamiento de las señales, evitando la oscilación excesiva, éste tipo de controles se ha utilizado en sistemas con PLC's en hornos de arco eléctrico, con bastante éxito.

c.- Control algorítmico matemático:

También conocido como MAC, utiliza una alimentación directa (en vez de una retroalimentación), con una mayor capacidad de muestreo de las señales de control, de tal manera que se logran rápidamente los nuevos puntos prefijados con una precisión mayor que los dos anteriores.

d.- Red neural y controlador lógico FUZZY:

El sistema predice la operación del horno con base en sus

parámetros eléctricos. Requiere de aproximadamente 10 minutos para que el controlador "aprenda" como es operado el horno. Esta es la mejor opción en controladores. El criterio para establecer puntos fijos de impedancia (Z) y amperajes (I), no es el ideal. Razón por la cual se desarrollaron los generadores de Puntos de Control (Set Point), los cuales utilizan reglas basadas en la Inteligencia Artificial.

El Generador de punto de control no puede prefijarse debido a que el comportamiento del horno eléctrico es una función del tipo, calidad y acomodo de la chatarra utilizada, así como las características del sistema de potencia, prácticas de operación, tipo y calidad de electrodos, acero por producir, etc.

Para mejorar el manejo del perfil de colada, el sistema de inteligencia artificial utiliza dos redes neurales, una para definir y fijar los puntos de control y otra como sistema regulador de posición.

Estas mejoras en el sistema de control han dado como resultado reducciones en el consumo de energía específica del orden de 8 a 10 % reducciones en el consumo de electrodos de 20 a 25 % , e incremento de la productividad de hasta 13 % , lo que equivale en algunos casos a un ahorro en costos de operación de más de un millón de dólares americanos por año.

3.2 ANÁLISIS MATEMÁTICO DE REGULACIÓN

El circuito de control de posición en un horno de arco eléctrico

se puede representar esquemáticamente como se muestra en la siguiente figura:

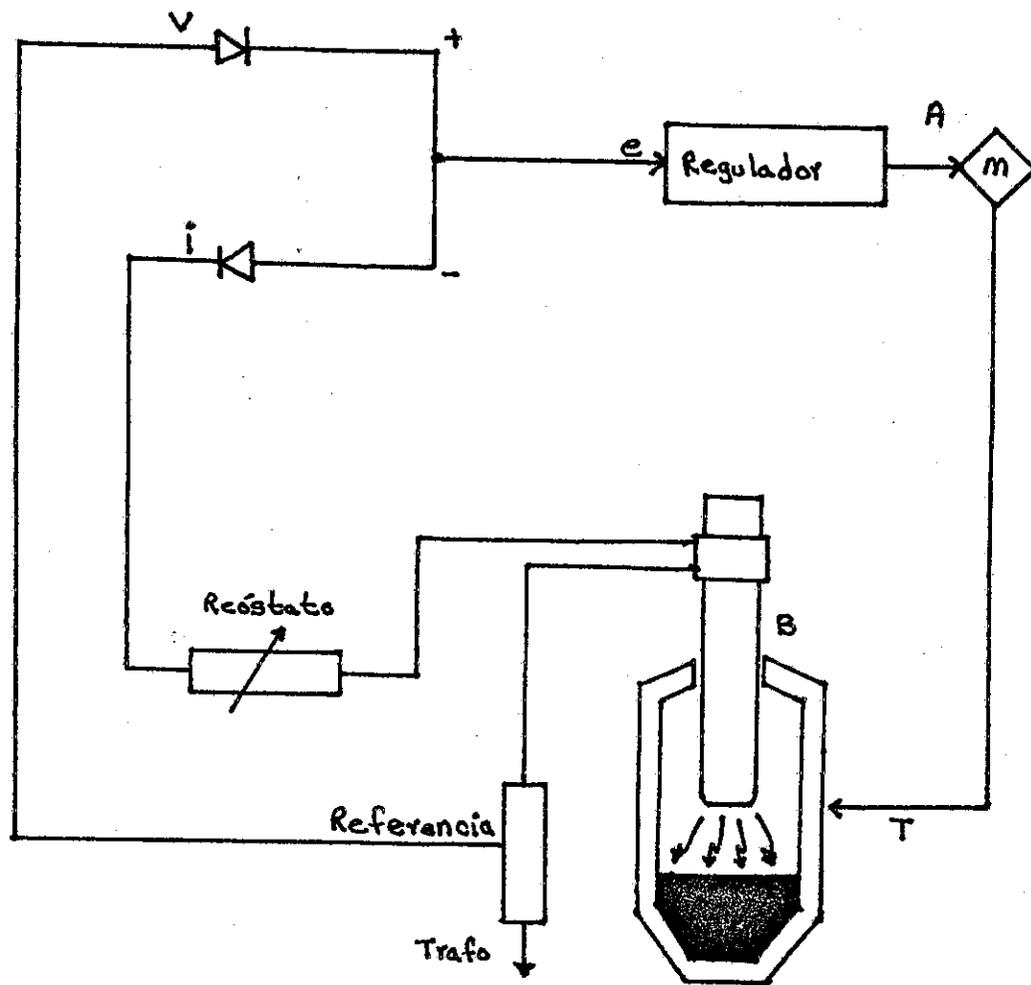


Fig. No. 37

Tomando como referencia al voltaje (V), puesto que es el voltaje seleccionado en el secundario del transformador del horno, quedará:

$$V - I = e \quad \text{Ecc. No. 19}$$

$$e \times A = T \quad \text{Ecc. No. 20}$$

$$T \times B = I \quad \text{Ecc. No. 21}$$

Sustituyendo la ecuación 21 en la 19, quedará entonces:

$$V - (T \times B) = e \quad \text{Ecc. No. 22}$$

Sustituyendo la ecuación 22 en la 20, quedará entonces:

$$(V - T \times B) \times A = T \quad \text{Ecc. No. 23}$$

La ganancia o función de transferencia del sistema será:

$$V \times A - T \times B \times A = T \quad \text{Ecc. No. 24}$$

Despejando de la ecuación 24, las variables $V \times A$, quedará:

$$V \times A = T + (T \times B \times A)$$

$$V \times A = T \times (1 + B \times A) \quad \text{Ecc. No. 25}$$

Definiendo el sistema cerrado por "G", entonces tendremos:

$$G = \text{salida} \div \text{entrada}$$

$$G = T \div V$$

$$G = A \div (1 + B \times A) \quad \text{Ecc. No. 26}$$

Ya que el producto de las ganancias de A y B, es mayor que la unidad o sea que $A \times B \gg 1$; entonces:

$$G = A \div (A \times B) \quad \text{Ecc. No. 27}$$

Finalmente:

$$G = 1 \div B \quad \text{Ecc. No. 28}$$

Del análisis anterior se deduce que la regulación de posición depende exclusivamente de la red de retroalimentación del sistema, tomando como señal de referencia el voltaje de operación, seleccionado por el tap del Transformador del Horno.

Por lo cual, la variable a controlar será la potencia (MW) necesaria para fundir la carga que es una función directa de la corriente, que depende de la impedancia del circuito, la cual se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad \text{Ecc. No. 29}$$

$$R = R_1 + R_A \quad \text{Ecc. No. 30}$$

$$I = V \div Z \quad \text{Ecc. No. 31}$$

La potencia en el arco será:

$$PA = I^2 \times R_A \quad \text{Ecc. No. 32}$$

Sustituyendo la ecuación 31 en la ecuación 32, quedará:

$$PA = (V \div Z)^2 \times R_A \quad \text{Ecc. No. 33}$$

Finalmente:

$$PA = (V^2 \times R_A) \div [(R_1 + R_A)^2 + X^2] \quad \text{Ecc. No. 34}$$

El circuito equivalente se muestra a continuación:

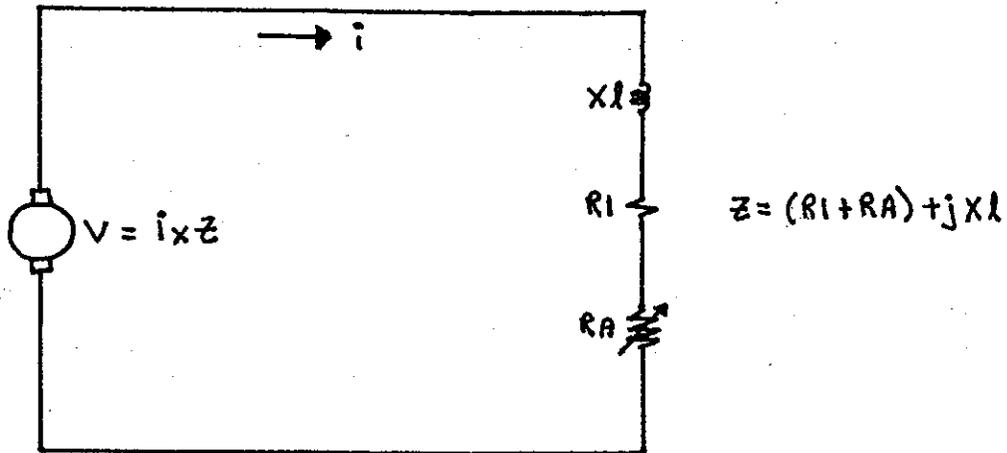


Fig. No. 38

3.3 MÁXIMA TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Partiendo de la ecuación 34, se tiene que la máxima transferencia de potencia en el arco se obtiene derivando en base a la resistencia del arco, o sea que:

$$dPA / dRA = 0 \quad \text{Ecc. No. 35}$$

$$\text{en donde: } RA = \sqrt{(R1^2 + X^2)} \quad \text{Ecc. No. 36}$$

Esto quiere decir que la resistencia del arco (RA) es igual a la impedancia del circuito, excluyendo la resistencia del arco. Si se desea conocer el valor de RA para máxima potencia en el circuito total, se toma en consideración lo siguiente:

$$Pc = I^2 \times (R1 + RA) \quad \text{Ecc. No. 37}$$

Sustituyendo la ecuación 31 en la 37 quedará:

$$P_c = [V^2 X (R_1 + R_A)] \div [(R_1 + R_A)^2 + X^2] \quad \text{Ecc. No. 38}$$

Derivando con respecto a R_A , e igualando a cero se obtiene:

$$R_A = X - R_1 \quad \text{Ecc. No. 39}$$

Esto significa que la máxima potencia en el circuito total se logra cuando la resistencia del circuito es igual a la reactancia, o sea con un factor de potencia de 0.7071 medido en el primario del transformador del horno. De las curvas de potencia de éste, se deduce que todos los parámetros están relacionados directamente con la corriente; cuando ésta cambia, todos los demás cambian en un determinado porcentaje.

3.4 INFLUENCIA DE CONTROL DEL ELECTRODO Y DISEÑO DEL HORNO EN PROBABILIDAD

La pérdida de calor resultante del diseño y línea del horno puede ser apreciablemente reducida por medio del acortamiento de la fusión y tiempos de trabajo (recalentamiento, afinación, fundición, etc.). En orden a tomar en cuenta para el requerimiento de acortar los tiempos de fusión, los hornos son construidos con muy altas especificaciones de entrada " UHP " (de muy alto poder). Para tales hornos es extremadamente importante alcanzar óptimas condiciones de operación para minimizar el quemado de la línea de refractario. El horno y el transformador tiene que tener dimensiones de tal modo que el desgaste de la línea sea pequeña. La reacción debe igualar la potencia de entrada. Para hornos grandes debe ser tan bajo como sea posible y el

rango de voltaje lo más estable posible. Otro método para incrementar el poder de fusión y reducir la pérdida variante con el tiempo de fusión es incrementar el poder medio activo, por un momento es mantenido el aparente poder constante. Esto puede hacerse con un sistema electrónico de medición y control del electrodo. Las propiedades del control del electrodo influye en el desgaste de la línea de refractario, el consumo del electrodo, repercusiones en la red de distribución, el tiempo demorado en la carga del horno, y en consecuencia, el consumo de energía específico, y finalmente en el rentabilidad de la planta.

La tarea del control del electrodo electrónico, es mantener el punto nominal de operación, situado por cualquiera de los operadores o por un sistema automático de control, teniendo en cuenta todas las condiciones de operación, con una gran precisión posible. El punto nominal de operación define la potencia activa de entrada necesario y el factor de potencia deseado. Esto significa que el dato del arco debe ser determinado y comparado con los puntos establecidos, los ajustes del electrodo acordes a la desviación del punto marcado y el largo del arco, como el único control variable, ser corregido cuando el voltaje del transformador es dado.

La modificación de los electrodos, que considerablemente influye los datos operacionales y el costo del proceso de fusión, es por lo tanto de principal importancia.

3.5 REQUERIMIENTOS OPERACIONALES EN DIFERENTES ETAPAS DEL PROCESO

3.5.1 PERÍODO DE FUSIÓN:

Durante la fusión, la pendiente del arco varía entre infinito (extinción) y cero (corto circuito). La operación seriamente afectada del horno, demanda que el sistema tenga una rápida respuesta, como primer requisito. En adición a responder inmediatamente, el sistema puede reducir la alta velocidad del electrodo y que los cortos circuitos puedan ser reprimidos o mantenerse dentro de los límites admitidos. Como consecuencia, la potencia puede mantenerse constante y con un promedio alto.

3.5.2 REFINACIÓN DE LA CARGA DE FUNDICIÓN:

Durante este período, usando un arco corto y altas corrientes la fluctuación del voltaje del arco y corrientes, no es tan grande cuando la fusión baja. Desde el arco, no rodeado por escoria, el calor irradiante causa perforaciones a las paredes y el techo. Aunque el arco está a una poca distancia de la superficie de lo fundido, los electrodos deben ser prevenidos desde la inclinación en el baño plano. Por lo tanto en este período, un alto grado de precisión es demandado del sistema de control.

3.5.3 PERÍODO DE TRANSICIÓN:

Durante este período (cuando el metal fundido y chatarra sólida están en el horno) no solo debe el sistema alcanzar altas velocidades, sino también una alta precisión. En la siguiente figura se muestra un diagrama esquemático del control de operación de electrodo electrónicamente y su respectivo sistema hidráulico, en donde se detallan los siguientes puntos:

- 1 = Sistema de medición
- 2 = Controlador

- 3 = Unidad del punto de control
- 4 = Amplificador de la señal de salida
- 5 = Válvula
- 6 = Presión de aire con bombas

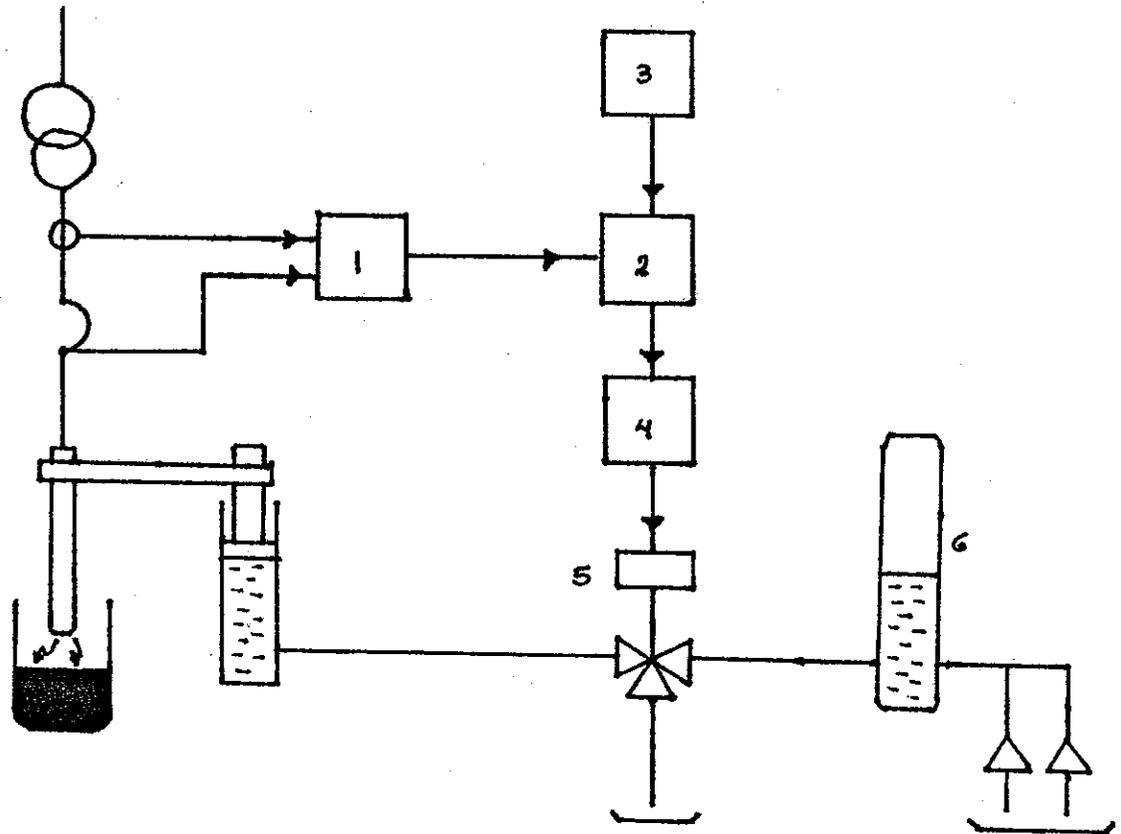


Fig. No. 39

3.5.4 MEDICIÓN Y DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL ARCO:

Dirigir la medida de voltaje del arco, no puede llevarse afuera, durante la operación. En el sistema de control de

impedancias, generalmente utilizando los fasores de corriente y voltaje, son por lo tanto medidas contiguas al transformador. El resultado, impedancia, es tomado como un valor operacional, y por lo tanto el nombre de "control de impedancia". Sin embargo, la medición del voltaje es la suma del voltaje del arco y la baja del voltaje en el conductor de alta corriente. Este bajo voltaje comprende un componente resistivo y un inductivo, del que el último es mucho mas largo y variable, dependiendo de la variación de la corriente en el tiempo (di/dt) de todas las tres variaciones de las fases de la corriente.

Las variaciones de la corriente que ocurren durante la operación del arco y el contenido armónico en la corriente del arco, resulta en grandes cambios el bajo voltaje inductivo. De ésta manera, los valores de impedancia determinados proveen una gráfica alineal de las características del arco. Los errores en medición de los valores operacionales guían al desplazamiento del punto de trabajo. Las consecuencias son:

- 1.- Operación asimétrica (diferente potencia activa en las tres fases).
- 2.- Desgaste desigual en las paredes del horno.

Esas desventajas pueden evitarse con una medida exacta de los valores instantáneos de voltaje. El sistema presentado determina el verdadero voltaje del arco de la siguiente manera:

- 1.- Medición del voltaje en los brazos del electrodo. Así, la

influencia de la variación de la reacción causada por el movimiento de los cables de potencia con distinta fase cambiante, lo cual se elimina.

2.- Simular la resistencia y el bajo voltaje inductivo, entre el punto de medida y la punta de los electrodos. La reacción entre esos puntos se asume que es constante.

Las mediciones confirman que la variación de la altitud del porta electrodos y consecuentemente un cambio en la distancia entre las fases solo causa una pequeña diferencia en la reacción, que se puede ignorar en práctica.

El principio de medición se ilustra en la figura No. 40, así mismo el principio de control que depende del mismo.

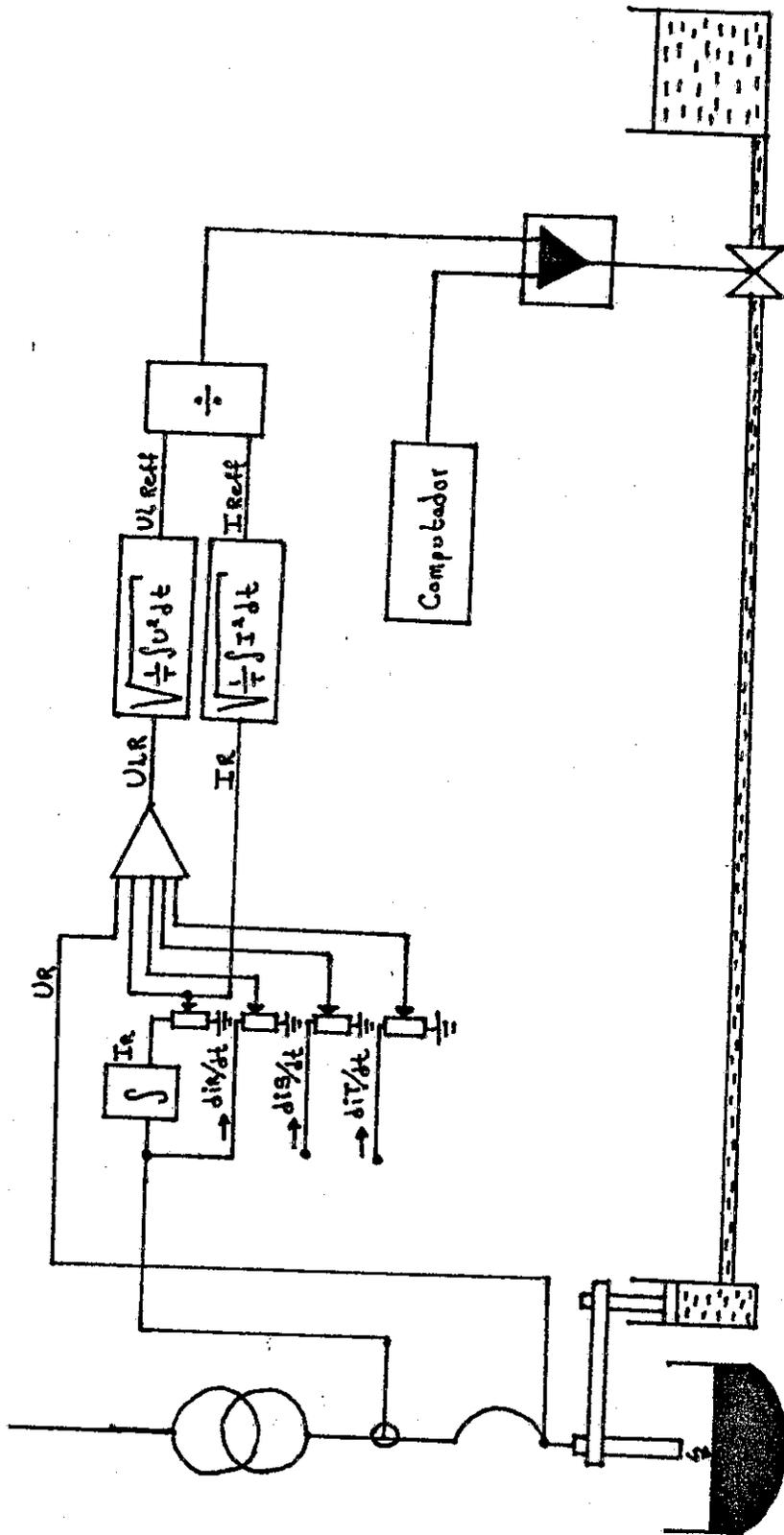
Al definir el voltaje resistivo como U_{rr} , U_{rs} y U_{rt} ; y el voltaje inductivo como U_{xr} , U_{xs} y U_{xt} son reproducidos y sustraídos de los voltajes moderados U_{or} , U_{os} y U_{ot} . Las ecuaciones para los voltajes del arco (U_{lr} , U_{ls} y U_{lt}) son:

$$U_{lr} = U_{or} - U_{xr} - U_{rr} \quad \text{Ecc. No. 40}$$

$$U_{ls} = U_{os} - U_{xs} - U_{rs} \quad \text{Ecc. No. 41}$$

$$U_{lt} = U_{ot} - U_{xt} - U_{rt} \quad \text{Ecc. No. 42}$$

Las ecuaciones que representan las porciones de voltaje inductivo serán:



Principio de control de regulación

Fig. No. 40

$$U_{xr} = - (dI_r/dt) * [(A+C) \div 2] + (dI_s/dt) * (A-B \div 2) + (dI_t/dt) * (C-B \div 2)$$

Ecc. No. 43

$$U_{xs} = (dI_r/dt) * (A-C \div 2) - (dI_s/dt) * [(B+A) \div 2] + (dI_t/dt) * (B-C \div 2)$$

Ecc. No. 44

$$U_{xt} = (dI_r/dt) * (C-A \div 2) + (dI_s/dt) * (B-A \div 2) - (dI_t/dt) * [(C+b) \div 2]$$

Ecc. No. 45

Las constantes A, B y C; dependen solo en el arreglo geométrico del circuito de potencia.

La magnitud del voltaje resistivo viene definido por:

$$U_{rr} = I_r * R_r \quad \text{Ecc. No. 46}$$

$$U_{rs} = I_s * R_s \quad \text{Ecc. No. 47}$$

$$U_{rt} = I_t * R_t \quad \text{Ecc. No. 48}$$

Las constantes A, B, C, R_r, R_s y R_t; se determinan en tres pruebas de inmersión y se fijan en el potenciómetro digital. Esta calibración requiere solo llevarse a cabo una vez, solo toma unos minutos y no requiere ningún instrumento especial de medición. La medición de la fase de corriente y el cálculo de los voltajes del arco se convierten en los transformadores del instrumento en valores efectivos. En esta forma se le pasan al regulador como valores operacionales.

3.5.5 PARÁMETROS DE CONTROL:

El sistema de mando describe el voltaje y lo deja o se ajusta la resistencia del arco a un valor constante. La ventaja de éste, está en que el "punto fijo" del voltaje del arco o sea la

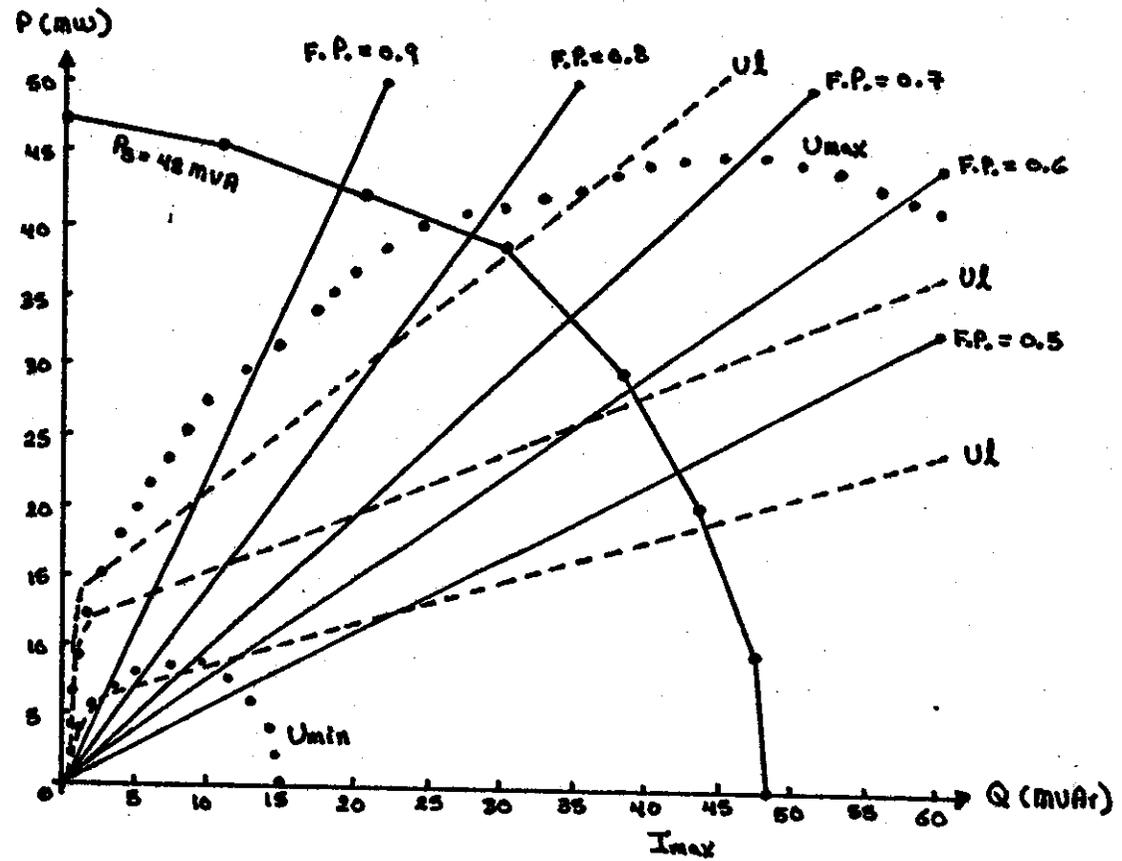
resistencia del arco se mantiene constante a pesar de las fluctuaciones en la reacción o el volumen armónico. En la figura No. 41 se muestran las curvas del voltaje del arco constantes y la resistencia. Se muestran punteados, esos arcos de voltaje del arco (marcado con UL). Las líneas de resistencia del arco constante corresponden a las líneas de potencia del factor ($\cos \theta$).

Con la ayuda de éstos diagramas, trazadas por computadora para cada horno, es posible especificar el rango posible del punto fijo o de control, quedando a criterio personal la observación el control del voltaje del arco constante o la resistencia constante. Sobrecargando el voltaje del arco se controla la resistencia del arco o viceversa; también se puede llevar en el sistema de mando.

3.5.6 CARACTERÍSTICAS DE CONTROL A LAS FASES DE FUSIÓN:

Se escoge las características del discontinuo, por el sistema de control electrónico que ha probado su valor por largo tiempo, y rinde resultados excelentes en todas las fases del proceso. Con esta característica es posible obtener una ganancia alta, con desviaciones pequeñas. Cuando la desviación es grande, la ganancia es débil y no pone fuerzas inadmisibles mecánicas en los brazos del electrodo, debido a las altas fuerzas de aceleración.

De esta manera, se cumple con el requisito por estabilidad. Este estipula que el producto del electrodo lleva una velocidad excesiva y la ganancia del sistema de mando debe ser pequeño y que el valor depende de los tiempos constantes del sistema (por ganancias dadas y persistentes del tiempo del horno se diseña el



- U_{min} : Mínimo voltaje del transformador
 $U_{máx}$: Máximo voltaje del transformador
 U_l : Voltaje de arco constante
 P : Potencia activa instalada
 Q : Potencia reactiva instalada
 I : corriente del electrodo
 P_s : máxima potencia aparente del transformador
 $\cos \phi$: factor de potencia constante instalado

Fig. No. 41

arco), todo ello mostrado en la siguiente ecuación:

$$Ch * Vv * Vb * Vr < [1 \div (Tv + Th)] + (1 \div Tr) \quad \text{Ecc. No. 49}$$

donde: Ch = Velocidad del electrodo

Vv, Vb, Vr = Factores de amplificación

Tv, Tr, Th = Constantes de tiempo

V = Válvula

B = Arco

R = Controlador

H = Cilindro Hidráulico

En la Figura No. 42 se muestran las características del mando en las cuales se puede escoger libremente los parámetros a controlar.

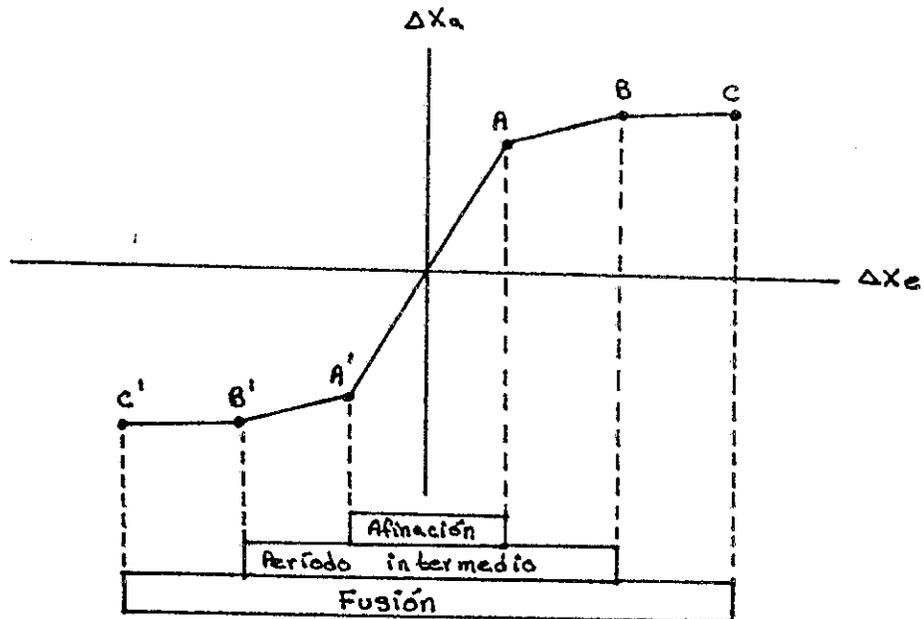


Fig. No. 42

3.5.7 UNIDAD DE PUNTO DE CONTROL DIGITAL:

El rango de puntos fijos posibles por el voltaje del arco se dividen en la resistencia en 99 valores discretos. Dejando que el material se funda, es posible programar arriba de 25 diferentes puntos de control. Esta facilidad de programar libremente los puntos fijos o de control, ofrece las siguientes ventajas:

- 1.- El punto de control puede fijar la longitud del arco, para los diferentes puntos del proceso; por ejemplo, para fundir material pre-reducido o hierro esponja, se requieren puntos de control bajos y pasos extras con puntos de control altos por la resistencia del voltaje del arco.
- 2.- La entrada numérica claramente define los puntos de control, se pueden cambiar, permitiendo que el proceso sea óptimo.

Los puntos de control son programados simultáneamente para las tres fases. Cuando el horno tiene conductores triangularmente altos en corriente es posible que ocurra alguna ligera asimetría, es inevitable que los puntos eléctricos de operación a ser fijados no sean exactamente simétricos, y asegurar el uso uniforme de la línea de refractario. Para ello se puede corregir el punto de control de cada fase por arriba de (+/-) 19 %. Esta corrección es efectiva para todos los puntos y refiere el valor programado de cada tiempo, con el resultado de que la relación entre los tres puntos de control, es constante, para todos los pasos.

3.5.8 ROMPIMIENTO EN CORTO CIRCUITO:

Cuando el valor momentáneo del voltaje del arco o la resistencia cae a un valor determinado por el punto de control,

tal como se observa en la Fig. No. 43, el corto circuito causa que el electrodo suba a una excesiva velocidad, fuera de lo normal. En el evento de un corto circuito ocurrido en la fase, ocasiona que el voltaje del arco aumente en las otras dos fases.

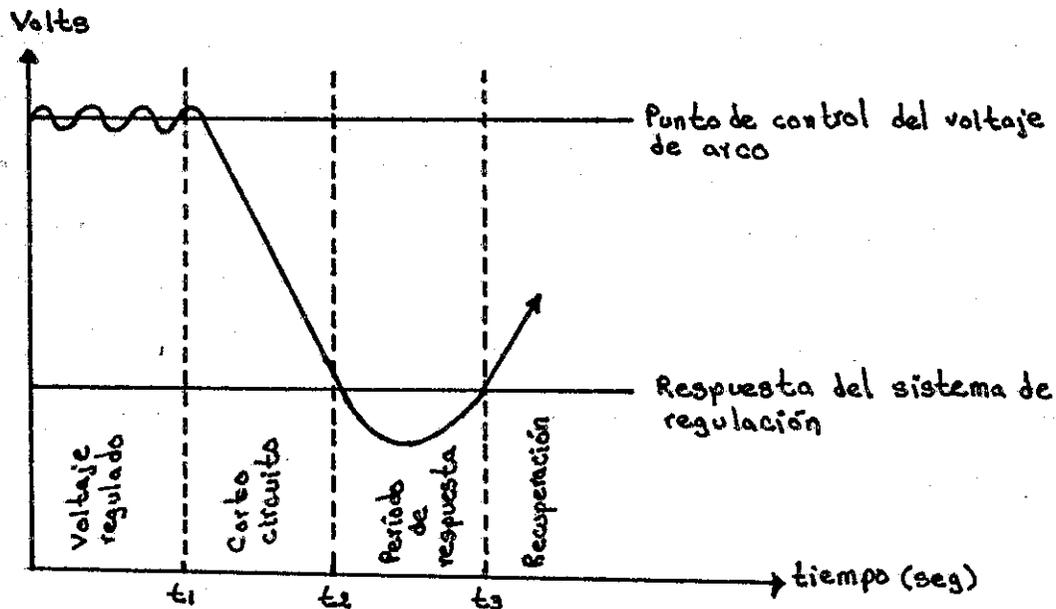


Fig. No. 43

Para ajustar el valor momentáneo del punto de control, un sistema convencional de control haría bajar los electrodos no involucrados en el corto circuito, con lo cual los parámetros de programación harán que se levanten los electrodos lentamente para reducir el corto circuito presente. Las ventajas de este sistema son:

- 1.- Los parámetros del punto de control responderán antes de que el corto circuito sea excesivamente alto.
- 2.- El umbral de contestación de la lógica depende del punto de control.

3.- El corto circuito presente se puede reducir por levantamiento lento de los electrodos no involucrados en el corto circuito.

En la figura No. 44 se muestra un esquema de un sistema de control de electrodo electrónico-hidráulico, en donde las distintas variables representan:

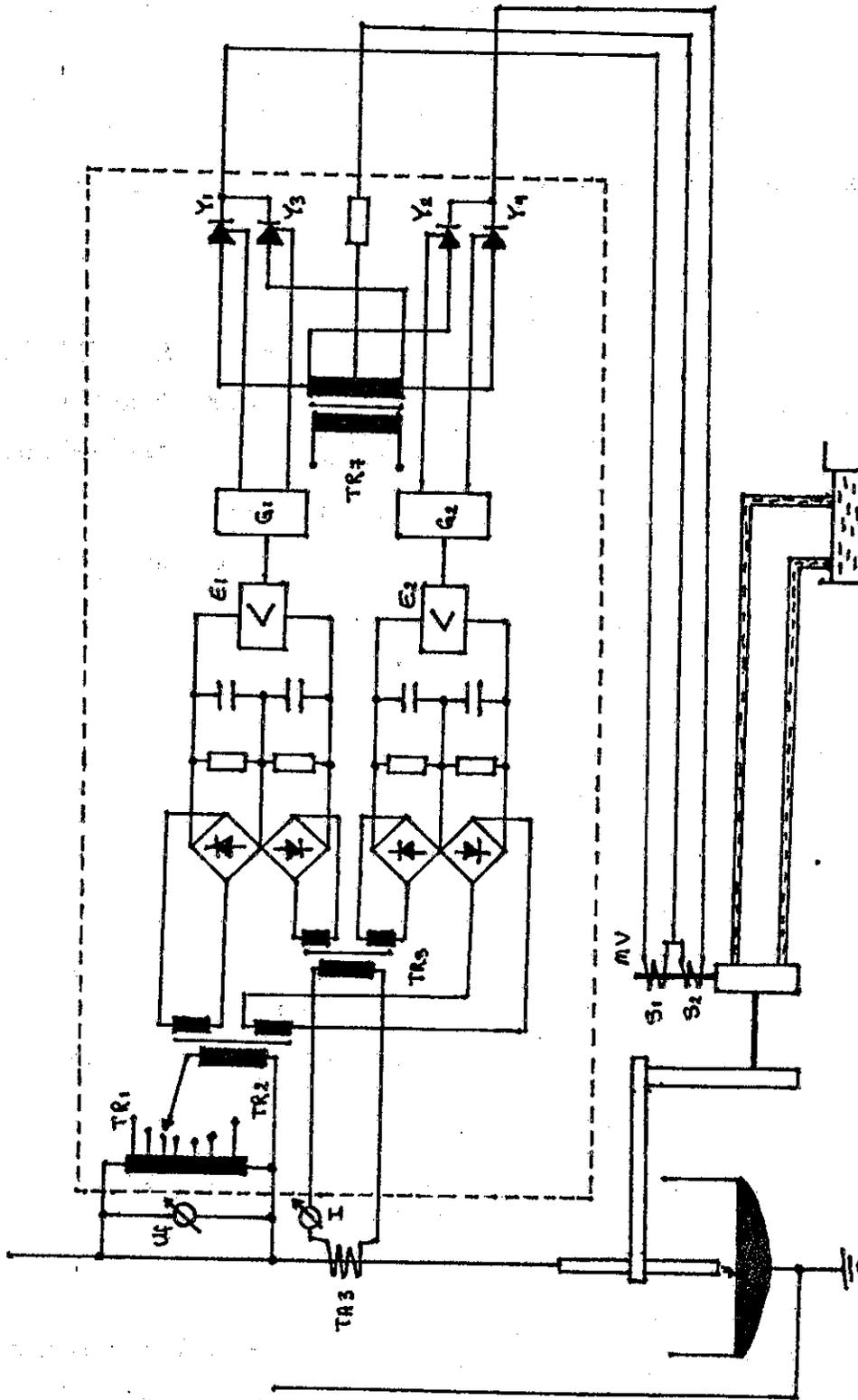
Es	= Unidad de control	Ta ₃	= Transformador de corriente
Tr ₁	= Autotransformador	P	= Switch para 16 posiciones
Tr ₇	= Transformador principal	E _{1,2}	= Amplificador
G _{1,2}	= Unidad de ignición	Y ₁₋₄	= Tiristores
Mv	= Válvulas magnéticas	S _{1,2}	= Bobina de excitación
Tr ₂	= Señal del transformador de voltaje		
Tr ₃	= Señal del transformador de corriente		

3.6 SELECCIÓN DE ELECTRODOS (ELÉCTRICAMENTE)

Los grados y aplicaciones especificados por UCAR son:

- 1.- AGR: grado normal para aquellas aplicaciones en las que las condiciones de operación, no son severas, desde el punto de vista eléctrico, mecánico y térmico.
- 2.- AGX: grado superior o premium, recomendado para utilizarse en hornos eléctricos con transformadores de alta potencia, en donde las condiciones de operación son severas eléctrica, mecánica y térmicamente.

La gráfica de diámetro de electrodo vrs. rango de corriente por fase está establecida considerando el efecto térmico ($I^2 * R$) en el electrodo (Fig. No. 45).



Sistema de control electrónico - hidráulico

Fig. No. 44

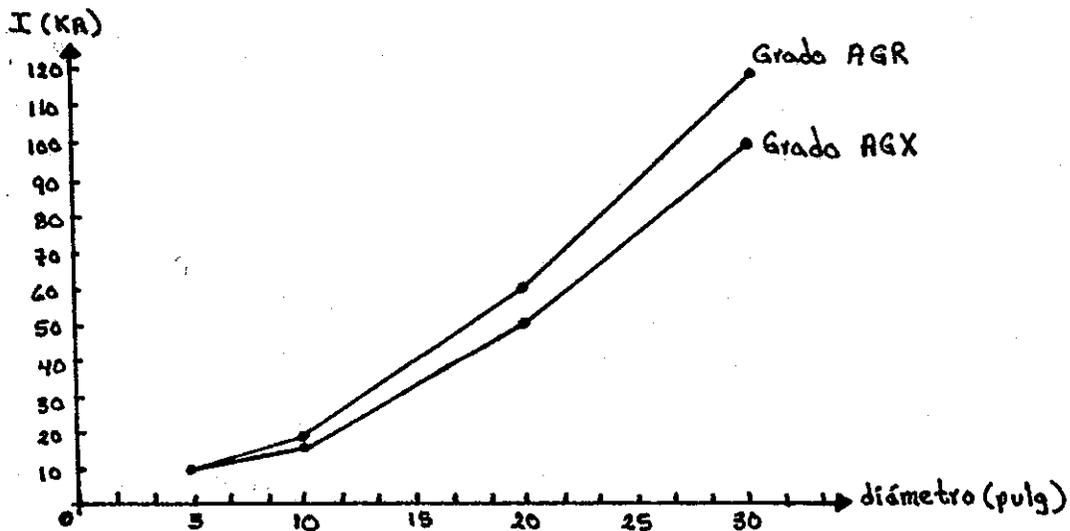


Fig. No. 45

Para seleccionar el diámetro y grado del electrodo adecuado a una aplicación particular, es necesario considerar, además del rango de corriente de operación, otros factores importantes, como:

- 1.- Tamaño y composición de la carga.
- 2.- Método de carga.
- 3.- Consumo de electrodos deseado.
- 4.- Consumo de refractarios deseado.
- 5.- Tiempos: fusión, afino, vac-vac, % T.U.
- 6.- Práctica de escoria.
- 7.- Nivel de potencia.
- 8.- Anillos / agua.
- 9.- Oxígeno / quemadores.
- 10.- Sistemas de humos, etc.

El comportamiento térmico del electrodo, está relacionado con el rango de corriente promedio, la resistencia del electrodo y las condiciones de operación dentro del horno. La gráfica de corriente (KA) vrs. diámetro (Pulgadas) del electrodo (Fig. No. 45), se basa en la ecuación:

$$D = \sqrt[3]{(I^2 * r \div K)} \quad \text{Ecc. No. 50}$$

en donde: D = diámetro del electrodo en pulgadas

I = corriente promedio por fase en Amperios

r = resistencia específica del electrodo en $\mu\Omega$ /pulg.

K = constante de disipación del grafito = 77.5 W/pulg²

En el siguiente cuadro, se presenta la resistencia típica de los electrodos expresadas en $\mu\Omega$ / pulgada:

Diámetro (pulg.)	Resist. Grado AGR	Resist. Grado AGX
3 - 9	325	217
10 - 16	345	217
18 - 28	315	207

Cuadro No. 8

La constante "K", está directamente relacionada con la potencia disipada por unidad de superficie, y el valor depende de las condiciones de operación y del medio ambiente que rodea al electrodo, dentro del horno la constante varía entre 65 a 92. Existen dos definiciones o puntos de vista con respecto a la capacidad de conducción de corriente de los electrodos de grafito, una técnica y otra económica.

Técnicamente, la capacidad de conducción de corriente se define como la máxima corriente que puede fluir a través de un electrodo de grafito, sin afectar su consumo específico.

Económicamente, la capacidad de conducción de corriente se define como la máxima corriente permisible que fluye a través de un electrodo de grafito, basado en costos. Es decir, que aún excediéndose de la capacidad de conducción de corriente recomendada técnicamente, que produce un incremento en su consumo específico, el efecto del incremento simultáneo de productividad del Horno de Arco Eléctrico puede traducirse en una reducción significativa en los costos totales de conversión.

La capacidad de conducción de corriente de los electrodos de grafito en aplicaciones de corriente alterna comparada contra corriente directa, se muestran en la figura No. 46. Los cinco mecanismos de consumo principales durante la operación de los electrodos de grafito, son: sublimación (zona de arqueo) en la punta del electrodo; oxidación del cuerpo del electrodo; roturas en la parte superior de la columna de electrodos; pérdida de puntas y desprendimiento de grafito debido al arco.

Estos se agrupan en dos categorías: Consumo continuo, formado por la oxidación y la generación del arco (sublimación), y el consumo intermitente, causado por las roturas, pérdida de puntas y desprendimiento de grafito. Si se exceden los límites recomendados en la capacidad de conducción de corriente de los electrodos de grafito, se tendrá un mayor consumo específico.

La resistencia óhmica "R", del electrodo es mayor en condiciones de corriente alterna, debido al efecto piel, que en corriente directa. Por ejemplo, para un electrodo de 28 pulgadas con una longitud de 110 pulgadas, cuyo valor de resistencia específica es típicamente de $200 \mu\Omega$ / pulgada, tendría $53 \mu\Omega$ de resistencia óhmica al circularle una corriente alterna de 60 Hz, pero solamente $36 \mu\Omega$ en corriente directa. La consecuencia en ésta disminución en la resistencia, permite que circule un 21% de mayor corriente directa a través del mismo electrodo sin que se incremente el calor disipado por $(I^2 * R)$ efecto Joule. En la figura No. 46 la capacidad de conducción de corriente en aplicaciones de corriente directa, toma en consideración la relación R_{dc} / R_{ac} . Manteniendo los niveles de corriente directa dentro de los límites de la gráfica, se tendrá teóricamente, un consumo específico consistente.

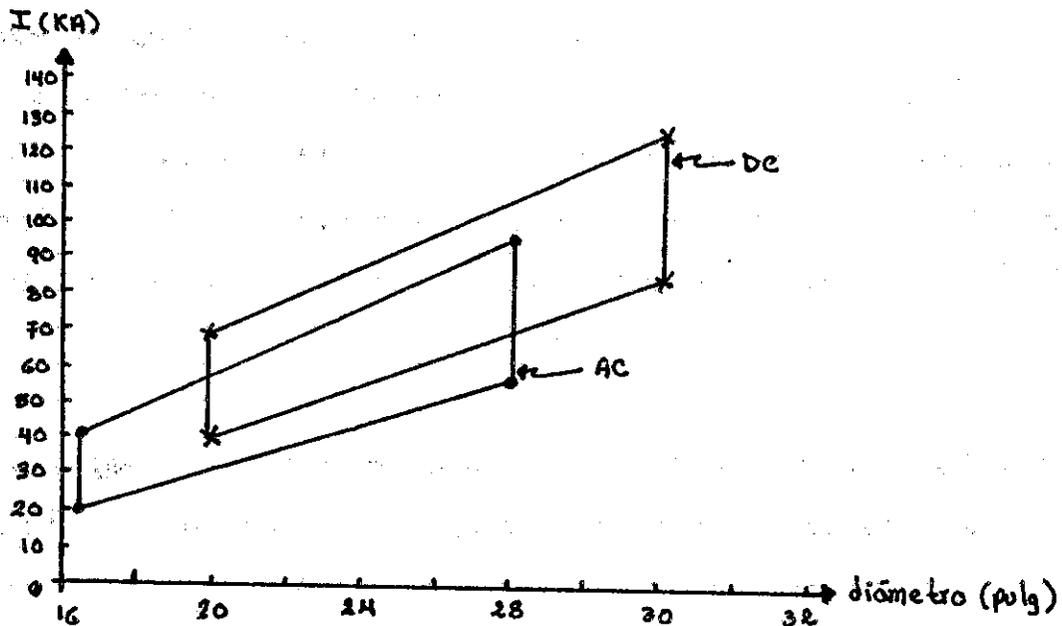


Fig. No. 46

3.6.1 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LOS ELECTRODOS:

- 1.- Parámetros eléctricos; el factor más importante es la capacidad del transformador, ya que ésta determina la densidad de corriente a través del electrodo (Amp / mm²).
- 2.- Propiedades del electrodo; las propiedades del electrodo que afectan su comportamiento son: densidad aparente (g / cc), resistividad eléctrica ($\mu\Omega$ / mt), y resistencia mecánica (KPa).
- 3.- Variables operativas de la acería; entre las que se encuentran: práctica de uso de oxígeno, tiempos de colada, consumo de energía, tipo de acero, calidad y tipo de carga, sistema de extracción de humos, práctica de escoria, nivel de potencia, anillos de agua sobre electrodos, etc.
- 4.- Prácticas de manejo y ensamble; la parte más débil de una columna de electrodos es la unión entre dos piezas por medio del niple, por lo que se deben de tener un cuidado especial para mantener esta parte de la columna apretada (con el par de apriete recomendado) y limpio.

3.7 ENFRIAMIENTO DE ELECTRODOS (ANILLOS)

La distribución típica del consumo total de electrodos es: por generación del arco (55 %), oxidación (40 %) y roturas (5 %). Se han intentado diferentes métodos para reducir el consumo por oxidación: recubrimientos conductores y cerámicos, tratamientos químicos, intercambiadores de calor (electrodos metálicos) etc. con buenos resultados, sin embargo, la mejor forma para disminuir el consumo lateral de las columnas de los electrodos es a través de una cortina de agua sobre éstos, por medio de anillos con orificios.

No se requieren sistemas de alta tecnología ni de propósitos especiales; el rango típico de flujo de agua a través del sistema de anillos depende de la temperatura de los electrodos y varía de 8 a 12 litros / minuto / fase, utilizados en Europa y de 15 a 27 litros / minuto / fase, en instalaciones del Continente Americano. Las presiones del agua oscilan solamente entre 0.35 a 0.7 Kgs / cm². Los orificios o espreas, con diámetros de entre 1.5 a 3.0 milímetros, están colocadas cada 10 a 15 centímetros, a través del anillo. Los anillos y la tubería asociada, son típicamente de acero inoxidable, de una pulgada de diámetro interior. Cuando se utiliza tubería C-40 (de acero al carbón) los anillos deben de ser abiertos, sin formar una bobina, para evitar inducción magnética en los mismos.

Entre las ventajas que muestra los sistemas de enfriamiento de electrodos por aspersión, están:

- 1.- Costo inicial bajo.
- 2.- Recuperación rápida de la inversión.
- 3.- Ahorro de electrodos entre 5 a 18 %.
- 4.- Incremento en la vida de la bóveda del horno (doble o triple).
- 5.- Mayor duración de las mordazas.
- 6.- Mejoría en las condiciones de trabajo.
- 7.- Potencial disminución de roturas y pérdidas de puntas al tener mayor diámetro.

Entre las desventajas del enfriamiento de electrodos, es decir, el chorro de agua sobre los electrodos están:

- 1.- Incremento en la energía específica (del orden de 5 a 7 %).
- 2.- Se requiere agua de calidad para evitar obstrucciones.

- 3.- Humedad en los sistemas de captación de humos (crítico en sistemas de extracción lateral).
- 4.- Agua en exceso, moja la chatarra (el uso de válvulas selenoide que cierran cuando se corta la corriente, han sido la solución a éste problema).
- 5.- Potencial de captación de hidrógeno en el acero por producir (crítico en la producción de aceros especiales, aunque no se han reportado problemas graves).

De acuerdo a evaluaciones efectuadas, de un consumo de 2.3 Kg/Ton sin utilizar enfriamiento de electrodos por medio de anillos con chorro de agua, el 42 % lo integra el consumo en la punta y el 58 % el consumo lateral. Con el uso del chorro de agua se obtiene una reducción del orden de 18 % en el consumo de electrodos, que equivale a un total de 1.9 Kg/Ton cuya distribución comprende 53 % de consumo de punta y 47 % de consumo lateral. Existe una dependencia del consumo en la punta con el cuadrado de la corriente de operación. Y puesto que el criterio de operar con altos voltajes y arco largo, implica rangos de corriente menores, el consumo longitudinal (puntas) ha disminuído en forma dramática. Se mantiene una relación directa entre los consumos de electrodos y de energía eléctrica, o sea que un aumento de energía eléctrica va acompañado con un incremento en el consumo de electrodos. La tendencia inversa se observa con la productividad, menor productividad - mayor consumo de electrodos.

En las siguientes figuras se observan los distintos tipos de enfriamientos de los electrodos, así como un detalle del sistema de aspersión en los mismos.

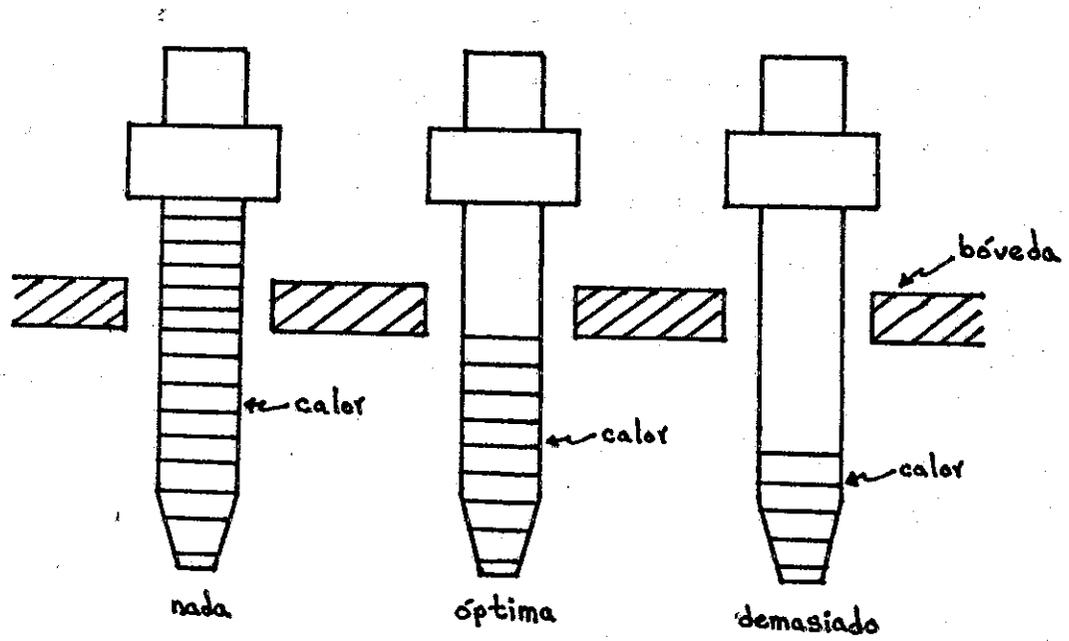


Fig. No. 47

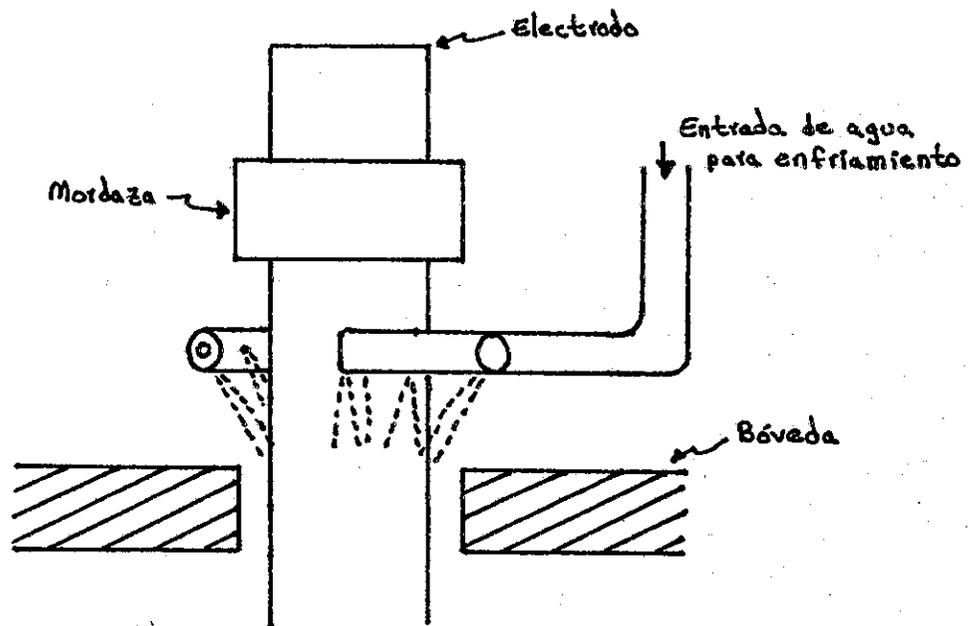


Fig. No. 48

4 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS

4.1 MEDICIÓN DEL SISTEMA 230 KV, CON HORNO FUERA DE LÍNEA

En la siguiente medición se muestran algunos parámetros medidos en la subestación eléctrica, en la barra de 230 KV. Es muy importante hacer la aclaración que las lecturas fueron tomadas en un día normal, en el cual el proceso de producción estaba detenido, con lo cual solamente se mostrará el comportamiento del Sistema Nacional ; los cuales son:

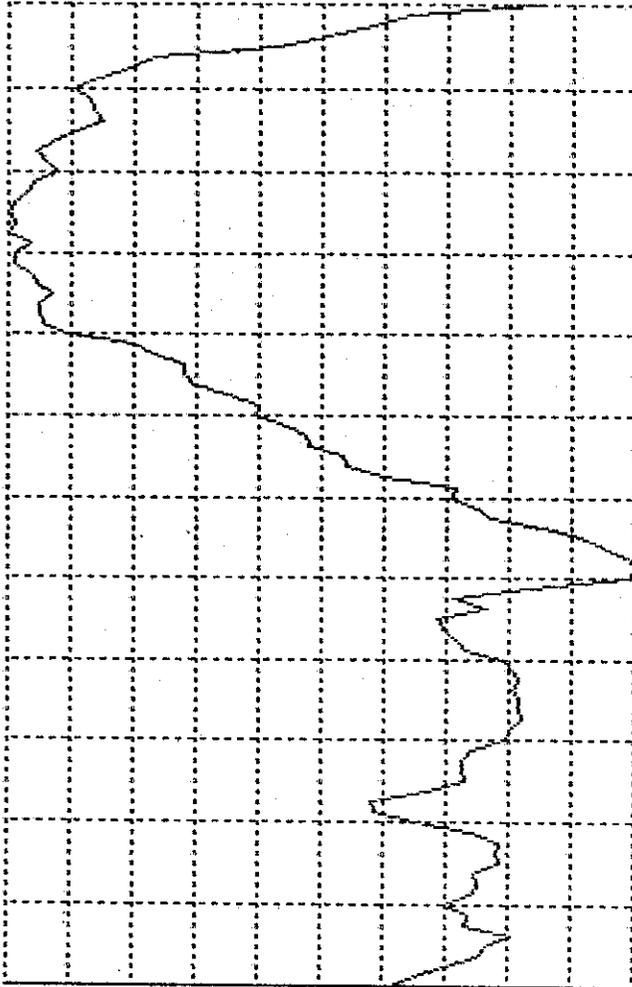
- | | |
|-----------------------------|-------------|
| 1.- Voltaje línea - tierra. | Fig. No. 49 |
| 2.- Amperaje por fase. | Fig. No. 50 |
| 3.- Kilovatios consumidos. | Fig. No. 51 |
| 4.- Kilovares consumidos. | Fig. No. 52 |
| 5.- Kilovatios demandados. | Fig. No. 53 |
| 6.- Amperajes demandados. | Fig. No. 54 |
| 7.- Factor de potencia. | Fig. No. 55 |
| 8.- Frecuencia. | Fig. No. 56 |

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:21:10 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- ▲ VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VOLUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVAIRH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME

137359



126394

TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

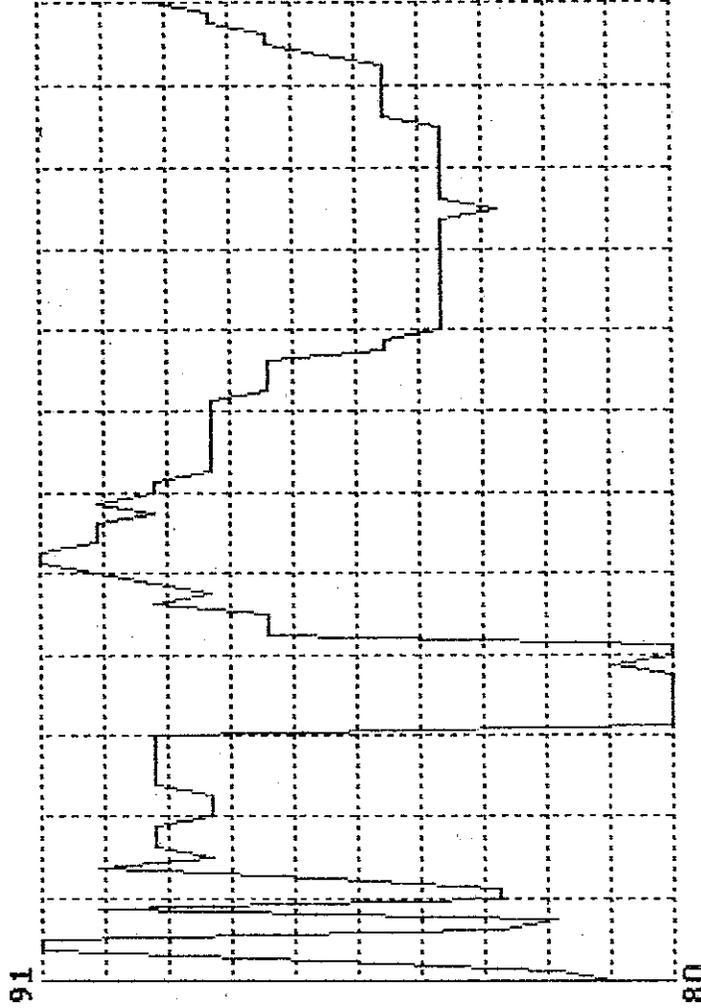
08:15:00
96/11/29

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:24:52 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- ▶ AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KWH DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWHI
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/29

TIME
DATE

08:15:00
96/11/28

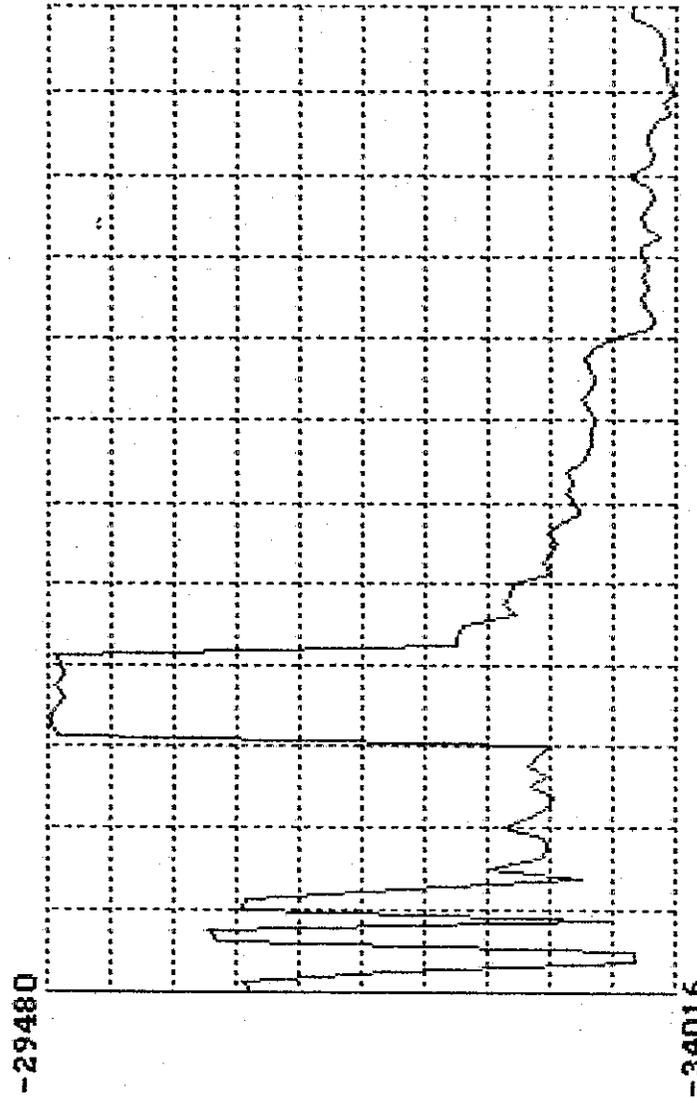
Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

Fig. No. 50

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:27:26 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- * KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

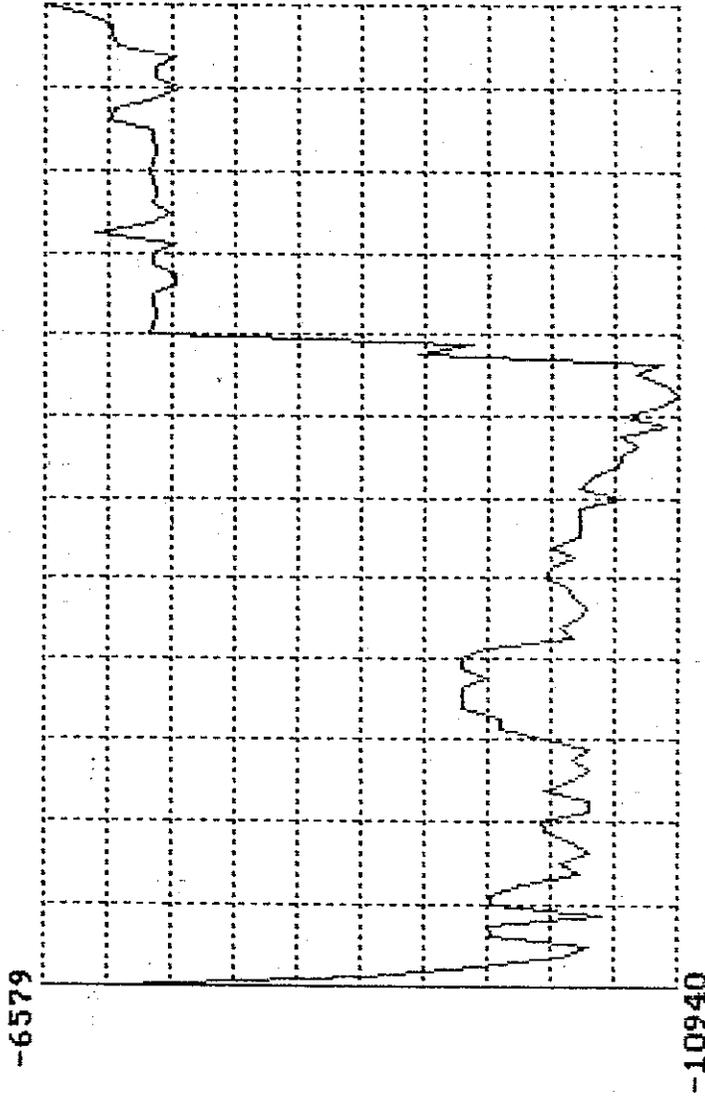
08:15:00
96/11/29

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:29:59 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- ▶ KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KMH
- KVARH
- KMH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

08:15:00
96/11/29

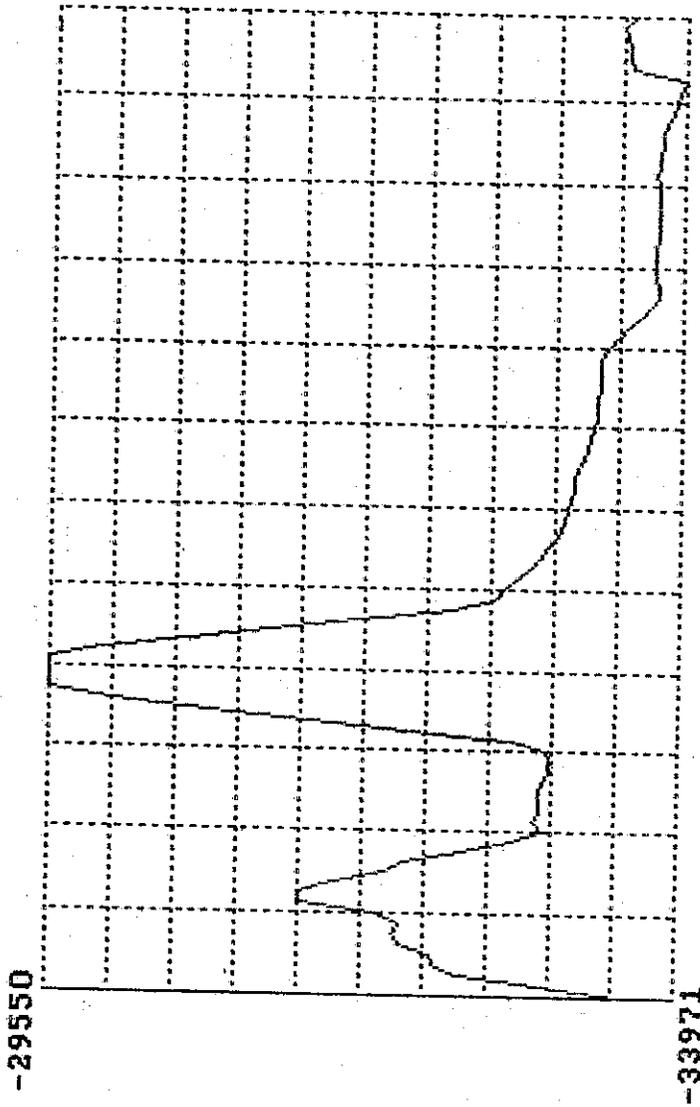
Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

Fig. No. 52

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:32:32 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- ▲ KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- V AUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

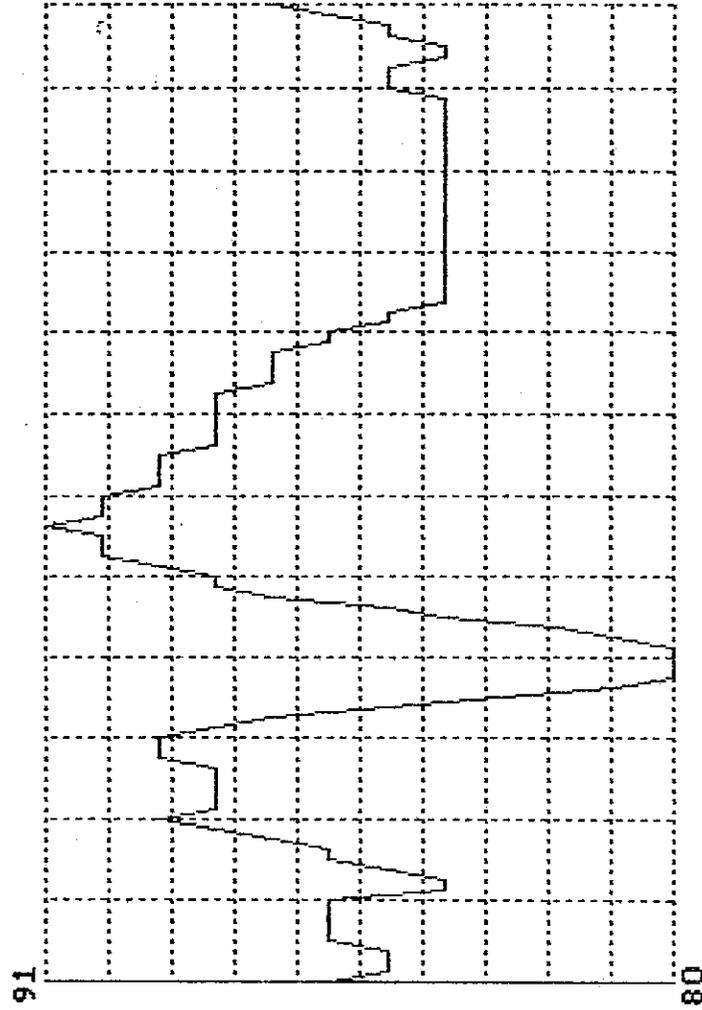
08:15:00
96/11/29

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:35:23 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KUAR
- KW DEMAND
- ▲ AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- V AUX
- FREQUENCY
- KMH
- KUARH
- KMH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00	TIME	08:15:00
96/11/28	DATE	96/11/29

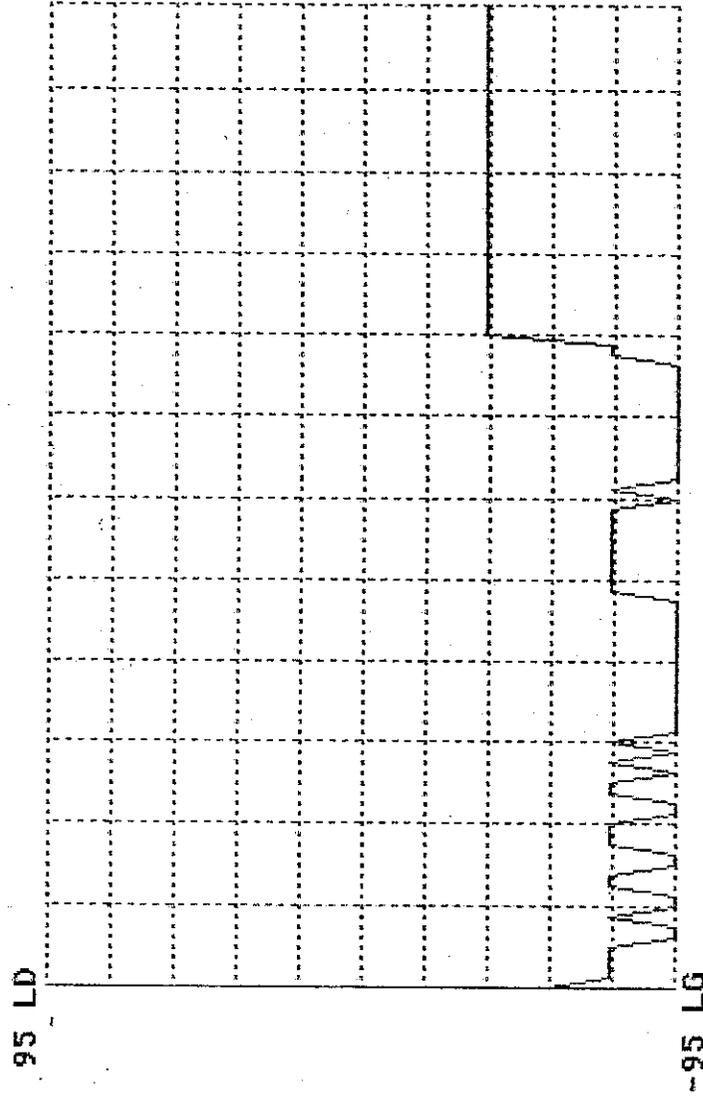
Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

Fig. No. 54

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:37:55 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- ▲ POWER FACTOR
- V/UX
- FREQUENCY
- KMH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

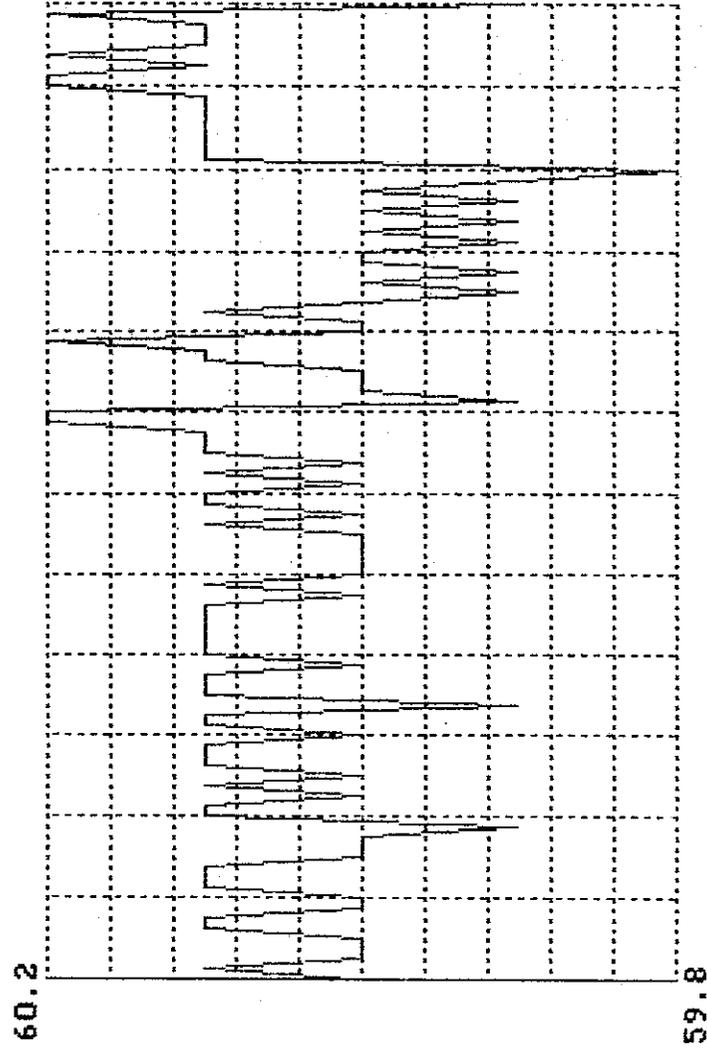
08:15:00
96/11/29

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 08:40:45 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- ▲ FREQUENCY
- KMH
- KVARH
- KMH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:15:00
96/11/28

08:15:00
96/11/29

Help: F1

Print: F4

Select: Enter

Scaling: F10

Exit: Esc

FIG. No. 56

4.2 MEDICIÓN DEL SISTEMA 230 KV, CON HORNO EN LÍNEA

En las siguientes gráficas se muestran los anteriores parámetros medidos en la barra de 230 KV de la Subestación Eléctrica SIDEGUA, en los cuales dichas lecturas ya muestran la influencia del horno de arco eléctrico en el Sistema Nacional.

- | | |
|-----------------------------|-------------|
| 1.- Voltaje Línea - Tierra. | Fig. No. 57 |
| 2.- Amperaje por Fase. | Fig. No. 58 |
| 3.- Kilovatios Consumidos. | Fig. No. 59 |
| 4.- Kilovares Consumidos. | Fig. No. 60 |
| 5.- Kilovatios Demandados. | Fig. No. 61 |
| 6.- Amperajes Demandados. | Fig. No. 62 |
| 7.- Factor de Potencia. | Fig. No. 63 |
| 8.- Frecuencia. | Fig. No. 64 |

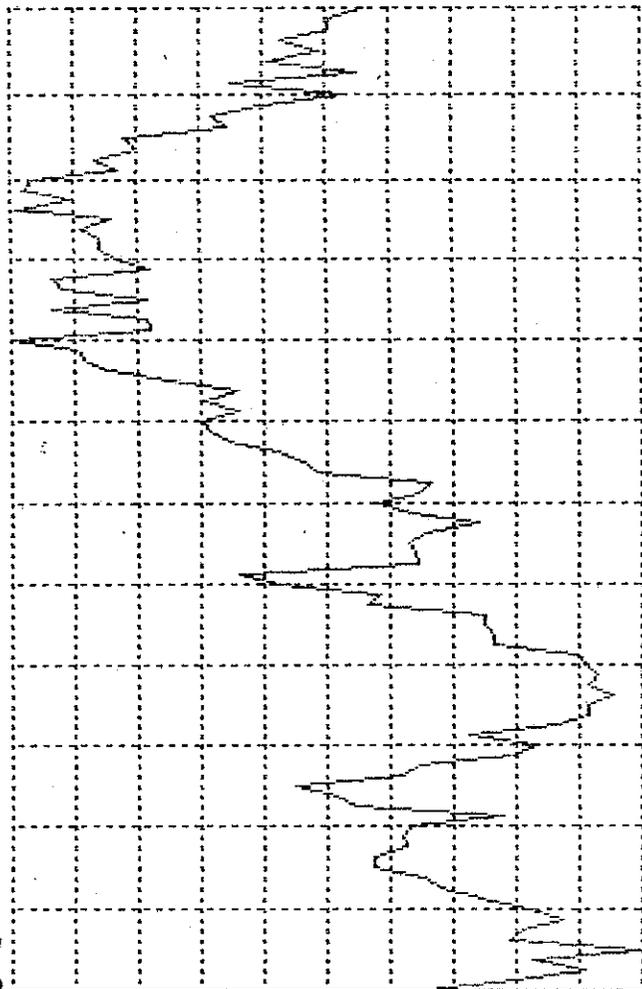
3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:16:30 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

139568

- COMMAND
- ▶ VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME

129201



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

TIME
DATE

08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4

Select: Enter

Scaling: F10

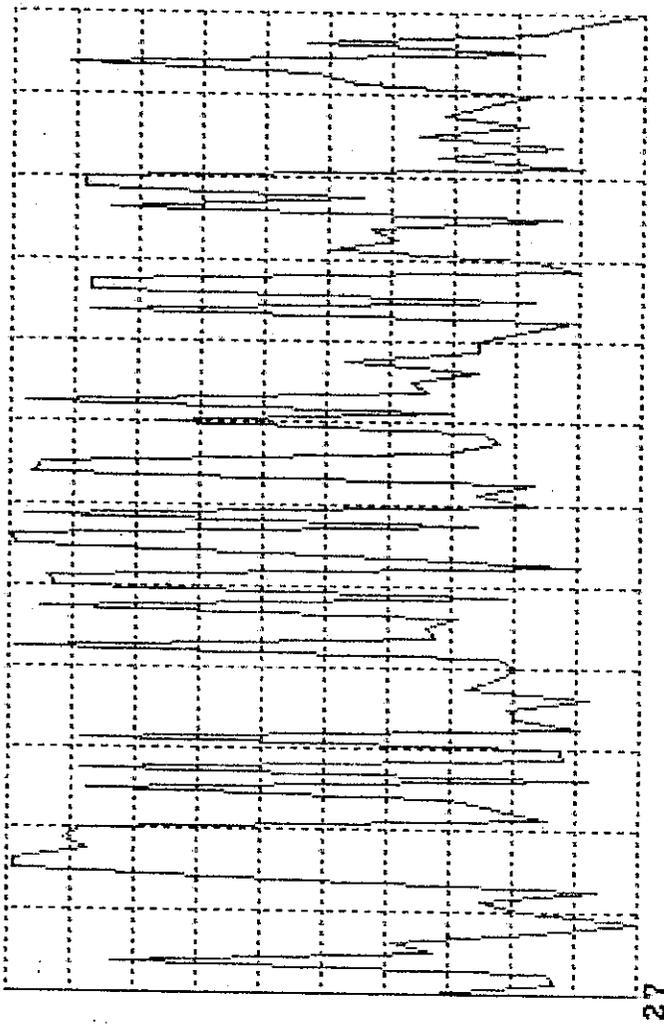
Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:20:04 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- ▶ AMPS AVG
- KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME

104



27

TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

TIME
DATE

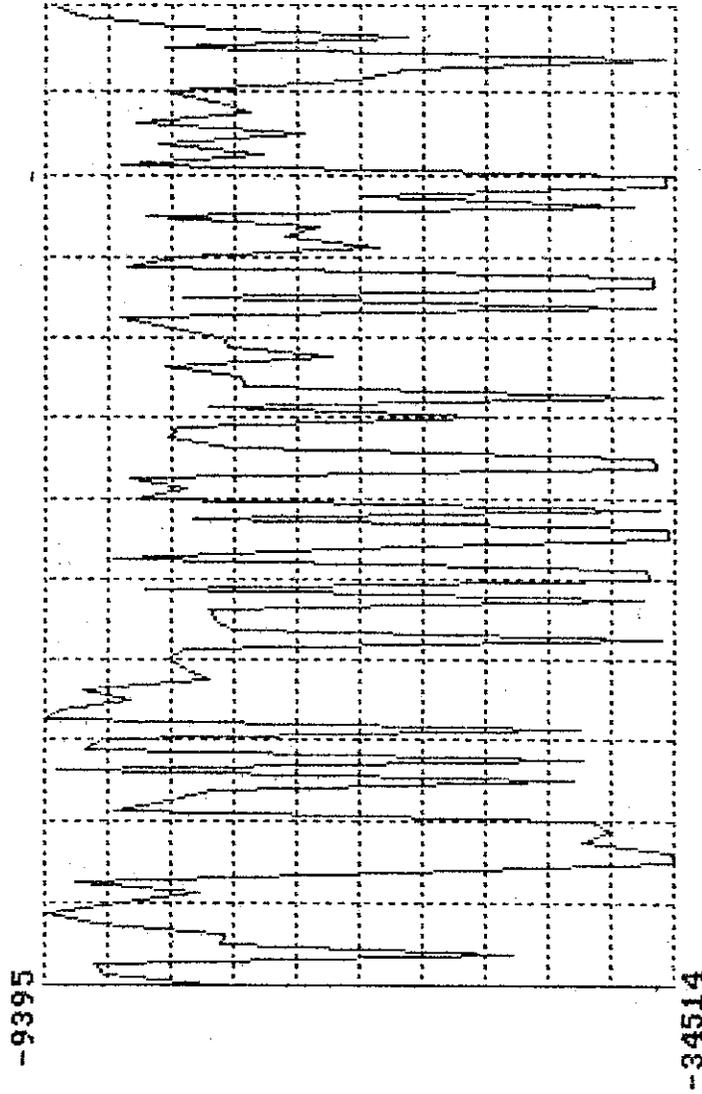
08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:22:37 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- ▲ KW
- KVAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KMH
- KVARH
- KMH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

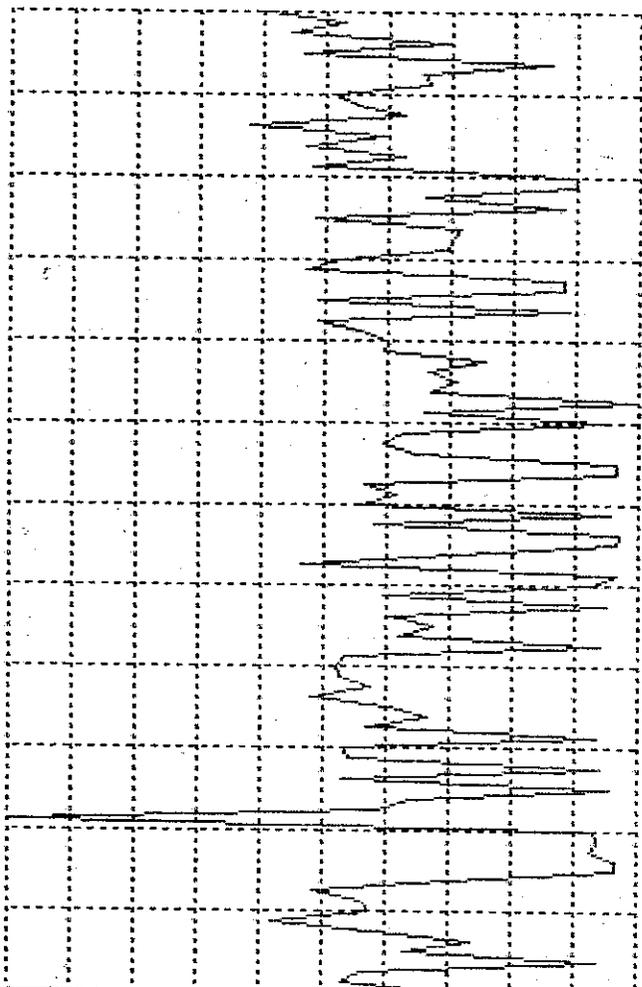
FIG. No. 59

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:25:10 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- ▶ KUAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KMH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME

8772



-23923

TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

08:00:00
97/01/24

TIME
DATE

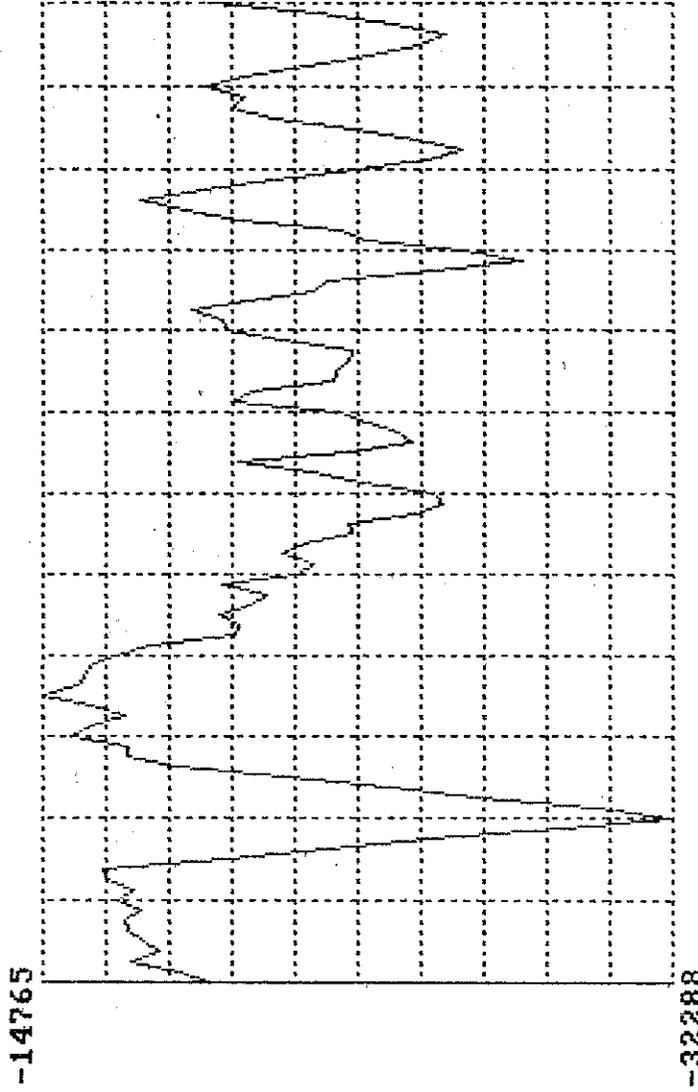
Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

Fig. No. 60

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:27:37 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KW
- KVAR
- ▲ KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

08:00:00
97/01/24

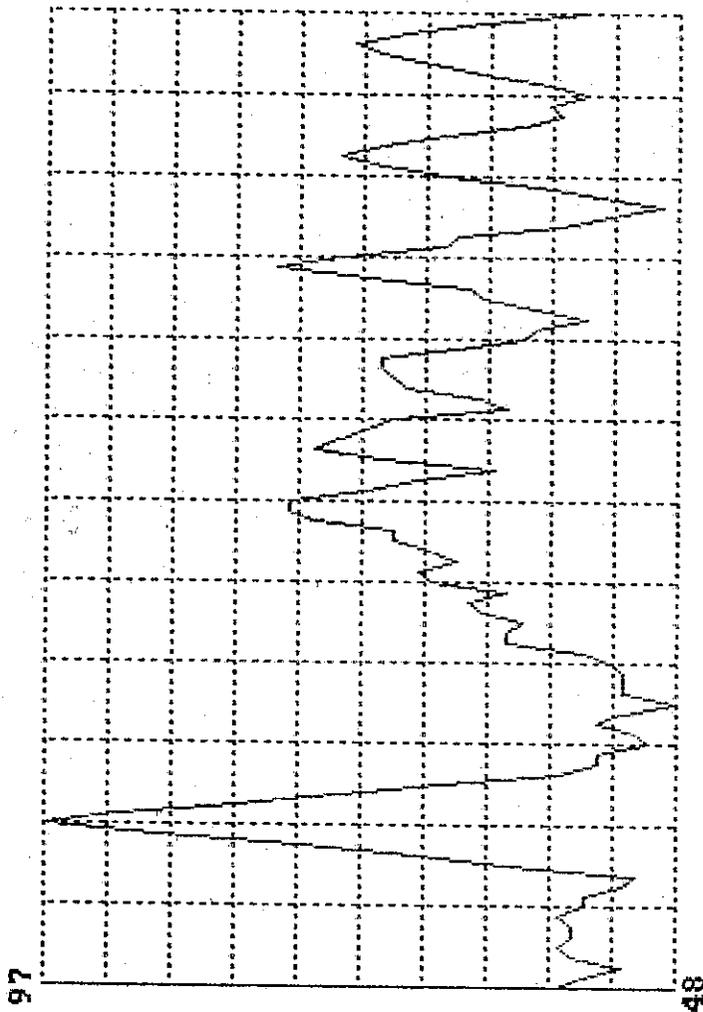
Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

Fig. No. 61

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:30:01 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KWH
- KVARH
- KWH DEMAND
- ▲ AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

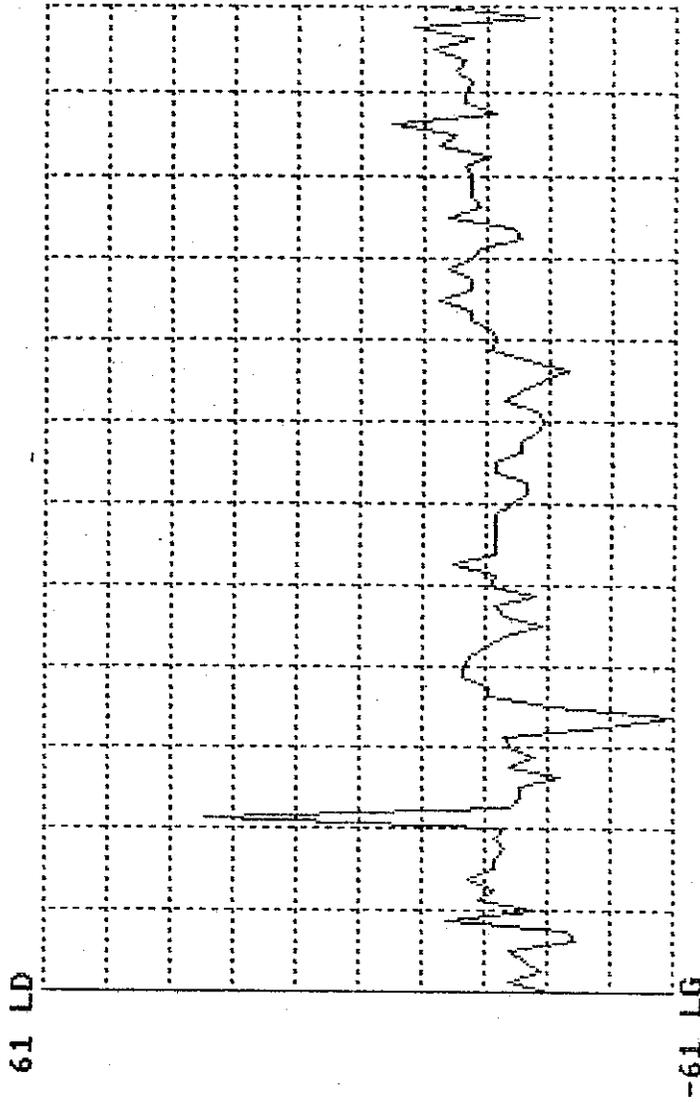
TIME
DATE
08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:32:32 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KM
- KUAR
- KW DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VAUX
- FREQUENCY
- KWH
- KUARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

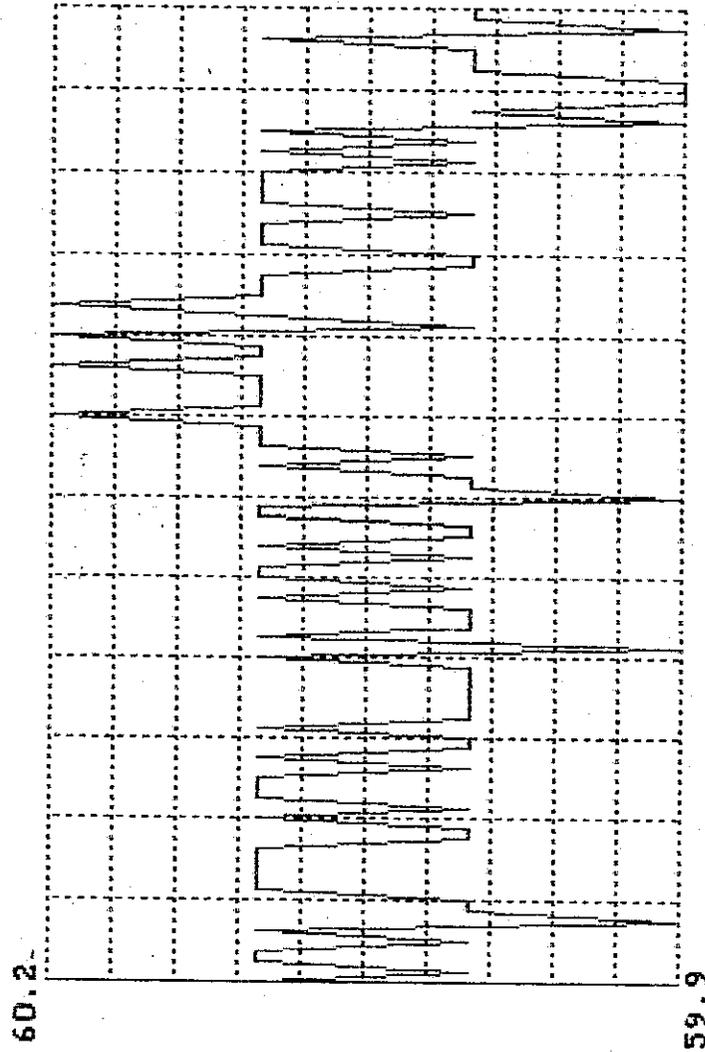
08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

3710 ACM Historical Trending Screen Updated at 14:35:04 Jan 24 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

- COMMAND
- VOLTS AVG
- AMPS AVG
- KWH
- KVAR
- KWH DEMAND
- AMP DEMAND
- POWER FACTOR
- VOLTS
- ▲ FREQUENCY
- KVAH
- KVARH
- KWH REVERSE
- CLEAR GRAPH
- CHANGE TIME



TIME BASE: 1

08:00:00
97/01/23

TIME
DATE

08:00:00
97/01/24

Help: F1 Print: F4 Select: Enter Scaling: F10 Exit: Esc

4.3 MEDICION DE ARMONICAS CON HORNO FUERA DE LINEA, CON HORNO EN ROMPIMIENTO DE CHATARRA Y CON HORNO EN BAÑO PLANO

Las gráficas que a continuación se muestran detallan el comportamiento del horno (midiendo sus armónicas generadas), tomadas las lecturas en la subestación eléctrica en la barra de 230 KV, inicialmente tomadas con: el horno fuera de línea, con el horno en el momento de realizar perforación de la chatarra (que es cuando se obtiene la máxima distorsión) y finalmente con el horno en baño plano, es decir cuando ya se tiene acero líquido sobre la bóveda.

- | | |
|--|--------------------------|
| 1.- Armónicas en forma vectorial. | Figs. Nos. 65, 66, 67 |
| 2.- Armónicas en forma senoidal. | Figs. Nos. 68, 69, 70 |
| 3.- Espectro de armónica de voltaje V1. | Figs. Nos. 71, 72, 73 |
| 4.- Tabla de armónica de voltaje V1. | Figs. Nos. 74, 75, 76 |
| 5.- Espectro de armónica de voltaje V2. | Figs. Nos. 77, 78, 79 |
| 6.- Tabla de armónica de voltaje V2. | Figs. Nos. 80, 81, 82 |
| 7.- Espectro de armónica de voltaje V3. | Figs. Nos. 83, 84, 85 |
| 8.- Tabla de armónica de voltaje V3. | Figs. Nos. 86, 87, 88 |
| 9.- Espectro de armónica de corriente I1. | Figs. Nos. 89, 90, 91 |
| 10.- Tabla de armónica de corriente I1. | Figs. Nos. 92, 93, 94 |
| 11.- Espectro de armónica de corriente I2. | Figs. Nos. 95, 96, 97 |
| 12.- Tabla de armónica de corriente I2. | Figs. Nos. 98, 99, 100 |
| 13.- Espectro de armónica de corriente I3. | Figs. Nos. 101, 102, 103 |
| 14.- Tabla de armónica de corriente I3. | Figs. Nos. 104, 105, 106 |
| 15.- Gráfica de voltaje promedio en sistema nacional | Fig. No. 107 |

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

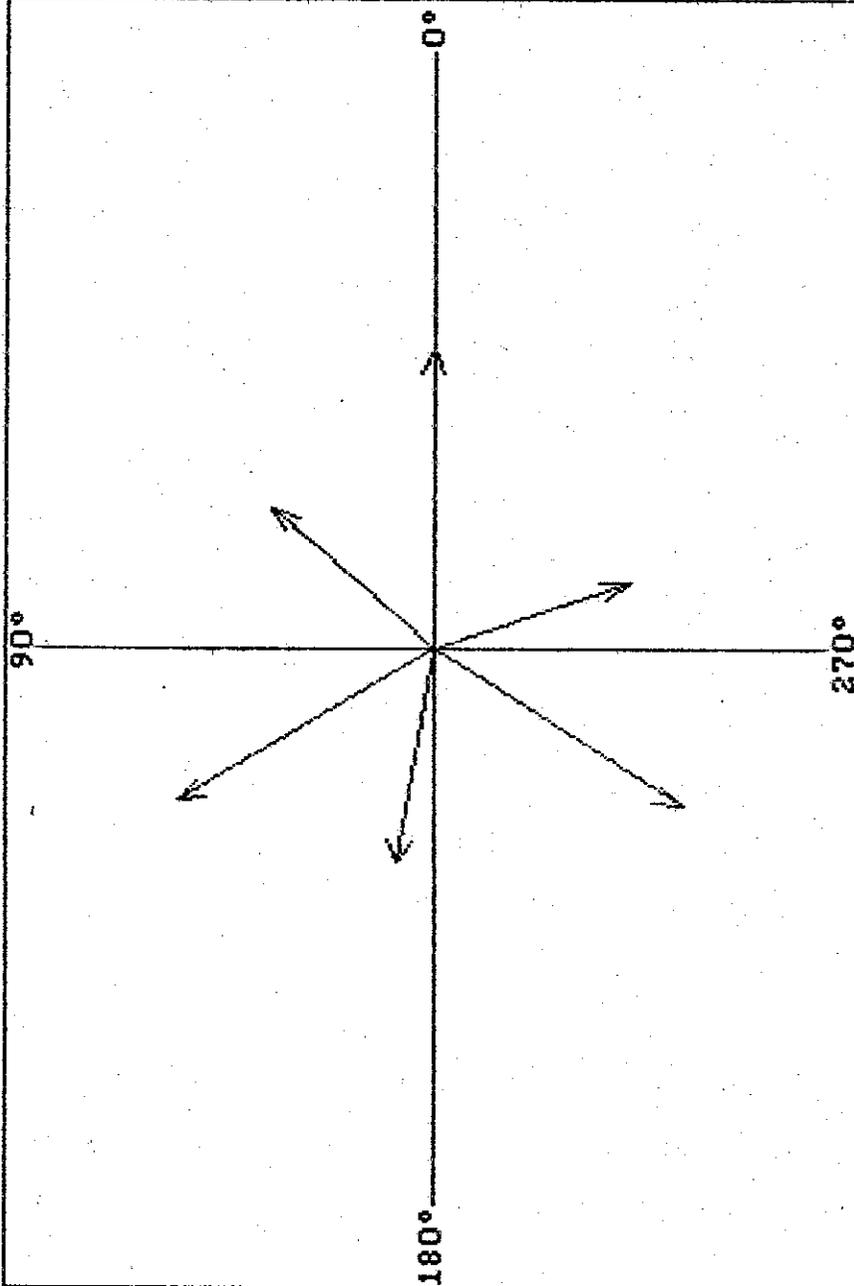
CHANNEL

VECTOR DIAGRAM

V1	0°
V2	119°
V3	239°
I1	169°
I2	287°
I3	49°

▶ WAVEFORMS

ACCURACY AT
NOMINAL FREQ
± 5°



Help: F1

Print: F4

Save: F2

Select: Enter

Exit: Esc

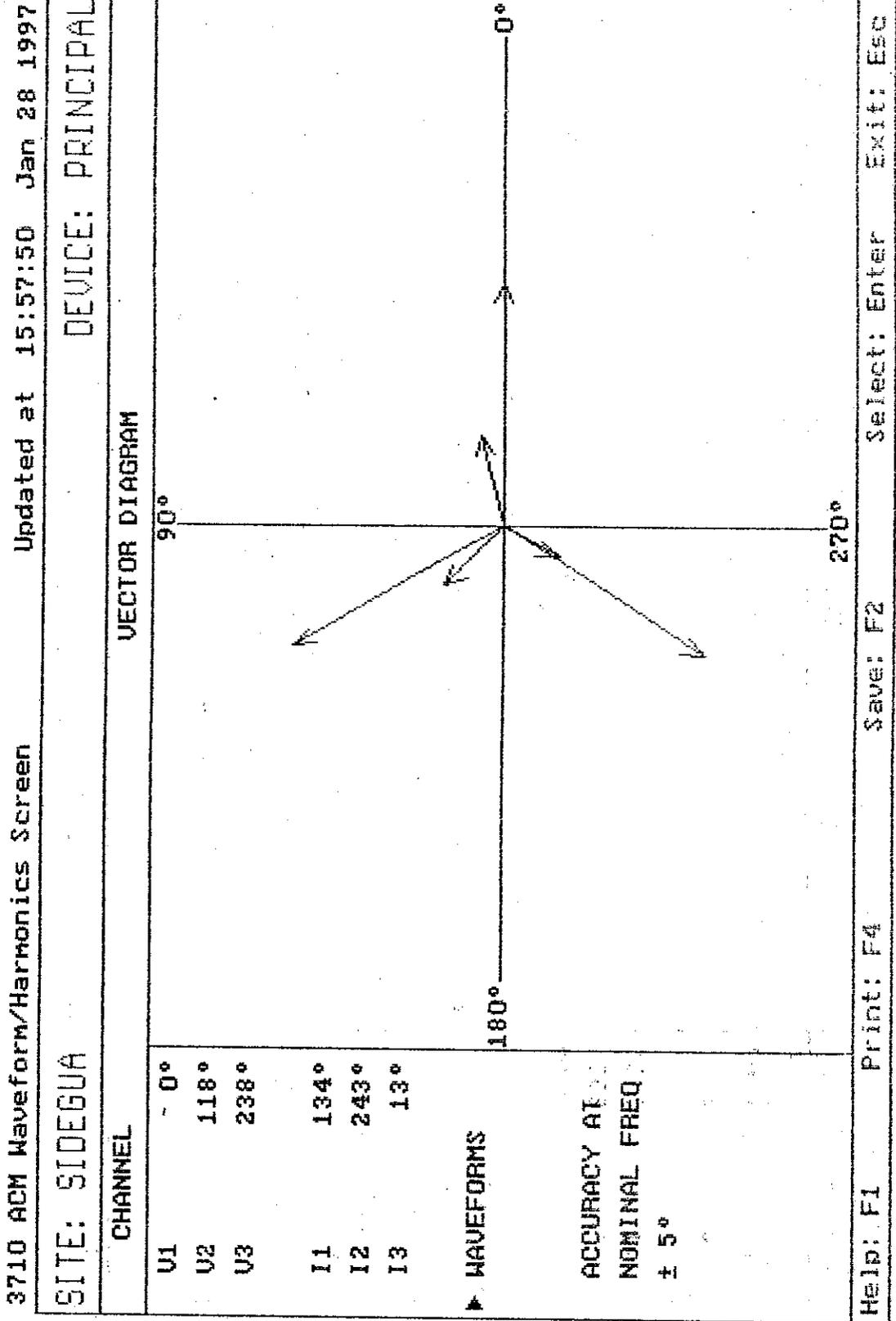
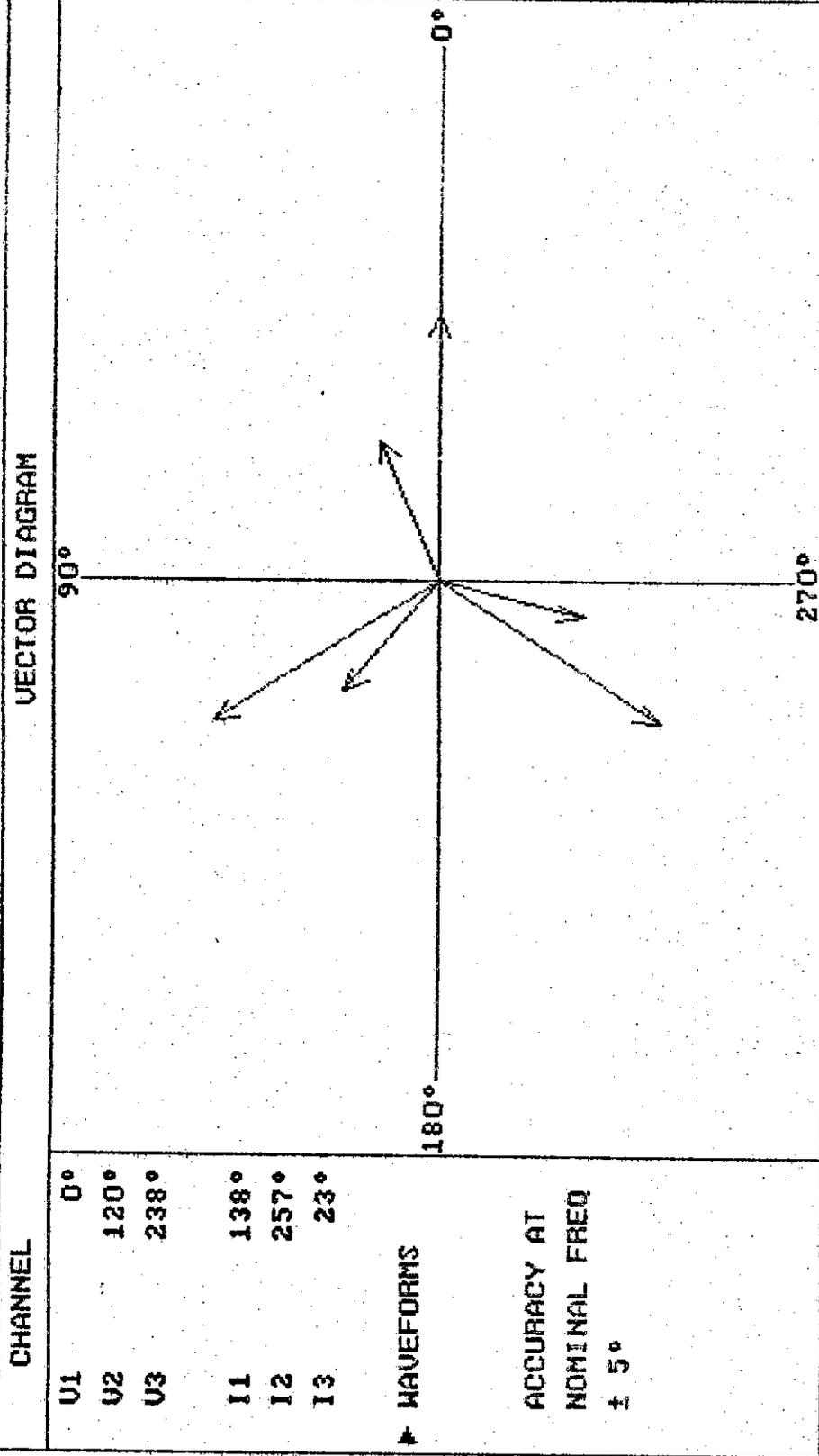


Fig. No. 6G

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL



Help: F1 Print: F4 Save: F2 Select: Enter Exit: Esc

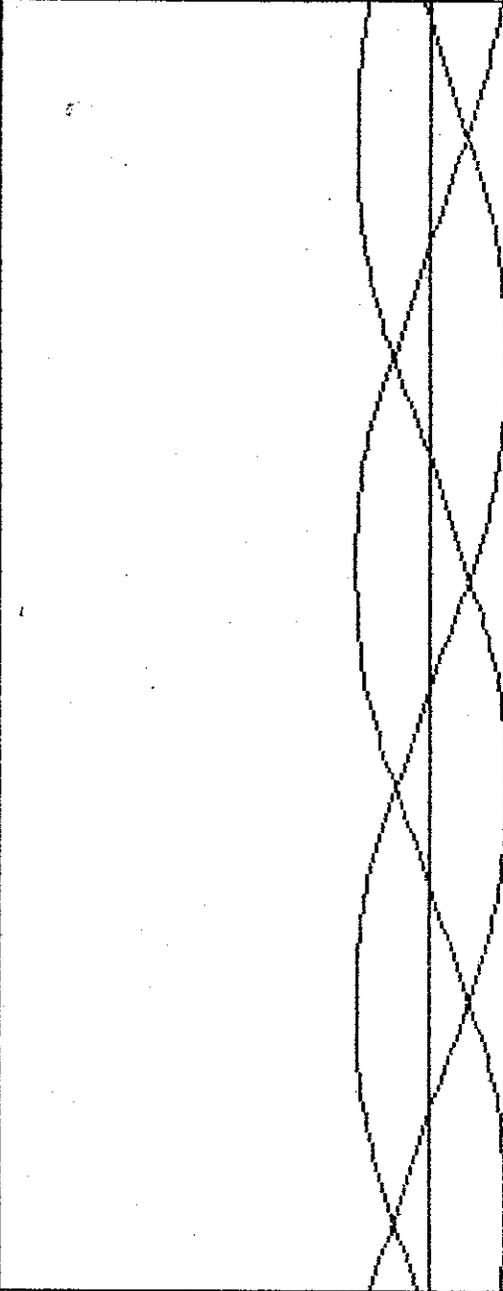
Fig. No. 07

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 08:45:24 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

CHANNEL CAPTURED WAVEFORM

- V1 THD 2.0
- V2 THD 2.3
- ▶ V3 THD 2.1
- VX THD
- I1 THD
- I2 THD
- I3 THD
- I4 THD
- SHOW VECTORS
- CLEAR GRAPH
- DISPLAY THD
- DISPLAY K-F
- DISPLAY C-F



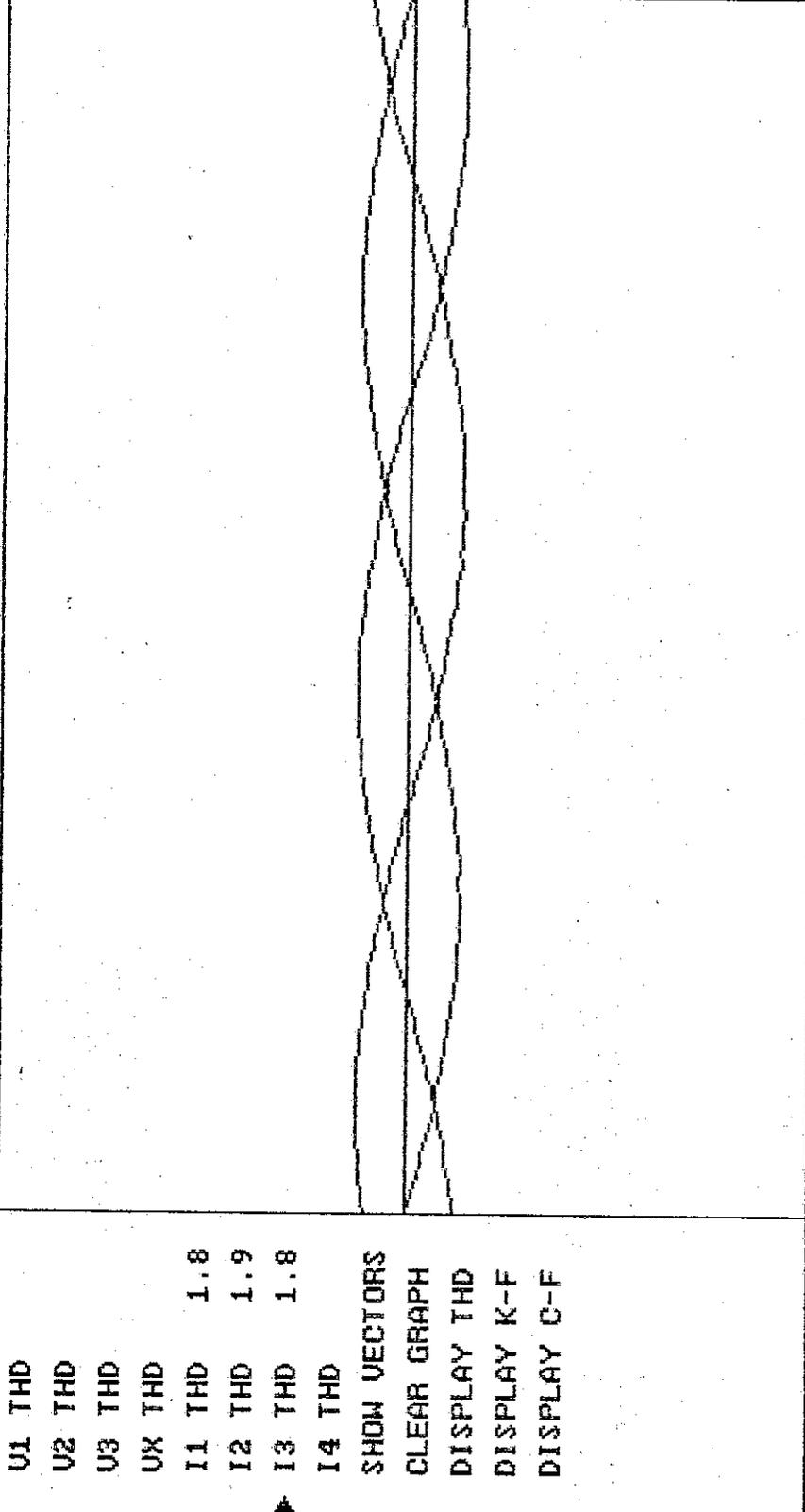
Help: F1 Print: F4 Save: F2 Spectrum: → Select: Enter Exit: Esc

Fig. No. 68

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 09:02:38 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

CHANNEL CAPTURED WAVEFORM



Help: F1 Print: F4 Save: F2 Spectrum: → Select: Enter Exit: Esc

Fig. No. 68

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

CHANNEL CAPTURED WAVEFORM

- ▶ U1 THD 2.5
- U2 THD 2.7
- U3 THD 2.6
- UX THD
- I1 THD 13.5
- I2 THD 16.9
- I3 THD 13.0
- I4 THD

- SHOW VECTORS
- CLEAR GRAPH
- DISPLAY THD
- DISPLAY K-F
- DISPLAY C-F

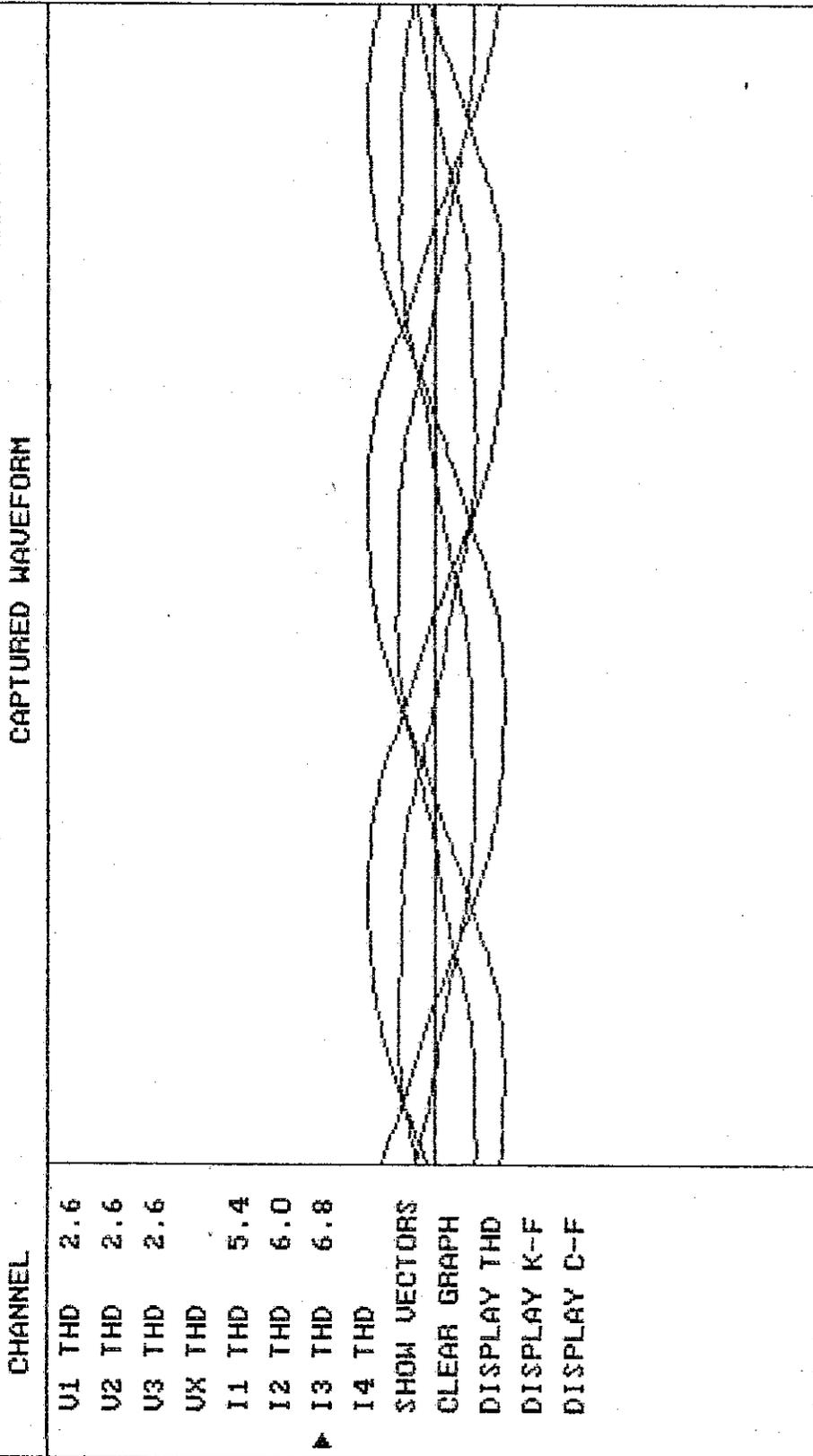


Help: F1 Print: F4 Save: F2 Spectrum: → Select: Enter Exit: Esc

FIG. NO. 69

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL



Help: F1 Print: F4 Save: F2 Spectrum: → Select: Enter Exit: Esc

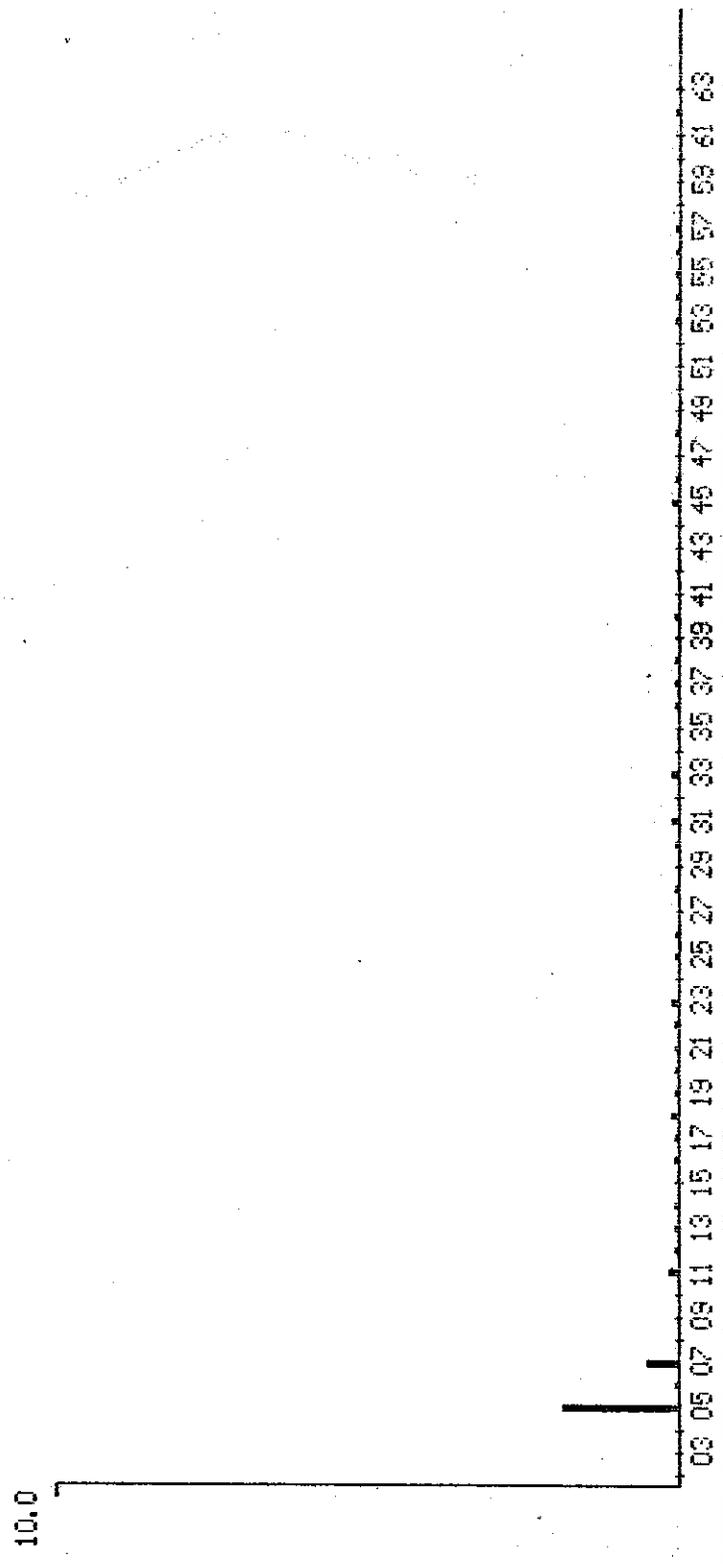
Fig. No. 70

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 08:45:24 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U1

%THD = 2.0



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 71

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U1

%THD = 2.5

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 72

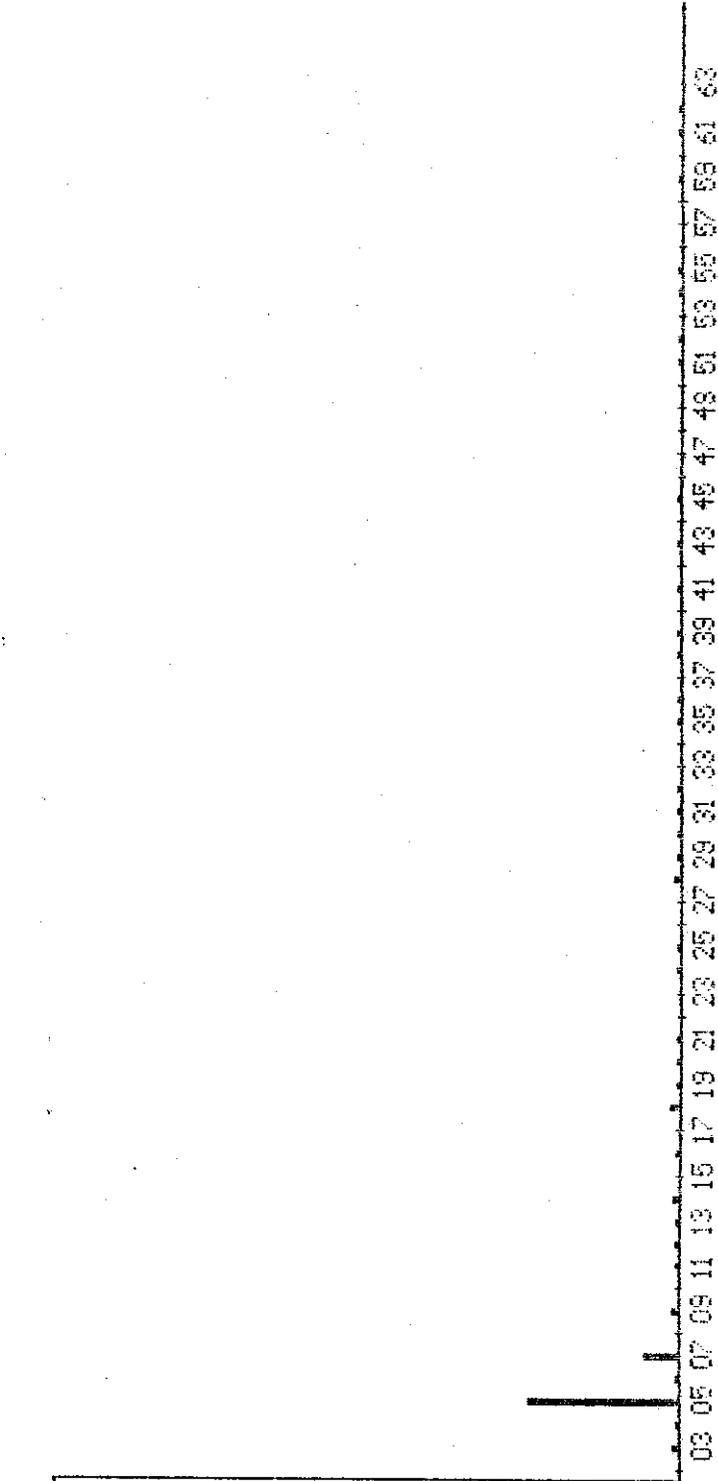
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U1

%THD = 2.6

10.0



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 73

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V1

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.0	04	0.0
05	1.9	06	0.1
07	0.5	08	0.0
09	0.0	10	0.0
11	0.2	12	0.1
13	0.1	14	0.1
15	0.0	16	0.1
17	0.1	18	0.1
19	0.1	20	0.1
21	0.1	22	0.1
23	0.1	24	0.0
25	0.1	26	0.1
27	0.0	28	0.1
29	0.0	30	0.1
31	0.1	32	0.0
33	0.1	34	0.0
35	0.0	36	0.1
37	0.1	38	0.1
39	0.0	40	0.1
41	0.0	42	0.0
43	0.0	44	0.0
45	0.1	46	0.1
47	0.0	48	0.1
49	0.0	50	0.0
51	0.0	52	0.0
53	0.1	54	0.1
55	0.1	56	0.1
57	0.1	58	0.0
59	0.0	60	0.0
61	0.0	62	0.1
63	0.0		

%THD = 2.0

SITE: SIDEGUA

137

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR VI

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.1
03	0.1	04	0.2
05	2.4	06	0.2
07	0.4	08	0.0
09	0.1	10	0.1
11	0.1	12	0.0
13	0.0	14	0.1
15	0.1	16	0.1
17	0.1	18	0.0
19	0.1	20	0.0
21	0.0	22	0.1
23	0.1	24	0.1
25	0.0	26	0.0
27	0.1	28	0.1
29	0.0	30	0.0
31	0.0	32	0.1
33	0.1	34	0.1
35	0.0	36	0.0
37	0.0	38	0.1
39	0.1	40	0.1
41	0.0	42	0.1
43	0.1	44	0.1
45	0.0	46	0.0
47	0.0	48	0.1
49	0.0	50	0.1
51	0.0	52	0.1
53	0.1	54	0.0
55	0.0	56	0.0
57	0.0	58	0.0
59	0.0	60	0.1
61	0.0	62	0.1
63	0.1		

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 Biblioteca Central

%THD = 2.5

Fig. No. 75

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V1

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.1	04	0.1
05	2.4	06	0.1
07	0.6	08	0.0
09	0.1	10	0.0
11	0.1	12	0.1
13	0.1	14	0.1
15	0.0	16	0.1
17	0.0	18	0.2
19	0.1	20	0.1
21	0.1	22	0.0
23	0.0	24	0.1
25	0.1	26	0.0
27	0.0	28	0.1
29	0.1	30	0.1
31	0.1	32	0.1
33	0.0	34	0.0
35	0.1	36	0.1
37	0.0	38	0.1
39	0.1	40	0.0
41	0.1	42	0.0
43	0.1	44	0.0
45	0.1	46	0.0
47	0.0	48	0.0
49	0.0	50	0.0
51	0.1	52	0.1
53	0.0	54	0.1
55	0.1	56	0.0
57	0.0	58	0.0
59	0.1	60	0.0
61	0.1	62	0.1
63	0.0		

%THD = 2.6

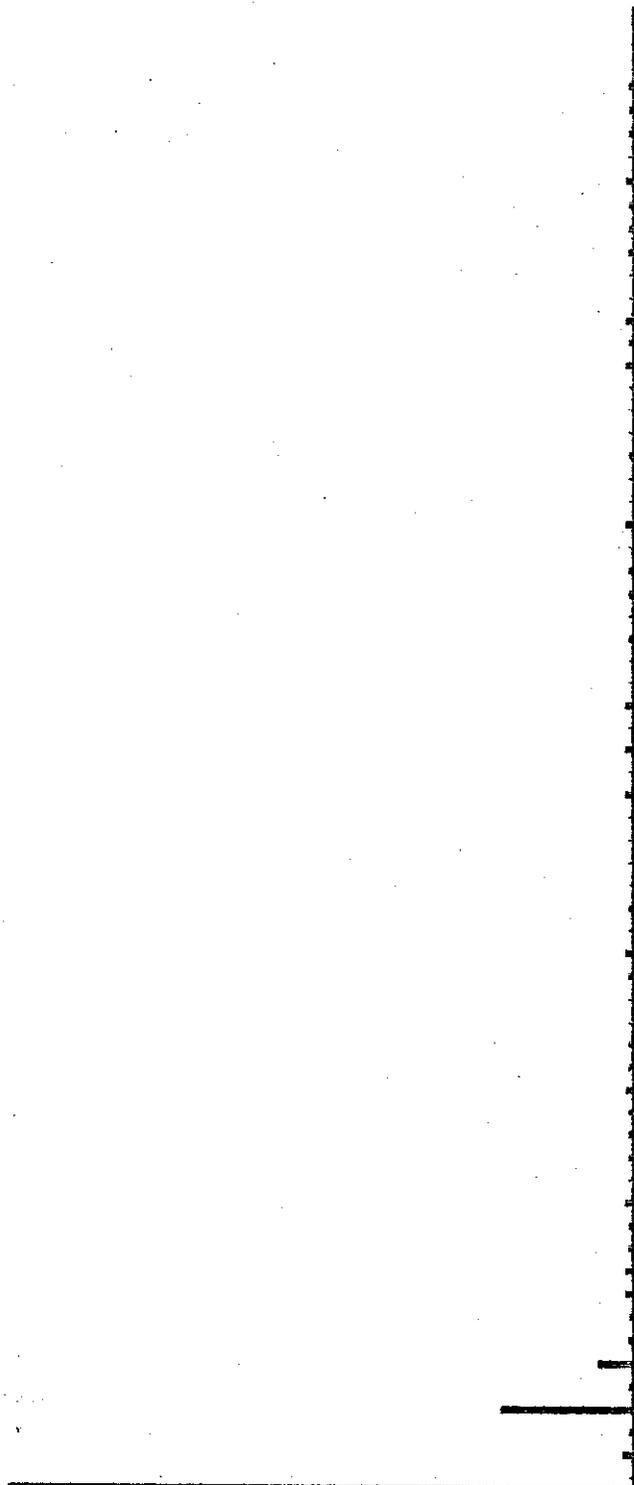
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 08:45:24 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U2

%THD = 2.3

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 77

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U2

%THD = 2.7

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 78

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U2

%THD = 2.6

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: + Save: F2 Print: F4 HD Table: + Exit: Esc

FIG. No. 79

SITE: SIDEGUA

142

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V2

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.2	04	0.1
05	2.1	06	0.1
07	0.6	08	0.1
09	0.1	10	0.1
11	0.1	12	0.1
13	0.1	14	0.1
15	0.0	16	0.1
17	0.1	18	0.1
19	0.1	20	0.1
21	0.1	22	0.0
23	0.0	24	0.1
25	0.1	26	0.0
27	0.1	28	0.0
29	0.0	30	0.0
31	0.0	32	0.1
33	0.0	34	0.1
35	0.0	36	0.1
37	0.0	38	0.0
39	0.1	40	0.0
41	0.1	42	0.1
43	0.0	44	0.1
45	0.0	46	0.0
47	0.1	48	0.0
49	0.0	50	0.0
51	0.1	52	0.1
53	0.1	54	0.0
55	0.0	56	0.1
57	0.1	58	0.1
59	0.1	60	0.0
61	0.1	62	0.1
63	0.1		

%THD = 2.3

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at: 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V2

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.1	04	0.1
05	2.6	06	0.1
07	0.4	08	0.1
09	0.1	10	0.0
11	0.0	12	0.1
13	0.0	14	0.0
15	0.1	16	0.1
17	0.0	18	0.1
19	0.1	20	0.0
21	0.1	22	0.0
23	0.0	24	0.0
25	0.1	26	0.0
27	0.1	28	0.1
29	0.1	30	0.1
31	0.1	32	0.0
33	0.1	34	0.0
35	0.0	36	0.0
37	0.1	38	0.1
39	0.1	40	0.0
41	0.0	42	0.1
43	0.1	44	0.1
45	0.1	46	0.1
47	0.1	48	0.1
49	0.0	50	0.1
51	0.0	52	0.1
53	0.0	54	0.0
55	0.0	56	0.0
57	0.0	58	0.1
59	0.1	60	0.0
61	0.1	62	0.1
63	0.1		

%THD = 2.7

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V2

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.1	04	0.1
05	2.5	06	0.0
07	0.5	08	0.1
09	0.0	10	0.0
11	0.0	12	0.0
13	0.0	14	0.1
15	0.0	16	0.0
17	0.1	18	0.0
19	0.1	20	0.1
21	0.0	22	0.1
23	0.1	24	0.0
25	0.0	26	0.1
27	0.1	28	0.0
29	0.0	30	0.0
31	0.1	32	0.0
33	0.0	34	0.0
35	0.0	36	0.1
37	0.1	38	0.1
39	0.2	40	0.0
41	0.0	42	0.0
43	0.0	44	0.1
45	0.1	46	0.0
47	0.0	48	0.1
49	0.0	50	0.0
51	0.1	52	0.1
53	0.0	54	0.1
55	0.1	56	0.0
57	0.1	58	0.1
59	0.0	60	0.0
61	0.1	62	0.0
63	0.0		

%THD = 2.6

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 08:45:24 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U3

%THD = 2.1

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

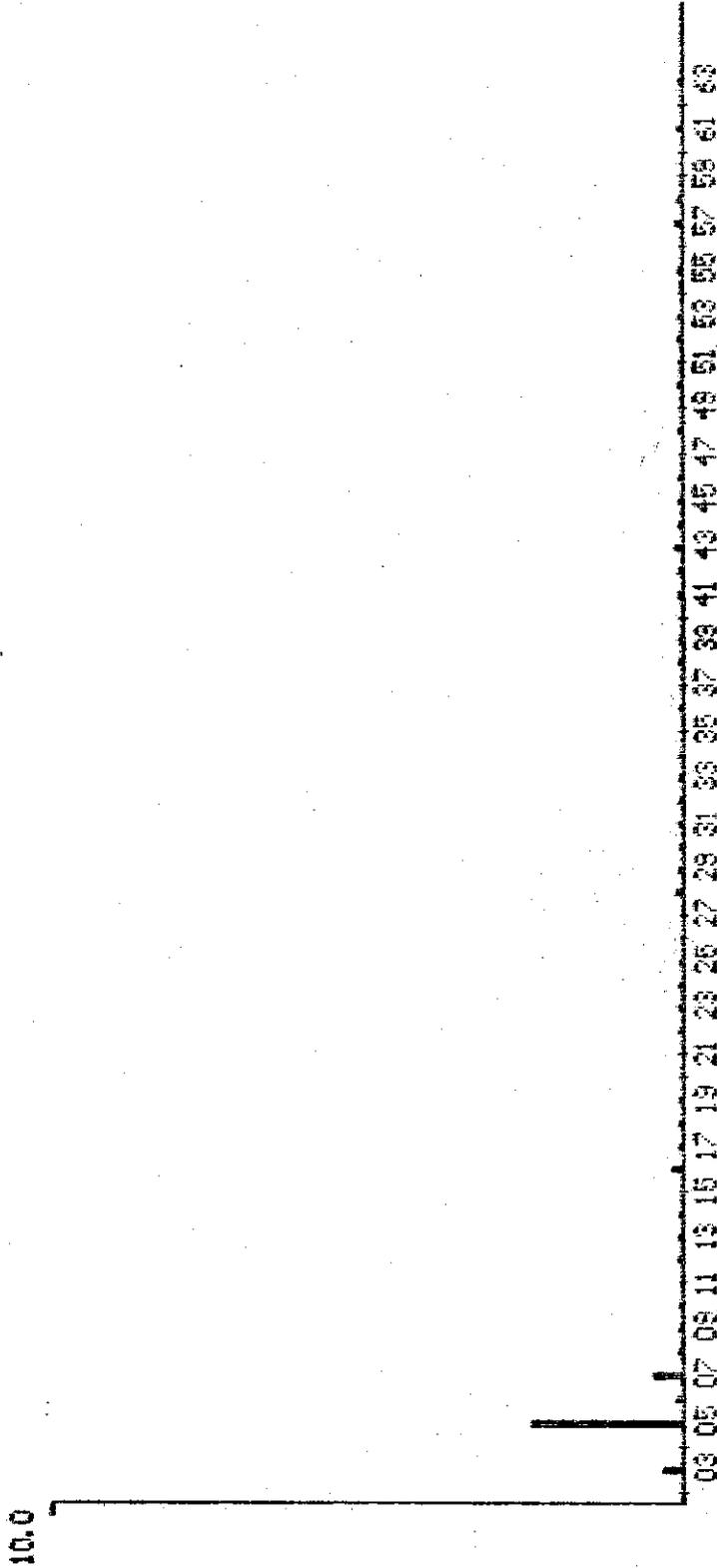
Fig. No. 03

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U3

%THD = 2.6



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: ESC

Fig. No. 84

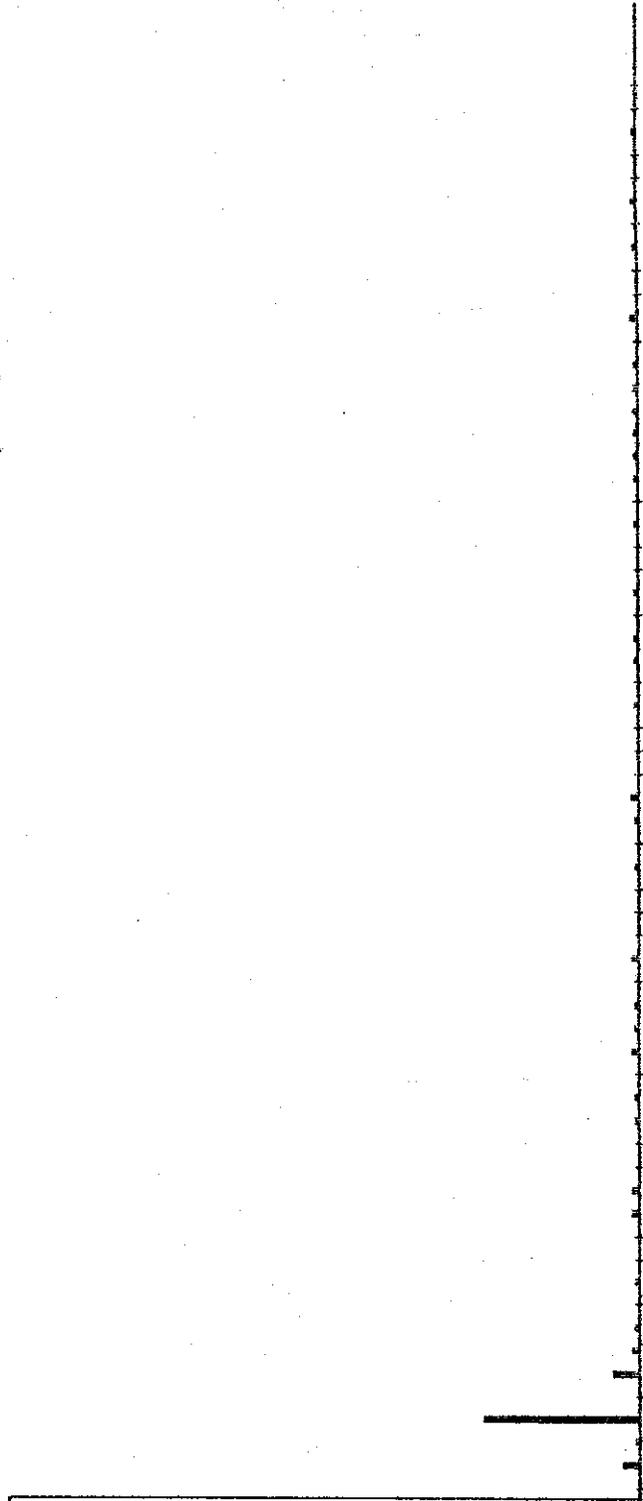
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR U3

%THD = 2.6

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 05

SITE: SIDEGUA

148

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V3

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.3	04	0.1
05	2.0	06	0.0
07	0.5	08	0.0
09	0.1	10	0.1
11	0.2	12	0.1
13	0.1	14	0.0
15	0.1	16	0.1
17	0.1	18	0.1
19	0.1	20	0.1
21	0.1	22	0.0
23	0.0	24	0.1
25	0.1	26	0.1
27	0.1	28	0.1
29	0.0	30	0.1
31	0.1	32	0.1
33	0.1	34	0.1
35	0.0	36	0.0
37	0.1	38	0.1
39	0.1	40	0.1
41	0.1	42	0.1
43	0.0	44	0.0
45	0.0	46	0.1
47	0.0	48	0.1
49	0.1	50	0.0
51	0.1	52	0.0
53	0.0	54	0.1
55	0.1	56	0.1
57	0.1	58	0.1
59	0.0	60	0.1
61	0.1	62	0.0
63	0.1		

%THD = 2.1

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR V3

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.3	04	0.0
05	2.4	06	0.1
07	0.5	08	0.1
09	0.1	10	0.1
11	0.0	12	0.1
13	0.1	14	0.1
15	0.0	16	0.2
17	0.1	18	0.1
19	0.1	20	0.0
21	0.0	22	0.1
23	0.1	24	0.1
25	0.1	26	0.0
27	0.0	28	0.1
29	0.1	30	0.1
31	0.1	32	0.1
33	0.1	34	0.1
35	0.0	36	0.1
37	0.0	38	0.1
39	0.1	40	0.0
41	0.1	42	0.1
43	0.1	44	0.1
45	0.1	46	0.1
47	0.0	48	0.1
49	0.0	50	0.1
51	0.0	52	0.1
53	0.1	54	0.0
55	0.1	56	0.0
57	0.1	58	0.1
59	0.0	60	0.0
61	0.1	62	0.0
63	0.1		

%THD = 2.6

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: CINEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR VO

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.3	04	0.1
05	2.5	06	0.0
07	0.4	08	0.1
09	0.1	10	0.0
11	0.1	12	0.0
13	0.0	14	0.1
15	0.1	16	0.0
17	0.0	18	0.1
19	0.1	20	0.0
21	0.1	22	0.1
23	0.1	24	0.0
25	0.1	26	0.0
27	0.0	28	0.0
29	0.1	30	0.0
31	0.1	32	0.1
33	0.0	34	0.0
35	0.0	36	0.1
37	0.0	38	0.1
39	0.1	40	0.0
41	0.1	42	0.0
43	0.0	44	0.1
45	0.0	46	0.1
47	0.1	48	0.1
49	0.1	50	0.1
51	0.1	52	0.0
53	0.1	54	0.0
55	0.0	56	0.1
57	0.0	58	0.1
59	0.0	60	0.0
61	0.1	62	0.0
63	0.0		

%THD = 2.6

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 09:02:38 Nov 29 1996

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I1

XTHD = 1.8

10.0



03	05	07	09	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Help: F1

Waveform: ←

Save: F2

Print: F4

HD Table: →

Exit: Esc

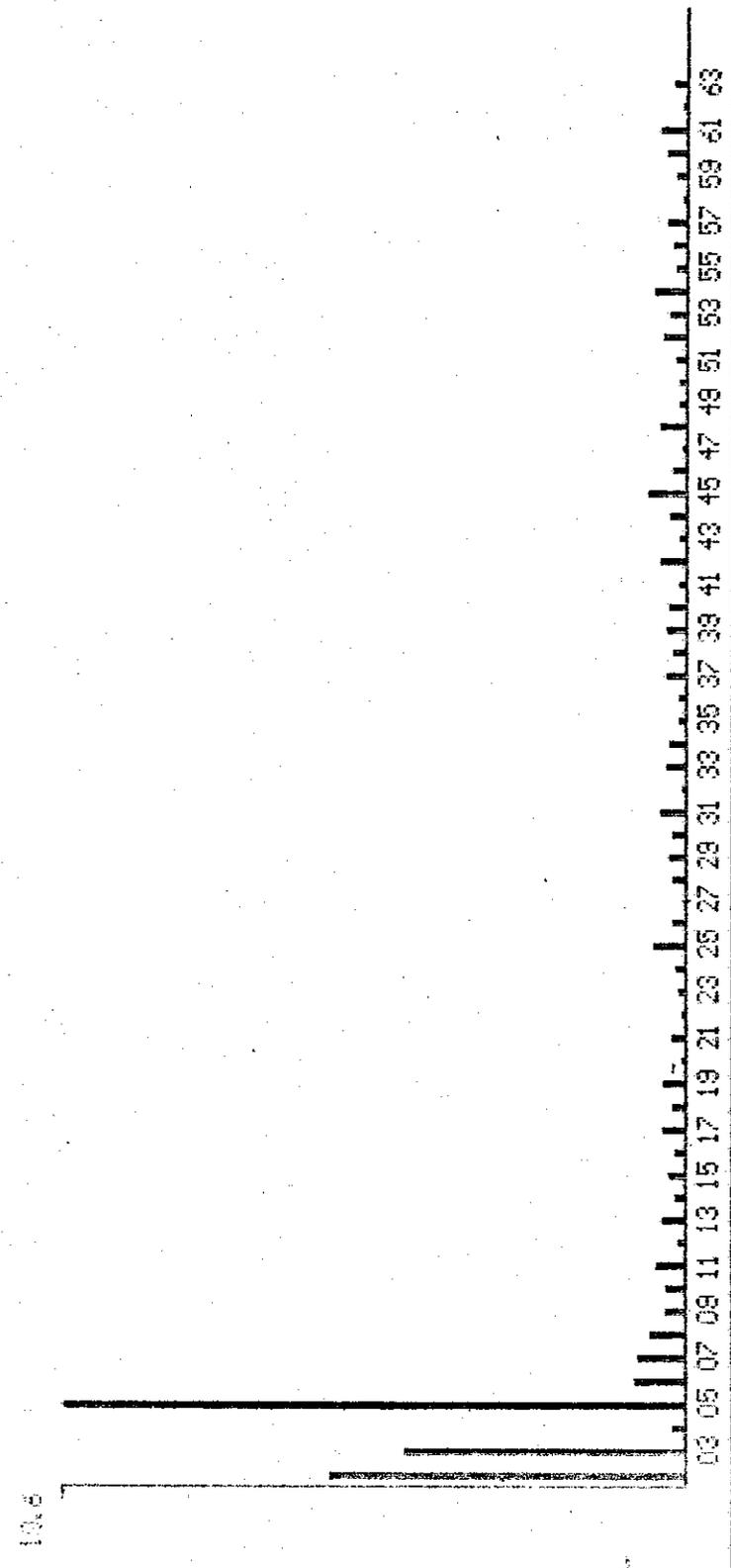
Fig. No. 09

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I1

%THD = 13.5



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 90

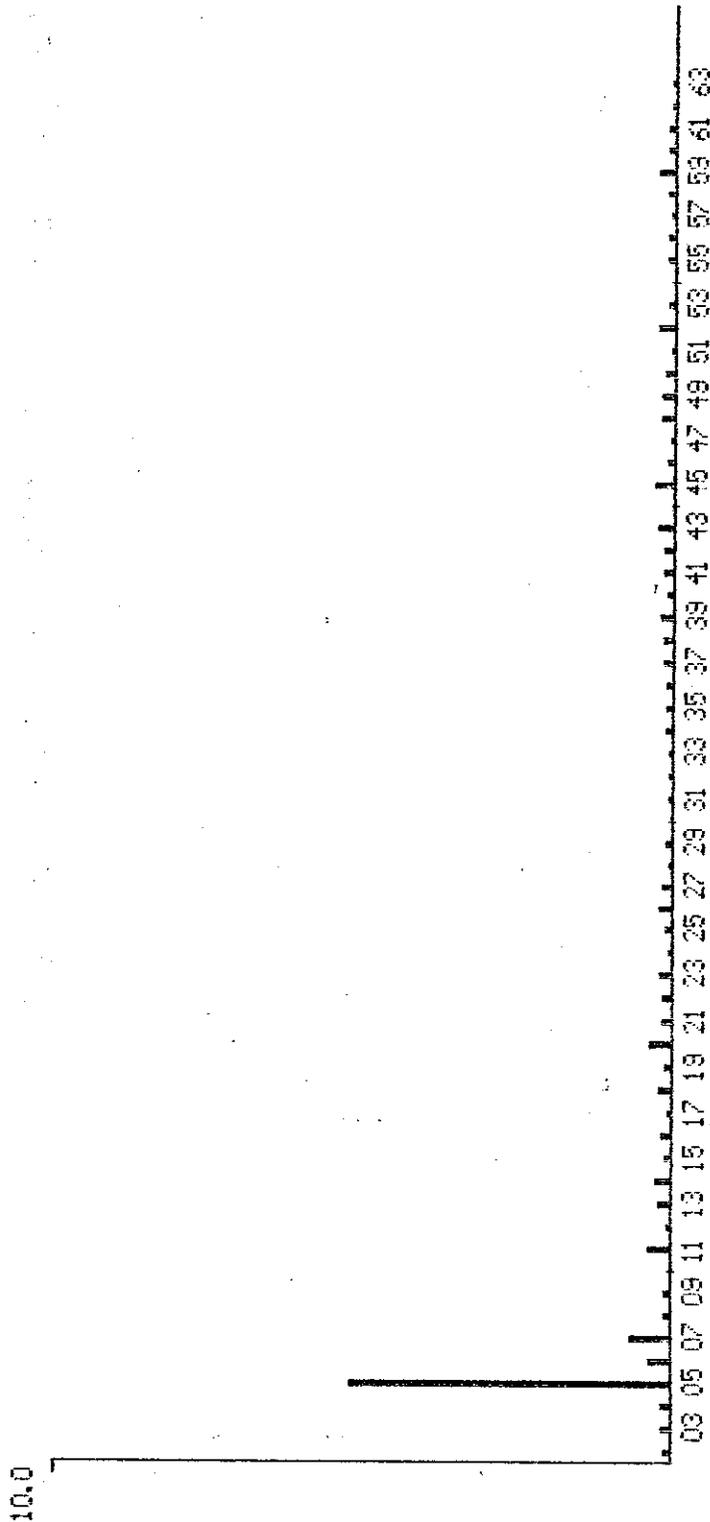
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEBUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I1

%THD = 5.4



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 31

SITE: SIDEGUA

154

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I1 :

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.1	04	0.1
05	1.3	06	0.1
07	0.5	08	0.2
09	0.2	10	0.1
11	0.1	12	0.0
13	0.2	14	0.2
15	0.1	16	0.1
17	0.1	18	0.2
19	0.4	20	0.1
21	0.2	22	0.1
23	0.1	24	0.3
25	0.2	26	0.2
27	0.1	28	0.2
29	0.2	30	0.1
31	0.1	32	0.1
33	0.1	34	0.1
35	0.0	36	0.2
37	0.1	38	0.2
39	0.1	40	0.3
41	0.2	42	0.2
43	0.1	44	0.1
45	0.1	46	0.1
47	0.1	48	0.1
49	0.1	50	0.1
51	0.1	52	0.1
53	0.1	54	0.1
55	0.0	56	0.1
57	0.0	58	0.2
59	0.0	60	0.1
61	0.0	62	0.2
63	0.1		

%THD = 1.8

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I1

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	6.1
03	4.8	04	0.2
05	10.6	06	0.9
07	0.8	08	0.6
09	0.3	10	0.3
11	0.5	12	0.1
13	0.4	14	0.2
15	0.3	16	0.2
17	0.4	18	0.2
19	0.4	20	0.1
21	0.2	22	0.1
23	0.1	24	0.2
25	0.6	26	0.2
27	0.0	28	0.2
29	0.3	30	0.3
31	0.4	32	0.1
33	0.3	34	0.3
35	0.1	36	0.2
37	0.3	38	0.3
39	0.4	40	0.3
41	0.2	42	0.4
43	0.1	44	0.3
45	0.7	46	0.2
47	0.1	48	0.4
49	0.2	50	0.1
51	0.2	52	0.4
53	0.3	54	0.6
55	0.2	56	0.2
57	0.4	58	0.1
59	0.2	60	0.4
61	0.5	62	0.1
63	0.2		

%THD = 13.5

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I1

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.1
03	0.2	04	0.2
05	5.2	06	0.4
07	0.7	08	0.1
09	0.1	10	0.0
11	0.4	12	0.1
13	0.2	14	0.3
15	0.1	16	0.2
17	0.1	18	0.2
19	0.1	20	0.4
21	0.2	22	0.2
23	0.2	24	0.1
25	0.1	26	0.2
27	0.2	28	0.1
29	0.1	30	0.0
31	0.1	32	0.1
33	0.1	34	0.1
35	0.1	36	0.1
37	0.2	38	0.2
39	0.2	40	0.1
41	0.2	42	0.2
43	0.3	44	0.0
45	0.3	46	0.1
47	0.1	48	0.2
49	0.2	50	0.2
51	0.1	52	0.3
53	0.1	54	0.0
55	0.1	56	0.1
57	0.1	58	0.1
59	0.3	60	0.1
61	0.1	62	0.1
63	0.1		

%THD = 5.4

3710 ACH Waveform/Harmonics Screen Updated at 09:02:38 Nov 29 1996

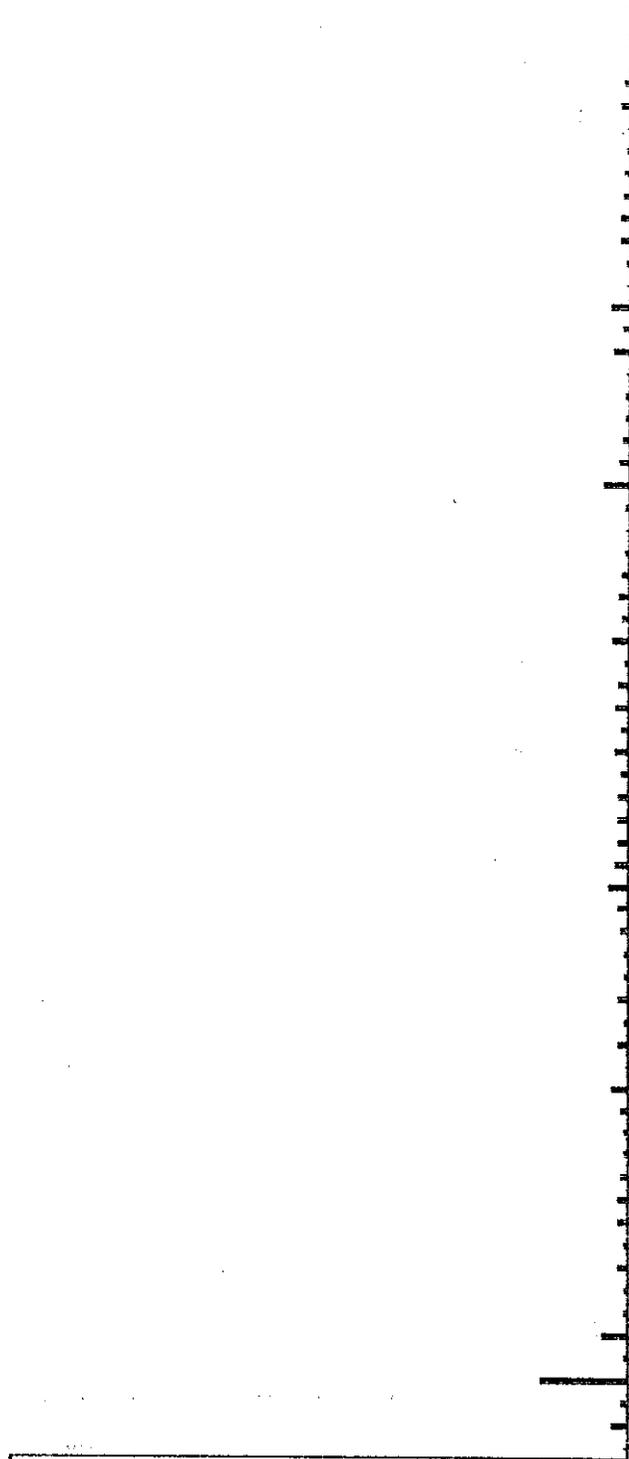
SITE: SIDEQUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I2

%THD = 1.9

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

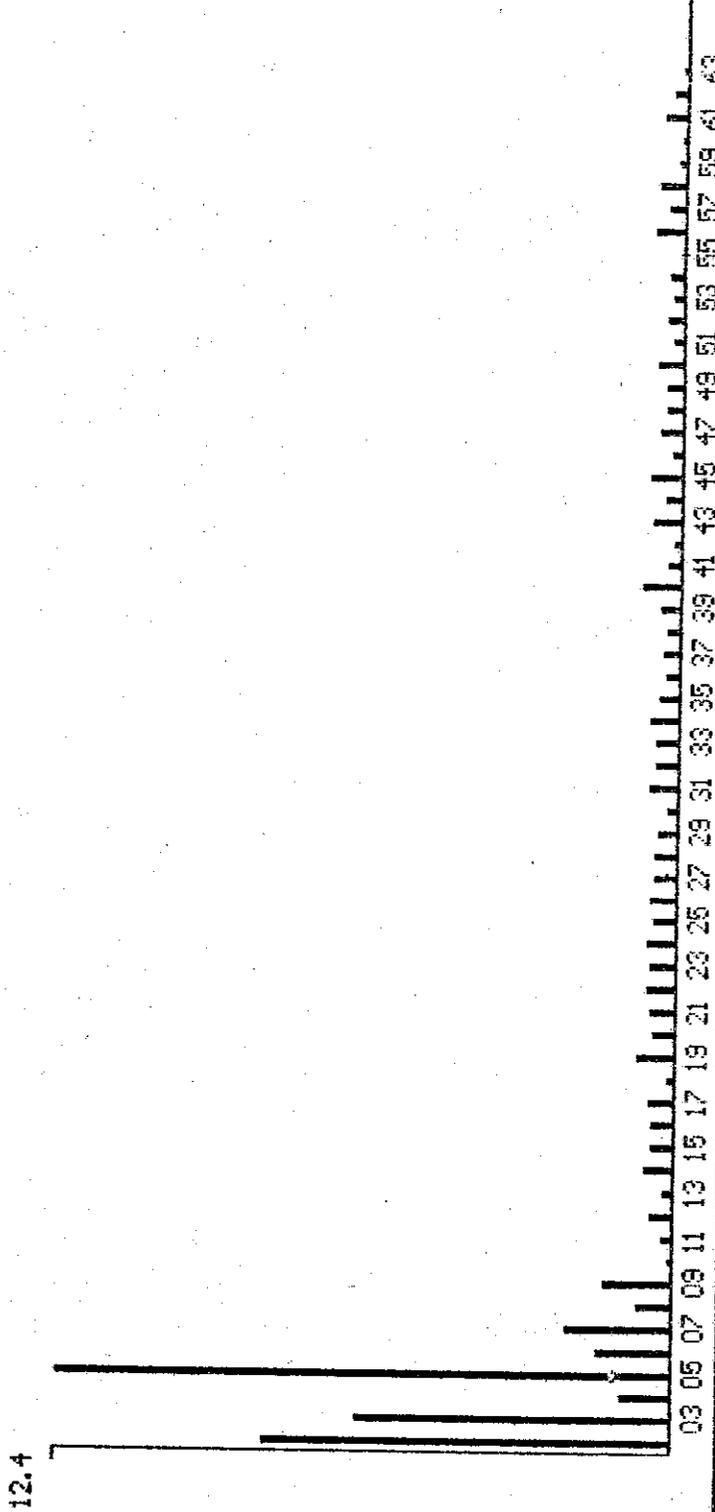
Fig. No. 95

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I2

%THD = 16.9



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 96

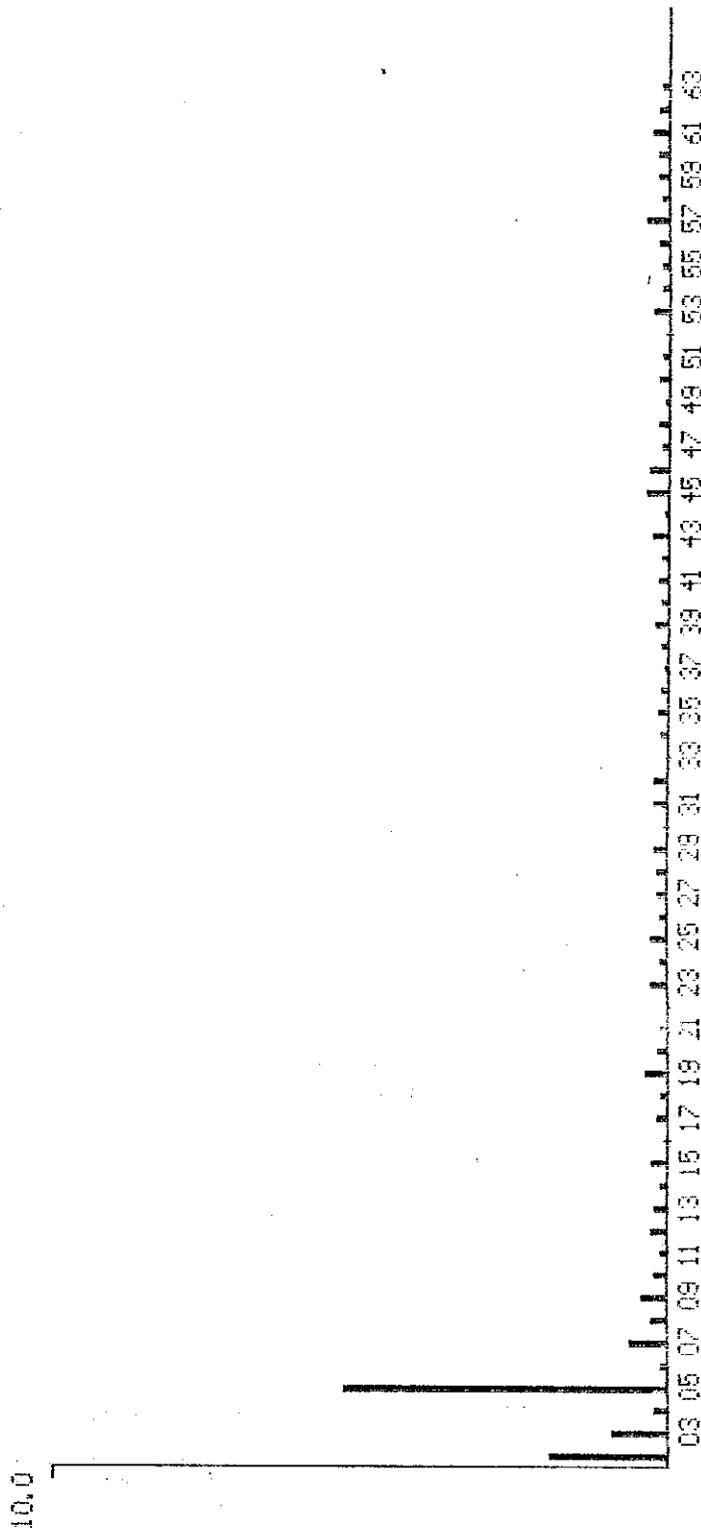
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

SITE: SIDEQUIA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I2

%THD = 6.0



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 97

SITE: SIDEGUA

160

DEVICE PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I2

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.3	04	0.1
05	1.4	06	0.1
07	0.4	08	0.1
09	0.1	10	0.2
11	0.1	12	0.2
13	0.2	14	0.1
15	0.1	16	0.1
17	0.1	18	0.3
19	0.0	20	0.2
21	0.1	22	0.2
23	0.1	24	0.1
25	0.1	26	0.2
27	0.3	28	0.2
29	0.2	30	0.2
31	0.2	32	0.1
33	0.2	34	0.1
35	0.2	36	0.2
37	0.1	38	0.3
39	0.1	40	0.2
41	0.1	42	0.1
43	0.0	44	0.1
45	0.4	46	0.2
47	0.1	48	0.1
49	0.1	50	0.0
51	0.3	52	0.1
53	0.3	54	0.0
55	0.1	56	0.2
57	0.2	58	0.1
59	0.1	60	0.1
61	0.0	62	0.2
63	0.1		

%THD = 1.9

9710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR 12

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	8.2
03	6.4	04	1.0
05	12.4	06	1.5
07	2.2	08	0.7
09	1.4	10	0.1
11	0.2	12	0.5
13	0.2	14	0.6
15	0.4	16	0.5
17	0.6	18	0.1
19	0.8	20	0.4
21	0.5	22	0.6
23	0.5	24	0.6
25	0.4	26	0.5
27	0.4	28	0.4
29	0.4	30	0.2
31	0.6	32	0.5
33	0.4	34	0.6
35	0.4	36	0.3
37	0.3	38	0.3
39	0.4	40	0.8
41	0.3	42	0.1
43	0.6	44	0.3
45	0.7	46	0.2
47	0.5	48	0.4
49	0.3	50	0.5
51	0.2	52	0.3
53	0.2	54	0.2
55	0.1	56	0.6
57	0.3	58	0.6
59	0.2	60	0.1
61	0.5	62	0.3
63	0.1		

%THD = 16.9

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I2

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	1.9
03	0.9	04	0.2
05	5.3	06	0.1
07	0.6	08	0.3
09	0.4	10	0.2
11	0.1	12	0.3
13	0.2	14	0.1
15	0.3	16	0.0
17	0.2	18	0.1
19	0.4	20	0.2
21	0.1	22	0.0
23	0.3	24	0.1
25	0.3	26	0.1
27	0.2	28	0.2
29	0.2	30	0.0
31	0.2	32	0.2
33	0.0	34	0.1
35	0.2	36	0.1
37	0.1	38	0.1
39	0.2	40	0.1
41	0.2	42	0.1
43	0.3	44	0.1
45	0.4	46	0.3
47	0.1	48	0.2
49	0.1	50	0.2
51	0.1	52	0.0
53	0.3	54	0.1
55	0.1	56	0.2
57	0.4	58	0.1
59	0.2	60	0.2
61	0.3	62	0.2
63	0.1		

%THD = 6.0

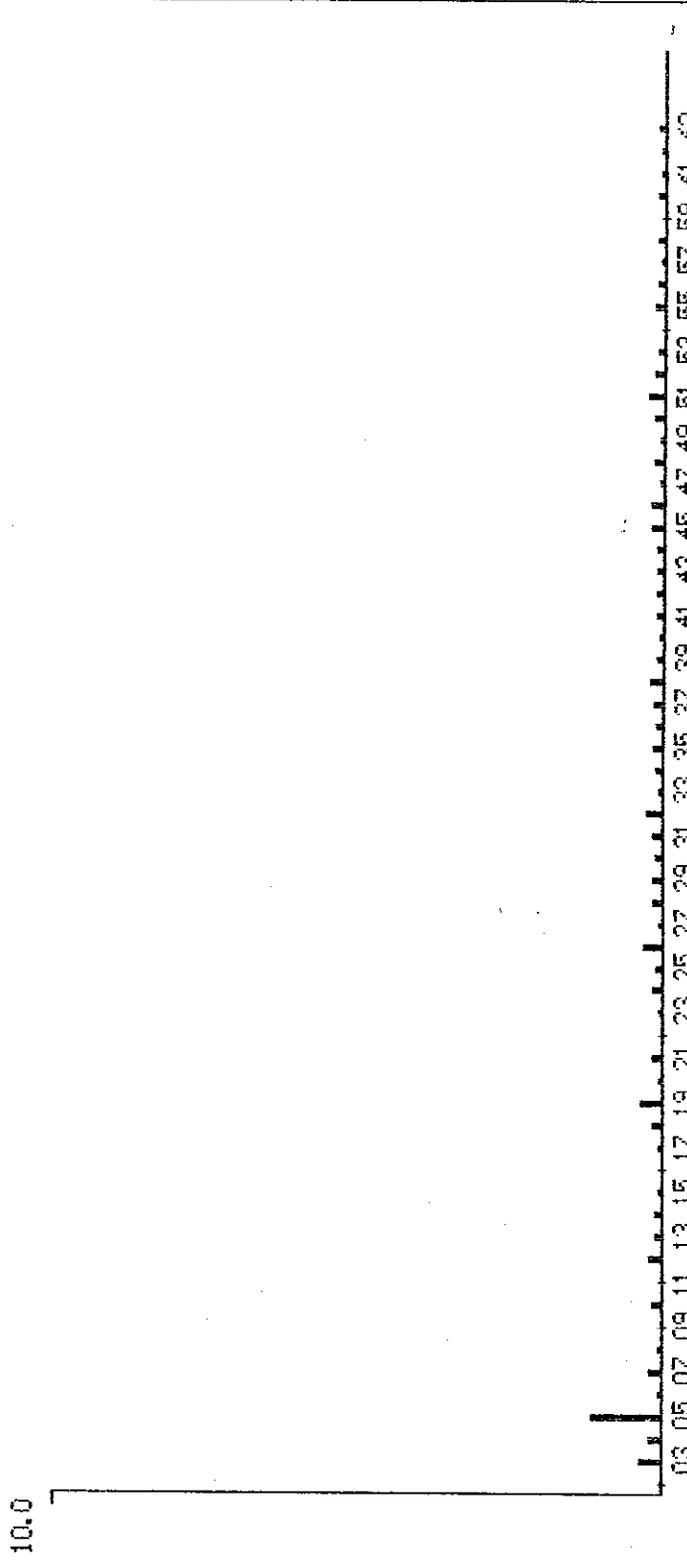
3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 09:02:38 Nov 29 1996

SITE: SIDEQUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I3

%THD = 1.8



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

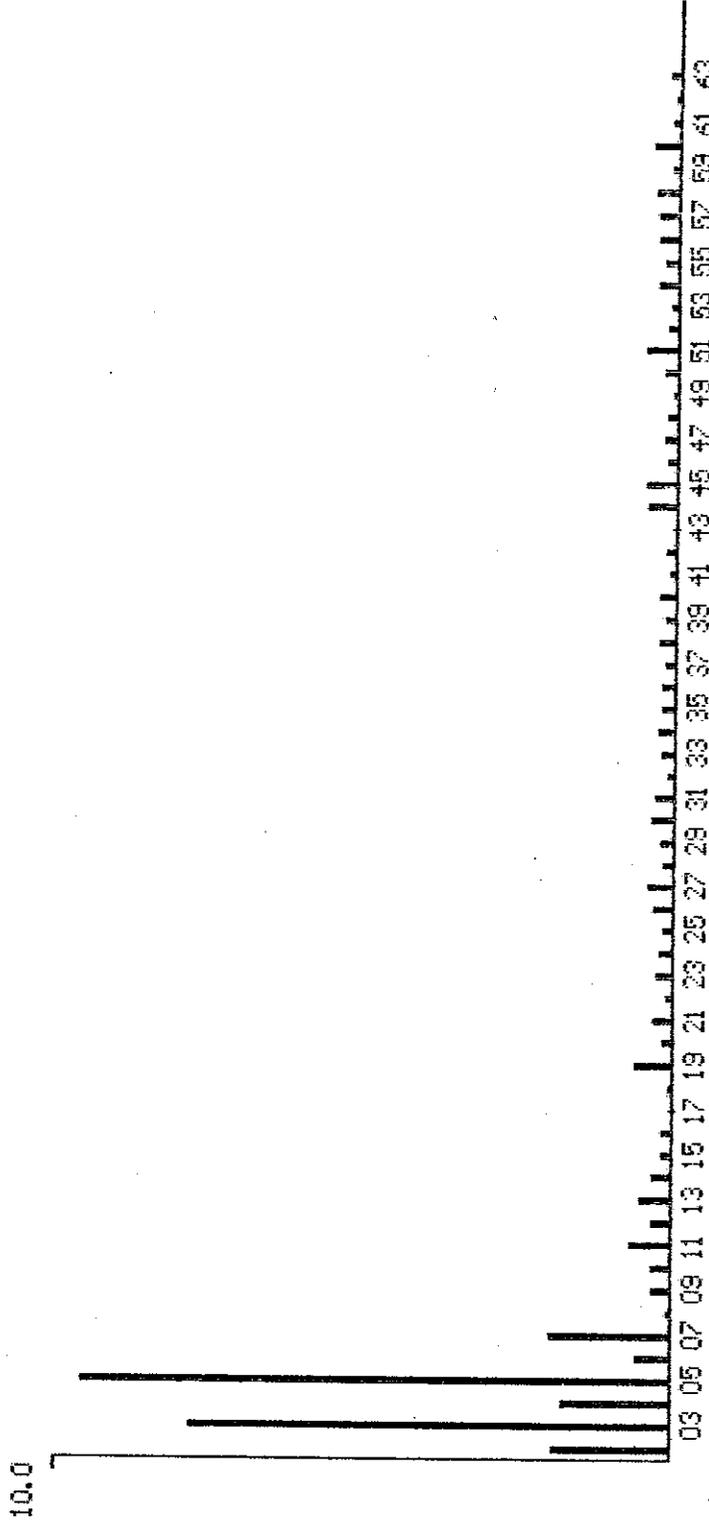
Fig. No. 101

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 15:57:50 Jan 20 1997

SITE: SIDEGUA DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I3

%THD = 13.0



Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 102

3710 ACM Waveform/Harmonics Screen Updated at 14:30:11 Jan 27 1997

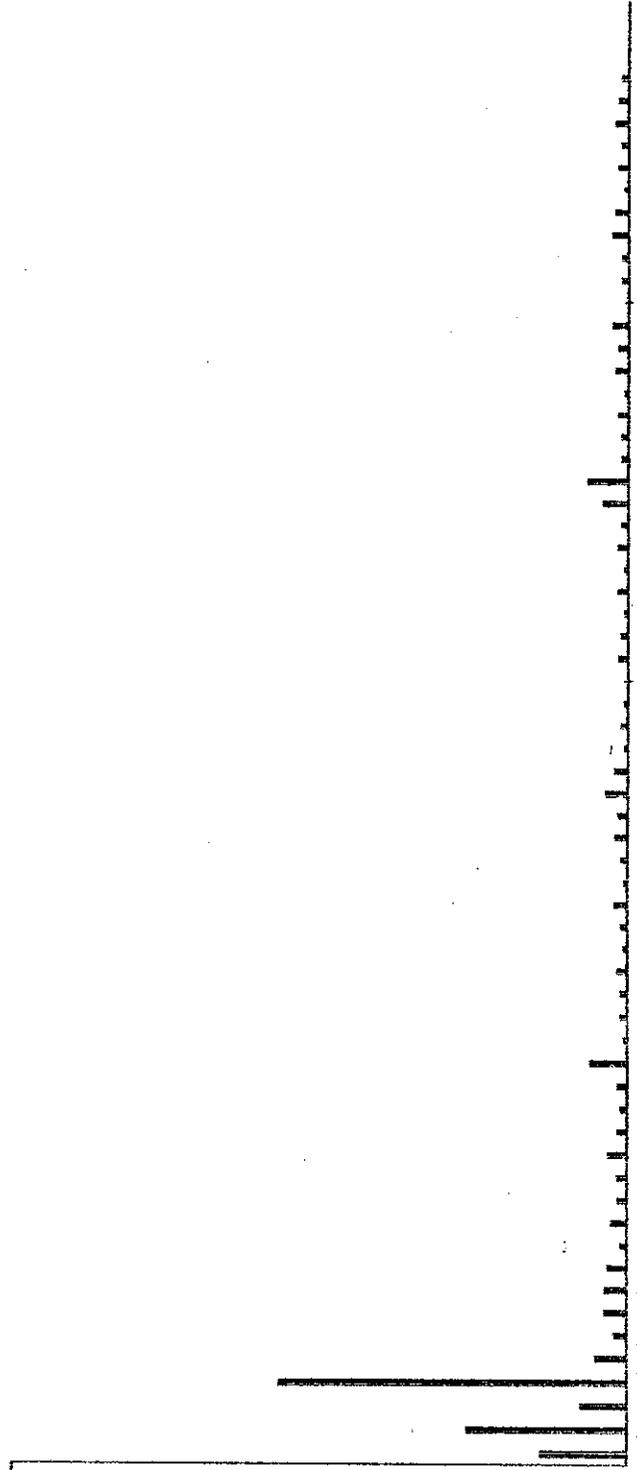
SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC SPECTRUM FOR I3

%THD = 6.8

10.0



03 05 07 09 11 13 15 17 19 21 23 25 27 29 31 33 35 37 39 41 43 45 47 49 51 53 55 57 59 61 63

Help: F1 Waveform: ← Save: F2 Print: F4 HD Table: → Exit: Esc

Fig. No. 103

SITE: SIDEGUA

166

DEVICE PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I3

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	0.0
03	0.4	04	0.2
05	1.2	06	0.1
07	0.2	08	0.1
09	0.0	10	0.2
11	0.0	12	0.2
13	0.1	14	0.1
15	0.1	16	0.0
17	0.1	18	0.2
19	0.4	20	0.1
21	0.2	22	0.0
23	0.1	24	0.2
25	0.1	26	0.3
27	0.1	28	0.2
29	0.2	30	0.1
31	0.2	32	0.3
33	0.1	34	0.1
35	0.2	36	0.1
37	0.2	38	0.2
39	0.1	40	0.1
41	0.1	42	0.1
43	0.1	44	0.1
45	0.2	46	0.2
47	0.1	48	0.2
49	0.1	50	0.2
51	0.3	52	0.2
53	0.1	54	0.0
55	0.2	56	0.1
57	0.1	58	0.1
59	0.0	60	0.1
61	0.1	62	0.1
63	0.1		

%THD = 1.8

3710 ACM Waveform/Harmonics Printout

Updated at 15:57:50 Jan 28 1997

SITE: SIDEGUA

DEVICE: PRINCIPAL

HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I3

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	1.9
03	7.8	04	1.8
05	9.6	06	0.6
07	2.0	08	0.1
09	0.3	10	0.3
11	0.7	12	0.3
13	0.5	14	0.3
15	0.2	16	0.2
17	0.0	18	0.1
19	0.6	20	0.2
21	0.3	22	0.1
23	0.3	24	0.2
25	0.2	26	0.3
27	0.4	28	0.2
29	0.2	30	0.4
31	0.3	32	0.1
33	0.2	34	0.3
35	0.2	36	0.2
37	0.2	38	0.3
39	0.2	40	0.3
41	0.1	42	0.2
43	0.0	44	0.5
45	0.5	46	0.2
47	0.2	48	0.2
49	0.1	50	0.2
51	0.5	52	0.2
53	0.1	54	0.3
55	0.2	56	0.3
57	0.3	58	0.4
59	0.1	60	0.4
61	0.1	62	0.1
63	0.2		

%THD = 13.0

FIG. No. 105

SITE: SIDEGUA

168

DEVICE: PRINCIPAL

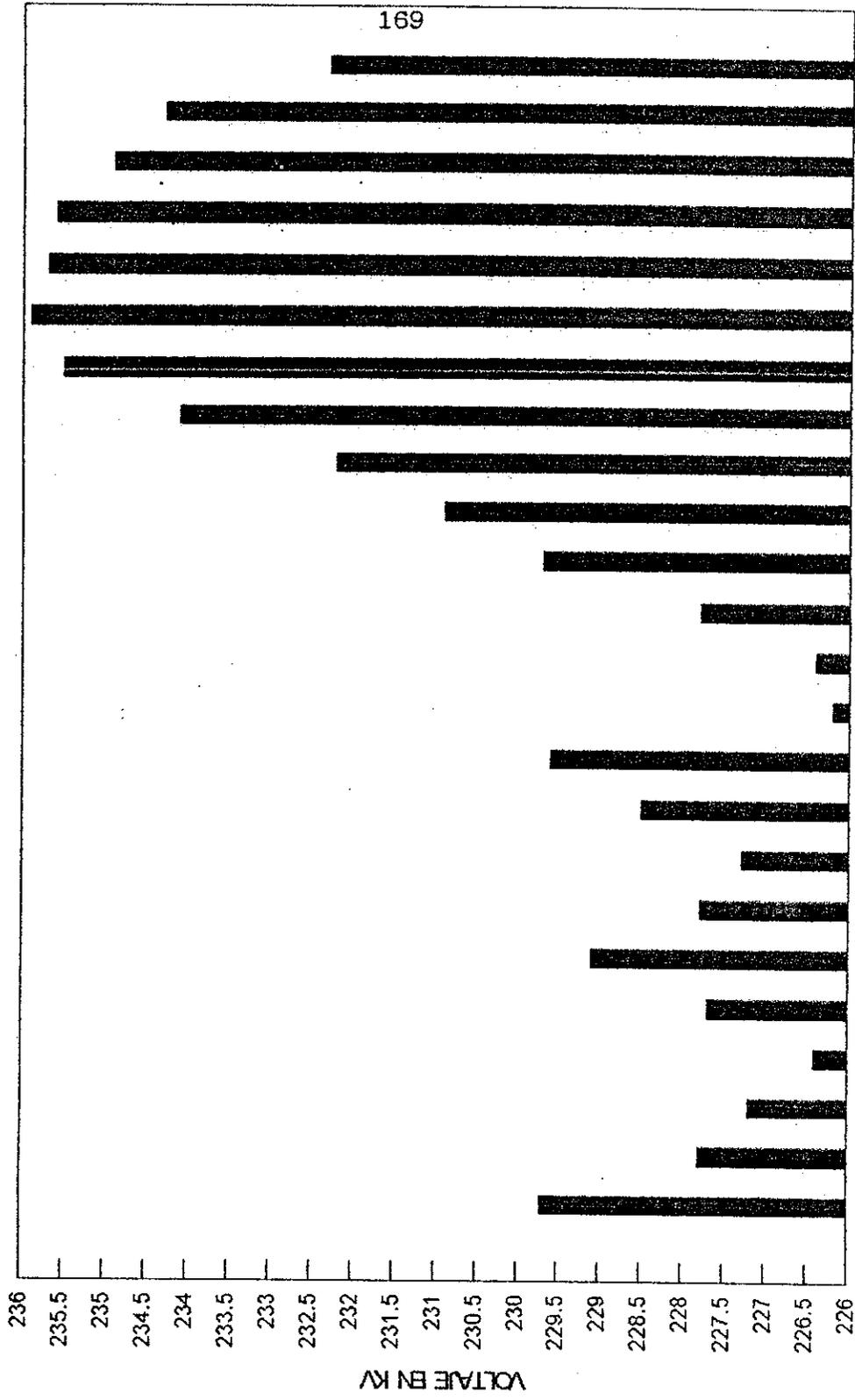
HARMONIC DISTORTION TABLE FOR I3

Hm	%HD	Hm	%HD
01	100.0	02	1.4
03	2.6	04	0.8
05	5.7	06	0.5
07	0.2	08	0.1
09	0.4	10	0.2
11	0.1	12	0.2
13	0.2	14	0.2
15	0.2	16	0.2
17	0.1	18	0.2
19	0.6	20	0.1
21	0.1	22	0.1
23	0.2	24	0.1
25	0.1	26	0.2
27	0.1	28	0.1
29	0.2	30	0.2
31	0.4	32	0.2
33	0.1	34	0.1
35	0.1	36	0.0
37	0.2	38	0.1
39	0.1	40	0.2
41	0.1	42	0.2
43	0.1	44	0.4
45	0.7	46	0.1
47	0.1	48	0.2
49	0.1	50	0.2
51	0.2	52	0.3
53	0.0	54	0.1
55	0.1	56	0.3
57	0.2	58	0.1
59	0.2	60	0.1
61	0.2	62	0.2
63	0.1		

%THD = 6.8

VOLTAJE PROMEDIO BARRA 230 KV

MUESTRA TOMADA DURANTE 31 DIAS



HORA	VOLTAJE EN KV
08:00	229.5
09:00	229.8
10:00	230.1
11:00	230.4
12:00	230.7
13:00	231.0
14:00	231.3
15:00	231.6
16:00	231.9
17:00	232.2
18:00	232.5
19:00	232.8
20:00	233.1
21:00	233.4
22:00	233.7
23:00	234.0
24:00	234.3
25:00	234.6
26:00	234.9
27:00	235.2
28:00	235.5
29:00	235.8
30:00	236.1
31:00	236.4

Fig. No. 107

4.4. ANÁLISIS DE GRÁFICAS

En las figuras 49 y 57, se puede observar las gráficas de voltaje en las cuales se muestra una caída de tensión de 2 KV en la barra de 230 KV cuando el horno entra en línea, lo que representa una distorsión relativa del 0.869 %.

En las figuras 50 y 58, se observan las gráficas de corriente; actualmente se cuenta con una planta de generación en la cual se han registrado en promedio alrededor de 100 amperios en la barra de 230 KV, cuando el horno entra en línea se registran valores de aproximadamente 25 amperios, lo que representa un consumo de 75 amperios en la barra de 230 KV, es decir 24 MW; tal como se observa al comparar las figuras 51 y 59.

En las figuras 52 y 60, se muestra el consumo de potencia reactiva en donde se puede observar un consumo de aproximadamente 10 a 15 MVAR.

En las figuras 55 y 63, se observa el factor de potencia en la barra 230 KV, sin horno oscila de 0.90 a 0.98 en adelanto, por el excedente de reactiva debido al reactor; con el horno en línea debido a su demanda de carga oscilan de 0.61 en atraso a 0.95 en atraso.

En las figuras 56 y 64, se muestran las gráficas de frecuencia en las que se observa que cuando el horno entra en línea, produce una caída de frecuencia de 0.1 Hz, lo que representa una distorsión relativa del 0.166 %, siempre medido en la barra de 230 KV.

En las figuras 65, 66 y 67 se muestran las gráficas vectoriales de las componentes de voltaje y corriente de las armónicas. En cuanto a los voltajes se observa un retraso vectorial de 1 grado, en el momento de la perforación de la chatarra, mientras que en la corriente se observan diferencias de 30 grados.

En las figuras 68, 69, 70 y 71, se muestran en forma senoidal y

con magnitudes de porcentajes, los voltajes y las corrientes de las armónicas, mostrándonos variaciones de 0.4 % en voltajes y de 15 % en amperajes.

En las figuras 71, 72, 73, 77, 78, 79, 83, 84 y 85 se observan los espectros de voltaje desde la 2a. armónica hasta la 63a. armónica, mostrando que la 5a. y la 7a. armónica son las mayores, pero sin mayor relevancia por su pequeña magnitud.

En las figuras 89, 90, 91, 95, 96, 97, 101, 102 y 103, se muestran los espectros de corriente en los cuales los más significativos se representan en la perforación de la chatarra y en la fase "S", en la 2a., 3a. y 5a. armónica, alcanzando niveles de hasta el 15 %, medidos en la barra de 230 KV con corriente promedio nominal de 75 amperios (11.25 amperios de armónicas); para contrarrestar lo anterior se posee un filtro para la 3a. armónica y la instalación de un SVC (Static Variator Compensator) para la 2a. armónica.

4.5 CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGÍA

El consumo específico de energía, se refiere al consumo en KWH por cada tonelada de acero líquido producido. Esto constantemente varia acorde a los imprevistos que surjan durante el proceso, es decir, que puede ocurrir algún atraso en el cual al acero mismo, o la chatarra en el proceso de fusión se detenga, y por consiguiente se enfríe y necesite nuevamente recalentarla.

Esto implica un aumento en el consumo de la energía para producir una misma cantidad de tonelaje de acero líquido. Con base en muchos muestreos realizados a distintos hornos de capacidades variadas se ha desarrollado una ecuación para calcular la energía específica

requerida. Con la aplicación de ésta fórmula, los resultados se acercan a los valores de consumo reales que oscilan entre 380 a 600 KWH/TAL, con una desviación estandar de 5 KWH/TAL.

$$\text{KWH/TAL} = 300 + 900 * (\text{TCM/TAL} - 1) + 1600 * (\text{TF/TAL}) - 10 * \text{GN} + 0.7 * (\text{Tv} - 1600) + 0.85 * \text{Tcon} - 3.5 * \text{O}_2$$

Ecc. No. 51

en dónde: KWH/TAL = kilovatios hora por tonelada de acero líquido

TCM/TAL = función de los pesos específicos de la chatarra y sus aleaciones

TF/TAL = función de los pesos de los fundentes (dolomita)

GN = utilización de los quemadores

Tv = temperatura de vaciado

Tcon = tiempo conectado durante la colada

O₂ = utilización de oxígeno

De ésta ecuación, se puede deducir los factores de influencia para reducir el consumo de energía eléctrica, modificando alguna variable.

Es una realidad que por medio de la insuflación de carbón o coque conjuntamente con oxígeno, se obtiene una reducción considerable de energía eléctrica. En una forma sencilla de decirlo, se puede establecer que solamente la aplicación de oxígeno afecta directamente al consumo de energía eléctrica, mientras que el carbón insuflado proporciona un mejor rendimiento metálico por la reducción del óxido de hierro. La escoria espumosa y la agitación por el fondo aportan ahorros de energía entre 10 y 30 KWH/TON.

En las siguientes gráficas se observa el comportamiento de distintos parámetros que en determinada forma afectan el consumo específico de la energía, así como la influencia de éste en la temperatura, en el tiempo, en los electrodos, en la densidad de los electrodos, etc.

- | | |
|--|--------------|
| 1.- KWH/TON en función de tiempo y temperatura | Fig. No. 108 |
| 2.- Calentamiento vrs. KW/TON | Fig. No. 109 |
| 3.- Potencia activa vrs. carga | Fig. No. 110 |
| 4.- KWH/TON vrs. Consumo de electrodos | Fig. No. 111 |
| 5.- Densidad de corriente vrs. Consumo de electrodos | Fig. No. 112 |

Adicionalmente en el siguiente cuadro, se muestra un ejemplo del consumo específico de energía de SIDEQUA, en un periodo (1 mes), en el cual el proceso se puede tomar como un estándar, sujeto siempre a posibles mejoras o atrasos de tipo laboral.

SIDEGUA

CONTROL DE CALIDAD

174

Septiembre de 1996

Fecha	TAN	Ton. Mermas	TAL	TCh	Energía Total	Energía / Ch	Energía / TAL	Energía / TAN	Cestas
1	493.22	9.525	502.745	596	302724	507.926	602.142	613.771	52
2	447.72	7.572	455.292	518.0	279127	538.855	613.072	623.441	44
3	538.72	8.948	547.668	661.5	355001	536.661	648.205	658.971	51
4	532.35	14.297	546.647	597.0	336105	562.990	614.848	631.361	54
5	556.01	9.763	565.773	654.5	330268	504.611	583.746	593.997	61
6	506.415	9.088	515.503	589.0	304203	516.474	590.109	600.699	61
7	510.965	13.257	524.222	666.0	343748	516.138	655.730	672.743	64
8	469.56	9.468	479.028	563.0	306220	543.908	639.253	652.142	51
9	261.17	4.871	266.041	334.0	180213	539.560	677.388	690.022	31
10	561.47	9.806	571.276	643.0	339430	527.885	594.161	604.538	56
11	550.095	9.119	559.214	643.0	316644	492.448	566.230	575.617	53
12	513.695	29.841	543.536	652.0	330598	507.052	608.236	643.569	56
13	407.708	6.248	413.956	490.0	216016	440.849	521.833	529.830	48
14	417.523	7.664	425.187	550.0	276873	503.405	651.179	663.132	44
15	427.955	8.749	436.704	555.0	287859	518.665	659.163	672.638	52
16	204.367	3.388	207.755	262.0	146136	557.771	703.405	715.067	25
17	443.287	12.743	456.030	587.0	296560	505.213	650.308	669.002	55
18	522.776	5.652	528.428	648.8	328558	506.409	621.765	628.487	62
19	362.755	4.067	366.822	461.0	225657	489.495	615.168	622.064	44
20	517.316	7.489	524.805	666.0	349605	524.932	666.162	675.806	69
21	420.745	6.026	426.771	522.0	285969	547.833	670.076	679.673	55
22	393.485	6.688	400.173	510.0	273248	535.780	682.825	694.431	57
23	320.371	7.215	327.586	428.0	227280	531.028	693.803	709.428	40
25	516.128	7.976	524.104	633.0	329143	519.973	628.011	637.716	58
25	469.21	7.915	477.125	559.0	297650	532.469	623.841	634.364	58
26	349.26	26.164	375.424	471.0	249296	529.291	664.039	713.783	41

SIDEGUA

CONTROL DE CALIDAD

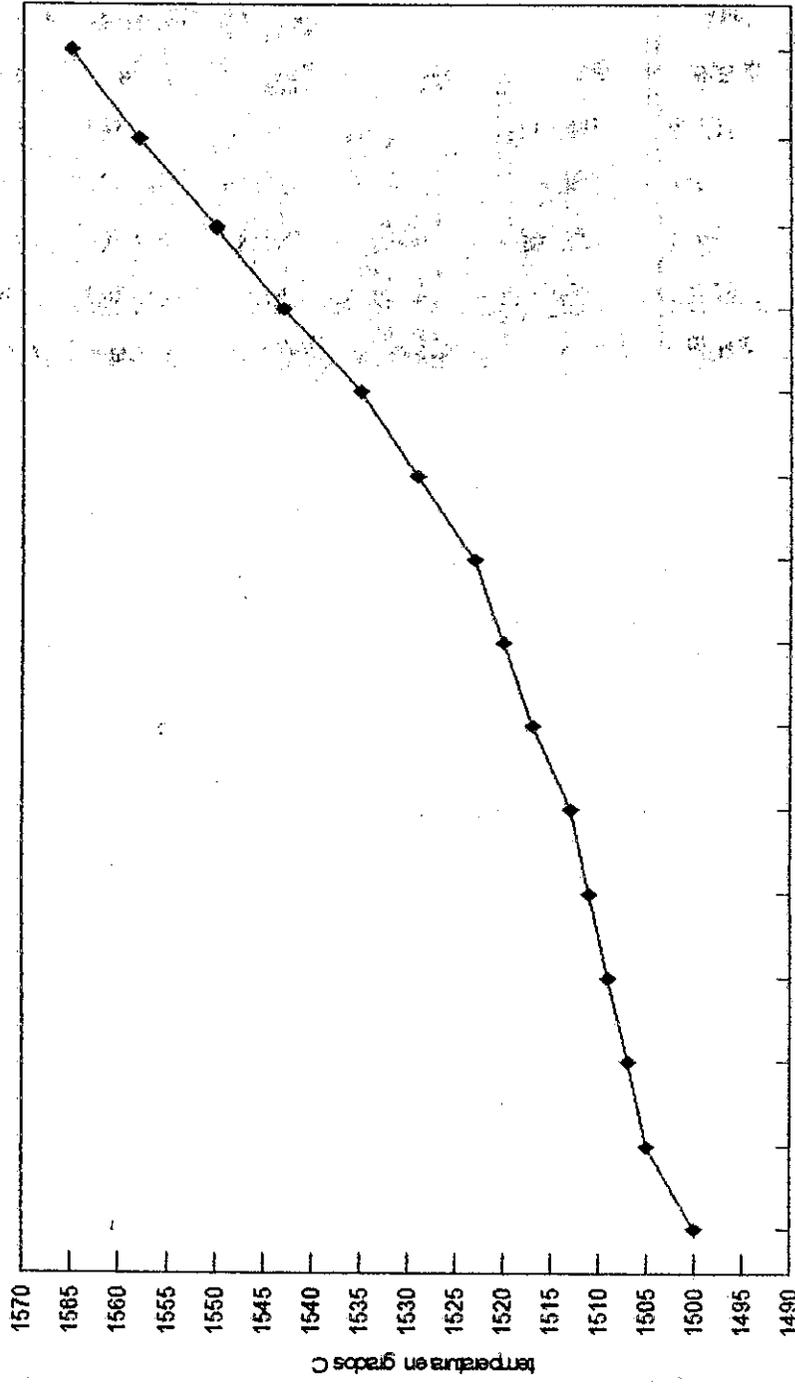
175

Septiembre de 1996

Fecha	TAN	Ton. Mermas	TAL	TCh	Energía Total	Energía / Ch	Energía / TAL	Energía / TAN	Cestas
27	416.504	11.948	428.452	516.0	286996	556.194	669.844	689.059	44
28	472.552	6.406	478.958	581.0	301090	518.227	628.635	637.157	56
29	433.366	5.718	439.084	526.0	287136	545.886	653.943	662.572	44
30	410.348	67.105	477.453	583.0	304657	522.568	638.088	742.436	50
	13362.129	344.716	13791.762	16665.8	8694010	521.668	630.377	650.646	1536

Cuadro No. 9

PERFIL DE CALENTAMIENTO



tiempo de calentamiento en minutos	
■ tiempo	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15
◆ temperatura	1500 1505 1507 1509 1511 1513 1517 1520 1523 1529 1535 1543 1550 1558 1565
▲ KWH/TONM	0 2 4 6.3 8 8 10 10 12 12 14 14 15.5 17 18.5 20 22 25

FIG. No. 108

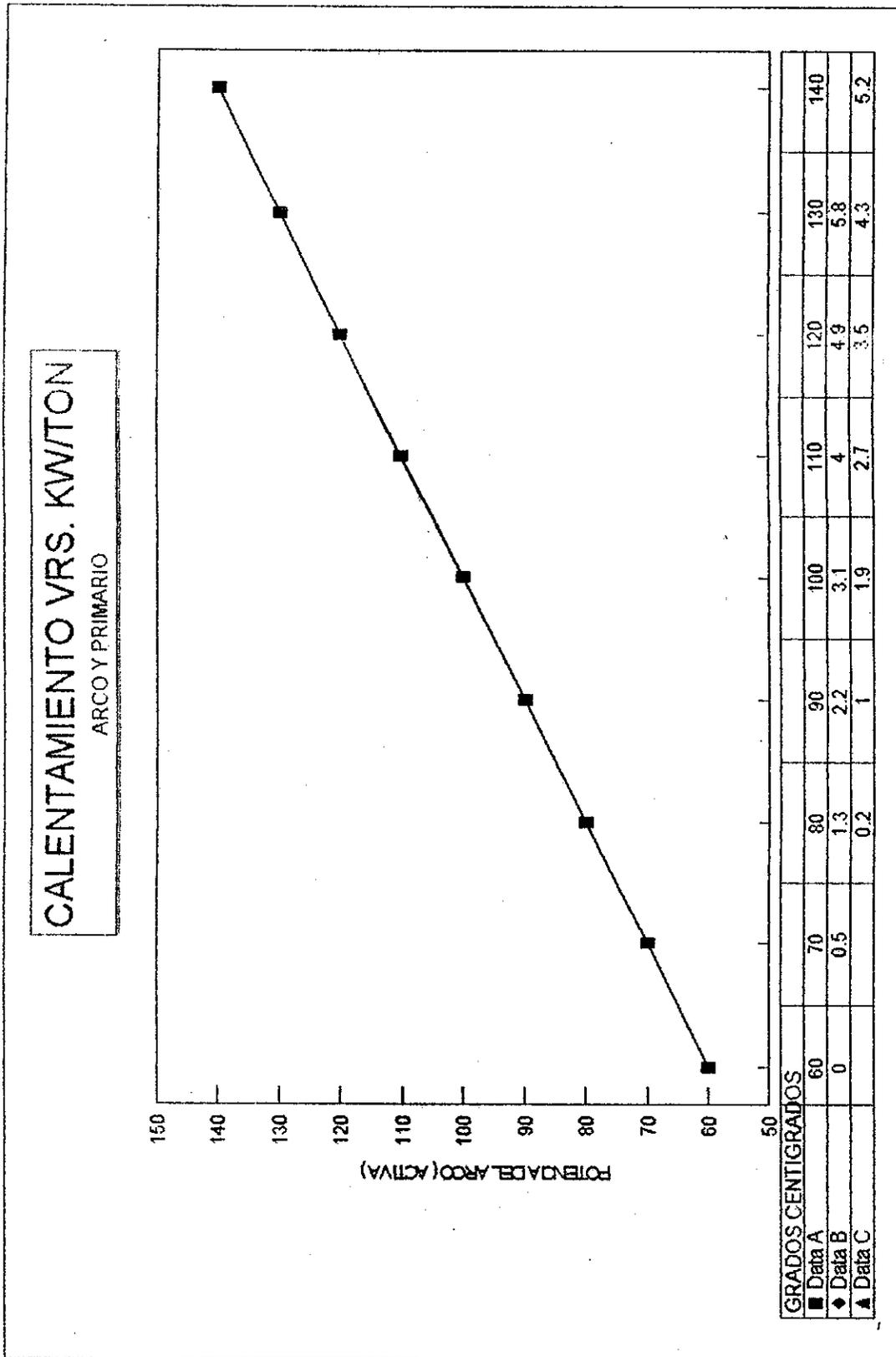


Fig. No. 109

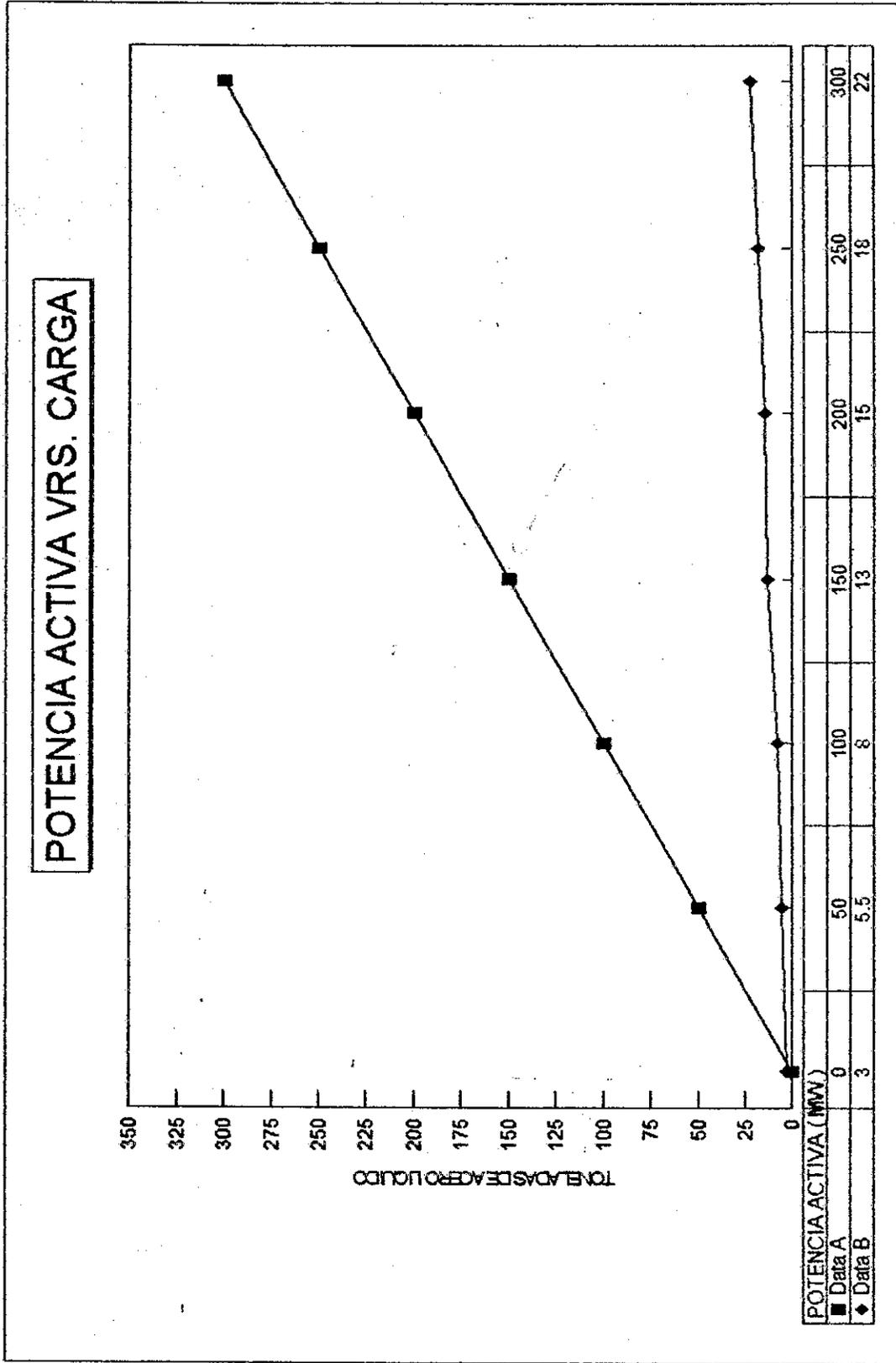


FIG. No. 110

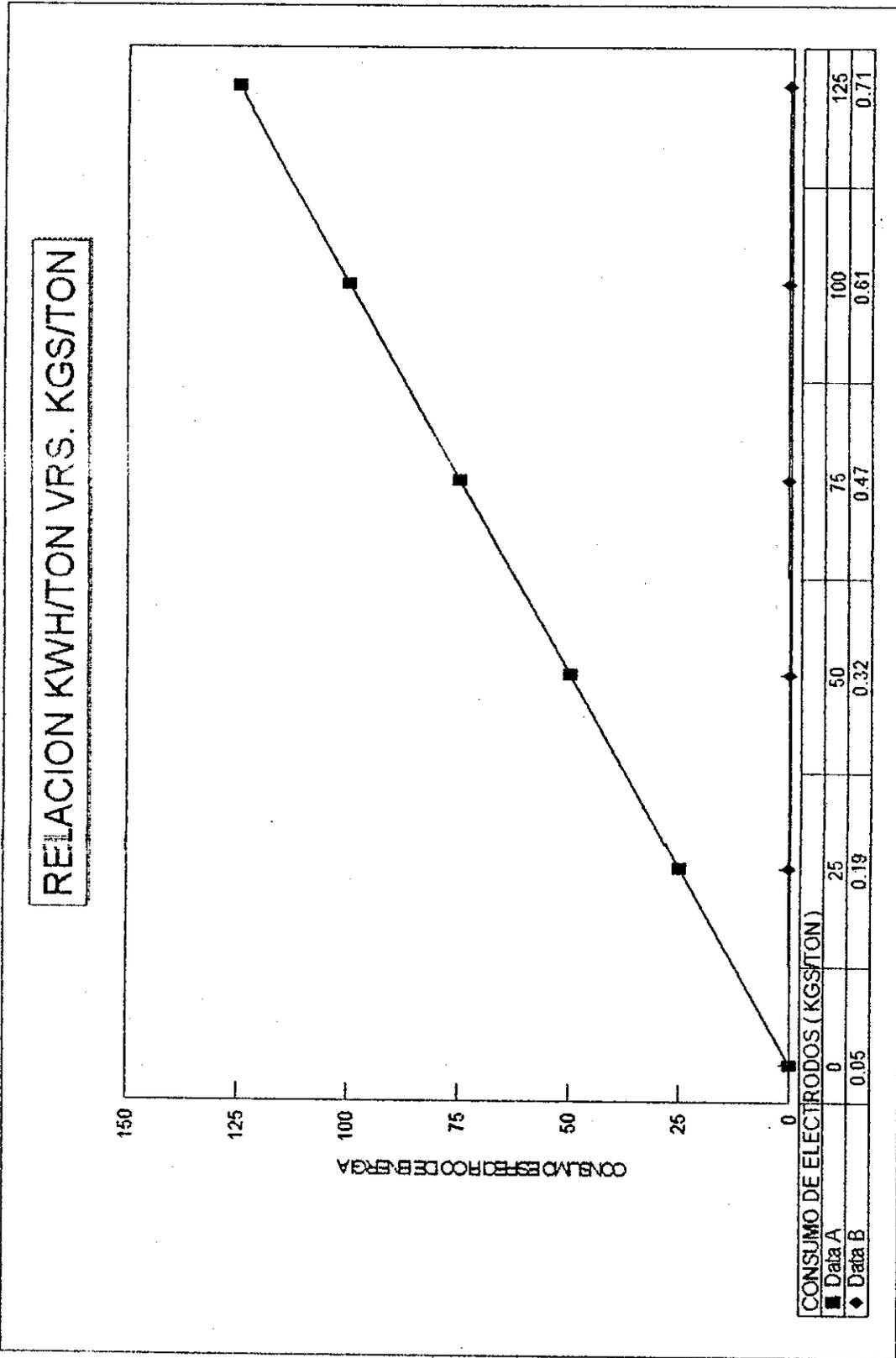


Fig. No. 111

CONSUMO ESPECÍFICO DE ELECTRODOS
VRS. DENSIDAD DE CORRIENTE

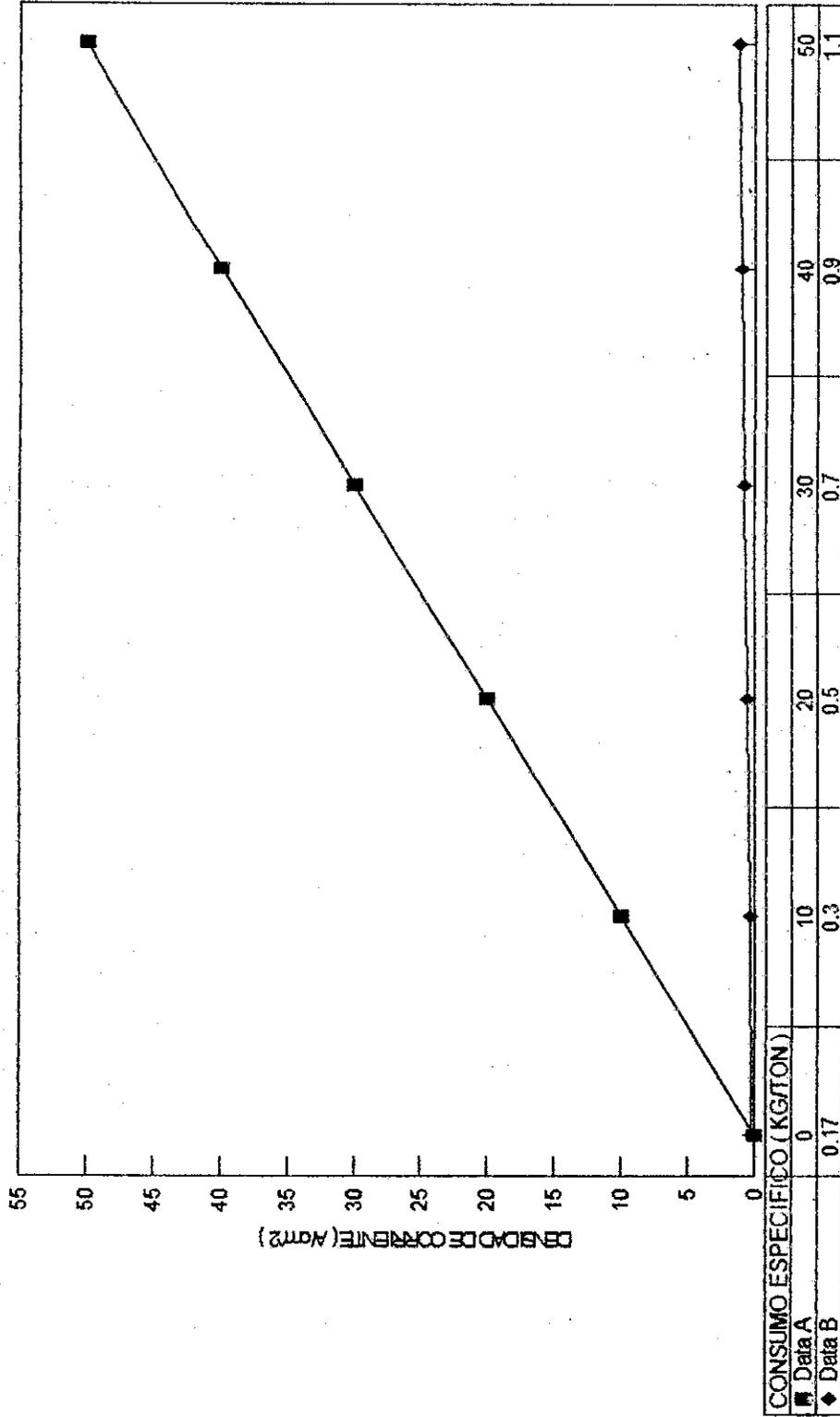


Fig. No. 112

4.6 TIPOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA UTILIZADOS EN H.A.E.

Con el fin de entender el efecto del tratamiento térmico en las propiedades, es necesario saber cómo se mide la temperatura. La pirometría se ocupa de la medición de altas temperaturas generalmente superiores a los 950 °F (510 °C) y los instrumentos utilizados para éste propósito se conocen como pirómetros. La termometría se ocupa de la medición de temperaturas por debajo de los 950 °F (510 °C), y los instrumentos empleados para éste propósito se conocen como termómetros.

4.6.1 MEDICIÓN DE TEMPERATURA POR EL COLOR:

Uno de los métodos más sencillos para estimar la temperatura de un metal es mediante la observación del color del cuerpo caliente. Este método dará sólo estimaciones de temperatura aproximadas, excepto cuando lo aplique un observador experimentado, la principal dificultad es que la apreciación del color varía según quien lo vea.

COLOR	TEMPERATURA	°F	TEMPERATURA	°C
Rojo tenue	950		510	
Rojo oscuro	1150		621	
Cereza oscuro	1175		635	
Rojo cereza	1300		704	
Cereza subido	1475		802	
Naranja oscuro	1650		899	
Naranja	1750		954	
Amarillo	1800		982	

Cuadro No. 10

4.6.2 TERMOMETROS POR EXPANSIÓN METÁLICA:

La mayoría de los metales se expanden cuando se calientan y la cantidad de expansión dependerá de la temperatura y del coeficiente de expansión de cada metal. Este principio se aplica en la cinta bimetalica que se utiliza en el termostato común. Dicha cinta se forma al unir sobre un costado de una tira de metal de coeficiente de expansión alto, un metal cuyo coeficiente de expansión sea bajo.

4.6.3 TERMÓMETROS POR EXPANSIÓN LÍQUIDA:

El resto del sistema mecánico de los instrumentos para medir la temperatura, ya sea por expansión líquida o por presión de gas o vapor, consta de un bulbo expuesto a la temperatura que se va a medir y un dispositivo expansible, generalmente un tubo Bourdon, que hace funcionar una aguja indicadora o una pluma registradora. El termómetro por expansión líquida tiene el sistema entero lleno con un líquido orgánico adecuado o con mercurio. Los cambios en la temperatura del bulbo hacen que el líquido se expanda o contraiga, lo cual a su vez hace también que el tubo Bourdon se expanda o se contraiga. Algunos de los líquidos empleados y las temperaturas a que se utilizan están:

Mercurio	- 35 a + 950 °F	- 37 a + 510 °C
Alcohol	-110 a + 160 °F	- 78 a + 71 °C
Pentano	-330 a + 85 °F	-201 a + 29 °C
Creosota	+ 20 a + 400 °F	- 7 a + 204 °C

4.6.4 TERMÓMETROS POR PRESIÓN DE GAS O VAPOR:

En el termómetro por presión de vapor, un líquido volátil llena parcialmente el bulbo. Diferentes temperaturas del bulbo producen variaciones de presión correspondientes en el vapor saturado arriba del nivel líquido en el bulbo. Estas variaciones se transmiten al tubo Bourdon, y las indicaciones de presión actúan como una medida de la temperatura en el bulbo. Mediante una adecuada selección de líquido volátil, casi cualquier temperatura de -60 a $+500$ °F (-51 a $+260$ °C) se puede medir. Algunos de los líquidos que más se utilizan son cloruro de metilico, éter, alcohol etílico y tolueno.

4.6.5 TERMÓMETRO DE RESISTENCIA:

El principio del termómetro de resistencia se basa en el incremento de la resistencia eléctrica con el aumento de temperatura de un conductor. Si se calibran las variaciones de temperatura-resistencia de un metal, es posible medir la temperatura al medir su resistencia eléctrica. Los resistores se hacen generalmente de cobre, níquel o platino. El níquel y el cobre son más apropiados para temperaturas de 150 a 500 °F (66 a 260 °C), en tanto que el platino puede emplearse entre -350 a $+1100$ °F (-212 a $+593$ °C).

4.6.6 PIROMETRO TERMOELÉCTRICO:

Este es el método que más se emplea en trabajos de metalurgia para medir y controlar temperaturas, funcionan en forma satisfactoria hasta los 3000 °F (1650 °C). El pirómetro termoelectrónico sencillo consta de: el termopar, compuesto de dos

metales o aleaciones diferentes; el bloque de empalmes, situado cerca y fuera del horno; los cables de extensión y el instrumento indicador o de registro. El funcionamiento de este pirómetro se basa en dos principios: Efecto Peltier; si dos alambres diferentes se ponen en contacto eléctrico, habrá una fem a través de la punta de contacto.

La magnitud de la fem desarrollada se determina por la composición química de los alambres y la temperatura de la punta de unión, y el efecto Thompson; si hay una diferencia de temperatura entre los extremos de un alambre homogéneo único, existirá una fem entre los extremos de dicho alambre. La magnitud de la fem desarrollada quedará determinada por la composición, la uniformidad química del alambre y la diferencia de temperatura.

Por tanto, la fem total en un pirómetro termoelectrónico, algunas veces llamada efecto "Seebeck", es la suma algebraica de cuatro fem: dos fem de Peltier en las uniones calientes y frías y dos fem de Thompson a lo largo de cada alambre. La unión fría o unión de referencia debe mantenerse a temperatura constante, la cual es generalmente 32 °F (0 °C).

En el instrumento indicador, esto se hace generalmente por medio de una bobina de compensación de la unión fría que cambia su resistencia con las fluctuaciones en la temperatura ambiental. En el siguiente cuadro se muestran algunos de los empalmes típicos utilizados como termopares:

cromel-alumel	1200 a 2200 °F	649 a 1205 °C
hierro-constantán	300 a 1400 °F	149 a 760 °C
cobre-constantán	- 420 a 600 °F	- 521 a 316 °C
platino-rodio 10%	32 a 3000 °F	0 a 1650 °C

Cuadro No. 12

4.6.7 PIRÓMETRO DE RADIACIÓN:

Los principios del funcionamiento del pirómetro de radiación incluye una fuente de radiación estandar, conocida como cuerpo negro, el cual es un cuerpo hipotético que absorbe toda la radiación que incide sobre él. Tal cuerpo radia energía con mayor rapidéz que cualquier otro cuerpo a la misma temperatura. La ley Stefan-Boltzmann, que es la base para la escala de temperatura de los pirómetros de radiación, muestra que la rapidéz de energía radiante que despide un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

El pirómetro de radiación no necesita estar en contacto directo con el cuerpo caliente; de esta manera, el límite superior del intervalo de temperatura no está determinado por la habilidad del pirómetro en sí para resistir altas temperaturas. El uso de protecciones apropiadas en el sistema óptico, no hay límite superior de temperatura. El límite mínimo de temperatura es de 1000 °F (538 °C) aproximadamente.

4.7 SUBESTACIÓN ELÉCTRICA

En la siguiente figura se muestra un diagrama unifilar de la subestación eléctrica 230/22.8 KV de SIDEGUA, en la que se observa una

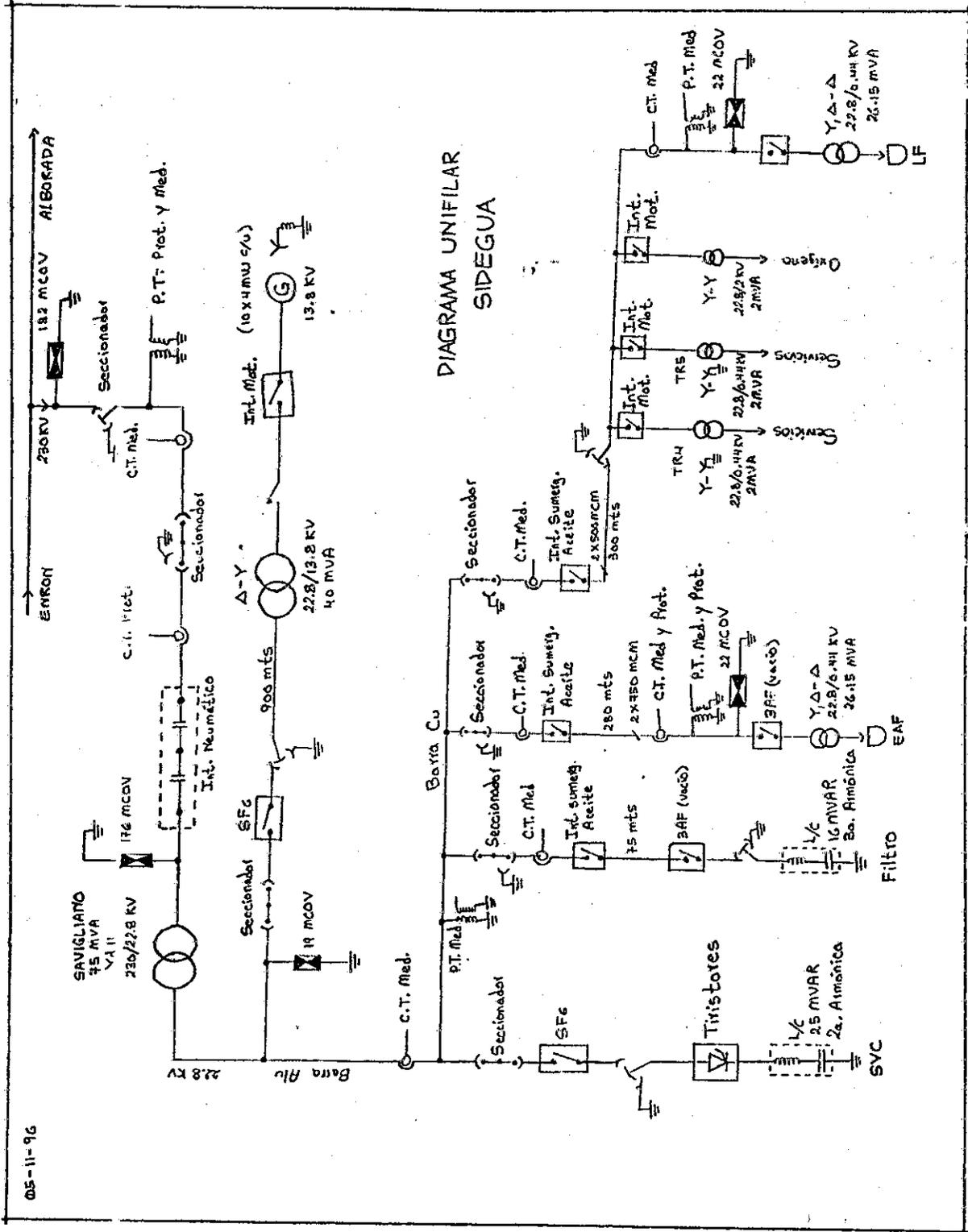


Fig. N.º 11.1

barra en 230 KV que comunica la subestación Alborada (Escuintla) con ENRON (Puerto San José). Luego un transformador que reduce la tensión a 22.8 KV; en esta barra está también la planta de generación INTEK con capacidad instalada de 40 MW, al igual que la alimentación del horno principal, así como servicios generales de la planta, el filtro para 3ra. armónica de 16 MVAR y con reciente instalación un SVC (Static Variator Compensator) para 2da. armónica de 25 MVAR, con el objetivo de mejorar la estabilidad en el sistema. En la subestación se lleva el control de consumo de potencia, así como parámetros de voltaje, corriente, frecuencia, factor de potencia, etc. con lo cual es necesario también colocar las debidas protecciones tales como relevadores de corriente, de voltaje, por temperatura, etc. y con ello garantizar que los equipos trabajen dentro de su rango debido.

4.8 IMPORTANCIA DEL FILTRO O REACTOR

En el proceso de fusión de la chatarra, la carga que es básicamente inductiva y debido a que no es constante y homogénea, origina desbalances dentro mismo sistema interno, con lo que ocasiona una generación de armónicas y oscilaciones de voltaje que de alguna manera afectan la fuente de alimentación. Una forma de reducir al mínimo este inconveniente es con la instalación de un reactor (filtro) que básicamente es un circuito LC (inductivo-capacitivo), que entra en resonancia a determinada frecuencia. En SIDEGUA se cuenta con un reactor de las siguientes características:

- | | |
|------------------------|---------|
| 1.- Potencia nominal | 16 MVAR |
| 2.- Tensión nominal | 22.8 KV |
| 3.- Frecuencia nominal | 60 Hz |

- 4.- Frecuencia de resonancia 180 Hz
- 5.- Temperatura ambiente - 25 a + 40 °C
- 6.- Servicio a intemperie
- 7.- Batería de condensadores conectado con doble estrella aislada
- a) Capacidad nominal 73 μ F
- b) Tensión de proyecto 27 KV
- 8.- Bobinas de reactancia
- a) Inductancia nominal 10.9 mH
- b) Corriente de proyecto 450 A

En la siguiente figura se muestra la conexión del filtro para la 3a. armónica.

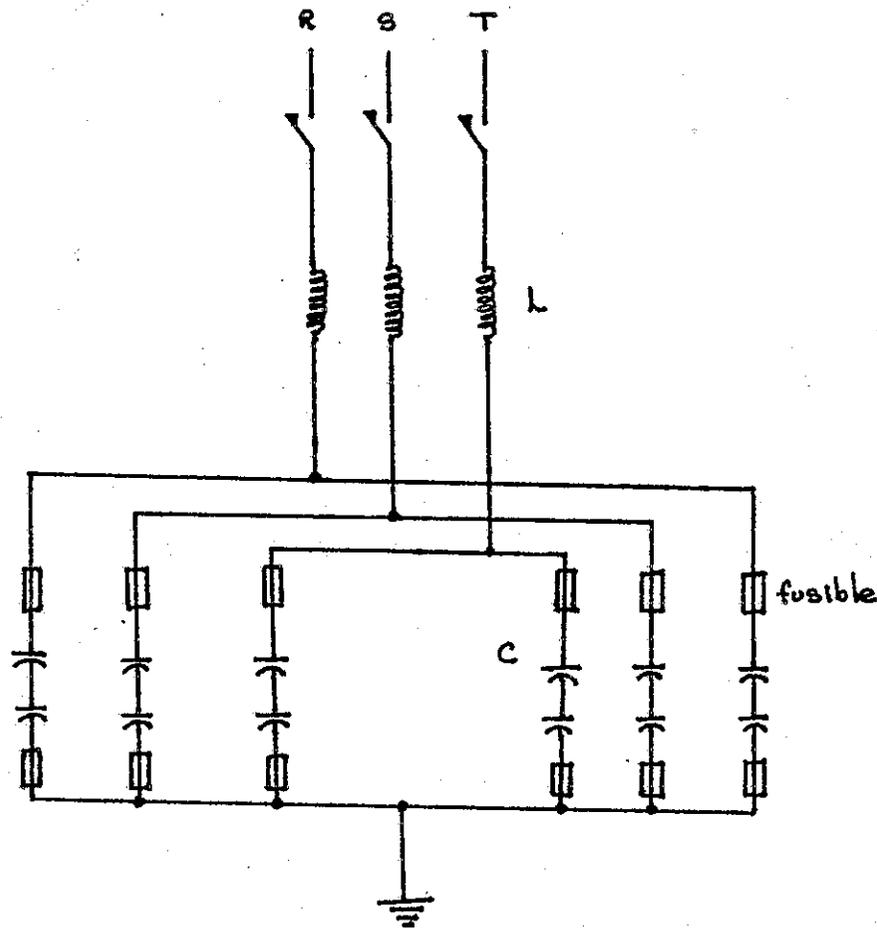


Fig. No. 114

Para encontrar la frecuencia de resonancia basta con igualar la reactancia inductiva con la reactancia capacitiva, es decir que

$$X_L = X_C \quad \text{Ecc. No. 52}$$

$$\omega L = 1 / (\omega C)$$

$$2\pi f L = 1 / (2\pi f C)$$

$$\text{finalmente } f = \sqrt{1 / (4 * \pi^2 * L * C)} \quad \text{Ecc. No. 53}$$

con lo cual, para los parámetros instalados en el reactor de SIDEQUA, o sea $L = 10.9 \text{ mH}$, $C = 73 \text{ } \mu\text{F}$ y $f = 60 \text{ Hz}$, la frecuencia de resonancia es aproximadamente 180 Hz (3ra. armónica).

De igual forma, el recientemente instalado SVC (Compensador de variación estática), que consiste en un reactor variable para amortiguar las distorsiones en el sistema generadas por el horno de arco eléctrico y a su vez eliminar la 2a. armónica, posee una capacidad de 25 MVAR , 22.8 KV , capacitores de $32.7 \text{ } \mu\text{F}$, y bobinas de 53.8 mH ; en las cuales también es aplicable la ecuación anterior, para calcular la frecuencia de resonancia.

5 CLASIFICACIÓN DE ACEROS

5.1 CLASIFICACIÓN DEL ACERO

Para clasificar el acero se pueden utilizar varios métodos, tales como: el de manufactura, por el uso, por su composición química, etc. Por su mayor importancia solamente se analizará al que corresponde por su composición química. Las especificaciones para los aceros representan una nomenclatura dada a conocer por AISI (American Iron and Steel Institute) y por SAE (Society of Automotive Engineers), en un programa de simplificación destinado a lograr mayor eficiencia para satisfacer las necesidades de acero.

El primero de los cuatro o cinco dígitos de la designación numérica indica el tipo a que pertenece el acero. De este modo, 1 indica un acero al carbón, 2 un acero al níquel, 3 un acero al níquel-cromo, etc. En el caso del acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento predominante en la aleación. Los dos o tres últimos dígitos generalmente indican el contenido de carbón medio dividido entre 100.

Así; por ejemplo, el símbolo 2520 indica un acero al níquel de aproximadamente 5 % de níquel y 0.20 % de carbón. Además de los números las especificaciones AISI puede incluir un prefijo literal para indicar el proceso de manufactura empleado en la producción del acero.

5.2 ACEROS ALEADOS

Los aceros al carbón son muy satisfactorios donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos. Estos aceros se utilizan también con todo éxito en las temperaturas comunes y en atmósferas que no son altamente corrosivas, pero su templabilidad relativamente baja, limita la resistencia que puede obtenerse, excepto en secciones regularmente delgadas. Casi todos los aceros endurecidos se revienen para reducir las tensiones internas. Los aceros al carbón muestran una marcada suavidad con el incremento de la temperatura de revenido.

Este comportamiento disminuirá su aplicabilidad para piezas que requieren dureza por arriba de la temperatura ambiente. La mayoría de las limitaciones de los aceros al carbón pueden vencerse mediante el uso de elementos de aleación. El acero aleado puede definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbón. Aunque todos los aceros al carbón contienen moderadas cantidades de manganeso (hasta el 0.90 %) y silicio (hasta el 0.30 %) no se consideran aleados, porque la función principal del manganeso y del silicio es actuar como desoxidadores. Ellos se combinan con el oxígeno y el azufre, para reducir el efecto nocivo de dichos elementos.

5.2.1 PROPOSITO DE LA ALEACION:

Los elementos de la aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, entre los cuales los más importantes son:

- 1.- Aumentar la templabilidad.
- 2.- Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
- 3.- Mejorar las propiedades mecánicas, tanto a altas como a bajas

temperaturas.

- 4.- Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia mínima.
- 5.- Aumentar la resistencia al desgaste.
- 6.- Aumentar la resistencia a la corrosión.
- 7.- Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos de la aleación pueden clasificarse de acuerdo con la forma en que se distribuyan en los constituyentes principales de un acero recocido, tales como:

- a) Elementos que se disuelven en ferrita.
- b) Elementos que se combinan con carbón para formar carburos simples o complejos.

Desde el punto de vista técnico, probablemente hay alguna solubilidad de todos los elementos en la ferrita, pero ciertos elementos no se encuentran extensivamente en la fase carburo. De esta manera, el níquel, el aluminio, el silicio, el cobre y el cobalto se hallan ampliamente disueltos en ferrita. Cualquier elemento disuelto en ferrita aumenta su dureza y su resistencia de acuerdo con los principios generales del endurecimiento por solución sólida. El efecto de endurecimiento de los elementos disueltos es realmente insignificante e ilustra cuán relativamente pequeña es la contribución del reforzamiento de la ferrita a la resistencia total del acero.

La presencia de los elementos que forman carburos influyen en la temperatura de endurecimiento y el tiempo necesarios para obtener un calentamiento total y uniforme.

5.3 MATERIALES METÁLICOS

Cuando se consideran en un amplio sentido, pueden dividirse en dos grandes grupos: ferrosos y no ferrosos. Los primeros tienen como base al hierro y los segundos poseen algún elemento diferente del hierro como constituyente principal. El grueso de los materiales no ferrosos está formado por las aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo y zinc. Otros metales y aleaciones no ferrosas que se utilizan con menor frecuencia incluyen el cadmio, molibdeno, cobalto, zirconio, berilio, titanio, tantalio, y los metales preciosos como el oro y plata y el grupo platino.

5.3.1 COBRE:

Las propiedades del cobre más importantes son la alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación. Además, el cobre es no magnético, tiene un color atractivo, puede ser soldado, soldado con latón, soldado con estaño y fácilmente se termina por revestimiento metálico (galvanizado) o barnizado. La mayor parte del cobre que se utiliza para conductores eléctricos contiene sobre 99.9 % de cobre y se identifica ya sea como cobre electrolítico resistente al depósito de grasa (típico del cobre) o como cobre libre de oxígeno de alta conductividad.

El cobre electrolítico contiene de 0.02 a 0.05 % de oxígeno, el cual se combina con el cobre en forma de compuesto óxido cuproso (Cu_2O). En la condición de fundido (sin tratamiento térmico), el óxido de cobre y el cobre forman una mezcla interdendrítica eutéctica.

Hay dos clases de temple para aleaciones de cobre forjadas, no tratables térmicamente: el temple proporcionado por trabajo en frío y el temple suave o recocido.

5.3.2 ALUMINIO:

La característica más conocida del aluminio es su peso ligero y la densidad es como una tercera parte de la del acero o de las aleaciones al cobre. Ciertas aleaciones de aluminio tienen mejor proporción "resistencia a peso", que la de los aceros de alta resistencia. El aluminio tiene buena maleabilidad y formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica. El aluminio no es tóxico, ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica.

Aunque la conductividad eléctrica del aluminio de la clase conductor eléctrico es como el 62 % que la del cobre, su peso ligero lo hace más apropiado como conductor eléctrico para muchas aplicaciones industriales. Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajo; se puede fundir mediante cualquier método conocido, laminado a cualquier espesor deseado, estampado, estirado, enroldado, forjado y extruido a casi cualquier forma imaginable.

5.3.3 MAGNESIO:

Las principales ventajas del magnesio son su peso ligero, su facilidad de maquinabilidad y la alta razón "resistencia a peso", que se puede obtener con sus aleaciones. Con base en volúmenes

iguales, el aluminio pesa una y media veces más y el acero cuatro veces más, y las aleaciones al cobre y al níquel cinco veces más que el magnesio. El magnesio tiene una estructura cristalina exagonal compacta y la deformación plástica tiene lugar a temperatura ambiente por deslizamiento a lo largo de los planos basales. La ductibilidad del magnesio es menor que la de los metales ya que hay menos sistemas de deslizamientos aprovechables para deformaciones plásticas. Tiene gran afinidad con el oxígeno y otros agentes químicos de oxidación. Se utiliza como desoxidador y desulfurizador en la manufactura de aleaciones al níquel y al cobre, así como eliminador de gases disueltos en tubos al vacío.

5.3.4 NÍQUEL:

Este metal se caracteriza por tener buena resistencia a la corrosión y a la oxidación; es de color blanco y tiene gran capacidad de trabajo y buenas propiedades mecánicas; además, forma aleaciones de solución sólida tenaces y dúctiles con mucho de los metales comunes. Aproximadamente, el 60 % del níquel producido se utiliza en aceros inoxidables y aceros aleados al níquel. Debido a su alta resistencia a la corrosión y dureza, el níquel es un recubrimiento ideal para piezas sometidas a corrosión y desgaste.

Sus propiedades mecánicas son semejantes a las de los aceros al bajo carbón, retiene su resistencia a elevadas temperaturas y su ductilidad y tenacidad a bajas temperaturas. La conductividad eléctrica del níquel, aunque no tan alta como la del cobre o aluminio, es satisfactoria para conductores y terminales de corriente en muchas aplicaciones electrónicas.

5.3.5 PLOMO:

Entre las principales propiedades del plomo se encuentran su peso, alta densidad, suavidad, maleabilidad, bajo punto de fusión y baja resistencia mecánica; además tiene propiedades de lubricación, baja conductividad eléctrica, alto coeficiente de expansión y alta resistencia a la corrosión. Como recubrimiento sobre alambre, el plomo actúa como lubricante de estiramiento.

5.3.6 ZINC:

Se emplea principalmente como recubrimiento para el acero con el fin de evitar la corrosión. Es más altamente anódico que el acero, y en una atmósfera corrosiva la recubierta de zinc actúa como el ánodo de sacrificio. De este modo el zinc se consume mientras se protege al acero de cualquier ataque químico. Los recubrimientos metálicos de zinc pueden aplicarse mediante varios métodos, como galvanizados por inmersión caliente, electrogalvanizado, pintado, metalizado o rociado de metal fundido y por sherardizado o cementación. El zinc puro tiene una temperatura de recristalización inferior a la ambiente, de modo que se autorrecuece y no puede endurecerse por trabajo a temperatura ambiente.

5.4 CONTACTOS ELÉCTRICOS

Las propiedades que debe presentar un material para que ofrezcan un buen contacto eléctrico son:

- 1.- Alta conductividad eléctrica para máxima capacidad de transporte de corriente; bajo coeficiente de resistencia a la temperatura para mantener la resistencia del contacto tan uniforme como sea

posible.

- 2.- Alta conductividad térmica para disminuir el incremento en la temperatura del contacto y reducir la tendencia a la oxidación.
- 3.- Baja resistencia superficial del contacto para utilizar mínima presión de contacto.
- 4.- Alto punto de fusión para evitar la formación de puentes fundidos, pérdida de material y asperezas en la superficie.
- 5.- Alto punto de ebullición para evitar vaporización local y pérdida de material durante la formación de arco.
- 6.- Alta resistencia a la corrosión para evitar un incremento en la resistencia de contacto.
- 7.- Altas características de no soldado y no pegajoso.
- 8.- Alta dureza y tenacidad para evitar el desgaste mecánico y falla mecánica, particularmente en piezas que funcionan a altas frecuencias o bajo altas presiones de contacto.

5.5 REQUERIMIENTOS DE ACEROS EN SIDEGUA

En Siderúrgica de Guatemala, se forjan aceros en los cuales, el análisis de control está definido para materiales tales como: carbón, manganeso, silicio, fósforo, azufre, cromo, níquel, molibdeno, cobre, aluminio, estaño, P + S, CeQu, residuales.

En el siguiente cuadro se muestra el porcentaje requerido de cada uno de los elementos anteriormente descritos, acorde al grado o tipo de acero por producir, dependiendo del tipo de demanda de acero en el mercado.

ESPECIFICACIONES ANALITICAS PARA ACEROS PRODUCIDOS EN SIDEGUA
PARA BARRAS, PERFILES, SOLERAS, HEMBRAS Y ALAMBRON

GRADO DEL ACERO	BARRA PERFILES SOLERAS HEMBRAS ALAMBRON	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Sn	P+S	CeQu	Resi
G60G	BARRAS	INTERVALO	1.25											0.65	
	ARRIBA	MAX	1.30	0.20	0.030	0.030	0.13	0.13	0.03	0.35	0.005	0.04	0.06	0.70	0.60
GRIS	3/4"	ANALISIS OBJETIVO	1.28	0.19	0.008	0.020								0.68	
G60	BARRAS	INTERVALO	1.10											0.52	
	ABAJO	MAX	1.15	0.20	0.030	0.030	0.13	0.13	0.03	0.35	0.005	0.04	0.06	0.55	0.55
NEGRO	3/4"	ANALISIS OBJETIVO	1.12	0.19	0.008	0.020								0.53	
G 40	BARRAS	INTERVALO	0.60	0.15±0.02										0.28	
	ABAJO	MAX	0.65	0.20±0.02	0.030	0.030	0.13	0.13	0.03	0.40	0.005	0.04	0.06	0.30	0.60
AZUL	3/4"	ANALISIS OBJETIVO	0.62	0.17	0.008	0.020								0.29	
G40G	BARRAS	INTERVALO	0.60	0.15±0.02										0.38	
	ARRIBA	MAX	0.65	0.20±0.02	0.030	0.030	0.13	0.13	0.03	0.5	0.005	0.04	0.06	0.4	0.6
VERDE	3/4"	ANALISIS OBJETIVO	0.62	0.17	0.008	0.020								0.39	
1015	PERFILES	INTERVALO	0.40	0.15±0.02										0.25	
	NARANJA	MAX	0.60	0.20±0.02	0.030	0.030	0.15	0.15	0.05	0.35	0.006	0.04	0.06	0.32	0.60
1012	PERFILES	ANALISIS OBJETIVO	0.12	0.17	0.008	0.020								0.30	
	SOLERA	INTERVALO	0.11	0.15±0.02										0.21	
ROJO	HEMBRAS	MAX	0.12	0.20±0.02	0.030	0.030	0.15	0.15	0.05	0.35	0.006	0.04	0.06	0.21	0.60
	HEMBRAS	ANALISIS OBJETIVO	0.11	0.16	0.008	0.020								0.24	

5.6 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

En una acería existen variadas formas de contaminación ambiental; que van desde la contaminación acústica, contaminación visual, contaminación de aguas, contaminación por gases generados, etc. Para lo cual, en cada uno de los tipos anteriormente descritos existen métodos o técnicas para contrarrestar los efectos nocivos al medio ambiente y al personal que labora en la misma.

En general, los contaminantes químicos se dividen en microcontaminantes y en macrocontaminantes. Los microcontaminantes se caracterizan porque con una pequeña concentración, es suficiente para causar mucho daño (como por ejemplo el mercurio en el agua); mientras que los macrocontaminantes necesitan de grandes proporciones para ocasionar dicho daño; tal como ocurre con el bióxido de carbono " CO_2 "

5.6.1 AGUAS:

Para enfriar los paneles que sirven de bóveda en el horno de fusión, las distintas tuberías de refrigeración y los sistemas de enfriamiento del lingote de acero producido, se utiliza agua debidamente tratada. Este tratamiento consiste en agregarle cromatos, que son los que evitan la corrosión e incrustación de la tubería o los equipos de enfriamiento, adicionalmente para evitar la concentración baja de calcio se le adhiere sal (cloruro de sodio) que es utilizado como un suavizador. Otro elemento que ocasionalmente acompaña al agua es el aceite que se fuga de algún equipo. Toda ésta agua contiene agentes contaminantes, para lo cual se sugiere que en todas las Acerías se instale una planta de tratamientos de aguas, para que si hubiere necesidad de desechar

esta agua, no contenga los mismos. Esencialmente éstos sistemas de enfriamiento están dentro de un circuito cerrado, en donde teóricamente no existe pérdida de agua, o sea que no hay necesidad de cambiarla periódicamente.

Para el sistema de regulación de electrodos y el levantamiento de la bóveda, que se hace a base de presión hidráulica, se utiliza agua emulsionada (agua mezclada con aceite en la cual se altera las propiedades mecánicas y térmicas, es decir, que se puede comprimir más, lubrica más, etc. Esto también constituye una fuente de contaminación, pero también está comprendido dentro de un circuito cerrado en el cual no se debiera tener fugas ni cambios del mismo; por lo que no se incurrirá en la contaminación a gran escala.

5.6.2 GASES:

Uno de los gases más utilizados en la industria del acero es el Oxígeno, el cual es introducido dentro del horno a través de lanzas o tuberías de hierro, para aumentar el proceso de calentamiento del acero. Con el oxígeno no hay daño directo al medio ambiente, básicamente éste genera óxidos en el acero que forma bióxido de carbono (CO_2), luego desprende fosfatos, sulfatos, y de alguna medida también algún tipo de plomos, aunque en proporciones muy pequeñas. Cuando el acero está directamente en forma líquida, se necesita mantener una homogeneidad tanto en su composición, así como en su temperatura; para lograr esto se le introduce nitrógeno; dicho gas no produce ningún tipo de daño al medio ambiente ya que es absorbido por el acero.

Otros gases utilizados para cortar hierros o para realizar soldaduras en los mismos, están el propano y el acetileno, en los cuales ambos generan básicamente bióxidos de carbono (CO_2). En el momento de realizar recargues de chatarra en las cestas, por lo general también se introduce porciones de tierras, plásticos, hules, vidrios, etc. que al momento en el cual, los electrodos empiezan a realizar la perforación de los metales, se desprenden partículas que por lo general son óxidos de los metales, fosfatos y sulfatos, creando un ambiente cercano a la bóveda con un alto porcentaje de impurezas del aire que respiran los trabajadores, por lo mismo se sugiere siempre utilizar mascarillas desechables.

Los materiales no utilizables en el acero, comunmente denominada escoria, forma maquetas al enfriarse, lo cual se puede utilizar para rellenos en donde se desee neutralizar terrenos, es decir que la escoria puede ser de un tipo ácida o de un tipo básica (caliza) y así mismo los terrenos pueden ser de un tipo ácida o de un tipo básica; con lo cual basta con mezclarse con un tipo distinto para neutralizarse, siendo esto muy beneficioso.

Las personas cercanas al horno deben de utilizar ropa no inflamable, preferiblemente mal conductor del calor, y si fuera de dos piezas la parte superior (camisa) debe de quedar por fuera de la inferior (pantalón), por si saltara alguna chispa dentro de la camisa, ésta salga. En la siguiente figura se muestra un sistema de extracción de humos en la que se absorbe la mayor cantidad posible de gases, partículas, etc. generados por la fusión del horno; separando aire y contaminantes.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

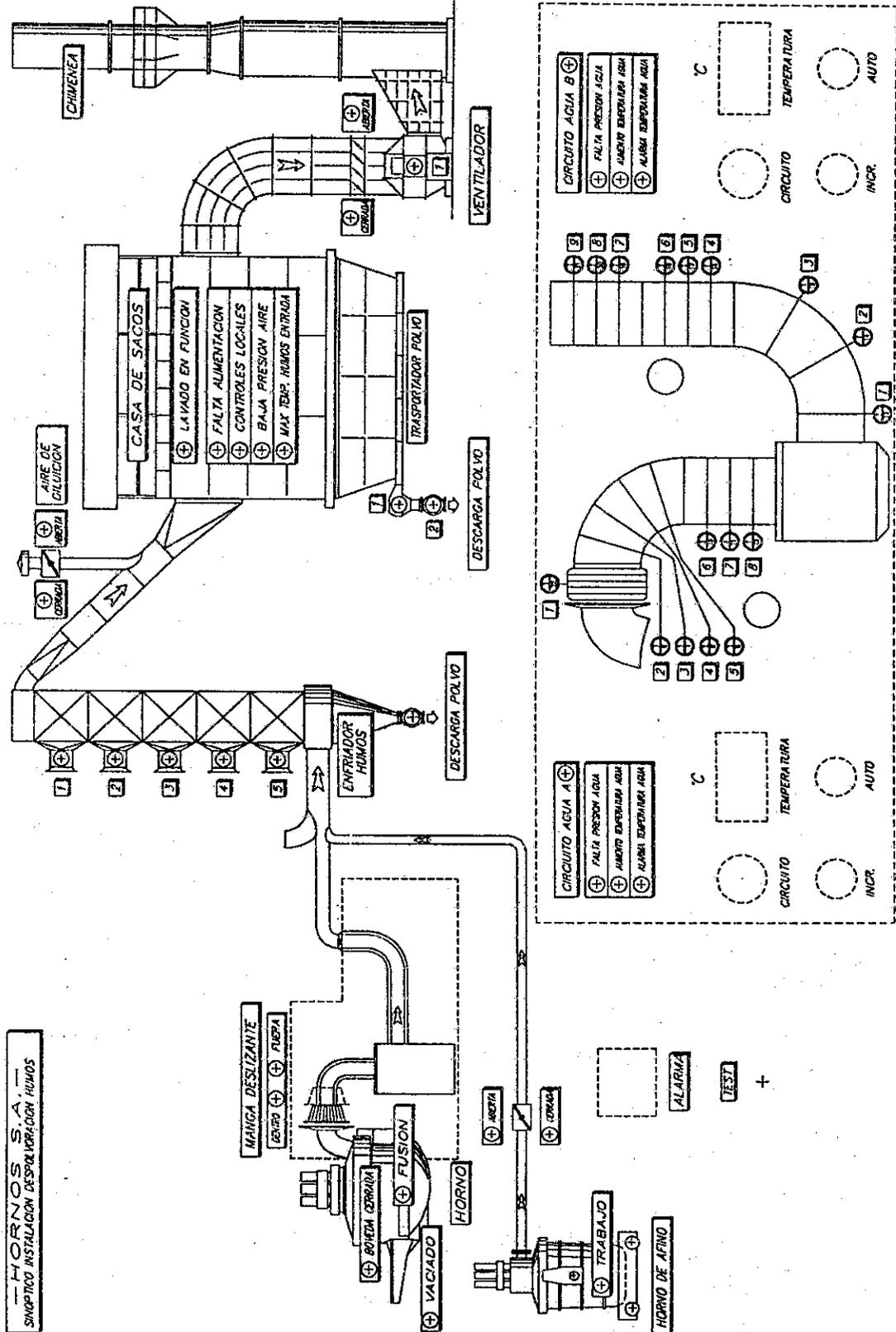


Fig. No. 115

Asimismo por el estruendo producido por el horno debe de utilizar siempre alguna protección para los oídos (orejeras, tapones adecuados, etc.) preferiblemente capaces de escuchar una conversación, aún en medio de altos niveles de ruido, por si hubiera una situación de peligro o de emergencia. Adicionalmente, es conveniente la utilización de cascos, siempre de un material no inflamable y de bastante dureza mecánica.

Uno de los procesos más relevantes en la producción del acero es el chequeo visual del baño plano, es decir que se debe de ver directamente al acero, esto implica observarlo a un temperatura de alrededor de los 1600 °C, lo cual alcanza una frecuencia de iluminación muy alta, el ojo humano es incapaz de observarlo sin sufrir daño alguno, por lo que se debe de utilizar lentes con cristales a base de cobalto.



CONCLUSIONES

- * Los transformadores para horno de arco eléctrico deben ser diseñados con especificaciones o requerimientos más rígidos que los transformadores de distribución (es decir que sean capaces de absorber de 75 a 100 interrupciones diarias, condiciones de corto circuito por largos periodos, desbalances repetitivos, calentamientos súbitos); contruidos con baja reactancia y utilizando variadores de Tap en el primario, debido a que en el secundario circularán altos amperajes. La conexión en el secundario siempre debe ser en delta (para evitar las componentes de secuencia cero en el corto circuito), aterrizando solamente la carcaza del transformador para proteger al personal.

- * El interruptor a utilizar en el transformador el Horno, deberá contener un set de resistencias y capacitancias, para que cuando efectúe una maniobra de apertura, entre en resonancia atenuadora la inductancia del transformador, con la resistencia y la capacitancia, disminuyendo de esa forma la sobretensión originada.

- * El consumo de energía eléctrica en Hornos de Arco Eléctrico oscila entre 300 KWH/TON a 600 KWH/TON (en SIDEGUA se cuenta aproximadamente con un consumo de 630 KWH/TON) beneficiándose con ahorros de 3.5 KWH/TON por cada 1 mt³ de oxígeno suministrado y con 10 KWH/TON con el uso de quemadores a base de diesel.



100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

100

- * En el arco eléctrico existen componentes simétricas (de secuencia positiva y secuencia negativa) y en su mayoría asimétricas, interviniendo únicamente como limitantes la impedancia de la línea de alimentación, la impedancia del transformador de la subestación eléctrica y del horno, la resistencia propia de los electrodos y de la chatarra misma que oscila alrededor de los 6 a 7 mΩ.

- * La longitud del arco eléctrico está relacionado directamente con la potencia aplicada e inversamente a la corriente que circula.

- * El Flicker o fluctuaciones de voltaje es una forma de contaminación óptica, es decir que es visible en los sistemas de iluminación, que está en función de un rango de oscilación del voltaje nominal.

- * La fusión en DC posee mejores ventajas que las de AC (tales como menor consumo de energía, menor consumo de electrodos, menor nivel de Flicker, etc.); pero el costo inicial de capital, es mayor (posee mayores accesorios eléctricos como la fuente de alimentación rectificadora, equipo de filtrado), pero si un mayor desgaste en las paredes y refractarios del horno.

- * El sistema de regulación representa lo fundamental en la eficiencia de una Acería; consiste en mantener los electrodos en una posición establecida de balance (entre el voltaje y la corriente) de tal forma, que se aprovecha al máximo el calentamiento y manteniendo al mínimo las pérdidas eléctricas,

utilizando para ello un sistema hidráulico gobernados por electroválvulas, manteniendo un factor > 0.85 y amperajes bajos.

- * El horno de arco eléctrico genera perturbaciones transitorias en el sistema nacional, que representan una oscilación de 2 KV en la barra de 230 KV, y una disminución de la frecuencia que no es superior a los 0.2 Hz, en el momento de perforar la chatarra; para lo cual ya se cuenta con filtros para la 2a y 3a. armónica que generan 25 MVar capacitivos y un reactor variable gobernado por tiristores que genera 25 MVar inductivos, que atenúan la distorsión total hasta un 50 % más.

RECOMENDACIONES

* Verificar antes de la adquisición de un transformador para un horno de arco eléctrico, que cumpla con el protocolo de pruebas que garanticen su buen estado, tales como de impulso, de aislamiento, de relación de transformación, de su aceite dieléctrico, etc. y que garanticen un tiempo mínimo de vida útil; así mismo que contengan preferiblemente variador de Tap capaces de maniobrar con carga, para minimizar las demoras en la producción y evitar accionar excesivamente el interruptor del horno. En cuanto a las protecciones se refiere, por lo menos debe contener relevadores Buchholtz, de temperatura, de flujo de agua y aceite, de nivel de aceite, de máxima corriente, de mínimo y máximo voltaje, pararrayos, etc.

* Al momento de la fusión siempre:

- Cortocircuitar los tres electrodos a mismo instante.
- Utilizar el transformador en el Tap de voltaje más alto.
- Trabajar siempre con arcos largos.
- Mantener el factor de potencia por arriba de 0.85 .
- Utilizar al máximo posible el uso de oxígeno y los quemadores.
- Evitar los disparos del interruptor del horno por máxima corriente.
- Verificar que el enfriamiento que los electrodos no sea excesivo.
- Trabajar con escoria espumosa para irradiar mejor el calor.

- * Es muy importante recordar que el mayor costo, radica en el consumo de energía eléctrica, por lo que también se sugiere evitar en la medida de lo posible el uso innecesario de la misma, básicamente en la preafinación y en la afinación del acero, que es cuando un buen operador del horno, puede disminuir el consumo de la misma; apoyándose con el uso de oxígeno, escoria espumosa, etc.

- * Otro factor muy importante, es el de mantener la temperatura alta, y no utilizar energía para recalentar el acero, es decir controlar de la mejor forma posible, las fugas de agua en los paneles de enfriamiento (que enfrían rápidamente la escoria dentro de la bóveda, así como al acero mismo).

- * Siempre que se instale una Acería, hacer un estudio preliminar de:
 - Las posibles perturbaciones en el Sistema Nacional, que conlleva la instalación de sus respectivos filtros y reactor variable, para contrarrestar los mismos.
 - El impacto ambiental, o sea que contenga equipos especiales para evitar la contaminación del aire (extractores de polvo), planta de tratamiento de aguas y el nivel de ruido generado; adicionalmente que contenga un plan permanente de seguridad industrial (utilización de cascos, orejeras o tapones de oídos, la vestimenta adecuada, el uso de extinguidores, etc) y especialmente personal asignado que se encargue de velar porque se cumplan con dichas medidas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- BAIN E. & H. PAXTON, **Alloying Elements in Steel**, Cleveland, ASM, 1961.
- 2.- CABPELL Y. E. & R. COLLINS, **Aplication Of Fracture Mechanics For Selection Of Methalic Structural Materials**, Metals Park, Ohio, ASM 1982.
- 3.- EDMINISTER, Joseph A., **Circuitos Eléctricos**, 2da. Edición, España; McGraw-Hill, 1991.
- 4.- ELGERD, Olle I., **Electric Energy Systems**, India; McGraw-Hill, 1978.
- 5.- FIND, Donald & Wayne H. BEATY, **Manual de Ingeniería Eléctrica**, 13a. Edición, Tomo I & II, México; McGraw-Hill, 1995.
- 6.- GOURISHANDAR, Vembu, **Conversión de Energia Electromagnética**, Taller de Servicios e Ingeniería, México, 1975.
- 7.- HAYT, William H., **Teoría Electromagnética**, 5a. Edición, México; McGraw-Hill, 1992.

8.- SAWABE, Hiroshi S., **Boletines Técnicos Ucar, "Horno de Arco Eléctrico"**, México.

Año 1 (del 1 al 10) 1993.

Año 2 (del 1 al 12) 1994.

Año 3 (del 1 al 12) 1995.

Año 4 (del 1 al 13) 1996.

9.- SAWABE, Hiroshi S., **Criterios de Operación de Hornos Eléctricos Modernos**, Unicarb Industrial, S.A. de C.V. , 1987.

10.- S.A., **Sistemas Eléctricos de Potencia**, 3a. Edición, Colombia, McGraw-Hill Latinoamérica, 1975.

11.- STEVENSON, William D., **Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia** 2a. Edición, México; McGraw-Hill, 1988.

ANEXO

DATOS TECNICOS DE AISLAMIENTO

1.- Factores de corrección por temperatura del factor de potencia de los aislamientos:

Temp. de prueba en °C	Aceite y trafos con tanque conservador	Transformadores en aceite sellados al aire
0	1.56	1.57
5	1.46	1.41
10	1.38	1.25
15	1.20	1.11
20	1.00	1.00
25	0.79	0.90
30	0.63	0.80
35	0.51	0.71
40	0.42	0.65
45	0.34	0.57
50	0.28	0.51
55	0.23	0.47
60	0.17	0.41
65	0.15	0.38
70	0.12	0.33
75	0.11	0.31
80	0.09	0.27

DATOS TECNICOS DE AISLAMIENTO

2.- Factores de corrección por temperatura para transformadores
sumergidos en aceite:

Temperatura en °C	Factor de corrección Fc
0	0.25
5	0.36
10	0.50
15	0.74
20	1.00
25	1.40
30	1.98
35	2.80
40	3.95
45	5.60
50	7.85
55	11.20
60	15.85
65	22.40
70	31.75
75	44.70

DATOS TÉCNICOS DE AISLAMIENTO

3.- Valores mínimos de aislamiento para distintos niveles de voltaje en transformadores sumergidos en aceite, a 20 °C:

KV	Mega-OHM
1.2	32
2.5	68
5.0	135
8.6	230
15.0	410
25.0	670
34.5	930
69.0	1860
92.0	2480
115.0	3100
138.0	3780
161.0	4350
196.0	5310
230.0	6200
287.0	7750
345.0	9380

DATOS TÉCNICOS SOBRE SECADO DE TRANSFORMADORES

- 4.- Punto de ebullición del agua a diferentes presiones:
 Presión para diferentes sistemas: Punto de ebullición:

Presión en KG/CM ²	Vacío Aprox. %	Vacío absoluto MM. HG.	°C	Grados °F
0.010	99	8	6.7	44
0.015	98.5	11	12.7	55
0.020	98	15	17.2	63
0.025	97.5	19	20.8	70
0.030	97	23	23.8	75
0.040	96	30	28.6	83
0.050	95	38	32.6	91
0.060	94	46	35.8	97
0.080	92	61	41.1	106
0.100	90	76	45.5	114
0.120	88	91	49.1	120
0.150	85	114	53.6	128
0.200	80	152	59.7	139
0.250	75	190	64.6	148
0.300	70	228	68.7	155
0.350	65	266	72.2	162
0.400	60	304	75.4	168
0.500	50	380	80.9	176
0.600	40	456	85.5	186
0.700	30	532	89.5	193
0.800	22	593	93.0	199
0.900	13	661	96.2	205
1.000	3	737	99.1	210
1.033	0	760	100.0	212

DATOS TÉCNICOS SOBRE SECADO DE TRANSFORMADORES

5.- Por ciento de humedad de los aislamientos a diferentes presiones de vapor y temperaturas del transformador:

EQUILIBRIO VAPOR PRESIÓN

Presión en MM. HG.	20°C	30°C	40°C	60°C	80°C	90°C
0.030	0.2	0.12	0.07	0.02	-----	-----
0.100	0.4	0.25	0.15	0.05	0.015	-----
0.300	0.8	0.50	0.30	0.10	0.040	0.020
1.000	1.6	1.00	0.75	0.25	0.100	0.070
3.000	2.8	1.90	1.20	0.50	0.230	0.150
10.000	5.4	3.80	2.50	1.20	0.510	0.350