



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**ESTUDIO DEL ESQUEMA DE PROTECCIÓN DE UN
TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO ELECTRICO**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia

Presenta:

Luis Manuel Ortiz Martínez

Asesores:

Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez

Ing. Moisés Campeas Balpuesta



San Luis Potosí, S. L. P.

octubre de 2022

AGRADECIMIENTOS

A mi Esposa e hijos Marcela, Luis y Manuel porque son la razón de sentirme tan orgulloso de culminar mi meta, gracias a ellos por confiar siempre en mí.

Agradezco a la empresa Schweitzer Engineering Laboratories, S.A. de C.V por haberme brindado las facilidades para cursar la maestría.

Agradezco a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a los Doctores y profesores por todos los conocimientos aportados para lograr culminar mis estudios.

Mi agradecimiento sincero a mis asesores de tesis Dr. Ciro Alberto Núñez e Ing. Moisés Campeas por todo el apoyo y tiempo dedicado para poder concluir este trabajo.

A la empresa siderúrgica Aceros DM, por permitir realizar mediciones en el transformador de horno y presentarlo como un caso real, para aportar al conocimiento de este tipo de proceso industrial.

RESUMEN

La industria del Acero ha existido por varias décadas, el principio de fundición del acero es el mismo mediante la aplicación de energía eléctrica para conseguir fundir en el menor tiempo con la máxima potencia, el desarrollo tecnológico ha optimizado este proceso permitiendo analizar con más detalle y ayudando a la toma de decisiones en la eliminación de problemas.

El presente trabajo muestra la problemática presentada en un transformador de horno de arco eléctrico que en su operación produce sobre corriente que interfieren el proceso en varias ocasiones, repercutiendo en la productividad y en una falla futura que sufren los equipos eléctricos como son el transformador y los interruptores.

Para determinar la solución del problema, se realizó una revisión al sistema eléctrico que alimenta el transformador de horno de arco eléctrico, corroborando los elementos de protección, ajustes, selección de componentes. Se realizaron mediciones con relevadores SEL registrando las perturbaciones ocasionadas por la operación normal de Horno y en el momento de presentarse disparos. Los registros obtenidos se analizaron el software AcSELelectorator donde se obtuvieron diagnósticos de lo que sucedía antes y después del disparo.

Con toda la información obtenida se presenta una propuesta de esquema de protección que se adapta al funcionamiento variable que se requiere en el proceso de fundición de chatarra y que permitirá tener un sistema confiable, selectivo y sensible a las corrientes de operación del transformador de horno de arco.



16 de diciembre de 2021

**ING. LUIS MANUEL ORTIZ MARTÍNEZ
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Ciro Alberto Núñez Gutiérrez y el M.I.D.E. Moisés Campeas Balpuesta**, Asesor y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Sistemas Eléctricos de Potencia**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de diciembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**"ESTUDIO DEL ESQUEMA DE PROTECCIÓN DE UN
TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO"**

Introducción.

1. Hornos de arco de corriente alterna.
2. Sistema eléctrico para el transformador de horno de arco.
3. Problemática del transformador del horno de arco.
4. Sistema de protección del transformador del horno de arco.
5. Análisis de la protección diferencial del transformador del horno de arco.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN

DIRECTOR

DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2330

Copia. Archivo
*etn.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I Hornos de arco de corriente alterna.

1.- INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS HORNO DE ARCO	7
1.1 GENERALIDADES	7
1.2 HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA FUSIÓN DE ACERO	8
1.2.- PRINCIPIOS BÁSICOS DEL HORNO DE ARCO	9
1.2.1.- Funcionamiento	9
1.2.2.- Características principales del horno de arco eléctrico	10
1.2.3.- Curvas de potencia del horno de arco	15

CAPÍTULO II Sistema eléctrico para el transformador de horno de arco.

2.- COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO	18
2.1.1.- TRANSFORMADOR DE SUBESTACION (TR1)	20
2.1.2.- TRANSFORMADOR DE HORNO (TR2)	20
2.1.3.- REACTOR	20
2.1.4.- IMPEDANCIA DEL HORNO	23
2.1.5.- EL ARCO	23
2.1.6.-BANCO DE CAPACITORES Y FILTROS	25
2.1.-ESPECIFICACIONES DE UN TRANSFORMADOR DE HORNO	26
2.2.- PLACA DE DATOS TRANSFORMADOR 70 MVA	26
2.3.- DIAGRAMA UNIFILAR	28

CAPÍTULO III Problemática del transformador del horno de arco.

3.- FALLOS EN UN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO	30
3.1.1.- SOBRECARGA EN TRANSFORMADORES DE HORNO ARCO	30
3.1.2.-CAUSAS DE FALLOS EN LOS TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO	30
3.1.3.- EFECTOS DE FALLOS EN LOS TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO	30

3.1.4.-NIVELES DE SOBRECARGA PERMISIBLES	31
3.1.- PROBLEMÁTICA TRANSFORMADOR 70 MVA	33
3.2.- AFECTACIONES A LA PRODUCCIÓN	34
3.3.- DISMINUCIÓN DE LA VIDA EN UN INTERRUPTOR POR APERTURAS CON CARGA	35

CAPÍTULO IV Sistema de protección del transformador del horno de arco.

4.- MEDICIONES RELEVANTES DEL TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO	36
4.1.- AJUSTES EN RELEVADOR DE PROTECCIÓN EN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO 70 MVA	38
4.2.- EFECTOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DE ARCO ELÉCTRICO	42

CAPÍTULO V Análisis de la protección diferencial del transformador del horno de arco.

5.- RECOLECCIÓN DE MEDICIONES EN RELEVADOR DE PROTECCIÓN	44
5.1.- ANÁLISIS DE CAUSA RAIZ	47
5.2.- DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR	49
5.3.- CURVA DE DAÑO DEL TRANSFORMADOR	50
5.4.- TABLA DE CÁLCULO DE CORRIENTES Y VOLTAJES	51
5.5.- PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR	52

Conclusiones.

Referencias.

1.- INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS HORNO DE ARCO

1.1.- GENERALIDADES

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

- la soldadura
- los hornos de fusión de metales
- los hornos de reducción de minerales

En los hornos de arco de fusión se coloca la carga en el interior de la cuba y se establece el arco entre los electrodos o entre los electrodos y la carga. Pueden disponerse un solo electrodo (hornos de corriente continua), dos electrodos dispuestos horizontalmente (calentamiento indirecto por radiación del arco al interior de la cuba) o tres electrodos (hornos de corriente alterna).

En la Figura 1.1 se representan esquemáticamente los tres tipos de hornos de arco:

- (a). - de arco radiante (calentamiento indirecto)
- (b). - de arco de fusión; en corriente alterna (b1) y en corriente continua (b2).
- (c). - de arco de reducción de minerales (calentamiento por resistencia)

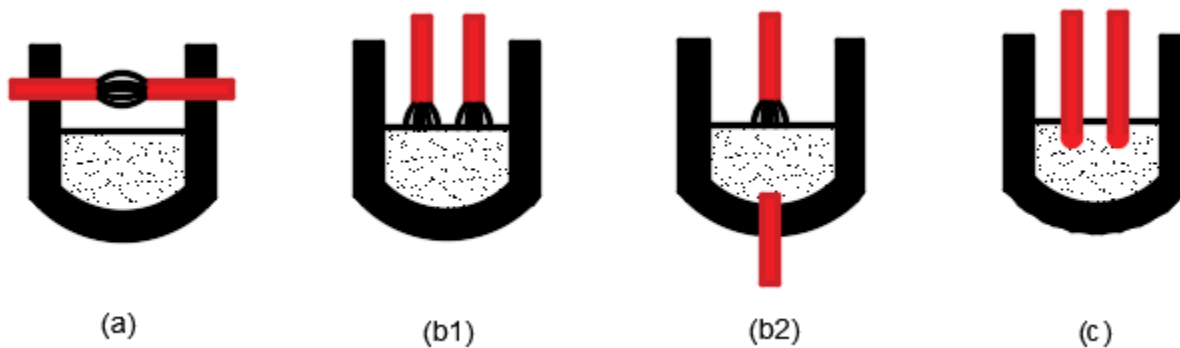


Figura 1.1.- Tipos de hornos de arco.

1.2.- HORNOS DE ARCO ELECTRICO PARA FUSIÓN DE ACERO.

En muchas ocasiones se denominan, simplemente, hornos de arco, sobreentendiendo su aplicación casi exclusiva a la fusión de chatarra de acero que engloba la posible utilización, total o parcial, de pre reducidos de mineral de hierro como carga. En todo caso disponen de tres electrodos de grafito, en corriente alterna, o un electrodo, en corriente continua, que se introducen siempre por la parte superior de la cuba [15].

En la Figura 1.2 se muestra el esquema completo de un horno de arco eléctrico con sus componentes básicos como son: el transformador, el sistema hidráulico, los electrodos de grafito, los brazos porta electrodos, los paneles y cables flexibles refrigerados.

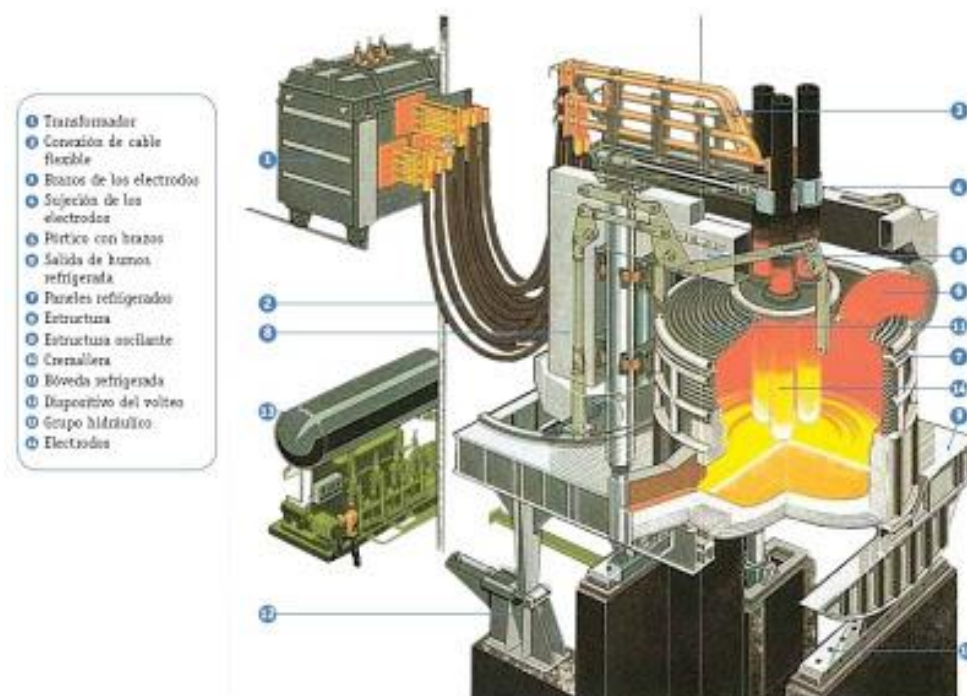


Figura 1.2 Disposición típica de horno de arco para fusión de acero [27].

1.2.- PRINCIPIOS BÁSICOS DE OPERACIÓN DEL HORNO DE ARCO.

1.2.1.- FUNCIONAMIENTO.

Los hornos de arco se basan en la transformación de la energía eléctrica en calor aplicado a la carga, lo que provoca la elevación de temperatura en la carga. La energía eléctrica procede de una red de corriente alterna en alta tensión y llega al horno, propiamente dicho, a través de un circuito eléctrico que consta básicamente de:

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

En los hornos de corriente alterna se disponen tres electrodos encima de la carga, que está puesta a tierra, y el arco conduce entre electrodos a través de la carga, es decir, cada electrodo hace alternativamente de cátodo y ánodo.

Por otra parte, el circuito eléctrico completo comprende resistencias, reactancias y condensadores que determinan los parámetros de funcionamiento de la instalación. Dichos parámetros son, entre otros:

- La tensión e intensidad de la corriente.
- Las potencias activas a la entrada y en el arco.
- Los factores de potencia en diversos puntos.

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

- Máxima producción, que procederá de la mayor potencia en el arco.
- Máximo rendimiento, es decir, mínimas pérdidas energéticas respecto a la potencia consumida, lo que determina normalmente un punto de funcionamiento a potencia en el arco algo inferior a la máxima.
- Mínimo coste de funcionamiento, lo que implica, no sólo el coste de la energía sino otros (consumo de electrodos y de refractario, carga, mano de obra, etc.) [7].

1.2.2.- CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Un horno de arco eléctrico consiste en una carcasa forrada de refractario que contiene la carga, generalmente chatarra. Tres grandes electrodos, generalmente de grafito, se mantienen en abrazaderas especiales en un estructura de soporte oscilante que se puede hacer a un lado para carga, y que permite que cada electrodo sea elevado o bajado según la salida del sistema de control. Después de que el horno se carga con chatarra, la operación comienza bajando los electrodos para iniciar los arcos eléctricos entre electrodos y la chatarra. El calor generado por los tres arcos eléctricos proporciona la energía requerida para derretir la chatarra [14].

Hay varias fases en la operación del horno de arco, cada una presenta un impacto diferente en el sistema de potencia en términos de flicker, es decir, el

- Período de penetración.
- Período de fusión.
- Periodo de refinación.

La Figura 1.3 muestra la potencia activa y reactiva medida, consumida durante la primera parte del ciclo de calor. En esta figura es posible distinguir la potencia activa y variaciones de potencia reactiva en los primeros minutos del proceso [1].

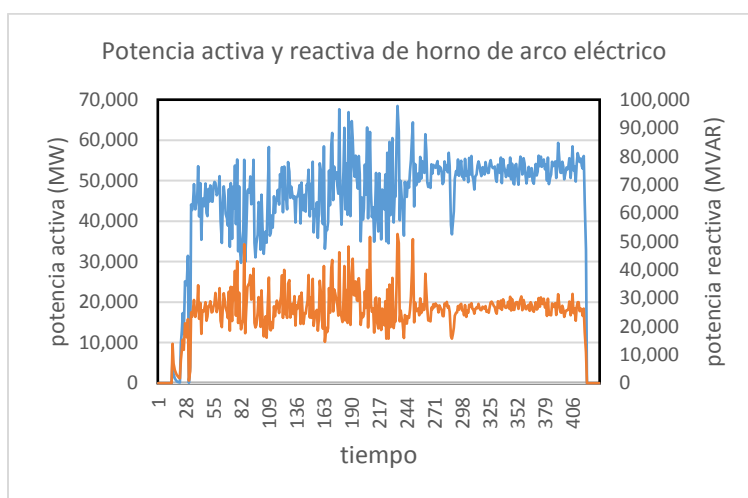


Figura 1.3 potencia activa y reactiva horno de arco eléctrico

En términos de generación de flicker en el sistema de potencia, las etapas críticas son durante los periodos de penetración y de fusión, que ocurren cada vez que se agrega una nueva cesta con chatarra. Estos periodos se caracterizan por fuertes variaciones estocásticas en la potencia reactiva absorbida por el horno de arco.

Período de penetración

Este período se caracteriza por fuertes variaciones de la potencia activa y reactiva causadas por variaciones estocásticas en la longitud del arco debido a la superficie irregular de la chatarra.

Los resultados de medición se muestran en la Figura 1.4, en donde se observan los valores medidos durante el proceso siguen a la curva calculada, y la Figura 1.5, nos da el comportamiento de las potencias medidas en la etapa de penetración.

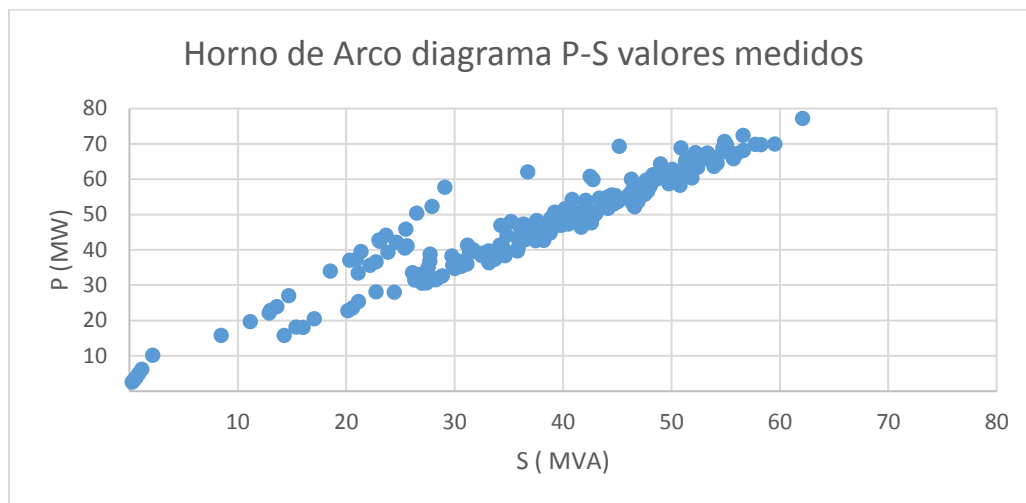
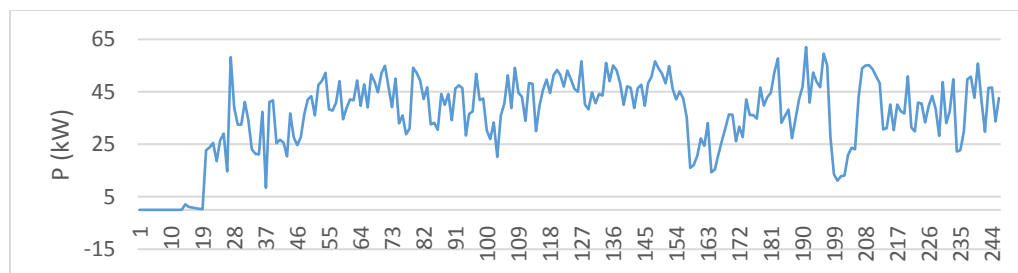


Figura 1.4 Curva P-S calculada y puntos medidos durante periodo de penetración.



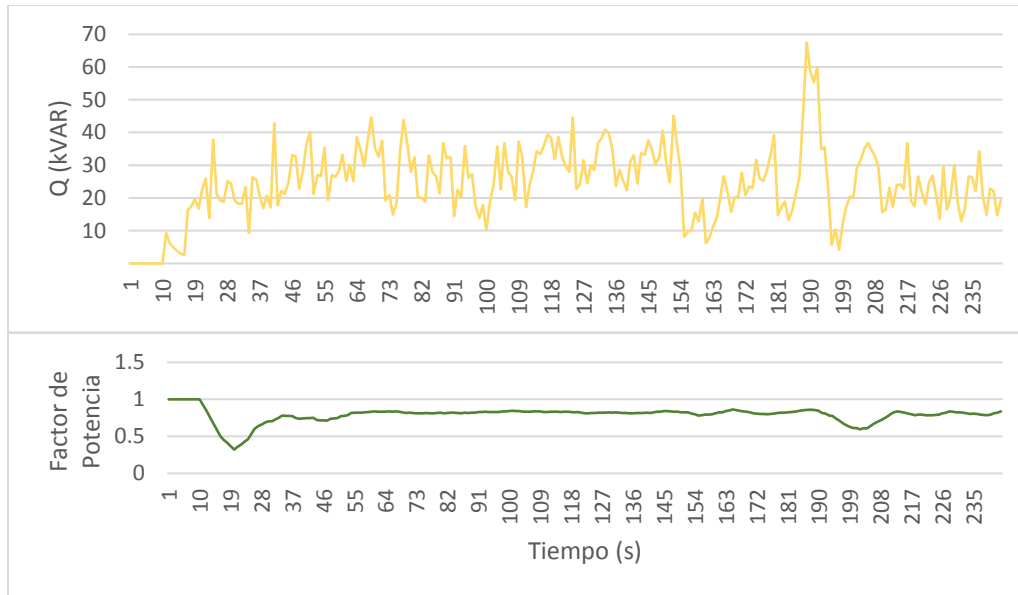


Figura 1.5 potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia medida durante periodo de penetración.

Período de fusión

Los resultados obtenidos de las mediciones tomadas en este período se muestran en la Figura 1.6 y la Figura 1.7.

En esta etapa de proceso la dispersión se reduce, ya que la chatarra ya se encuentra en su mayoría en estado líquido, lo que mejora la eficiencia de potencia del arco eléctrico.

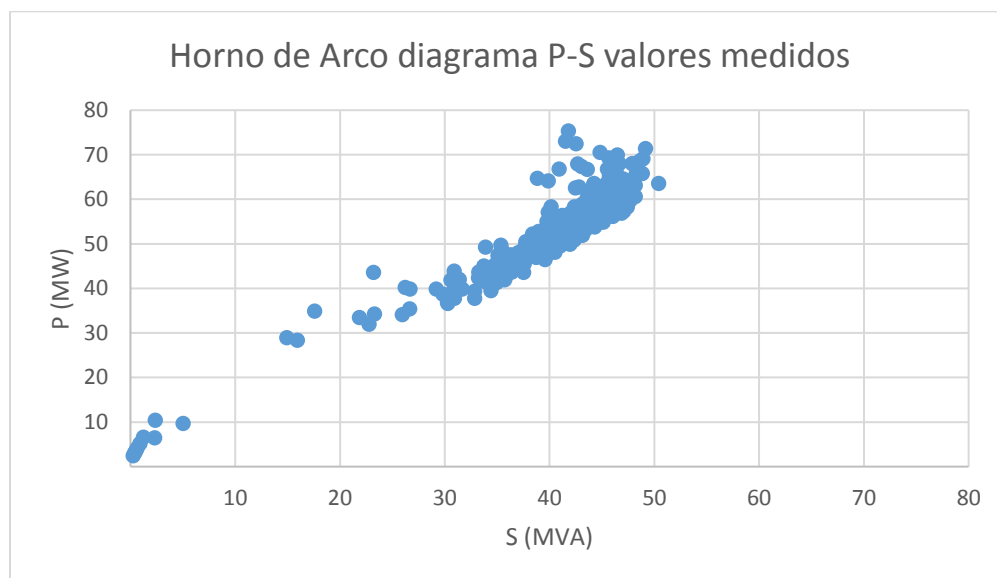


Figura 1.6 Curva P-S calculada y puntos medidos durante periodo de fusión

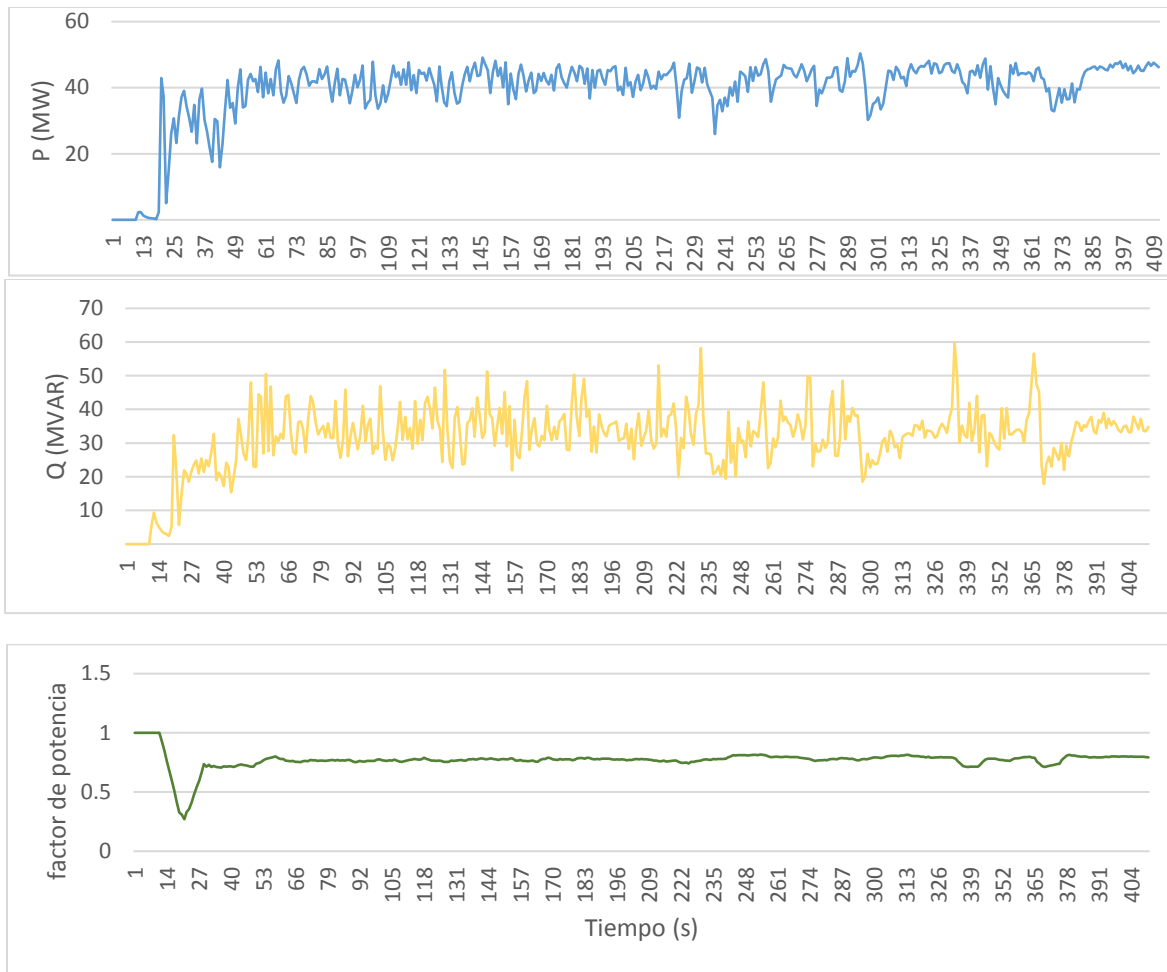


Figura 1.7 factor de potencia, potencia activa y reactiva medida durante periodo de fusión.

Periodo de refinación

Los resultados obtenidos de las mediciones tomadas en este período se muestran en la Figura 1.8 y la Figura 1.9.

En esta etapa de proceso el acero está líquido, lo que nos da un comportamiento más estable en los parámetros eléctricos, teniendo menor dispersión.

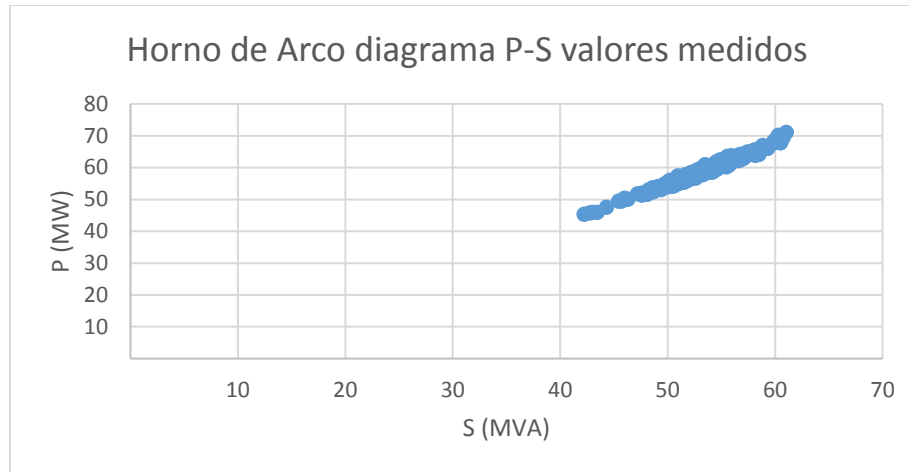


Figura 1.8 Curva P-S calculada y puntos medidos durante periodo de refinación.

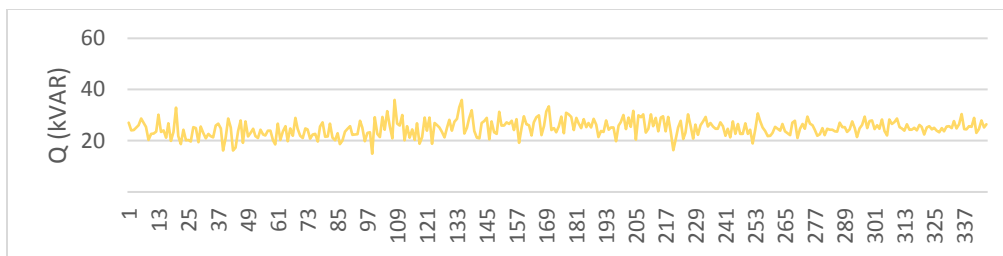
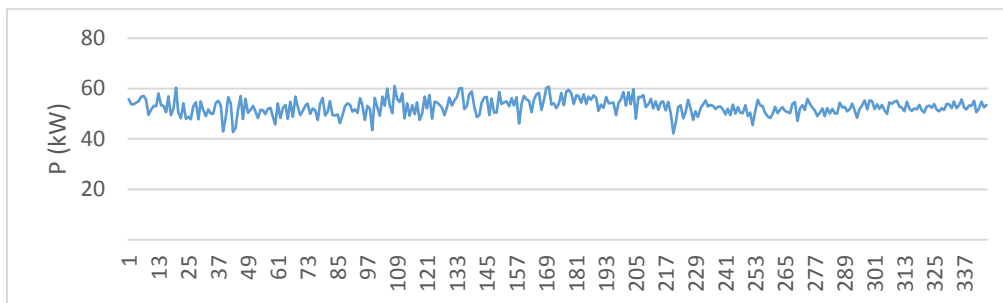


Figura 1.9 potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia medida durante periodo de refinación.

1.2.3.- CURVAS DE POTENCIA DEL HORNO DE ARCO

Las características que definen la operación del Horno de Arco Eléctrico son los parámetros eléctricos, es decir, la impedancia Z , la reactancia X y la resistencia R . Estos tres elementos constituyen la oposición de la corriente dada en Amperes (I) a través del circuito eléctrico del horno; lo que genera las Potencias (Aparente, Activa, Reactiva y pérdidas). Los conocimientos teóricos de estas potencias se deben representar en forma gráfica, para su mejor comprensión, de aquí, se deriva la necesidad de hacer referencia a las curvas de potencia del Horno de Arco Eléctrico [19].

El grupo de curvas de la Figura 1.10, muestra la relación de la corriente del arco, como variable independiente, con la potencia del arco (MW), potencia reactiva Q (MVAR), potencia aparente S (MVA), potencia activa P (MW), pérdidas eléctricas (i^2R) y longitud de arco (l_a).

Existen una familia de curvas con magnitudes específicas para cada voltaje del secundario, por ejemplo, en el caso de 6 taps, existirán 6 grupos de curvas suponiendo que el sistema es en delta y balanceado. En el caso de sistemas Coplanares, habrá 3 grupos de curvas para cada fase, totalizando 18 grupos de curvas para los 6 taps del secundario.

POTENCIA DEL ARCO (MW); Esta es la potencia que funde la carga. Cabe mencionar que esta potencia no es posible medirla directamente, sino en forma teórica, restando las pérdidas i^2R 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 HAE. La máxima potencia del arco coincide con un factor de potencia entre 0.78 y 0.82 medido éste en el primario del transformador del horno [17].

PÉRDIDAS DEL CIRCUITO (i^2R); Esta curva se muestra en la parte inferior de la figura 1.10. La mayor porción de estas pérdidas está presente en la columna de electrodos (la punta del electrodo es la zona de mayor resistencia) por lo tanto i^2R , que es teóricamente una pérdida se aprovecha como calor útil dentro del horno [17].

POTENCIA ACTIVA (MW); Esta curva indica que la potencia medida en el primario del transformador del horno al aumentar la corriente, la potencia se incrementa hasta que $MW=MVAR$, 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 UHP (Ultra Alta Potencia), es un requisito la operación con $MW>MVAR$, arco largo y escoria espumosa [17].

POTENCIA REACTIVA (MVAR); Esta curva muestra la potencia que se desarrolla en la reactancia de operación (X_{op}), que es la reactancia total del circuito, y aumenta en forma parabólica al aumentar la corriente del arco, La curva de MVAR intersecta en el punto máximo a la de MW (@-45 °), punto de máxima transferencia de energía eléctrica en el circuito, pero NO en el arco [17].

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 3 electrodos haciendo contacto directo en el acero líquido), es decir, corriente máxima, los MVA y MVAR están en valores máximos y los MW al mínimo, con un factor de potencia alrededor de 0.15 [17].

LONGITUD DE ARCO (l_a); 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 disminuyen 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 3 fases tengan la misma forma de punta, para tener al horno balanceado, potencias iguales por fase [17].

En la figura 1.10 se muestra la curva de potencia de arco eléctrico donde contienen amplia información gráfica sobre el fenómeno eléctrico del proceso de fusión por arco, se puede ver que tanto la potencia activa como la reactiva aumenta al incrementarse la corriente, también se observa, que el factor de potencia ($\cos \Phi$) disminuye al aumentar la corriente. El punto que representa la intersección de la curva de potencia activa (MVA) con la curva de potencia reactiva (MVAR), a partir del cual la potencia activa comienza a disminuir en tanto que la reactiva continua en aumento, representa el punto óptimo de corriente y máxima potencia. Contrariamente a lo que podría esperarse, este no necesariamente corresponde al punto de máxima producción del horno, los cuatro factores principales que influyen en la determinación del punto óptimo de operación en cada horno de arco eléctrico en particular son: el circuito eléctrico de potencia, la longitud de arco (L_a), el tipo de chatarra y la etapa de operación. La gráfica obtenida es el resultado del comportamiento del proceso de fundición en la etapa de refinación donde de los datos obtenidos indican la impedancia de operación y se proyectan todos los parámetros que muestran como está operando el transformador del horno [21].

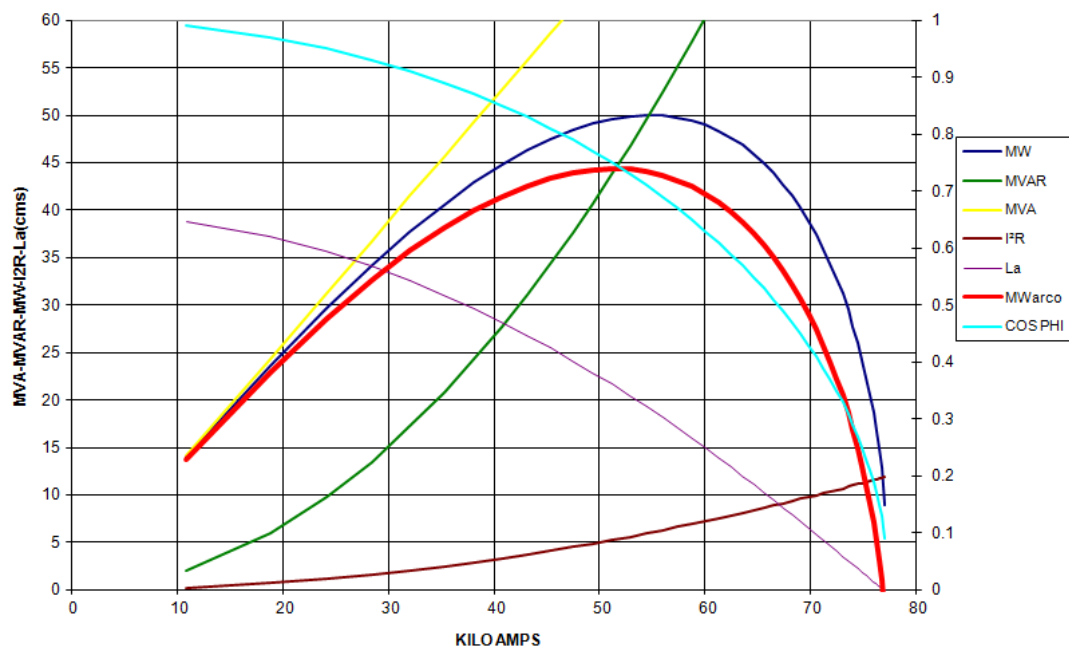
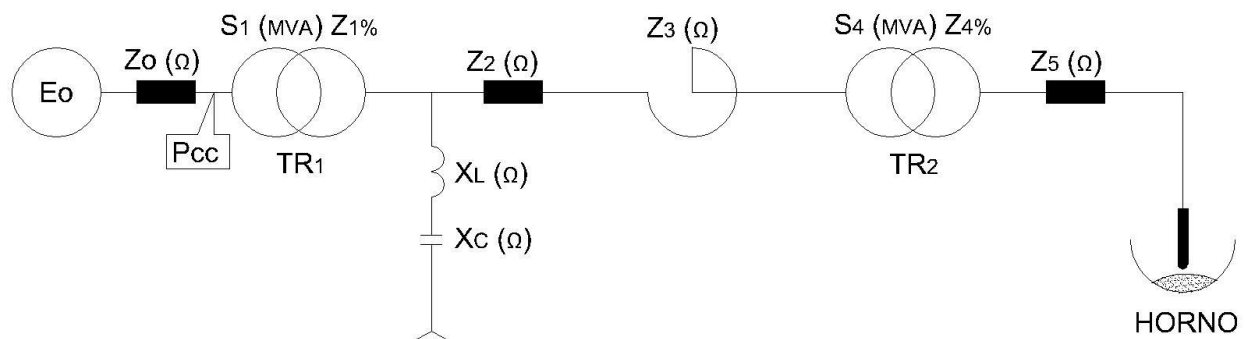


Figura 1.10 Gráfica de operación del transformador de horno [1].

CAPÍTULO II- SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO

2.- COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Los hornos eléctricos de arco operan en un régimen de carga muy variable, principalmente, en el inicio de fusión de una carga de chatarra. Es común, por lo tanto, que se tenga una alimentación directa exclusiva para uno o varios hornos de arco, desde un punto común de consumo (PCC) donde deberá existir una potencia de corto circuito suficiente para las potencias instaladas de manera tal que no se afecten otros consumidores. La Figura 2.1 representa una configuración unifilar típica de alimentación de un horno de arco eléctrico trifásico.



Z_o, E_o : Fuente de tensión e impedancia interna en PCC
 S_1, Z_1 : Potencia aparente e impedancia de corto circuito de transformador TR_1 .
 Z_2 : Impedancia de línea de transmisión.
 Z_3 : Impedancia de reactor
 S_4, Z_4 : potencia aparente e impedancia de corto circuito transformador TR_2 .
 Z_5 : Impedancia de conductores de secundario hasta electrodos.
 X_c : Reactancia de banco de capacitores de compensación.
 X_L : Reactancia inductiva de filtro de armónicos.

Figura 2.1 Diagrama unifilar de alimentación de un horno de arco eléctrico.

Los puntos comunes de consumo (PCC) con tensiones más elevadas, tienen potencia de corto circuito mayores. Es recomendable, por tanto, instalar al horno de arco en PCCs con tensiones iguales o mayores de 115 kV.

Las tensiones para alimentación de arco, en tanto, pueden llegar a valores de 1,200 volts, entre fases, teniendo valores que operan de 400 V a 1000 V.

Teóricamente es posible instalar, entre el PCC y buses de alimentación del arco, un único transformador, a fin de adaptar las tensiones del PCC a la tensión requerida de arco. Esto en tanto no sería una solución económica y segura para la instalación de los interruptores de horno, los reactores intermedios y los bancos de capacitores, con o sin filtros, ya que sería insegura su operación. El uso de tensiones intermedias para operar estos equipos es la solución normalmente usada. Las tensiones más usadas para este fin son; 13.8 kV y 34 kV . De esta forma, es necesario instalar 2 transformadores reductores entre el PCC y el horno de arco eléctrico. Para reducir desde tensiones de 230 kV a 13.8 kV y 34 kV.

En la Figura 2.1 se puede reconocer los siguientes componentes del sistema;

- E_o y Z_o : Fuente de tensión y su impedancia interna en el PCC
- S_1 y Z_1 : Potencia aparente e Impedancia de corto circuito del transformador (TR1).
- Z_2 : Impedancia de línea de transmisión entre la subestación principal y la subestación de alimentación del horno de Arco instalada junto a el mismo.
- Z_3 : Impedancia del reactor serie destinado a completar la reactancia total del sistema para una operación estable del horno.
- S_4 y Z_4 : Potencia aparente e Impedancia de Corto Circuito del transformador (TR2), reductor de Tensión de alimentación a Horno de Arco.
- Z_5 : Impedancia de todos los conductores que van desde el secundario del transformador de alimentación de Horno hasta el arco, incluyendo los electrodos.
- El arco del horno, que se representa como una resistencia eléctrica disipando energía.
- X_c : Reactancia Total del banco de capacitores para compensación de factor de potencia.
- X_L : Reactancia de la bobina que en serie con el banco de capacitores forma un filtro para armónicos de corriente.

2.1.1- TRANSFORMADOR DE SUBESTACION (TR1)

Este transformador puede tener conmutación de tensión con carga o solamente en vacío. Con la conmutación con carga la tensión secundaria es ajustada sin desenergizar el transformador, mientras que, con la conmutación en vacío, se debe desconectarlo para ajustar la tensión al valor deseado.

Cuando el horno es desconectado, o cuando los electrodos suben, interrumpiendo el arco y permaneciendo el banco de capacitores conectado, la tensión aumenta. El transformador de la subestación opera con carga, el conmutador automáticamente, restablecerá la tensión V_r anterior. Cuando el Horno vuelve a ser conectado, la tensión cae y nuevamente el conmutador restablece la tensión. Esto resulta en un gran número de conmutaciones para cada colada del horno.

Con la conmutación en vacío se ajusta la tensión secundaria en vacío para un valor 5% mayor del valor nominal y se deja que la tensión varíe con la carga.

Cuando la compensación de reactivos se hace a través de un compensador sincrónico o cuando se usan compensadores estáticos, la tensión en el secundario del transformador es más estable y el número de operaciones del conmutador con carga es mucho menor.

Normalmente este transformador tiene los bobinados conectados en estrella con neutro a tierra en el primario y en el secundario, teniendo un bobinado terciario en delta, para la compensación de las corrientes homopolares. También puede ocurrir la conexión delta en el primario y estrella con neutro a tierra en el secundario o aun, la conexión a estrella con el neutro aterrizado en el primario y delta en el secundario. En los casos en que el primario o el secundario ya estén conectados en delta no existe la necesidad de un terciario para compensación de las corrientes de secuencia cero [11].

2.1.2- TRANSFORMADOR DE HORNO (TR2)

Este transformador también puede tener conmutación con carga o en vacío. Las tensiones secundarias normalmente varían con pasos de 20 V a 40 V, para ajustarse a las necesidades del proceso en las diferentes etapas. Si la tensión máxima en vacío del secundario corresponde al 100% la tensión mínima deberá ser de, aproximadamente, 60%. El transformador debe ser capaz de operar con la potencia nominal. A fin de no perder tiempos de operación es muy deseable que las conmutaciones de tensión se realicen con carga, esto es, sin desenergizar el transformador.

Los bobinados secundarios deben estar conectados en delta. Estas conexiones pueden ser hechas de modo que el cerramiento quede en el interior o en el exterior del tanque del transformador. El primario puede ser conectado en triángulo o estrella, sin embargo, con el neutro aislado si el transformador de la subestación principal tiene un secundario en estrella con el neutro a tierra. La Figura 2.2 ilustra las conexiones de un transformador de horno de arco, teniendo el primario y el secundario conectados en delta. Nótese que el baño con líquido fundido constituye el neutro flotante del sistema. Si los tres arcos entre los electrodos y el baño líquido estuviesen equilibrados, el potencial del baño estará equidistante de los potenciales de las tres fases [11].

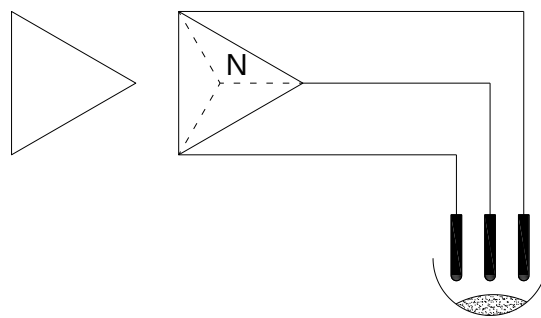


Figura.2.2- Conexiones del transformador de horno eléctrico.

Este transformador debe ser instalado lo más próximo posible del horno con el fin de disminuir la longitud de los conductores que conectan el secundario al arco y que son principales responsables por las pérdidas de todo el circuito.

El transformador del horno puede tener la conmutación de sobrecarga del lado primario, conforme se observa en la Figura 2.3, o puede tener la conmutación con carga en el secundario, con transformador elevador (booster), como se observa en la Figura 2.4

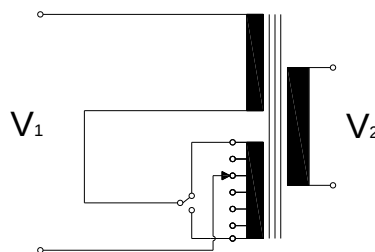


Figura 2.3 – Transformador de Horno con conmutación en el primario.

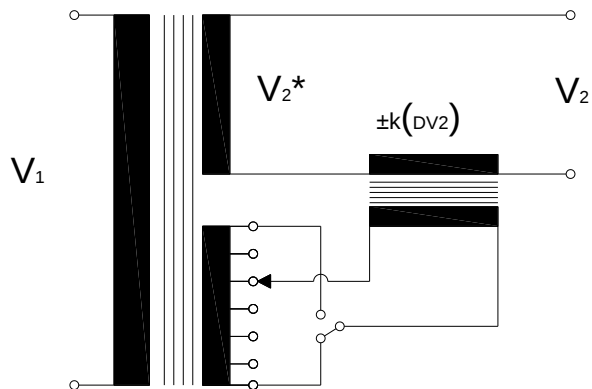


Figura 2.4 – Transformador de horno con conmutación en el secundario, tipo elevador.

En el caso de la Figura 2.3 la tensión secundaria se varía aumentando o disminuyendo el número de espiras activas del primario. Si el número de espiras activas del primario disminuye, aumenta la tensión secundaria y viceversa. Los pasos del conmutador en el primario, en número de espiras, son iguales, como imposición del proyecto. Multiplicando una tensión constante aplicada al primario por la relación de transformación N_2/N_1 , en que N_1 varía con saltos iguales, se obtiene una tensión en el secundario variando con pasos desiguales. A medida que se pasa de mayor tensión secundaria para una menor, los pasos en voltaje van disminuyendo.

Para la Figura 2.4, los saltos de tensión secundaria son constantes porque la inducción en el núcleo permanece constante y la tensión en la salida se ajusta variando el número de espiras del secundario. Con esto, se consigue cubrir una cierta variación total de la tensión secundaria con un número menor de conmutaciones. Operacionalmente el esquema de la figura es mejor, sin embargo, el costo del transformador es mayor.

2.1.3.- REACTOR

El reactor con impedancia Z_3 se instala en serie para ajustar la reactancia del sistema a las necesidades de estabilización de arco. El reactor posee un cierto número de derivaciones de modo que el ajuste se hace por pasos de reactancia a través del uso de un conmutador de derivaciones que se controla a distancia desde la cabina de operación del horno. Si una necesidad de ajuste es muy frecuente, es conveniente el uso de un conmutador con carga.

Una caída de tensión en el reactor deberá ser lineal en función de la intensidad de corriente. Es normal especificar que la linealidad se debe mantener como mínimo, hasta 2 veces la corriente nominal del transformador de horno. Los reactores con núcleo de hierro son más compactos, tienen menos pérdidas y se instala junto al transformador de horno. Los reactores con núcleo de aire son más voluminosos y requieren un espacio grande para su instalación. Normalmente se instalan a la intemperie, en la subestación principal. Los reactores con núcleo de aire son más lineales, tienen pérdidas mayores y son viables donde la conmutación se realiza con línea desenergizada [11].

2.1.4.- IMPEDANCIA DEL HORNO

Minimizar las pérdidas es un punto muy importante en el diseño. De un modo general las pérdidas eléctricas se verifican en los buses del secundario, cables enfriados, brazos de electrodos y en los electrodos del horno. El valor de la reactancia, entre el secundario del transformador hasta la punta de los electrodos, es de 2 a 3 m Ω en 50 Hz y 20% mayor en 60 Hz. El valor de resistencia es de 0.5 a 1.0 m Ω , un valor que cae dentro del orden de magnitud de las resistencias de contacto. Por eso se debe prestar atención, en los contactos entre buses, los cables enfriados, brazos porta electrodos y electrodos [23].

2.1.5.- EL ARCO

Para comprender la operación de un horno de arco es necesario entender la naturaleza del arco. El arco es una descarga eléctrica que ocurre en una mezcla de gases y vapores metálicos, en forma de plasma, que hace una atmósfera del horno y forma una columna plásmica de gran intensidad luminosa entre dos puntos calientes, uno en la extremidad del electrodo y otro en la superficie de incidencia del arco en el metal fundido o en fusión. El ánodo corresponde al polo positivo (+) y el cátodo al polo negativo (-). En el horno eléctrico el arco de los polos corresponde a los electrodos de grafito y la carga metálica a ser fundida o ya en estado líquido. En corriente alterna los polos, positivo y negativo, cambian de posición a cada medio ciclo de tensión de la red.

La temperatura de la columna plásmica llegará a valores superiores a 10,000 °K y la concentración de energía es tal que corresponde cerca de 30 kW/cm³. Las concentraciones de energía en los puntos calientes del ánodo y cátodo, son aún mayores, porque, a una distancia de solamente un micrón de la superficie la caída de tensión es de cerca de 10 V en el cátodo y 30 V en el ánodo. Esto corresponde a los gradientes de campo eléctrico del orden de 100 a 300 kV/cm en estos puntos. Estos gradientes producen

una fuerte emisión de electrones que ionizan la atmósfera del horno resultando así el arco. No existen posibilidades prácticas de medir estas caídas de tensión en los puntos calientes, mas cálculos teóricos permiten dimensionarlas y definir las como independientes de las corrientes de arco.

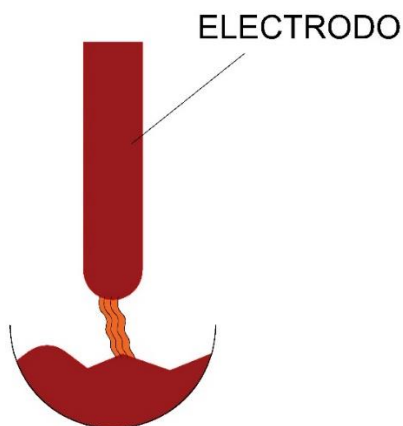


Figura 2.5 – Características del arco

A lo largo de la columna plásmica del arco, con excepción de los puntos calientes, la distribución de energía o gradiente de potencial es, prácticamente, constante y del orden de 10 a 12 V/cm, también es independiente de la intensidad de corriente eléctrica. Así, se puede establecer la expresión (1.1) para la caída de tensión en el arco, seleccionar un valor entre (1012), y la expresión (1.2) para la longitud de arco. La Figura 2.5 sintetiza estas características del arco, en hornos de arco eléctrico de C.A.

$$V_{arc} = 40 + (10 \dots 12)L_{arc} \quad (1.1)$$

$$L_{arc} = \frac{V_{arc} - 40}{10 \dots 12} \quad cm \quad (1.2)$$

En los hornos de corriente alterna el arco se extingue cuando la corriente se anula y reenciende, cuando la tensión vuelve a aumentar. Esto ocurre en cada medio ciclo. El arco reenciende porque todo el espacio entre los polos permanece ionizado durante la inversión de polaridad.

Para iniciar la operación del horno se deben acercar los electrodos de grafito en la carga metálica, lo que corresponde a realizar un corto en el sistema. En estas condiciones la corriente eléctrica alcanza su valor

máximo operacional, cuando los electrodos se alejan de la carga, se establecen los arcos en las 3 fases. Alejando los electrodos la tensión de arco aumenta, la corriente disminuye, y viceversa, lo que indica que la resistencia del arco opera como una resistencia negativa.

Como una caída de tensión en el arco es proporcional a la distancia entre ánodo y cátodo, la forma de onda de esta tensión se aproxima al de una onda cuadrada o rectangular. Por tanto, la tensión en vacío en el secundario del transformador de horno, con forma de onda senoidal, se transforma, en el arco; en una onda que asemeja la forma rectangular. Los armónicos de tensión y de corriente generados por el arco son los responsables por esta transformación. El arco se presenta, porque, como es una carga no lineal. Resumiendo, se puede decir que el arco se comporta como una resistencia negativa y genera armónicos de tensión y corriente [11].

2.1.6.-BANCO DE CAPACITORES Y FILTROS

En la Figura 2.1 el capacitor y la bobina son un filtro que tienen la finalidad de proporcionar en el PCC, una calidad de la energía dentro de patrones internacionales que definen:

- Los límites de factor de potencia
- Los límites de armónicos de tensión y corriente
- Los límites de las fluctuaciones de tensión que producen centelleos en las lámparas.

Como fue dicho anteriormente, el horno de arco opera en régimen de carga muy variable produciendo fluctuaciones de tensión y armónicos [11].

Para los casos simples (Figura 2.1) en que se tiene un banco de capacitores en serie con una bobina sintonizada en un determinado armónico, la reactancia capacitiva efectiva, en la frecuencia fundamental, para corregir el factor de potencia, se obtiene por la expresión (1.1). En esta expresión, Q_{cc} es la potencia reactiva necesaria para la compensación y V_c es la tensión aplicada en el filtro (Bobina más banco de capacitores). Se pueden tener diversos filtros en paralelo sintonizados en diversas frecuencias de armónicas. Los dispositivos pueden ser sustituidos, para la frecuencia fundamental, por una reactancia equivalente, dada la expresión (1.3).

$$X_{cc} = \frac{V_c^2}{Q_{cc}} \quad (1.3)$$

2.1.-ESPECIFICACIONES DE UN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Para especificar un transformador de Horno de Arco Eléctrico , debe considerarse que tiene características muy diferentes a un transformador convencional de distribución, los puntos importantes a tener en cuenta son los siguientes:[]

- Potencia Nominal (MVA) a 55°C de incremento de temperatura ambiente.
- Capacidad de MW para los MVA de placa (Especificando el punto de medición de MW).
- Temperatura del agua del Sistema de Enfriamiento.
- Ciclo de carga (En operación).
- Voltaje nominal del primario.
- Potencia de corto circuito de la red de alimentación (35 veces la potencia aparente de la placa).
- Accesorios, como: transformadores de corriente de primario y secundario, relevador de presión. súbita, indicador de temperatura de “punto caliente” del devanado, apartarrayos y capacitores de supresión, intercambiador de calor con detector de fugas, diagramas esquemáticos, certificados de prueba, etc.
- Impedancia de corto circuito del transformador (Z%).
- Voltajes nominales del secundario (definido el número de taps).
- Tipo de cambiador de taps (bajo carga).
- Construido y diseñado de acuerdo a normas ANSI Y NEMA.

2.2.- PLACA DE DATOS TRANSFORMADOR 70 MVA

En la Figura 2.6 se indican los datos del transformador de horno, es importante analizar los límites de Potencia y corrientes para no operar arriba de su capacidad y evitar un daño mayor, en la placa de datos se indican los puntos de potencia por tap donde se encuentran las tensiones y corrientes a las que opera el transformador en ese punto.

TAMINI ENERGY TRANSFORMERS	
Numero de Serie	12HN142/1
Año de Fabricación	2013
Sistema de refrigeración	OFWF
Frecuencia nominal	60 Hz
Potencia nominal	70,000 - 52803 kVA
Tensión nominal MT	13,800 V
Intensidad nominal MT	2,929 - 2,209 A
Tensión nominal BT	1,004 - 804 - 604 V
Intensidad nominal BT	40,250 - 50,500 A
Nivel de aislamiento	MT Um 17.5 - U95 - AC 38 kV BT Um 3.6 - AC 10 kV
Grupo de conexión	D d (abierto)
Tensión de cortocircuito	6.96 %
relación : 13,800/1,004 V - 70,000 kVA - 75°C	
Capacidad de refrigeración	2 x 75 %
Caudal de agua de refrigeración	2 x 45 m3/h
Temperatura max. Entrada agua	35 °C
Condición nominal de funcionamiento:	
Max. Aumento de temperatura de aceite	50 K
Aumento temperatura bobinados	55 K
Masa Total estimada	85,000 kg
Masa estimada a desencubar	54,000 kg
Masa aceite estimada	21,000 kg
Min. Altura gancho grúa	8 m
Cuba resiste vacío	0.4 kPa

OLTC			Lado MT		Lado BT	
			Tensión	Corriente	Tensión	Corriente
Pos	Conexión	Potencia (kVA)	(V)	(A)	(V)	(A)
1	4	52,803	13,800	2,209	604	50,500
2	5	54,554		2,282	624	
3	6	56,306		2,356	644	
4	7	58,057		2,429	664	
5	8	59,808		2,502	684	
6	9	61,559		2,575	704	
7	10	63,310		2,649	724	
8	11	65,061		2,722	744	
9	12	66,812		2,795	764	
10	13	68,563		2,869	784	
11a	14	70,000	13,800	2,929	804	50,274
11b	3				824	49,052
11c	4				844	47,889
12	5				864	46,779
13	6				884	45,720
14	7				904	44,707
15	8				924	43,738
16	9				944	42,811
17	10				964	41,922
18	11				984	41,069
19	12				1004	40,250
20	13					
21	14					

Figura 2.6 Placa de Datos Transformador del Horno 70 MVA

Además de la información habitual, cada fabricante de transformadores debe proporcionar al menos los siguientes datos del transformador:

- Pérdidas de carga y corriente de carga en diferentes tomas (voltaje mínimo, voltaje nominal, máximo voltaje)
- Pérdidas de carga e impedancias de cortocircuito en diferentes tomas (tensión mínima, tensión nominal, Voltaje máximo, cada uno referido a la potencia relativa del tap)
- Capacitancia parásita por fase equivalente a tierra
- En los casos que involucren un reactor en serie, la siguiente información adicional para el reactor:
 - Impedancia en ohmios / fase en diferentes tomas
 - Capacitancia parásita por fase equivalente a tierra [7].

2.3.- DIAGRAMA UNIFILAR

En la Figura 2.7 se representa el diagrama unifilar se indican las dimensiones de los componentes principales del sistema eléctrico del horno de arco eléctrico y muestra el circuito desde la acometida de la compañía suministradora hasta alimentación a un horno de arco eléctrico, se indican los componentes que intervienen en el circuito eléctrico; Interruptores, seccionadores, filtros de armónicos, se indican además los esquemas internos de los tableros de alta y media tensión, así como sus nomenclaturas como están identificados. En el diagrama unifilar, también se indican los componentes de las protecciones como son transformadores de corrientes, transformadores de potencial y apartarrayos.

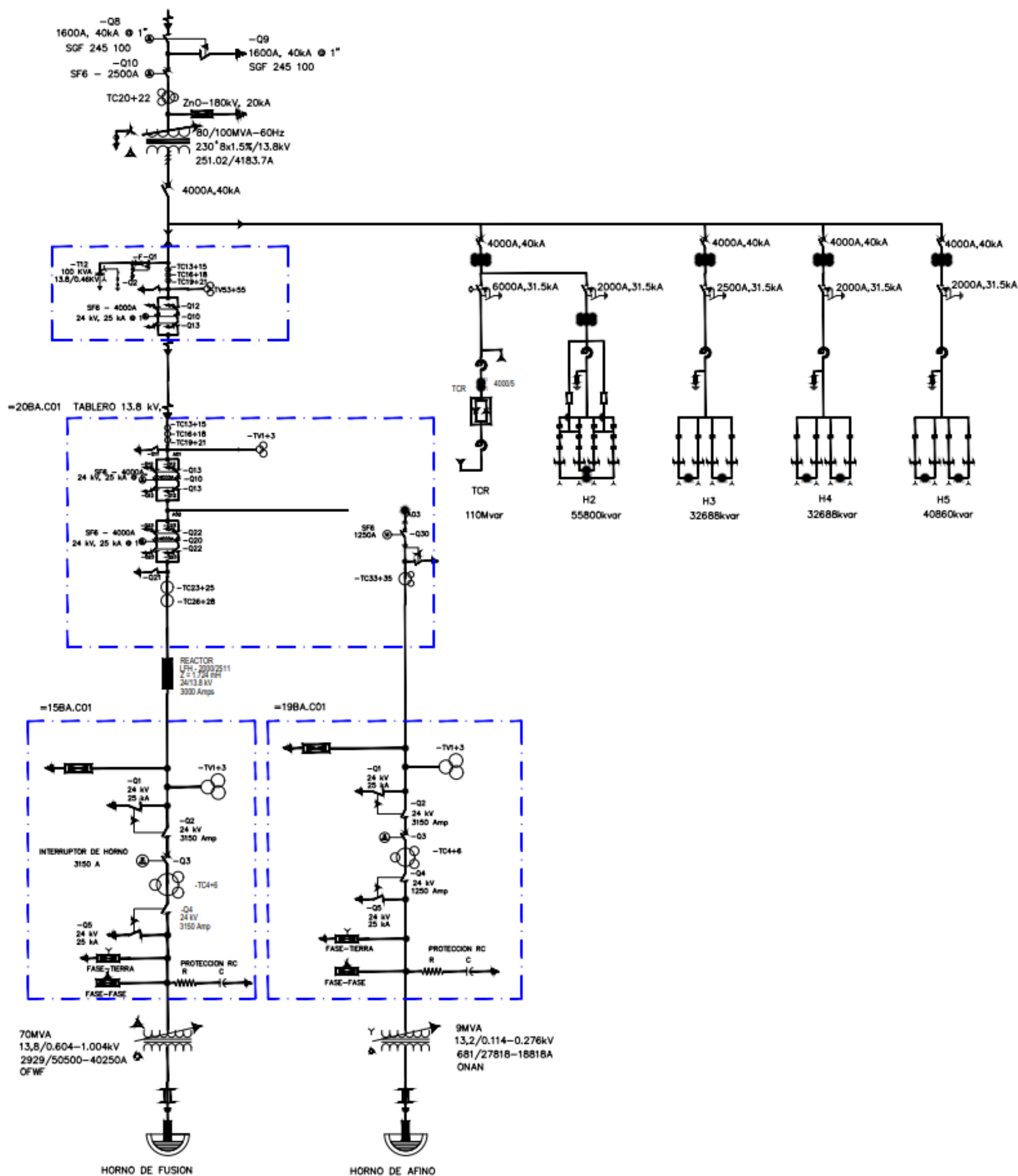


Figura 2.7 diagrama unifilar circuito hornos de arco

CAPÍTULO III PROBLEMÁTICA DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO DE ARCO.

3.- FALLOS EN UN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO

3.1.1.- SOBRECARGA EN TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO

La sobrecarga es la condición de flujo excesivo en un transformador de potencia. La sobrecarga se presenta cuando se exceden las siguientes normas (USA estándar C57.12.00 sección 2.4)

Un transformador debe ser capaz de:

- Operar a 105 % del voltaje secundario nominal a su potencia con factor de Potencia igual o mayor a 0.8.
- Operar a 110 % del voltaje secundario nominal, sin carga.

3.1.2.-CAUSAS DE FALLOS EN LOS TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO

- Bajo condiciones normales el sistema debe ser capaz de permitir los límites establecidos por las normas
- Durante el arranque y parada de generadores, la sobrecarga puede ser causada por el efecto de reducción de la frecuencia (Hz), si no se reduce el voltaje de manera proporcional
- Condiciones de operación de emergencia, específicamente durante y después de un disturbio importante de potencia, que produzcan desbalance entre la generación y la carga puede ocasionar una operación de baja frecuencia y/o sobre voltaje [9].

3.1.3.- EFECTOS DE FALLOS EN LO TRANSFORMADORES DE HORNO DE ARCO.

El efecto principal de la sobrecarga en los transformadores de potencia es la degradación térmica del aislamiento debido a la generación de corrientes parásitas, seguido por la ruptura del aislamiento debido al sobrevoltaje. Los niveles de sobrecarga superiores a lo establecido por las normas, causa saturación en el núcleo del transformador. El efecto de las corrientes de Eddy debido a la sobrecarga, produce calentamientos y pérdidas i^2R en los devanados conductores, terminales y partes estructurales. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocasionar daños irreversibles en los materiales aislantes del transformador [5].

Una sobrecarga severa puede causar que un transformador sufra un daño en corto tiempo; sin embargo, pueden ocurrir “pequeñas” sobrecargas sin que el operador del horno se percate de su existencia o consecuencias. Ya que la degradación térmica resultante de sobrecargas continuas es acumulativa, el transformador puede soportar repetidas sobrecargas moderadas, antes de que ocurra la falla eléctrica. Esta falla puede ser causada por una sobrecarga de consideración que se tuvo en meses anteriores seguido por una operación de servicio normal.

3.1.4.-NIVELES DE SOBRECARGA PERMISIBLES

Con base en periodos reducidos, existe una determinada capacidad de sobrecarga establecida por las normas; debido a que los componentes bajo los efectos del calentamiento resultante tienen constantes de tiempo térmicas finitas. Ya que el daño en el transformador es una función de la magnitud y duración de la sobrecarga, la compañía General Electric desarrolló la gráfica de la Figura 3.1 como una guía general para periodos cortos de sobrecarga permisibles.

El porcentaje de sobrecarga se define como la relación de voltaje nominal entre la frecuencia (V/H) aplicado al devanado primario bajo cualquier carga.

El valor de sobrecarga para periodos cortos depende del diseño de cada transformador, por lo tanto, cualquier guía general como la mostrada en la figura, es conservadora.

La operación debajo de la curva de la Figura 3.1, no causará pérdida significativa en la duración del aislamiento del transformador.

Por ejemplo, con referencia a la Figura 3.1 un transformador podría ser operado a 120% de sobrecarga (1.2 veces los V/H nominales) por un periodo de 1 minuto sin daños perceptibles. Entonces, si la sobrecarga se reduce a un nivel dentro de los límites de estado estacionario (especificado por las normas) por un periodo de varias horas, la temperatura de los componentes “calentados” podrían regresar a valores normales; permitiendo de esta forma que se tengan periodos cortos de sobrecarga, sin daños cuantificables en el aislamiento del transformador. Es de esperarse que, en situaciones de emergencia, un numero razonable de sobre cargas consecutivas (dentro de límites) no afectaría la vida del transformador.

Por otra parte, la operación arriba de la curva de la Figura 3.1, tal como 120% de sobre carga en un periodo de 2 minutos, podría causar un daño permanente al transformador. Este daño es acumulativo para ocurrencias repetitivas y podría contribuir eventualmente a una falla eléctrica.

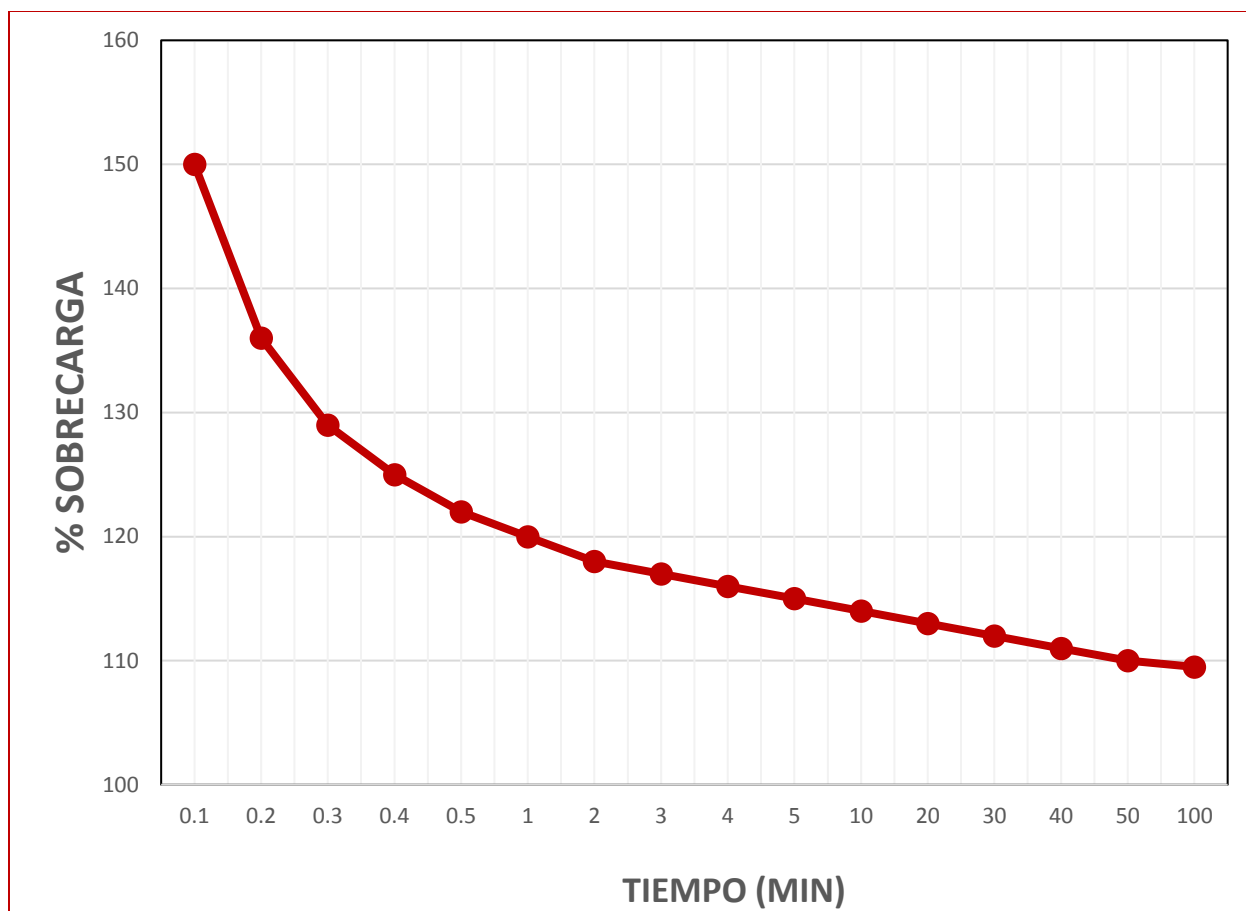


Figura 3.1 Gráfica Límites de Operación Transformadores [18].

3.1.- PROBLEMÁTICA PRESENTADAS EN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO DE 70 MVA

Durante las diferentes etapas de la operación del transformador de horno de arco eléctrico se aplica energía eléctrica para la fusión de la chatarra. Se observa en la gráfica de la Figura 3.2 la corriente a la que está fundiendo el transformador de arco eléctrico, en el segundo recargue hay una baja de corriente a cero que en cuando se presenta un disparo en el relevador de protección , es reestablecido y vuelve a conectar el transformador continuando con el proceso hasta fundir la chatarra, se observa que los taps (línea azul) del transformador van aumentando o disminuyendo, dependiendo del perfil seleccionado por el sistema. Los disparos por sobrecarga se presentan en varias ocasiones por día, variando en las diferentes etapas del proceso y a distintos taps del transformador. Existen algunos factores como son el tipo de chatarra cuyo material es variable y no se puede garantizar un control en la materia prima [2].

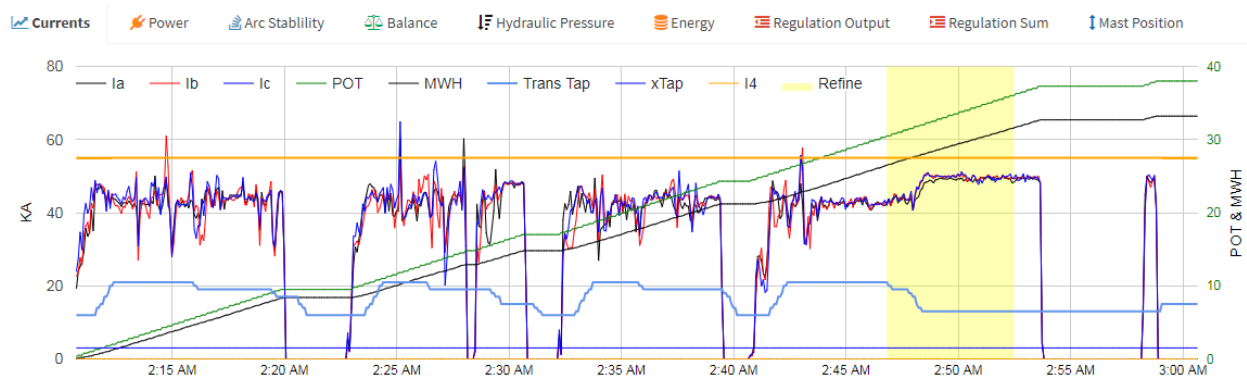


Figura 3.2 Gráfica de colada completa 4 recargas.

3.2.- AFECTACIONES A LA PRODUCCIÓN

El acumulamiento de intervenciones por disparos en el transformador es registrado por la parte operativa, donde mensualmente se lleva un registro de los tiempos y frecuencias con los que se presentan, disminuyendo los tiempos de operación y bajando la producción programada que se debe obtener. En la Figura 3.3 se muestra un reporte de demoras en el área eléctrica presentado a la dirección, en donde se presentan las intervenciones de los meses de diciembre de 2017 a mayo de 2018, indicándose mediante la leyenda “SE BOTA INTERRUPTOR”, las veces que se presentaron disparos por sobre corriente. Estas intervenciones finalmente repercuten en un costo en el producto final, y pérdida de producción. Así mismo implica un análisis del problema, y el desarrollo de una propuesta para mejorar [22].

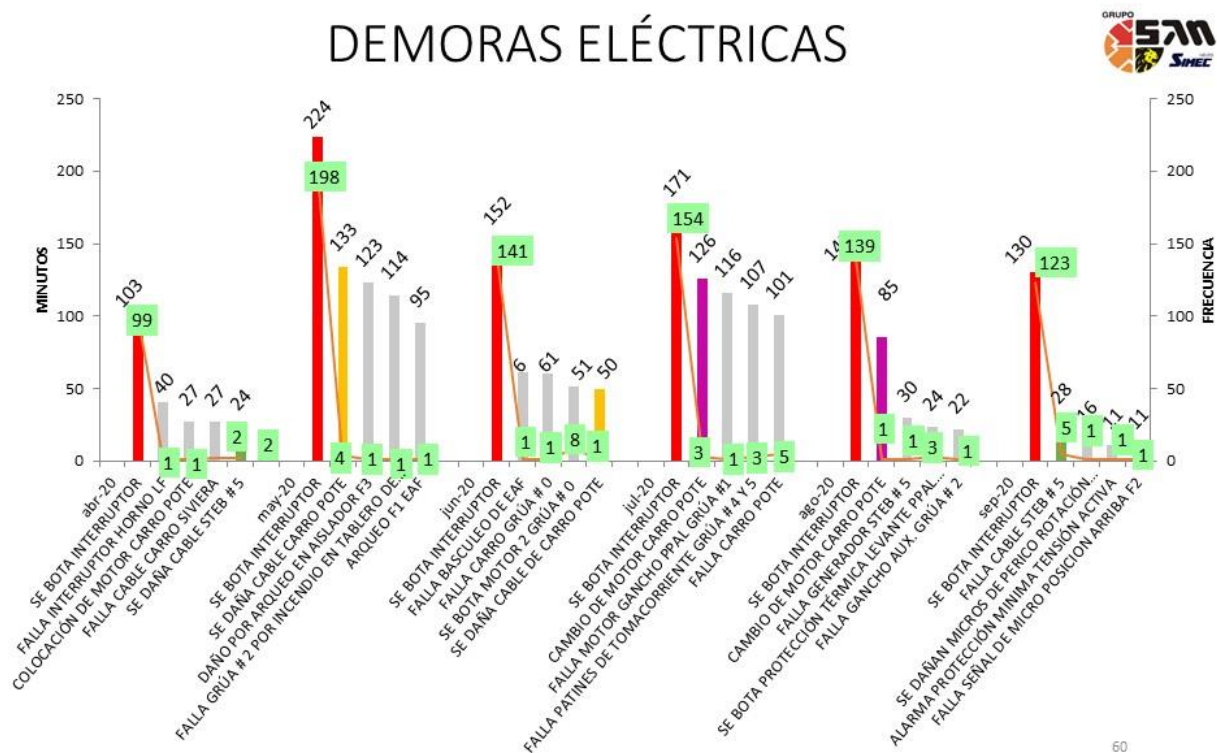


Figura 3.3 Demoras Eléctricas Área de Acería

3.3.- DISMINUCIÓN DE LA VIDA EN UN INTERRUPTOR POR APERTURAS CON CARGA

El número de ciclos de maniobra está representado en función de la corriente de corte (valor efectivo). La operación de ciclos se disminuye si abre con corrientes mayores, al estar en operación y con carga la apertura por disparos en falso afecta en la vida de un interruptor de potencia en vacío como se indica en la curva de vida de operación de un interruptor de vacío de la Figura 3.4 [22].

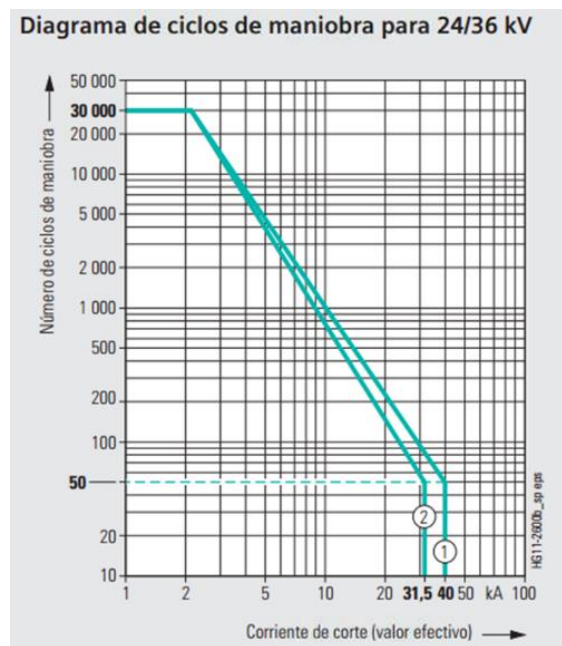


Figura 3.4 Curvas de vida en ciclos de operación del interruptor del horno de arco [22].

CAPÍTULO IV. SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO DE ARCO.

4.- MEDICIONES RELEVANTES DEL TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO

Se han realizado diferentes mediciones en el lado primario del transformador del horno para tener datos de los valores de corrientes y voltajes que se presentan durante el proceso de fusión. Con ello se utilizó un equipo METREL 2892 [10]. En la Figura 4.1 se presentan los datos obtenidos de corrientes de lado primario durante una etapa del proceso en el momento de presentarse un disparo en el relevador. En la Figura 4.2 se grafica la onda de corriente instantes antes de presentarse el disparo en el relevador generados por el transformador de horno. En la Figura 4.3 se indica el espectro de armónicos en el mismo instante de disparo del relé [24].



Figura 4.1 Corrientes Lado Primario Transformador horno de fusión.

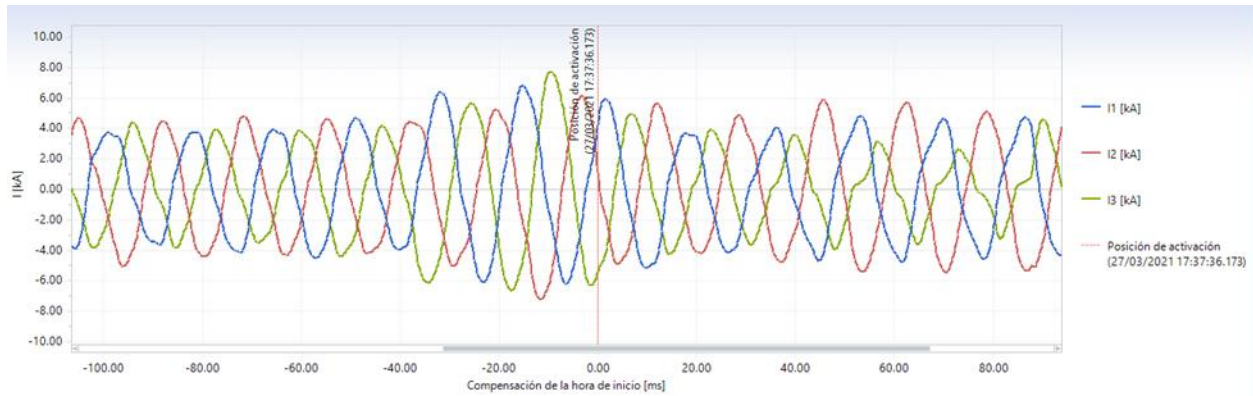


Figura 4.2 Mediciones de formas de onda en transformador de horno de fusión.

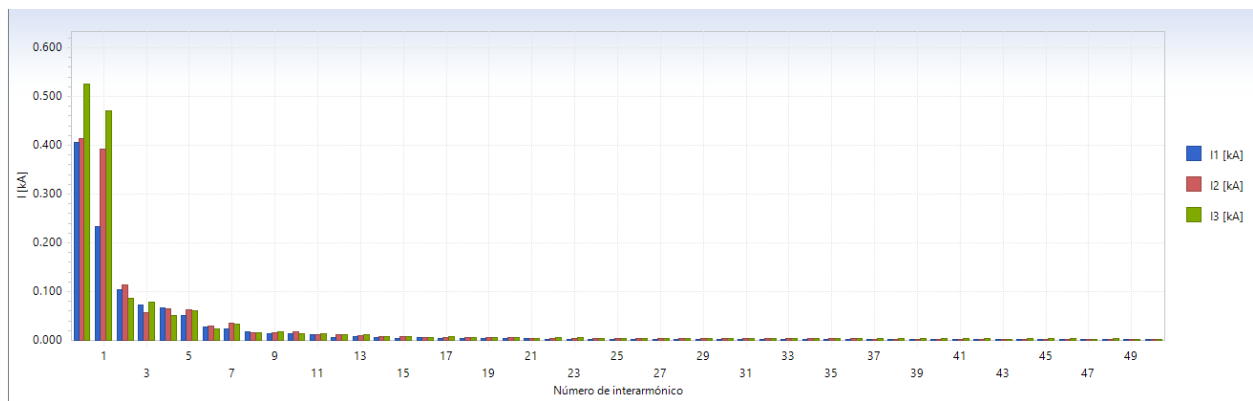


Figura 4.3 Mediciones de armónicos en transformador de horno de fusión.

4.1.- AJUSTES EN RELEVADOR DE PROTECCIÓN EN TRANSFORMADOR DE HORNO DE ARCO DE 70 MVA

El análisis de corto circuito se tomó como partida para el estudio de coordinación de protecciones. Este estudio se basó en la memoria de cálculo de corto circuito, además de las características nominales de todos los equipos y dispositivos seleccionados en la red. La metodología para el estudio de coordinación de protecciones de sobre corriente consiste en determinar los puntos de operación de las curvas de los dispositivos de protección y conjuntamente con las curvas características tiempo-corriente de los elementos serie del sistema, los cuales se expresan en ejes logarítmicos, para dar como resultado la gráfica final de coordinación.

El dispositivo de protección próximo a una carga específica debe operar rápidamente, de acuerdo a los tiempos establecidos, operando con cierto retraso de tiempo la siguiente protección que está hacia la fuente [26].

De esta manera se deben cumplir las limitaciones que los dispositivos de protección imponen unos a otros, además de los límites naturales de operación de los equipos, como son:

a) Corriente de inrush o energización de los transformadores; La corriente de inrush se representa como un punto. El valor de esta corriente es de 8 a 12 veces la corriente nominal del transformador, la cual se presenta en un tiempo de 0.1 segundo.

b) Curvas de daño de los cables y transformadores; Los equipos y accesorios deben soportar las altas temperaturas ocasionadas por el exceso de corriente. Estos límites deben quedar por encima de las curvas de las protecciones, para evitar que sufran daños, si esta no llega a operar; en lo que opera la protección de respaldo. La curva de daño de los conductores está definida por la ecuación de Ordendonk, siendo conocida para los transformadores como curva ANSI; esta curva determina los puntos de operación y establece las características que deben cumplir los devanados para soportar, sin resultar dañados, los esfuerzos térmicos y magnéticos producidos por corto circuitos en sus terminales.

Para la selección y ajuste de protecciones se consideraron las características que definen el comportamiento de una coordinación ideal:

a) Sensibilidad. Define la característica por medio de la cual todos los dispositivos deben operar con señales relativamente pequeñas.

b) Selectividad. Esta característica, sostiene que, al presentarse una falla en el sistema, deberá operar la protección más cercana al punto de falla, garantizando con esto la continuidad del servicio al resto de la instalación.

c) Velocidad. Es una característica fundamental, pues la rapidez con que se despeje la sobrecorriente es de suma importancia para disminuir al máximo los daños en la zona de falla. La velocidad depende de la magnitud de la sobre corriente y de la coordinación con las demás protecciones.

d) Confiabilidad. Esta característica en conjunto con la velocidad de despeje es de los puntos más importantes, ya que un relevador digital puede ser muy rápido y en un momento crítico puede fallar. Por esta razón las protecciones seleccionadas deben corresponder a una manufactura de primera calidad.

e) Costo. La selección de un esquema específico de coordinación de protecciones, equipos y secuencias de operación, tiene como principal objetivo el proteger y aislar la zona fallada, evitando así que, esta se extienda hacia más equipos. El costo de los esquemas depende de su selectividad, y por lo tanto se evalúa el punto óptimo o de equilibrio entre el costo y la selectividad de la protección [8].

El transformador se protege mediante un relevador modelo MX3AMD30 de Alstom. Los criterios de ajuste fueron:

Este relevador cuenta con un juego de transformadores de corriente con relación de 3000 / 5. La corriente nominal esperada es de 2,928 A; sin embargo, debido a que se tiene una presencia de armónicas se ajustó el relevador en 4,540 A, lo que ofrece un margen suficiente para evitar que el relevador dispare por la presencia de armónicas, pero a su vez, garantizar su correcta operación ante falla.

Se seleccionó una curva de tipo tiempo definido con un retardo de tiempo de 1.0 segundos. Se propone ajustar el primer elemento instantáneo a 6000 A, con un retardo de tiempo de 0.2 segundo.

El segundo elemento instantáneo se recomienda en 40,020 A con un tiempo de retardo de 0.02 segundos

En la Figura 4.4 se muestra la coordinación de Protección del sistema aguas arriba.

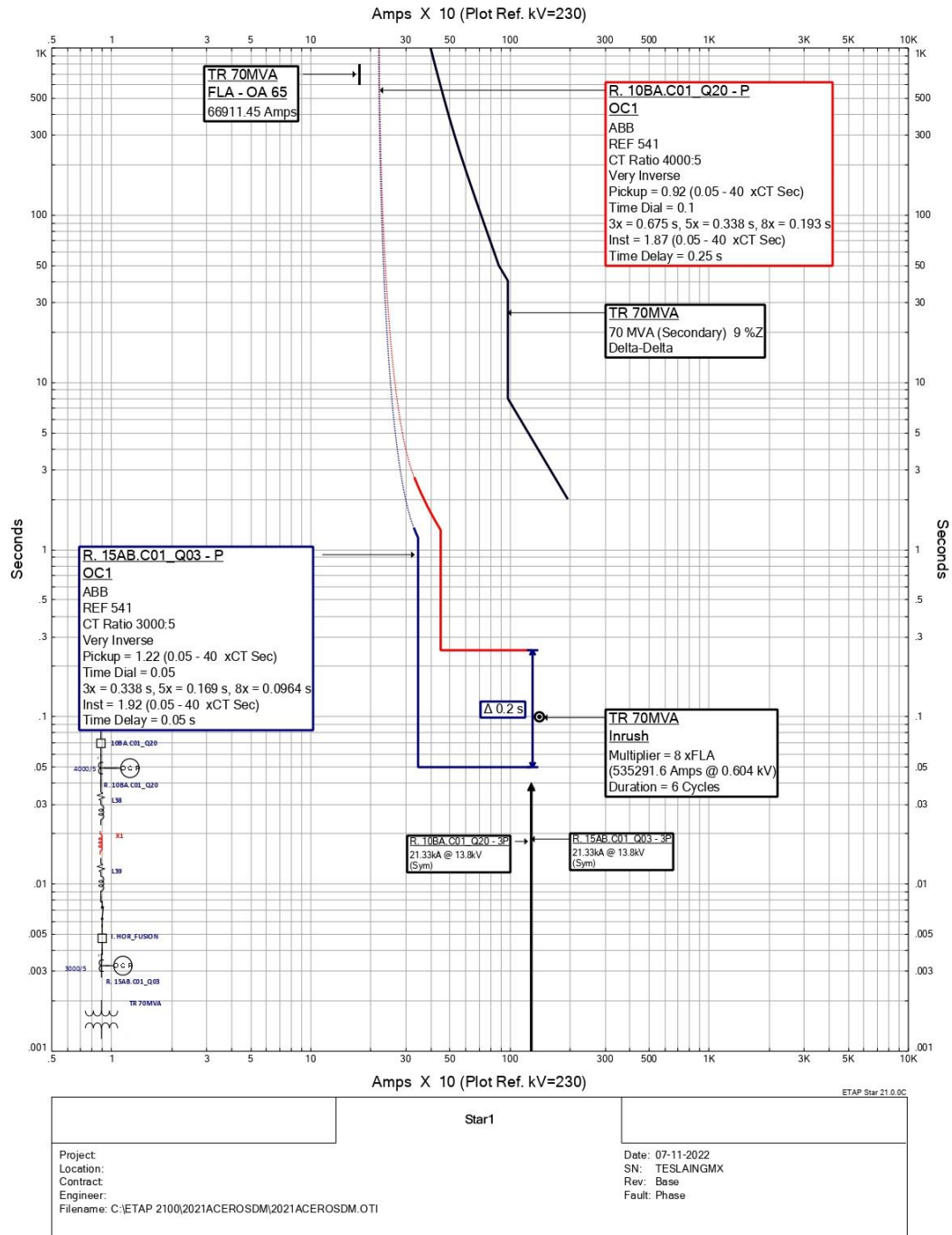


Figura 4.4 Gráfica de Coordinación de Protecciones.

4.2.- EFECTOS DE LA REGULACIÓN ELECTRÓNICA DEL ARCO ELÉCTRICO

Para considerar la revisión de la regulación del arco, la potencia del arco está directamente relacionada con la potencia del transformador. Estos ajustes pueden estar muy sensibles y permitir que el corto inducido en la chatarra exceda los tiempos de operación del relevador, lo que ocasiona que entre en la zona del disparo del relevador. El objetivo principal del regulador de electrodos es mantener el punto de ajuste metalúrgico de la manera más eficiente. Por supuesto, esto no siempre es fácil debido a varios factores como la calidad de la chatarra y/o escoria, la potencia del transformador, el diseño del horno, la fase del proceso de fusión [20].

La definición común o la estabilidad del arco para evaluar la capacidad del Regulador de electrodos es la desviación estándar de la corriente secundaria.

Este parámetro permite medir los rendimientos del regulador, es evidente que entre diferentes condiciones no siempre es posible obtener los mismos rendimientos, sin embargo, es fundamental conocer los valores medios y optimizarlos a lo largo de la producción. Figura 4.5 [25].

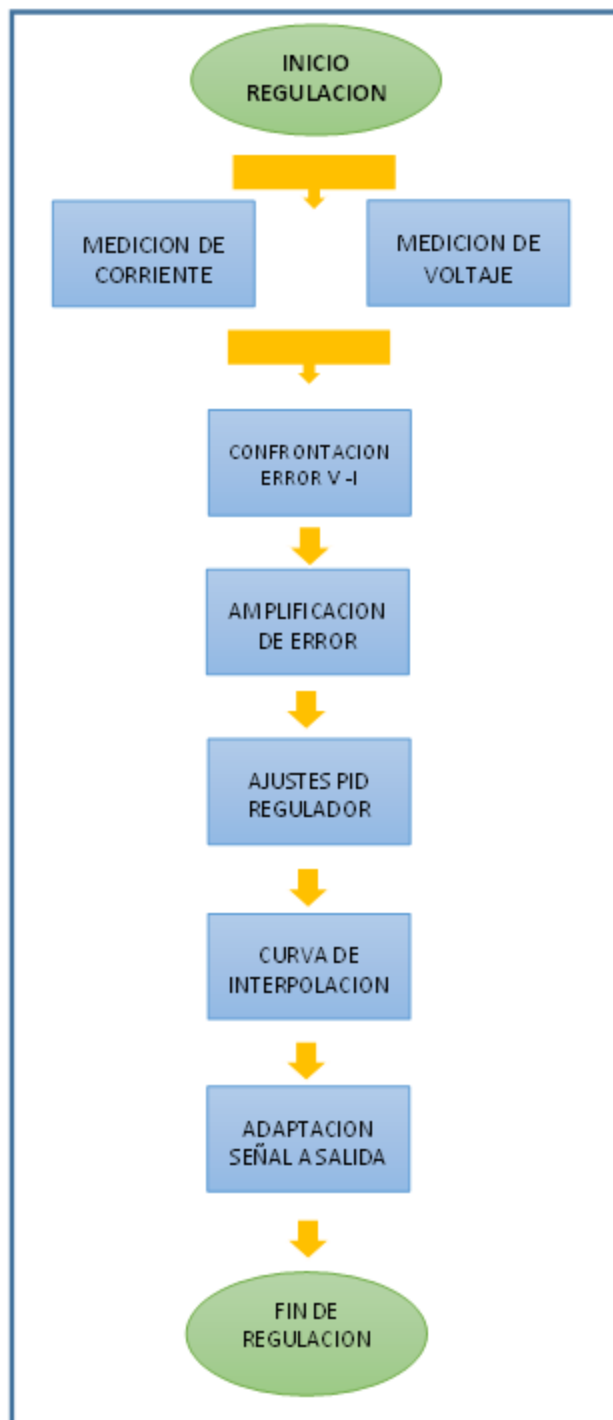


Figura 4.4 Esquema de Regulación de horno de arco.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR DE ARCO.

5.- RECOLECCIÓN DE MEDICIONES EN RELEVADOR DE PROTECCIÓN

En las gráficas que se obtuvieron durante los disparos se observan los picos de corriente muy aleatorios e impredecible es saliéndose de las curvas de ajuste del relevador, esto debido a la naturaleza de operación del horno que trabaja en diferentes taps del transformador y se afecta por los tipos de chatarra y la etapa de operación, con respecto a los disparos se pudo comprobar en los registros que los niveles de corriente sobrepasan los valores de ajuste de pickup y tiempos de operación de los relevadores, es decir funcionaron de acuerdo a su ajuste.

Realizando el análisis de osciloperturgrafía del relevador de protección Alston para una falla, en la Figura 5.1 se observa, que durante la activación de la falla existen valores de corriente de mayor magnitud en 2 fases y una fase de menor magnitud, la Fase 1 (verde) se presenta más distorsión en los valores entrando en los ajustes de disparo, llegando a la operación del relevador. Se analizaron varias gráficas de eventos presentados, observando que los disparos ocurren en diferentes fases, y en diferentes taps de operación, así como en etapas de proceso diferente.

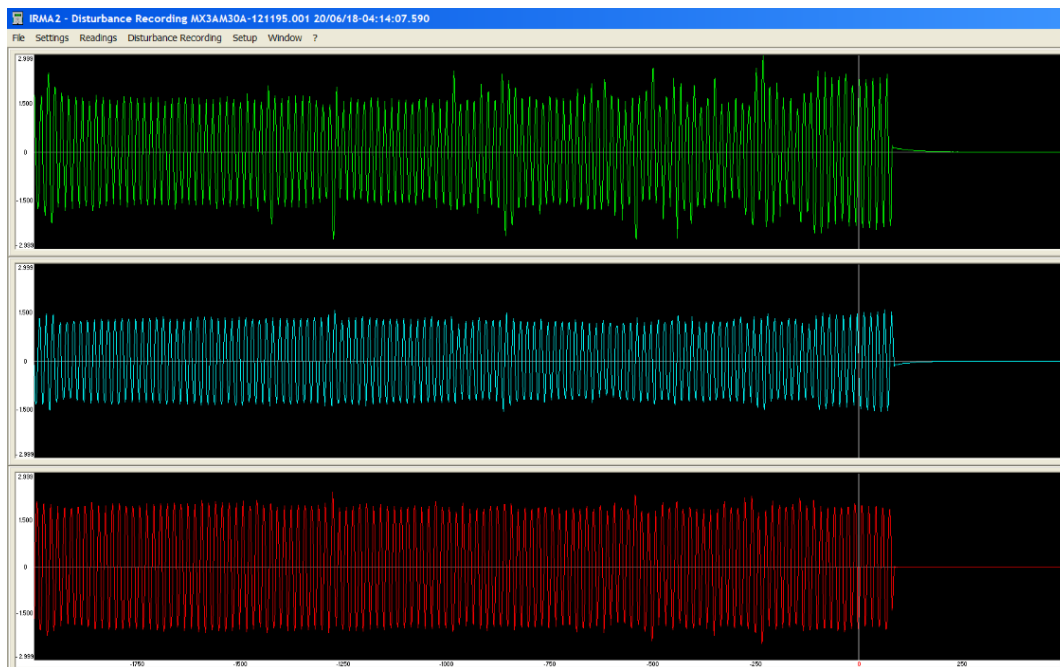


Figura 5.1 Osciloperturgrafía almacenada en relevador Alstom.



Figura 5. 2 Panel de prueba

Para poder tener otra referencia de medición en los disturbios que se generan en el relevador Alstom se realizó un panel con componentes SEL Figura 5.2 y poder registrar los disparos en el Transformador del Horno de Fusión. Se instaló un equipo SEL 735, éste se utiliza para medición de calidad de energía, nos da información de presencia de armónico y formas de onda distorsionadas, permite ver diagramas fasoriales de voltajes y corrientes.

También se instaló un relevador SEL 2414 que se utiliza para supervisar transformadores, rastrea la pérdida de vida del transformador por medio de un modelo térmico que nos ayuda a seguir con exactitud la tendencia de la carga del transformador y correlacionar los datos con otros parámetros del sistema, permite controlar cargas de cambiadores de derivación.

Con el software ACSerator se descargaron varias gráficas en el momento de disparos, obteniendo valores como se muestran en la Figura 5.3, en ellas se observan las magnitudes de corriente y voltaje

instantes antes de operar el relevador de protección ALSTOM, podemos observar la variación entre fases generada antes de ser detectada por el relé de protección.

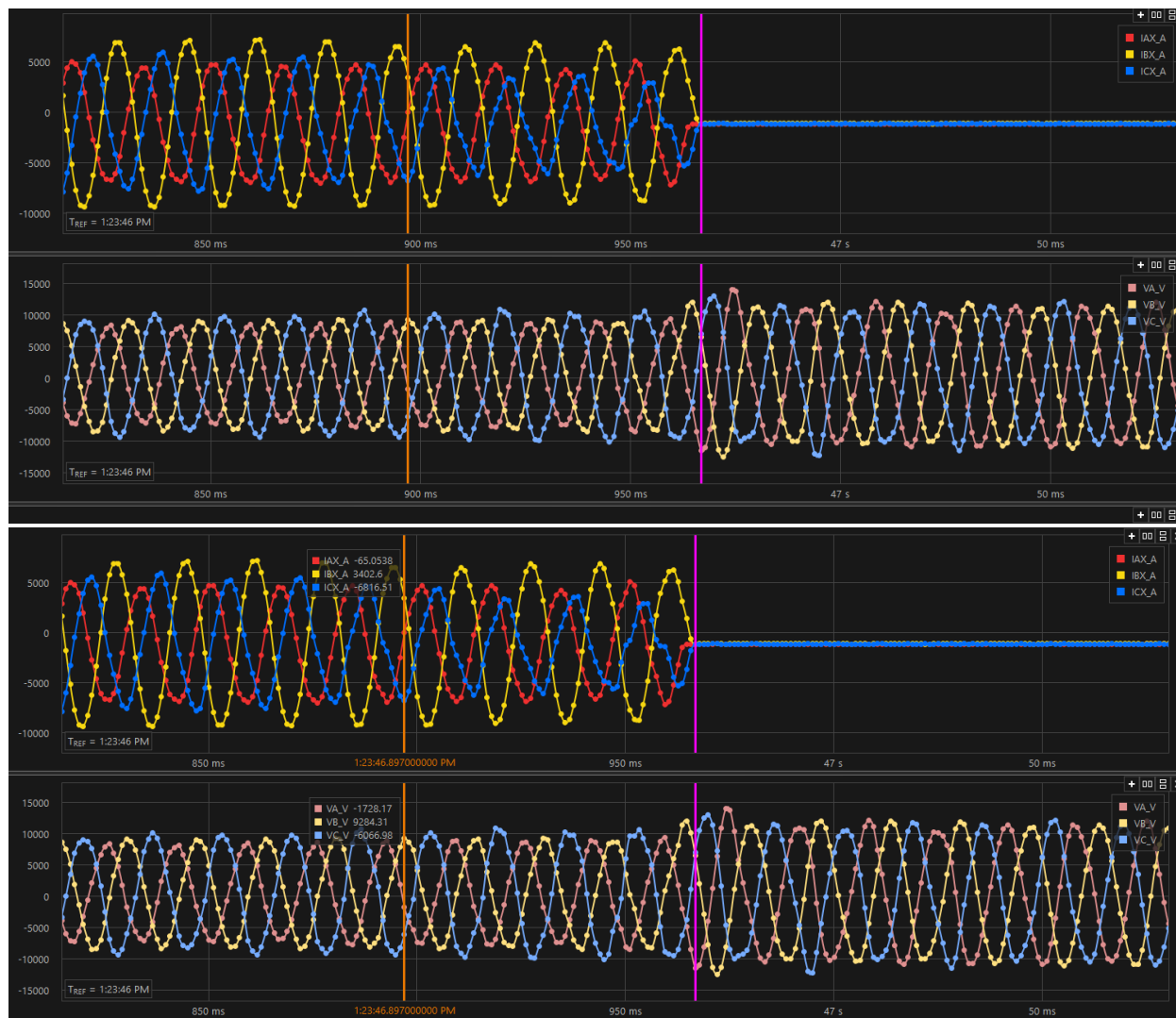


Figura 5.3 Gráficos medidos en relevador Selinc.

5.1.- ANÁLISIS CAUSA-RAÍZ

Haciendo un análisis causa-raíz para visualizar las causas del problema y nos oriente a la toma de decisión y a identificar el problema, se recopilaron datos sobre los efectos observados, desagregando con mayor detalle en subcausas y poder actuar con precisión sobre el fenómeno que explica el comportamiento no deseado. Se indican los fenómenos encontrados. Figura 5.4

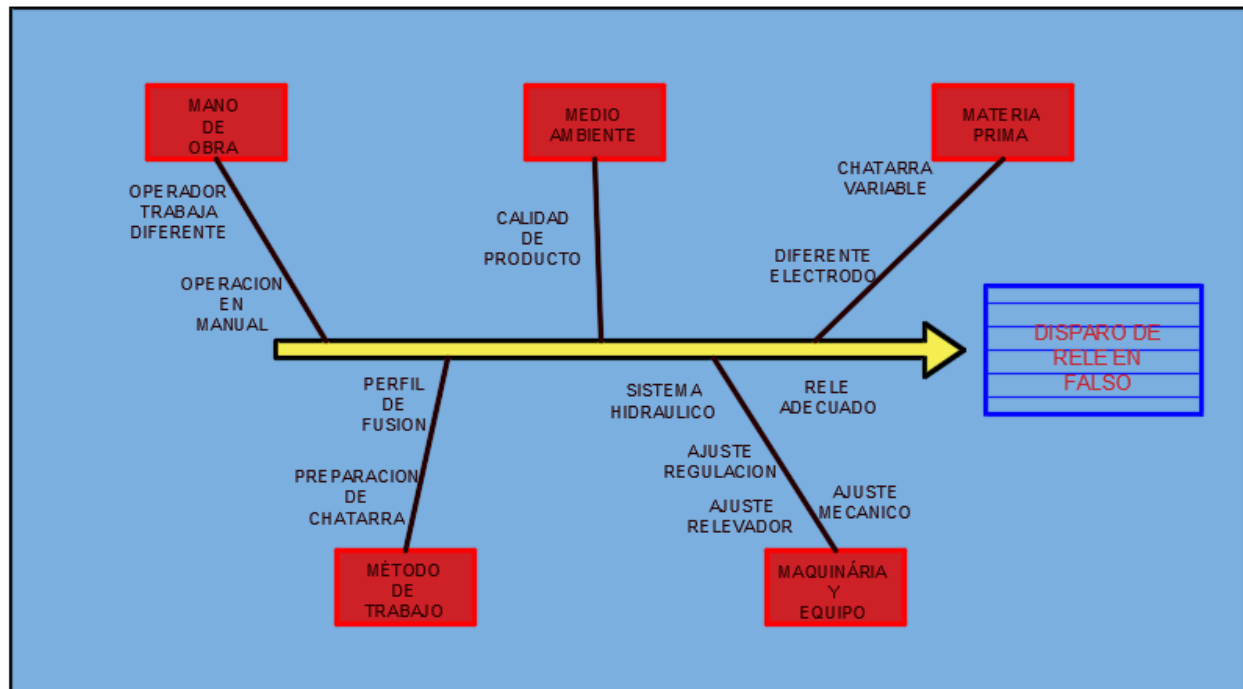


Figura 5.4 Esquema de Análisis Causa-Efecto

MANO DE OBRA

- Operador en turno trabaja diferente; al manejar 3 turnos de trabajo de 8 horas, la manera en cada jefe de turno opera el horno es una causa de variación en el comportamiento de cada colada.
- Operación en forma manual; en ocasiones el operador deshabilita el automático del horno y él toma el control , lo que nos lleva a variar la operación del horno.

MEDIO AMBIENTE

- Condiciones de operación varían; al manejar tipos de acero de diferente carbón (bajo , medio y alto carbón), se agregan aleaciones que provocan reacciones en el acero, generando otro punto de variación.

MATERIA PRIMA

- Chatarra Utilizada varían calidades; la chatarra que se alimenta al horno es de diferentes calidades y densidades siempre, esto ocasiona que no sea uniforme la carga en horno.
- Diferente tipo de Electrodo se comportan diferente; Se utilizan diferentes marcas de electrodos, esto nos ocasiona que el rendimiento sea bajo, así como provoca que el arco generado nos de potencias variadas.

MÉTODO DE TRABAJO

- Perfil de Fusión es cambiado por producción; la búsqueda de mejor operación en el horno, implica que cambio en etapas de fusión.
- Preparación de cargas de chatarra; el manejo de chatarra que se cargará al horno en base a la materia prima existente obliga al operador a realizar mezclas que no son las de mejor rendimiento.

MAQUINARIA Y EQUIPO

- Condiciones hidráulicas; la formación del arco depende de sistemas hidráulico , al tener un mal funcionamiento por fugas, o pérdidas de presión afecta directamente en el arco de horno.
- Regulación Electrónica; la respuesta en los ajustes electrónicos afecta directamente al movimiento de los brazos y al arco que se forma para fundir la chatarra [16].
- Ajustes en Relevador; el tipo de relevador , los ajustes del estudio de coordinación , dan la confiabilidad de protección del relevador.
- Desajuste mecánico en mástiles; el daño en guías , desajustes mecánico provoca atoramientos que se ven reflejados en el arco del horno.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR

El desarrollo de sistemas de protección de transformadores de hornos es una actividad compleja que requiere un confiable intercambio de información entre el fabricante del transformador y el ingeniero de planta.

Los transformadores están diseñados de acuerdo con una especificación técnica de pedido y estándares internacionales que definen los niveles de tensión dieléctrica soportada y los procedimientos de prueba específicos. La selección adecuada de los niveles de tensión y los niveles de aislamiento soportados relevantes son responsabilidad del ingeniero de la planta, quien tiene que asegurarse de que en funcionamiento bajo diversas condiciones esperadas para la planta específica los niveles de aislamiento serán adecuados [3].

Si se solicita, el fabricante del transformador puede diseñar y proporcionar los dispositivos de protección para el transformador, y protección del reactor en serie (si se incluye). La verificación sigue siendo responsabilidad del ingeniero de planta.

El ingeniero de planta debe proporcionar la información relevante de la planta, que incluye:

- Diagrama unifilar simplificado del sistema de alimentación del horno
- Potencia de cortocircuito de red
- Tensión nominal y variación máxima de tensión
- Datos eléctricos del transformador reductor (potencia nominal, voltajes, impedancia de cortocircuito)
- Datos eléctricos del reactor en serie (si no los proporciona el fabricante del transformador)
- Parámetros de circuito equivalente del circuito de compensación de potencia reactiva.

Con la información anterior proporcionada se realizan flujos de carga, análisis de cortocircuito y coordinación de protecciones de sobrecorriente del sistema de potencia (SEP) partiendo de la energía eléctrica suministrada por CFE, se calculan los ajustes de acuerdo con las recomendaciones normativas que brinden una óptima operación en presencia de fallas de sobrecorriente y sobreintensidad (cortocircuito).

5.3 CURVA DE DAÑO DEL TRANSFORMADOR

La capacidad de transformador para soportar los efectos térmicos y mecánicos a través de una falla se muestra en la curva de la Figura 5.5, la curva proporciona la capacidad térmica de cortocircuito. Los transformadores sufrirán daño térmico (quemarse) si soportan una corriente muy elevada por un tiempo determinado, el fabricante debe proporcionar la curva del transformador, que define la característica térmica y la característica de capacidad, cuando se producen fallas frecuentes considerando duración y magnitud.

La protección se debe coordinar con la curva de daño del transformador, y debe interrumpir la falla para proteger la curva térmica. Se indica en la figura 5.5 el tiempo de operación y la relación I/I_n que nos indica el punto debajo de la curva donde debe operar la corriente del transformador y evitar pasar encima de la curva [8].

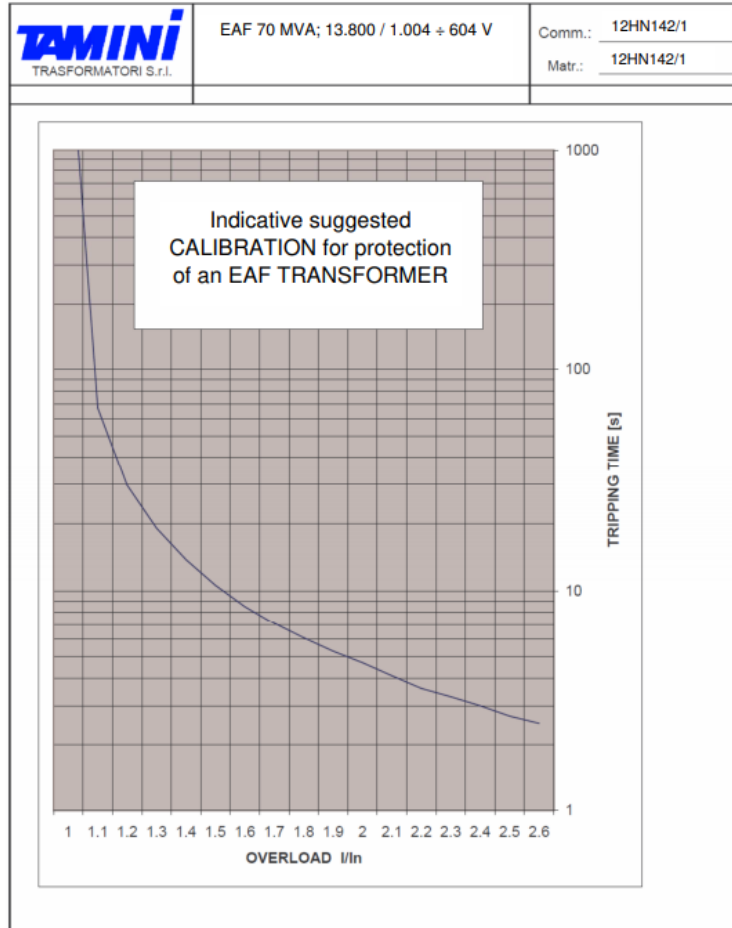


Figura 5.5 Curva de transformador de horno de arco proporcionada por fabricante

5.4 TABLA DE CÁLCULO DE CORRIENTES Y VOLTAJES

Con base en los parámetros eléctricos y datos de la red de alimentación se genera la tabla con los datos de corto circuito en cada tap del transformador de horno de arco eléctrico, en los distintos puntos del diagrama unifilar desde el transformador en alta tensión hasta el punto del secundario del transformador y horno, en la Figura 5.6 se observa que las corrientes cambian en cada tap de operación, ocasionando que en el relevador de protección se limite al ajuste a un tap nominal del transformador [13].

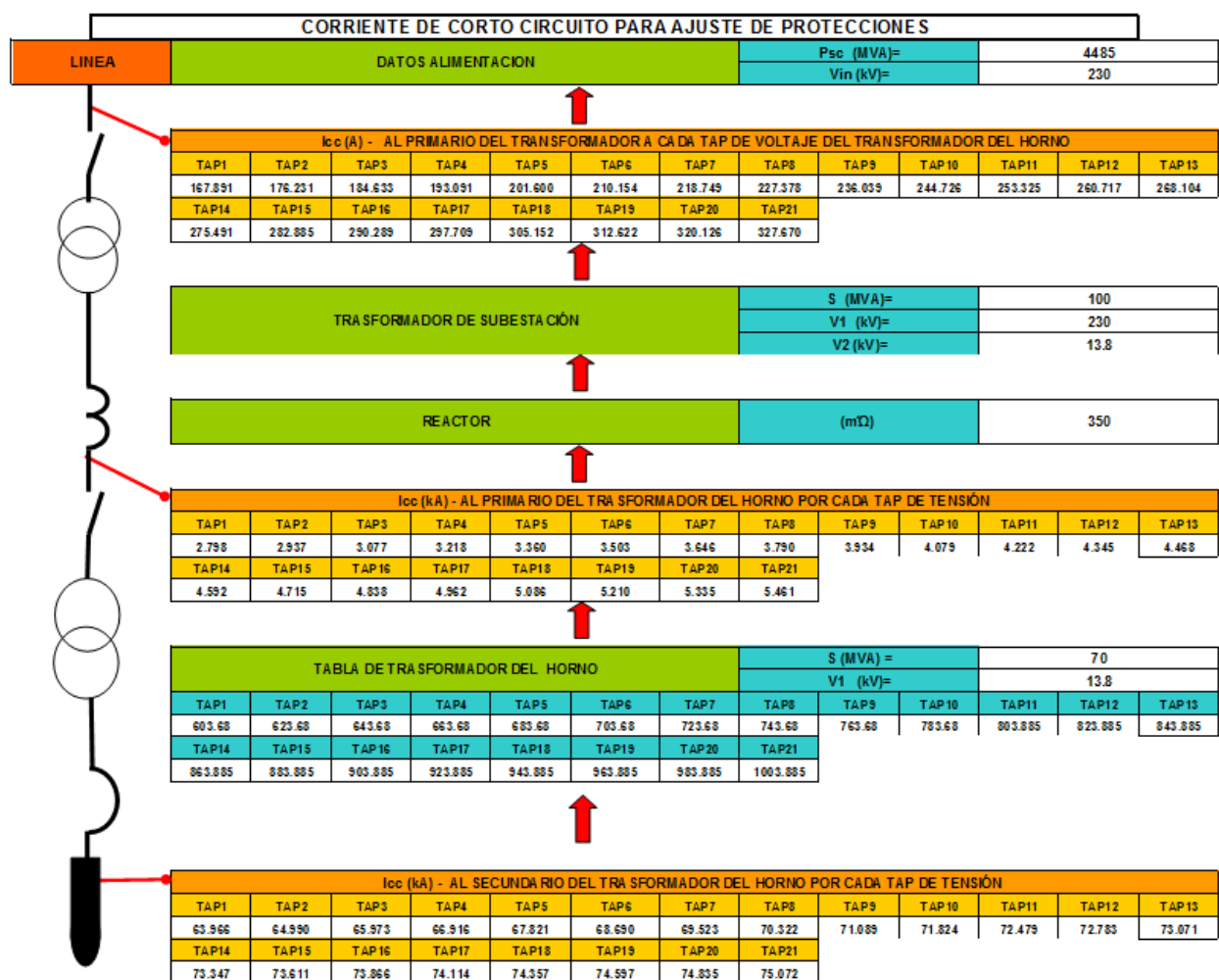


Figura 5.6 Tabla de corrientes/voltajes a diferentes taps del transformador.

5.5 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE TRANSFORMADOR

La protección diferencial de transformador está basada en la comparación de intensidades, apropiada para la detección de fallas internas. Es importante recordar evitar la desconexión tempestiva debida a corriente Inrush [6].

Considerando que la corriente de magnetización se caracteriza por la presencia de 2º armónico, mientras que la sobreexcitación presenta un gran contenido de 5º armónico. La conexión debe realizarse tal como se representa en la Figura 5.7, tal que ambos lados del elemento protegido intercambien la información

a través de las vías de comunicación y realicen la comparación de las intensidades, atendiendo a la primera ley de Kirchhoff:

$$\sum I = 0$$

El convenio de signos será positivo para las corrientes entrantes, y negativo para las salientes.

Mientras la falta sea interna (dentro de la zona protegida), el relé genera la orden de disparo a los interruptores de la zona. Si la falta es externa (fuera de la zona protegida), el relé debe mantenerse estable y no mandar la orden de disparo.

La protección diferencial se basa en una comparación de intensidades (ley de corrientes según Kirchhoff, pero considerando la relación de transformación de intensidad del transformador). Aquí se aprovecha que un objeto a proteger conduce, en estado de funcionamiento sin interferencias, la misma intensidad I por ambos extremos, Figura 5.7. Esta intensidad circula de forma que entra por un lado en la zona observada y la abandona nuevamente por el otro lado. Si hay una diferencia de intensidad, es indicación segura de que existe una falta dentro del objeto a proteger. El cálculo de la diferencia se determina aplicando la definición direccional de las intensidades. La dirección de la intensidad hacia el objeto a proteger se define como positiva. La intensidad diferencial resulta de la suma vectorial de las intensidades.

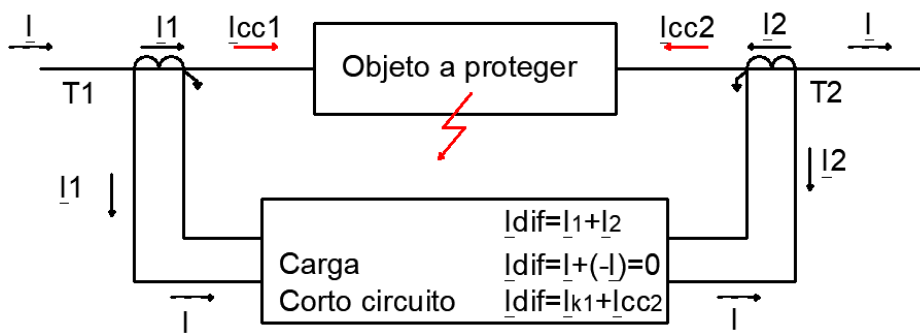


Figura 5.7 operación de protección diferencial [29].

Las diferencias entre las magnitudes y ángulos de las corrientes serán compensadas internamente por el relé de protección.

Es importante conocer que la zona de protección de la diferencial de transformador, no se enfoca en el equipo, sino en la zona comprendida entre los transformadores de intensidad localizados a cada uno de los lados del transformador, por tanto, quedan protegidos todos los equipos que forman parte del bloque de transformación (Figura 5.8).

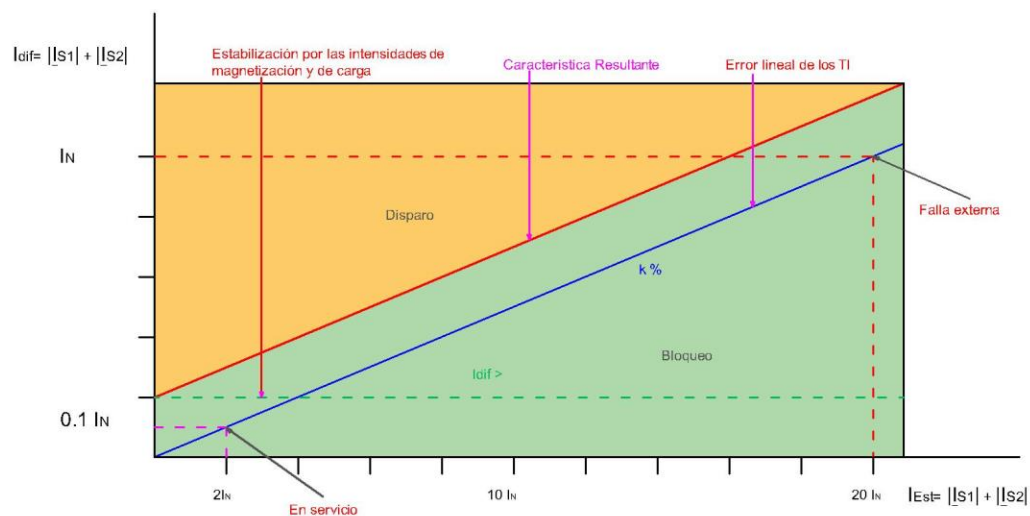


Figura 5.8 Gráfica de operación de disparo por diferencial en transformador [29].

Los requerimientos específicos de la función diferencial de transformador para la aplicación se enumeran a continuación:

- Debe disponer de tres funciones monofásicas diferenciales independientes de alta velocidad con el fin de asegurar la operación rápida ante fallas internas severas o con T/i saturado, que realizarán de forma independiente la medida para cada fase.

- Debe disponer de tres funciones monofásicas diferenciales independientes con característica porcentual, con una o más pendientes, continuamente ajustables la primera de ellas entre el 15% y el 50% de la intensidad de frenado.
- Debe ser estable durante la energización del transformador (Inrush).
- Debe ser estable ante condiciones de sobreexcitación.
- Compensación del grupo de conexión del transformador de potencia, transformadores de medida, y relación deben realizarse internamente por el relé.
- Los relés han de disponer de la posibilidad de modelos de cuatro arrollamientos.
- La sensibilidad máxima será del 5%.

Con base a los resultados observados en la medición se determina que el rediseño del esquema de protección actual más apropiado a la operación de un transformador de Horno es un relé tipo diferencial (87T).

CONCLUSIONES

En la operación de un horno de arco eléctrico (EAF), el principal objetivo es producir el tonelaje máximo de acero al precio más bajo costo. El operador debe usar la máxima potencia disponible en el menor tiempo posible, y evitar lapsos de producción perdidos o minimizarlos. Con la naturaleza no lineal y estocástica del EAF, algunos parámetros del horno como voltaje y corriente, real y potencia reactiva, así como la resistencia y reactancia del horno, presentan variaciones significativas especialmente durante la fusión. Estas variaciones causan problemas de flicker y armónicos en el punto de acoplamiento PCC. Aunque se tenga una capacidad de corriente de cortocircuito en el PCC y compensadores de armónicos que aportan a la estabilidad de arco y disminución de sobre voltajes que podrían dañar los principales componentes del sistema. Para una operación estable del sistema deben ajustarse adecuadamente los parámetros del sistema y especialmente los parámetros del transformador.

La protección del transformador debe ser más completa y cubrir todas las curvas donde operan las corrientes y voltajes del transformador. Realizando un cambio en el esquema tradicional y realizando una medición las corrientes que circulan en un transformador de horno de arco en el lado primario y secundario, nos permitirá que exista una comparación en sus componentes fasoriales, ante cualquier diferencia que exceda los valores permitidos de funcionamiento activará el relevador de protección. La gama de relevadores SEL que se diseñan permite tener una mejor cobertura de protección que se puede aplicar al proceso de fundición en un horno de arco eléctrico. En este trabajo se realizaron diferentes mediciones y se pusieron a prueba equipos SEL para conocer el efecto en el modo de operación y programación de los equipos de protección.

REFERENCIAS

- 1.- Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces. Pedro E. Issouribehere, Juan C. Barbero, Fernando Issouribehere, IEEE Member, and Gustavo A. Barbera
- 2.- Some Thoughts on Minimizing Cost of Arc-Furnace Transformers Jugoslav S. Milutinovich William T. Mahon
- 3.- Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring A.S. Karandaev¹, S.A. Evdokimov², V.R. Khramshin², O.I. Karandaeva²
- 4.- Protective Relaying Theory and applications, Second Edition. Walter A. Elmore.
- 5.- Estudio sobre fallas en transformadores para Arco Eléctrico en industria Siderurgica. Universidad de San Carlos Guatemala, Carlos Rolando Curiel.
- 6.- Protecciones Eléctricas, Gilberto Carillo.
- 7.- IEEE Industry Applications Society. Annual Meeting (52nd : 2017 : Cincinnati O, IEEE Industry Applications Society. 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting : 1-5 Oct. 2017
- 8.- Transformer Overcurrent Protection Coordination Russell W. Patterson Patterson Power EngineersElmo Price Consultant, ABB Inc. Retired
- 9.- IEEE Guide for Liquid-Immersed Transformer Through-fault-current Duration C57.109-1993 (R2008)
- 10.- Procedimientos de análisis de calidad de la energía y de solución de problemas. Version 1.5.1; Código n° 20752484 METREL
- 11.- Fornos a Arco Análise e Projeto do Sistema Eléctrico Walter Ries
- 12.- Análisis de las perturbaciones provocadas por el Horno de Arco Eléctrico y sus métodos para atenuarlas, Universidad de San Carlos de Guatemala , Héctor Armando Hernández Curiel.
- 13.- Manual Cambiador de Tomas bajo Carga Tipo M, Instrucciones de Servicio, MR Maschinenfabrik Reinhausen.
- 14.- Electric Furnace Steelmaking ,Chapter 1.5, Jorge Madias.
- 15.- Acería Eléctrica, Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte I. Jose Luis Enríquez Berciano
- 16.- Horno Eléctrico Manual del operador Hireg Plus TWS ,Danieli Automation ,Rivotto
- 17.- Hornos de Arco para Fusión de Arco, Julio Astigarraga Urquiza, Iberdrola
- 18.- Transformador para Horno de Arco Eléctrico, Ing Hiroshi S. Sawabe, Boletín Técnico UCAR
- 19.- Horno de Arco Eléctrico – Curvas de Potencia, Ing Hiroshi S. Sawabe, Boletín Técnico UCAR

- 20.- Análisis de Regulación del Horno de Arco Eléctrico, Ing Hiroshi S. Sawabe, Boletín Técnico UCAR
- 21.- Effects of Main Transformer Replacement on the Performance of an Electric Arc Furnace System
Alper &dagt,\$, Isik Cadircit, Erbil Nalcacit, Muammer Ermist, and Susumu Tadakumal
- 22.- 3AH4 Vacuum Circuits Breakers. Siemens Catalog HG11-04 Edition 2018
- 23.- Ing. Hiroshi S. Sawabe. Impedancia de un Transformador para Horno de Arco Eléctrico. Boletín Técnico UCAR año 2, número 8 ,Agosto. 1994
- 24.- Marvasti FD, Samet H. Fault detection in the secondary side of electric arc furnace transformer using the primary side data. Int Trans Electr Energy Syst. 2014 Oct 1;24(10):1419–33.
- 25.- Elettroapplicazioni srl C. CEA DRS EAF-LF digital regulation system electrical arc control parameters user manual.
- 26.- Pasotti A. Short circuit Study for EAF revamping. 2016.
- 27.- <https://sites.google.com/site/horno> electrico de arco/2-componentes
- 28.- Siemens SA Manual 7UT86.2016