



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**COLEGIO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**MODELO DE UN HORNO DE ARCO ELECTRICO A TRAVES DE  
ATPDRAW.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO Y ELÉCTRICO**

**PRESENTA:**

**FRANCISCO JIMENÉZ MONROY**

**ASESOR:**

**M.C. ISMAEL ALBINO PADILLA**

**PUEBLA, PUE.**

**JUNIO DE 2021**



## Contenido

Contenido.....	2
Resumen.....	4
Índice de figuras .....	5
Índice de tablas .....	8
Abreviaturas.....	9
1. Protocolo De Tesis.....	11
1.1 Planteamiento del Problema.....	11
1.2 Justificación .....	12
1.3 Objetivos .....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
1.4 Hipótesis .....	14
1.5 Estado del arte .....	15
2. El horno de arco eléctrico .....	19
2.1 Introducción .....	19
2.2 Características del horno.....	19
2.2.1 Materiales de carga .....	20
2.3 Funcionamiento del horno.....	20
2.3.1 Etapa de fusión .....	21
2.3.2 Etapa de afino .....	22
2.4 El transformador de potencia.....	22
2.5 Los electrodos .....	23
2.6 El arco eléctrico.....	24
2.7 Disturbios del horno en la red eléctrica.....	24
2.7.1 Desbalance de carga.....	25
2.7.2 Voltaje flicker .....	26
2.7.3 Efecto flicker.....	26
2.7.4 Armónicos.....	27
2.8 Circuito eléctrico del hae .....	28
3. Modelo teórico del horno de arco eléctrico.....	33
3.1 Introducción .....	33
3.2 Descripción de la curva característica V-I .....	33
3.3 Descripción de la resistencia no lineal .....	36
3.4 Comportamiento dinámico de la resistencia no lineal .....	36



3.5 Resistencia no lineal variable en el tiempo.....	37
3.6 Resistencia no lineal con ley sinusoidal.....	38
4. El programa Atpdraw .....	40
4.1 Introducción .....	40
4.2 ATP-EMTP.....	41
4.2.1 Principio de operación.....	42
4.2.2 Módulos de simulación integrada.....	43
4.2.3 Aplicaciones .....	44
4.2.4 Capacidad .....	45
4.3 Descripción del espacio de trabajo .....	45
4.3.1 Gestor del entorno ATPCC .....	46
4.3.2 El compilador ATP .....	47
4.3.3 Editor de textos PF32 .....	47
4.3.4 Visualizador gráfico PLOTXY .....	47
4.4 ATPDRAW.....	48
4.5 Configuración de los parámetros de simulación .....	49
5. Marco experimental .....	52
5.1 Modelado del horno de arco eléctrico .....	52
5.2 Ajuste de los componentes del circuito eléctrico .....	52
5.3 Red de potencia (equivalente de Thevenin).....	53
5.4 Transformador de conexión a la red de potencia.....	55
5.5 Transformador en la subestación del horno .....	57
5.7 Cable de conexión del electrodo .....	57
5.8 Modelado de la resistencia no lineal .....	59
5.9 Simulación del modelo estacionario del HAE.....	62
5.10 Simulación del modelo dinámico del HAE .....	63
Conclusiones y trabajos futuros.....	68
Conclusiones .....	68
Trabajos futuros.....	68
Anexo A Cantidades por unidad .....	69
Referencias.....	72



## Resumen

Este trabajo presenta una simulación a través de TACS del ATP de un modelo de horno de arco eléctrico conectado a un sistema de potencia. El modelado del horno consiste en una resistencia no lineal variable en el tiempo. La resistencia no lineal es obtenida mediante una relación empírica entre la longitud, voltaje y corriente a través del arco. Este modelo captura con gran precisión la curva V-I del horno, la cual caracteriza su comportamiento. Además, es asignada una ley sinusoidal en la variación en el tiempo de la longitud del arco, la cual genera las fluctuaciones de voltaje. Con el fin de validar los resultados de la simulación, estos son comparados con datos hallados en la literatura. Se observa que este modelo es apropiado en estudios relacionados al efecto flicker y a los armónicos.



## Índice de figuras

- Figura 1.1 Curva característica ideal voltaje-corriente del modelo de resistencia no lineal del horno de arco eléctrico a través de atpdraw.
- Figura 1.2 Curva característica V-I del modelo de un horno basado en las ecuaciones del principio de conservación de la energía o del balance de potencia.
- Figura 1.3 Curva característica V-I del modelo de aproximación lineal por partes del horno de arco.
- Figura 2.1 Representación gráfica del recipiente cilíndrico de un horno de arco eléctrico.
- Figura 2.2 Ciclo típico de fundición durante la producción de acero en un horno de arco eléctrico.
- Figura 2.3 Representación del transformador de potencia que suministra a un HAE.
- Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente unifilar del horno de arco.
- Figura 2.5 Ejemplo de un circuito equivalente de un HAE con sistemas de compensación (banco de capacitores y reactores en serie).
- Figura 2.6 Diagrama de impedancias del circuito equivalente del horno de arco
- Figura 3.1 Curva característica teórica V-I del modelo de resistencia no lineal del horno de arco.
- Figura 4.1 Espacio de trabajo (workspace) de la Interfaz gráfica del simulador para transitorios electromagnéticos ATPDRAW.
- Figura 4.2 Antiguo simulador analógico “Transient Network Analyzer” para el análisis de transitorios en la red eléctrica.
- Figura 4.3 Esquema de comunicación entre los programas del ATP EMTP.
- Figura 4.4 Espacio de trabajo del graficador PLOTXY del ATP.
- Figura 4.5 Ejemplo de una ventana de diálogo en ATPDRAW de una fuente de voltaje trifásico.
- Figura 4.6 Visualización del modelado de circuitos eléctricos simultáneos en ATP.
- Figura 4.7 Ventana “Simulation” de ajustes generales en el programa Atpdraw.
- Figura 5.1 Esquema del circuito eléctrico del horno de arco utilizado en la simulación de este trabajo a través de AtpDraw.
- Figura 5.2 Diagrama unifilar semejante al circuito Puebla-Ternium con horno de arco.



Figura 5.3 Modelado del equivalente de Thevenin de la red de potencia referido al secundario del transformador del horno T2.

Figura 5.4 Impedancia del transformador T1 conectado a la red de potencia y referido al secundario del transformador T2.

Figura 5.5 Impedancia del transformador T2 conectado al transformador T1 a través de Atpdraw.

Figura 5.6 Implementación de la impedancia del cable que conecta el electrodo del horno y su transformador mediante Atpdraw.

Figura 5.7 Circuito eléctrico equivalente referido a la carga del horno de arco en atpdraw.

Figura 5.8 Diagrama de bloques completo del modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo que representa la carga del horno de arco.

Figura 5.9 Estimación de la corriente de arco del horno mediante el bloque 1 en TACS del atp.

Figura 5.10 Diagrama del bloque 2, derivada de la corriente del horno en TACS

Figura 5.11 Variación en el tiempo de la longitud de arco mediante el diagrama del bloque 3 en ATP.

Figura 5.12 Circuito eléctrico y diagrama de bloques del modelo de resistencia dinámica implementado a través de TACS del atp.

Figura 5.13 Formas de onda del voltaje de arco mediante el modelo de resistencia no lineal medido en la terminal de conexión del horno U4.

Figura 5.14 Forma de onda de la corriente de arco del horno mediante el modelo de resistencia no lineal.

Figura 5.15 Curva característica V-I del horno mediante el modelo de resistencia no lineal.

Figura 5.16 Voltaje dinámico del horno de arco mediante la variación en el tiempo de la longitud de arco.

Figura 5.17 Forma de onda dinámica de la corriente del HAE mediante una ley sinusoidal de 30 Hz.

Figura 5.18 Curva dinámica V-I del horno mediante el modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo.

Figura 5.19 Validación del modelo mediante la comparación de los resultados que aparecen en [7].



Figura 5.20 Formas de onda del voltaje fase a, b y c superpuestas del modelo dinámico del horno.

Figura 5.21 Formas de onda de la corriente de las tres fases del horno de arco.

Figura 5.22 Curva característica V-I de cada una de las fases del horno trifásico.



## Índice de tablas

Tabla 3.1 Datos de las variables y constantes de la curva V-I en un ciclo completo.





## Abreviaturas

HAE	Horno de Arco Eléctrico.
PCC	Punto de Acoplamiento Común.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
SVC	Static Var Compensator.
ATP	Alternative Transients Program.
TACS	Sistemas de Control del Análisis Transitorio.
OLTC	Cambiador de Tomas Bajo Carga.
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
EMTP	Electro Magnetic Transients Program.
BPA	Bonneville Power Administration.
EPRI	Instituto de Investigación de Energía.
MODELS	Lenguaje de programación.





# 1. Protocolo De Tesis

## 1.1 Planteamiento del Problema

El horno de arco eléctrico (HAE) es utilizado en la producción de acero durante el proceso de fusión de chatarra metálica fragmentada. El calor generado por el arco eléctrico formado entre los electrodos del horno y la chatarra, puede alcanzar temperaturas de aproximadamente 2000 ° C o más, con relación a valores de corriente de hasta 100 kA [29]. Existen hornos que pueden contener desde 40 hasta 270 toneladas de material fundido y pueden ser adecuados en la fabricación de diferentes clases de acero [32], destinados a distintas aplicaciones (automotriz, construcción, electrodomésticos, sector salud, buques de carga etc.) [39]. En definitiva, el horno de arco eléctrico destaca grandes ventajas debido a su alta capacidad de producción y a su amplia variabilidad en la composición del acero.

Por el contrario, en un sistema de potencia, el horno de arco es reconocido por sus posibles efectos desfavorables en la calidad de la energía eléctrica. La carga del HAE trifásico puede ser no lineal, variable en el tiempo e inestable, debido a la naturaleza intrínseca del arco eléctrico, capaz de generar disturbios o perturbaciones (armónicos, voltaje flicker, desbalances, sobrevoltajes) en el sistema de potencia al que está conectado [1]. Un horno de arco puede introducir, principalmente, voltaje flicker en el PCC (Punto de Acoplamiento Común) y afectar a una amplia variedad de clientes conectados cerca de la carga del horno [7]. El voltaje flicker puede ocasionar molestias al sistema visual humano debido a las variaciones en la intensidad de iluminación (efecto flicker) [2]. Además, los hornos de arco son fuentes de problemas de armónicos debido a la naturaleza altamente no lineal del arco [6]. El voltaje flicker y los armónicos de corriente y voltaje, pueden afectar el correcto funcionamiento del sistema eléctrico de la propia instalación del horno y de instalaciones conectadas cerca de esta carga [33].

Por ejemplo, en el estado de Puebla, la compañía CFE (Comisión Federal de Electricidad), registro irregularidades en los niveles de voltaje del sistema eléctrico de una planta que produce acero a partir de minerales con horno de arco, en este caso, el ente suministrador de energía eléctrica es responsable de realizar las medidas correspondientes e implementar estrategias (sistemas de compensación, SVC, entre otros) con el fin de mitigar o suprimir disturbios que pueden perjudicar la calidad del suministro eléctrico [27]. No obstante, diferentes estudios son necesarios, previos a la implementación de estrategias, para predecir el comportamiento del horno de arco conectado al sistema de potencia. Entre estos estudios, es necesario el desarrollo de modelos de horno de arco eléctrico y del sistema de potencia a través de un software de simulación de sistemas eléctricos que permita un mejor análisis del comportamiento de la red.

Las simulaciones en el dominio del tiempo a través del software ATP (Alternative Transients Program) [3], han sido útiles en el modelado de los diferentes elementos del sistema de potencia del horno y en el análisis y resolución de una gran variedad de problemas relacionados con la calidad de la energía [26].



## 1.2 Justificación

Las compañías encargadas de suministrar energía eléctrica a la población, los usuarios industriales que tienen este tipo de carga, los fabricantes de equipos y los entes encargados de regular y operar el sistema eléctrico, están preocupados por el impacto severo del horno de arco en los sistemas de potencia e intentan implementar estrategias que atenúen sus posibles disturbios. De ahí que, obtener la respuesta del horno de arco eléctrico a través de un potente software de simulación de circuitos eléctricos, se convierte en un trabajo esencial.

Además, los datos de la simulación del modelo del horno de arco eléctrico serán comparados con los resultados que aparecen en la literatura. Estos datos serán de gran utilidad en el análisis del comportamiento del horno de arco eléctrico en el sistema de potencia.



## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

- Simular un modelo de horno de arco eléctrico a través de Atpdraw para estudiar su comportamiento en la red eléctrica.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Modelar un circuito eléctrico de 220 kV que suministra a un horno de arco de 60 MVA
- Implementar el modelo de horno de arco eléctrico mediante una resistencia no lineal conectado al circuito de 220 kV a través de TACS (Sistema de Control del Análisis Transitorio) de Atpdraw para obtener su curva característica voltaje-corriente.
- Agregar una ley sinusoidal a la variación en el tiempo en la simulación del modelo del horno que genere el voltaje flicker.
- Validar los resultados de la simulación del horno mediante la comparación con datos reales que aparecen en la literatura.



## 1.4 Hipótesis

Comprobar que el desarrollo del modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo a través de ATPDraw es de utilidad para el mejor estudio del comportamiento de la carga del horno en un sistema de potencia.



## 1.5 Estado del arte

Generalmente, el horno de arco eléctrico es empleado en la industria del acero. En un sistema de potencia, el horno de arco, es quizá la carga más severa que se pueda encontrar y es estudiada desde inicios de la ingeniería eléctrica [26]. Durante los últimos años, debido al desarrollo tecnológico se ha provocado un cambio significativo en el tipo de cargas eléctricas conectadas a la red. En la actualidad, se han conectado cargas no lineales en el sistema eléctrico las cuales han aumentado la presencia de disturbios, algunos de estos disturbios pueden ser: corrientes no sinusoidales con elevado contenido de armónicos y el voltaje flicker, entre otros. El uso de equipos electrónicos que pueden causar perturbaciones en la red o que son sensibles a sí mismos, últimamente, ha aumentado el interés por la descripción de estos fenómenos. Afortunadamente, en el sistema eléctrico de potencia, la carga del horno es menos frecuente, comparada con otro tipo de cargas no lineales [27].

Es importante señalar que los sistemas de potencia deben estar preparados para soportar la conexión de este tipo de cargas no lineales. La solución a los posibles problemas relacionados con la calidad de la energía causados por el horno de arco, está en función de la disponibilidad de modelos matemáticos que representen su comportamiento en el sistema de potencia. Los investigadores tanto académicos e industriales, conscientes de la importancia del modelado del horno de arco eléctrico, rigen sus esfuerzos para simular su operación, estableciendo una gran variedad de modelos matemáticos de diferentes niveles de complejidad. Por ejemplo, algunos de los modelos que aparecen en la literatura son:

- Modelo de resistencia no lineal. Es un modelo basado en una relación empírica entre la longitud del arco, voltaje y corriente a través del arco. Este modelo captura con gran precisión la curva característica V-I (voltaje-corriente), figura 1.1, la cual aproxima el comportamiento real del horno, y es utilizado en el estudio de armónicos y en las fluctuaciones de voltaje [2] [7] [31].

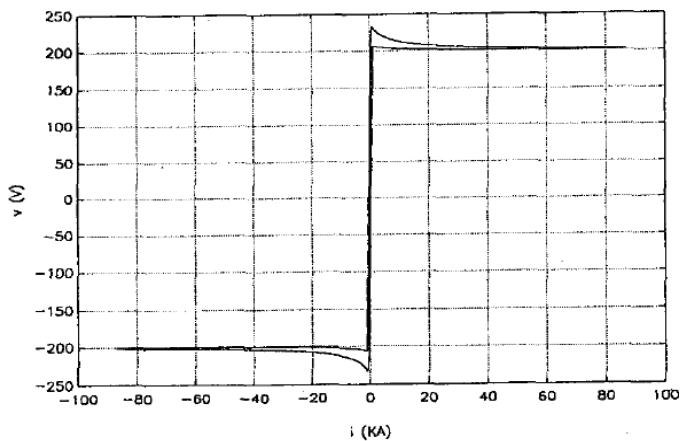


Figura 1.1 Curva característica ideal voltaje-corriente del modelo de resistencia no lineal del horno de arco eléctrico a través de atpdraw [7].

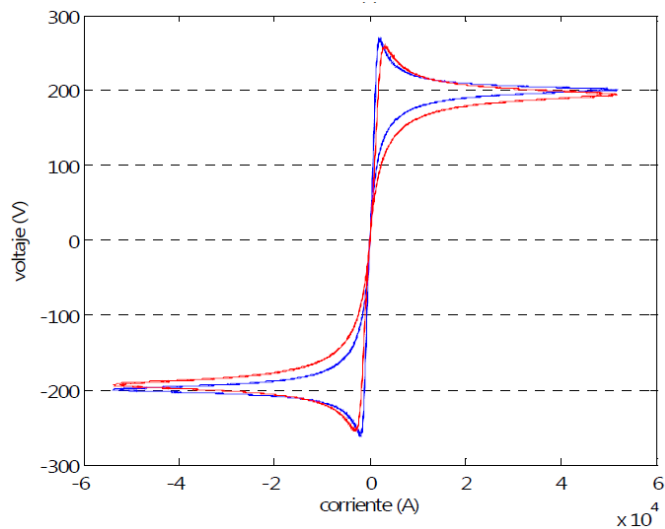


Figura 1.2 Curva característica V-I del modelo de un horno basado en las ecuaciones del principio de conservación de la energía o del balance de potencia [1]

- Modelo basado en el principio de conservación de la energía. Este modelo utiliza una ecuación diferencial no lineal que se fundamenta en el principio de conservación de la potencia, la cual captura la curva característica V-I, figura 1.2. Básicamente, esta ecuación describe el balance de la potencia desarrollada en el arco en función del radio de arco [16], [30], [39].
- Modelo de aproximación lineal por partes. Es un modelo relativamente básico que aproxima la característica real V-I de un horno de arco, figura 1.3, mediante ecuaciones lineales por tramos [21], [23].

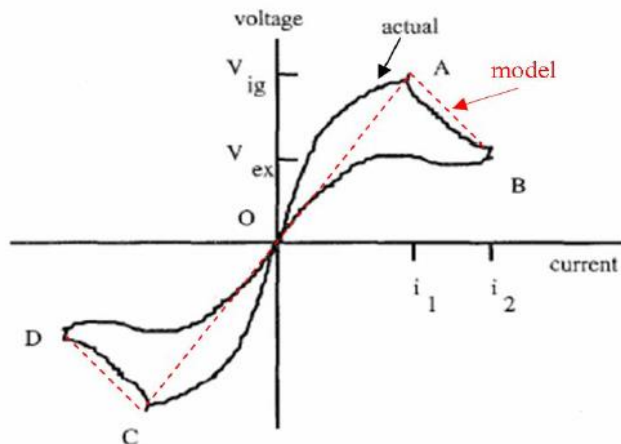


Figura 1.3 Curva característica V-I del modelo de aproximación lineal por partes del horno de arco [20].





Se puede observar que la curva V-I frecuentemente es utilizada para caracterizar la operación de la carga del horno.

Los modelos presentados en la literatura son paramétricos, es decir, están basados en las características de operación del horno y los cuales proporcionan las principales particularidades de su comportamiento eléctrico [36].

Respecto a los trabajos relacionados a los modelos del horno de arco eléctrico, a continuación, se mencionan los que están basados en el modelo utilizado en la simulación de este trabajo de tesis. El paper “Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker” [1] es un trabajo de investigación realizado en los últimos años que muestra la comparación de dos modelos de horno de arco; un modelo se fundamenta en las relaciones empíricas entre la longitud, voltaje y corriente de arco y el otro modelo es descrito mediante una ecuación diferencial no lineal basada en el principio de conservación de la energía. Se observa que ambos modelos son adecuados en el análisis del efecto flicker.

El modelo empírico del horno también aparece en el trabajo de grado titulado “Modelo de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker y su solución con métodos de compensación” [27], en donde es desarrollado el modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo que representa la operación del horno para análisis del efecto flicker y su solución con métodos de compensación (por ejemplo, el SVC). Este trabajo se sustenta principalmente en investigaciones que datan de la década de los 90's, las cuales pertenecen a los autores que aparecen en “Arc furnace model for the study flicker compensation in electrical networks” [2], “Atp simulation for arc furnace flicker investigation” [7] y “The effects of series inductors for flicker reduction in electric power systems supplying arc furnaces” [35].

Así mismo, un paper que de igual modo hace uso del modelo de resistencia no lineal es el que aparece en el trabajo “Harmonic and flicker analysis in arc furnace power systems” [31], el cual presenta una guía que puede evaluar con precisión los armónicos y el flicker que generan los hornos de arco eléctrico a través del programa ATP.

Por su parte, en el trabajo “Identificación de los parámetros de un modelo dinámico de horno de arco eléctrico basándose en la naturaleza estocástica del mismo” [37], es ocupado el modelo de resistencia dinámica, en el que es planteado un método de optimización con el fin de estimar sus parámetros, los cuales representan los valores más cercanos a los reportados en la literatura.





## 2. El horno de arco eléctrico

### 2.1 Introducción

El presente capítulo describe las características y el funcionamiento básico del horno, su equipamiento eléctrico y los principales disturbios del horno que pueden perjudicar la calidad de la energía. Por último, es presentado el circuito eléctrico del sistema de potencia del horno utilizado en la simulación en este trabajo.

### 2.2 Características del horno

A principios del siglo XIX Sir Humphrey Davy condujo una demostración experimental del arco eléctrico y más tarde Pepys investigo la soldadura. A finales del mismo siglo, Wilhem Siemens desarrollo los primeros hornos de arco para fusión de metales. Después, Paul Héroult, Paul Girod y Stassano, pusieron a punto los hornos de arco hasta llegar casi a lo que son en la actualidad. Existen hornos con capacidades de hasta 270 toneladas de material fundido, aunque se ha visto que puede ser más rentable y adecuado el de 100-150 t de capacidad y portes de entre 140 a 200 MVA, aproximadamente.

El horno de arco eléctrico, figura 2.1, en general, consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa o solera, de 15 a 30 mm de espesor aproximadamente, recubierto de material refractario que forma la bóveda o cuba que recibe el baño de acero líquido y la escoria (carbono, manganeso, silicio, fósforo, azufre). El resto del horno está conformado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para cargarla con chatarra a través de unas cestas especiales.

Además, la cuba del horno está equipada con una serie de orificios en donde se introducen los electrodos, generalmente tres, que son barras gruesas de grafito de hasta 760 mm de

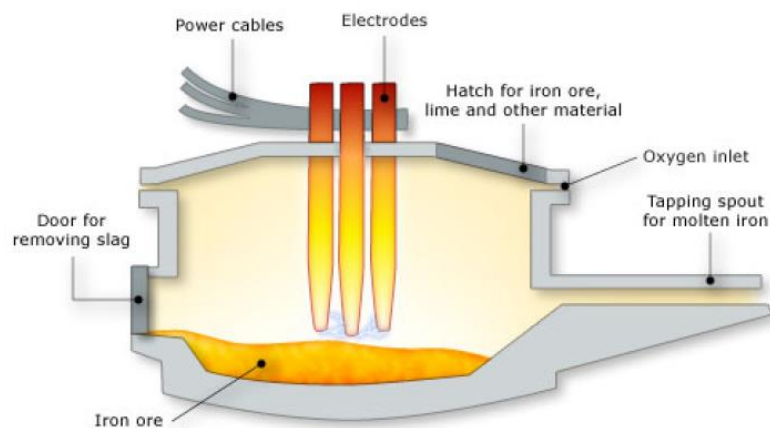


Figura 2.1 Representación gráfica del recipiente cilíndrico de un horno de arco eléctrico [15].



diámetro los cuales permiten el paso de altas corrientes sin que sean fundidos por completo.

Los electrodos son desplazados de tal modo que pueda ser regulada su distancia a medida que se van consumiendo y están conectados a un transformador que proporciona las condiciones adecuadas de voltaje y corriente para crear el arco eléctrico. El consumo de electrodos puede representar hasta el 10 % del costo total de la operación de un HAE.

Existe un orificio más en la bóveda que permite la captación de humos que son depurados convenientemente para evitar la contaminación del ambiente.

El horno va colocado en una estructura móvil que le permite oscilar para llevar a cabo el vaciado del baño de acero [32].

### 2.2.1 Materiales de carga

El hierro es un elemento químico metálico ubicado en los minerales de la corteza terrestre, el cual en estado puro no posee las propiedades de resistencia y dureza necesarias en las aplicaciones de uso común. Sin embargo, cuando el hierro es combinado con determinadas cantidades de carbono se obtiene un material denominado acero, cuyas propiedades varían en función de su contenido en carbono y de otros elementos de aleación (cromo, aluminio, níquel, entre otros) [32].

En general la materia prima fundamental en el proceso siderúrgico de la producción de acero a través del horno de arco, se puede clasificar en dos vías [32]:

- La chatarra férrea. Es procedente del desguace de; edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.
- El arrabio. Es una aleación de hierro y carbono en estado líquido y de otros componentes de impurezas. Este material es obtenido a partir del mineral hallado en la corteza terrestre en instalaciones equipadas con un alto horno.

### 2.3 Funcionamiento del horno

El principal objetivo en la operación de un horno de arco eléctrico es producir la máxima cantidad de toneladas de acero al mínimo costo. Por ejemplo, los encargados de operar los hornos deberán utilizar la máxima cantidad de potencia disponible en el menor tiempo posible, además de evitar los lapsos de pérdida de producción o reducirlos al mínimo [26]. El tiempo aproximado del ciclo de trabajo de un horno es de 2-3 horas para los mejores hornos de 100-130 toneladas [18].



La figura 2.2 muestra el ciclo de fundición típico de un horno. Un primer paso en la producción de acero mediante un HAE, es cargar la bóveda del horno con chatarra de acero previamente seleccionada y con otras materias primas. Luego de que el horno es cargado con la chatarra la bóveda es cerrada y la operación comienza haciendo bajar los electrodos para encender el arco eléctrico entre los electrodos y la chatarra. El calor generado debido al efecto Joule por los arcos eléctricos, proveen el medio para fundir el acero [26].

Las reacciones químicas que ocurren durante el proceso de fabricación del acero requieren de altas temperaturas superiores a los  $1000^{\circ}\text{C}$  [32]. Se estima que el calor

generado por el arco eléctrico del horno alcanza temperaturas de hasta  $3\ 000^{\circ}\text{C}$  con relación a valores superiores de corriente de 60 kA [29].

Frecuentemente, el horno es energizado y desenergizado durante su operación, debido principalmente a la inestabilidad del arco, lo que provoca condiciones especialmente hostiles a los interruptores los cuales operan el horno. Por lo regular, en los hornos de arco son usados los interruptores de vacío, debido a su baja necesidad de mantenimiento y larga duración de vida o los interruptores en baño de aceite (resina sintética).

Una vez que la chatarra es derretida, es conveniente una mayor transferencia de potencia para reducir el ciclo tap-to-tap (ciclo de trabajo), aumentando así la productividad [6] [27] [2].

La operación de un HAE puede ser dividida básicamente en dos etapas denominadas; etapa de fusión (fundición) y etapa de afino (refinado).

### 2.3.1 Etapa de fusión

En la etapa de fusión, el horno es cargado con chatarra metálica y otros materiales de aleación, de inmediato la bóveda es desplazada hasta cerrar el horno, los electrodos del horno descienden, los cuales son puestos en contacto con la chatarra y completan el circuito eléctrico que provoca de manera intencional un cortocircuito. Después, los electrodos se elevan y forman un arco eléctrico. El calor generado por el arco empieza a fundir el metal, permite el



Figura 2.2 Ciclo típico de fundición durante la producción de acero en un horno de arco eléctrico [41].



avance de los electrodos y perforan el material [32]. Durante esta primera fase el arco eléctrico es inestable. La longitud del arco varia como consecuencia del movimiento de la chatarra debido a la acción de las fuerzas electromagnéticas y al calor generado por el propio arco. Incluso, el arco puede ser extinguido con facilidad, de aquí que, en ocasiones es necesario repetir el proceso de encendido del arco. Cuando el arco esta formado, este puede ser controlado de tal modo que permanezca constante, por ejemplo, al ejercer un control con los brazos porta electrodos. El proceso de apagado y reinicio del arco eléctrico puede suceder de manera aleatoria o al azar y provocar cambios en la impedancia de la carga [30]. Esta fase se repite hasta completar la capacidad del horno [32].

El movimiento aleatorio del material de fusión tiene como consecuencia que no existan dos ciclos de forma de onda de voltaje y corriente de arco idénticos. Para tener una operación más estable se pueden ajustar las condiciones del sistema, por ejemplo, los parámetros del transformador.

### 2.3.2 Etapa de afino

Cuando la chatarra esta fundida en su totalidad, el acero líquido es sometido a este proceso de transformación físico químico denominado afino. La obtención del acero pasa por la eliminación de las impurezas encontradas en el arrabio o en la chatarra férrica, y por el control, dentro de unos límites especificados según el tipo de acero, de los contenidos de los elementos que influyen en sus propiedades. Primero se analiza la composición del baño de acero fundido, luego se procede a eliminar las impurezas (en forma gaseosa o trasladándolas del baño a la escoria) y después son agregadas las ferroaleaciones que ajustan la composición química deseada para el acero [30]. Esta es una fase que puede ser más estable, en donde las fluctuaciones de voltaje y corriente son menores a causa del material fundido [26].

### 2.4 El transformador de potencia

Uno de los equipos fundamentales en el sistema eléctrico del horno desde el punto de vista de funcionamiento, es el transformador de potencia, figura 2.3. El transformador de potencia reductor suministra energía al horno de arco eléctrico trifásico. Este cambia la corriente de alta tensión y baja intensidad que llega a la planta a corriente de baja tensión y alta intensidad que resulta conveniente para aprovechar el efecto Joule generado por el arco en el calentamiento y fusión de la materia prima.

Un horno moderno de fabricación de acero de tamaño regular puede tener un transformador de 60 MVA, con un voltaje secundario entre 300 y 900 volts y una corriente secundaria de hasta 100 kA [18].

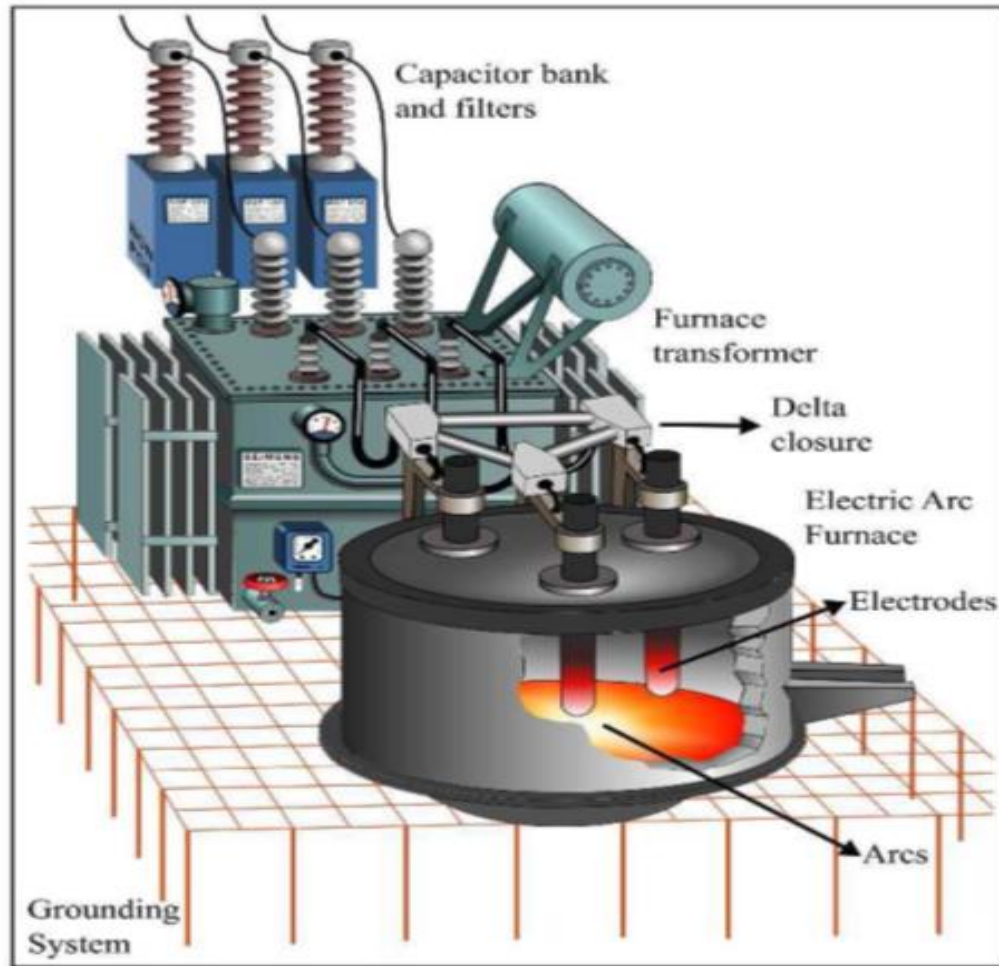


Figura 2.3 Representación del transformador de potencia que suministra a un HAE [36].

El transformador del horno puede estar conectado con un arreglo en estrella-delta, figura 3, con el fin de eliminar armónicos triples provenientes del horno.

Los requerimientos más importantes para el transformador del horno de arco son [26]:

- Amplio rango de regulación de tensión (taps).
- Alta impedancia de corto circuito.
- Capacidad de sobrecarga del 20% durante el proceso inicial de fusión.

## 2.5 Los electrodos

Los cables de potencia del horno con enfriamiento por agua, proveen la conexión flexible entre el secundario del transformador del horno y los electrodos. Los electrodos entregan la potencia eléctrica al horno en forma de arco eléctrico entre la punta del electrodo y la carga del horno sin que a pesar de su elevada temperatura se fundan. Por lo regular los hornos de arco operan con tres electrodos de grafito que puede llegar a tener 700 mm de diámetro, una





longitud de 3 a 12 m, los cuales son muy resistentes y densos, además de poseer una baja resistividad eléctrica.

## 2.6 El arco eléctrico

El arco es una descarga eléctrica en un gas caracterizada por una alta corriente y un bajo voltaje. En el arco es evidente el crecimiento de la densidad de corriente lo que causa un fuerte crecimiento en la temperatura debido al efecto Joule [26]. La columna cilíndrica creada que llamamos arco eléctrico, es el gas ionizado o plasma y puede generar temperaturas variables entre 4000 y 3000 °C que dependen de las condiciones del medio y de la corriente que circula por el arco.

En hornos de arco eléctrico, el arco puede ser extinguido en cada cruce por cero de la corriente, cuando esto ocurre, el voltaje del electrodo a la carga es aproximadamente igual al voltaje entre el secundario y el neutro en el transformador del horno [27]. La longitud del arco puede determinar la propia impedancia del arco y, por lo tanto, los parámetros restantes de la operación HAE. Es indispensable mencionar que el arco se emplea de tal modo que se aproveche la mayor potencia disponible [29].

## 2.7 Disturbios del horno en la red eléctrica

El termino calidad de la energía eléctrica, está relacionada con una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan las ondas de voltaje y corriente de un sistema de potencia en un instante y en un lugar determinado, es decir, a la calidad de las señales de voltaje y corriente. Por otra parte, este término también hace referencia a la continuidad o confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

La calidad de la potencia en un sistema eléctrico, y a su vez, los parámetros que la definen (variaciones en el tiempo de impedancia, voltaje, corriente y frecuencia) pueden verse afectados por diferentes tipos de perturbaciones que alteran la forma de onda del voltaje. Algunas de estas perturbaciones pueden ser:

- Armónicos
- Desbalance de alimentación trifásica
- Voltaje flicker y parpadeo
- Variaciones en la frecuencia
- Interrupciones y caídas de voltaje
- Presencia de corriente continua
- Sobrevoltajes





- Transitorios (por descargas atmosféricas y de maniobras)

La gran mayoría de los circuitos eléctricos y electrónicos (hornos y soldadores de arco, controladores de velocidad variables, PCs, etc.) que utilizan técnicas de modo de conmutación pueden ser representados como una carga no lineal o un generador de disturbios capaces de degradar la calidad del suministro eléctrico.

De manera individual el HAE es quizá la carga más difícil para un sistema de energía eléctrica de transmisión o subtransmisión y de distribución debido a las altas potencias que requiere para su funcionamiento. El horno es considerado una carga no lineal y variante en el tiempo lo que conduce a efectos adversos en la calidad de la potencia [31]. La conexión de este tipo de cargas puede afectar a otros equipos o maquinas en la misma instalación y en otras conectadas a través de distintos alimentadores en el mismo sistema de distribución. En la actualidad, los hornos de arco están diseñados para clasificaciones de entrada de potencia muy grandes y debido a la naturaleza no lineal del arco, los hornos pueden causar serios disturbios al sistema de potencia, principalmente:

- Armónicos
- Flicker de voltaje
- Flicker
- Desbalance entre fases
- Caídas de voltaje
- Sobrevoltajes

los cuales son parámetros característicos de la calidad de la energía.

Generalmente, la etapa inicial de fusión del HAE causa la mayoría de estos disturbios. A medida que la temperatura de la chatarra sube y se forma el acero líquido, las perturbaciones comienzan a disminuir. A continuación, se describen los disturbios que afectan la calidad de la energía eléctrica y que son generados por la operación del horno.

### 2.7.1 Desbalance de carga

En cuanto al sistema de potencia, el horno de arco trifásico es una carga no balanceada. Los mayores desbalances se presentan cuando una o dos fases están en cortocircuito y la otra fase en circuito abierto. Ya que, en el caso de que las impedancias no sean iguales y debido a las altas corrientes en el horno, las mínimas diferencias entre las impedancias de fase se pueden ver reflejadas en el desbalance de voltaje [27].



### 2.7.2 Voltaje flicker

El voltaje flicker es una perturbación del voltaje de suministro. En un sentido amplio, el voltaje flicker es una variación o fluctuación del voltaje que puede ser cíclica o aleatoria. El horno puede introducir flicker de voltaje en el PCC. El nodo de conexión común es un punto en el sistema público que es eléctricamente más cercano a la instalación afectada y a otras instalaciones que son o pueden ser conectadas, es decir, es un punto situado aguas arriba de la instalación considerada. Puesto que el voltaje flicker no está limitado al sistema eléctrico del HAE, puede afectar la red de AT, por lo tanto, varios clientes de MT y BT pueden verse perturbados por el flicker obligando a las empresas del suministro de energía a ocuparse de las fluctuaciones de voltaje.

El flicker de voltaje puede estar relacionado con las variaciones en la longitud del arco que a su vez causa variaciones en la impedancia de la carga del horno.

Algunos de los posibles efectos de las fluctuaciones de voltaje son: Flicker, pérdidas y fatiga en máquinas rotativas por variación del torque, pérdida de eficiencia en procesos que requieren estabilidad del voltaje, por ejemplo, en los hornos de arco.

### 2.7.3 Efecto flicker

El fenómeno de parpadeo o flicker consiste en variaciones perceptibles en la luminosidad de las lámparas debido a un cambio repentino en el voltaje de suministro, que puede afectar el sistema visual humano, dependiendo de su frecuencia e intensidad [40]. El cambio en la intensidad de la luz es debido al funcionamiento de cargas variables como hornos de arco, equipos de soldadura, grandes motores etc. Una de las principales causas del flicker es la conexión de hornos de arco al bus de alto voltaje de las redes de distribución, en donde el horno es capaz de producir estos disturbios. El efecto flicker puede provocar fatiga física y psíquica a los usuarios que hacen uso del sistema de iluminación que esté conectado cerca de la carga [7], [27].

Cuando el horno aproxima su amplitud y frecuencias cercanos al umbral de perceptibilidad humano aparece el flicker. El umbral de perceptibilidad es el menor nivel de voltaje de flicker para el cual una variación en la intensidad luminosa es discernible para la mayoría de la población. El ojo humano es especialmente sensible a las variaciones de luminosidad que ocurren cuando el voltaje de alimentación es modulado a frecuencias por debajo de 30Hz [26]. Las frecuencias correspondientes a la máxima sensibilidad del ojo humano son próximas a los 10 Hz. Por tanto, el HAE puede ser considerado una fuente de flicker en el rango de 10 a 30 Hz [29]. Específicamente, las variaciones de la corriente de carga y, por tanto, las variaciones del voltaje, son debido a los cambios cíclicos o aleatorios en la longitud del arco eléctrico, el



cual está relacionado con el movimiento de la chatarra metálica y la acción de las fuerzas electromagnéticas.

#### 2.7.4 Armónicos

El termino armónico está asociado a la distorsión de la forma de onda de origen sinusoidal ya sea de la tensión o de la corriente fundamentalmente debido al uso de cargas con impedancia no lineal, materiales ferromagnéticos y en general al uso de equipos que requieran conmutación en su operación normal. Mediante el análisis de Fourier, la distorsión puede ser descrita como una componente sinusoidal de frecuencia fundamental más otras componentes sinusoidales de frecuencia de orden superior y múltiplos de la frecuencia. Por ejemplo, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz) y séptima (420 Hz). Esta distorsión de las formas de onda de voltaje y corriente a causa de las corrientes de carga armónicas, es considerado uno de los principales disturbios que afecta la confiabilidad del sistema y en consecuencia la calidad de la energía. Las cargas eléctricas se pueden clasificar en lineales y no lineales (procedentes de la electrónica de potencia). Una carga lineal adquiere una corriente proporcional al voltaje de alimentación, por tanto, no origina perturbaciones de la forma de onda. Por otro lado, las cargas no lineales distorsionan la corriente consumida, si se le aplica un voltaje senoidal a una carga no lineal, la corriente no será directamente proporcional al voltaje y la forma de onda no será senoidal, dicho de otro modo, la corriente no senoidal consumida por una carga no lineal, es debido a la impedancia de los dispositivos que cambian en un ciclo completo de voltaje [39].

Los armónicos en el sistema eléctrico pueden generar problemas, por ejemplo:

- Errores de medición, funcionamiento incorrecto de protecciones.
- Disminución de la vida útil de los equipos, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, sobrecalentamiento de; cables, transformadores y motores.
- Corrientes excesivas en el neutro.
- Aumento de pérdidas de potencia activa.
- Sobrevoltajes en los condensadores.
- Fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito.

Actualmente, las redes eléctricas están obligadas a soportar la presencia de cargas no lineales, con elevado contenido de armónicos. Esta energía de distorsión asociada se traduce en energía o trabajo no útil [27].

La causa de los armónicos en un HAE está relacionada principalmente con la característica no lineal voltaje-corriente del arco eléctrico [31]. Los armónicos predominantes son el 3,5,7,9,11... decrecientes en magnitud a medida que aumentan en orden.



Como se mencionó anteriormente, en un horno de arco, las ondas de voltaje y corriente pueden ser desviadas considerablemente de los patrones sinusoidales simétricos [18], la corriente es más sinusoidal que la tensión, esta última está caracterizada por ondas cuadradas, de este modo el HAE puede considerarse como una fuente de armónicos de tensión [26].

La comprensión de los armónicos de corriente y de voltaje es de gran importancia tanto para el suministrador de energía, que puede prevenir los efectos adversos del estado estable no sinusoidal en una red determinada, como para los consumidores en lo que se refiere a la medición y el precio correspondiente de la energía eléctrica. Es posible que los componentes armónicos en la energía eléctrica suministrada perjudiquen a los consumidores elevando la energía facturada [18].

## 2.8 Circuito eléctrico del hae

Un sistema de energía eléctrica puede ser dividido en niveles de generación, transporte y distribución [4]. La interconexión de estos niveles es realizada en las subestaciones y centros de transformación, donde, además, están localizados los dispositivos de maniobra y protección del sistema [3]. El sistema eléctrico presenta cierta estructura que es utilizado no solo para describirlo sino también para modelarlo, simularlo, controlarlo y gestionarlo. Esta estructura básica permite descomponer las redes eléctricas en las subredes de transmisión y distribución de media y baja tensión.

Por otra parte, el modelo de circuito eléctrico es un modelo matemático de uso común que aproxima el comportamiento real de un sistema eléctrico. Los elementos que forman el modelo de circuito son denominados componentes de circuito ideales. Un componente de circuito ideal es un modelo matemático de un componente eléctrico real. Es importante que el componente de circuito ideal utilizado en un modelo de circuito represente el comportamiento del componente eléctrico real con un grado aceptable de precisión y de acuerdo con el tipo de aplicación que realizara. Una comparación entre el comportamiento deseado, que se obtiene de las especificaciones de diseño, y el comportamiento predicho, que se obtiene del análisis del circuito, puede conducir a mejoras en el modelo de circuito.

La interconexión de elementos de circuito ideales puede ser usado para predecir cuantitativamente el comportamiento de un sistema e implica describir la interconexión de los elementos mediante ecuaciones matemáticas. Para que las ecuaciones matemáticas sean útiles deberán ser expresadas en términos de magnitudes medibles. En el caso de los circuitos, dichas magnitudes son el voltaje y la corriente [43].

En su modo más simple, un circuito eléctrico de corriente alterna, figura 2.4, está formado por una carga eléctrica y una fuente que suministra energía. Mientras la fuente alimente la carga del horno con una cantidad de energía por unidad de tiempo o potencia eléctrica, la señal de voltaje forzara una señal de corriente a través del circuito. El circuito equivalente del

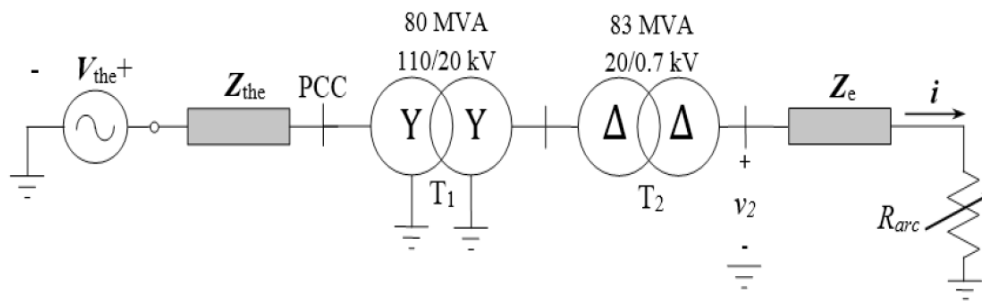


Figura 2.4 Circuito eléctrico equivalente unifilar del horno de arco [1].

horno de arco utilizado en el análisis de sus características eléctricas se puede simplificar y representar como el que aparece en la figura 2.4 [27].

En cuanto al fenómeno del arco eléctrico creado entre los electrodos del horno y la chatarra, este puede ser representado mediante una resistencia no lineal variable en el tiempo, figura 2.4.

Los sistemas trifásicos son utilizados para generar y transmitir potencia eléctrica, los cuales difieren de los sistemas monofásicos en que usan un conjunto de tres voltajes sinusoidales de ca en vez de uno. En general, si un sistema trifásico está balanceado se puede resolver considerando solo una de sus fases. Esto es que, los dispositivos y redes eléctricas que presentan una configuración trifásica, independientemente del régimen en estudio, sus modelos corresponden a circuitos con tres nudos por cada barra o punto de conexión. Ahora bien, en ocasiones, por el funcionamiento equilibrado de la red o por las características del análisis a realizar, el modelo de los dispositivos y de la red puede ser planteado y resuelto mediante modelos monofásicos equivalentes debido a que una vez que se sabe la solución de una fase, se pueden deducir las soluciones de las otras dos sin más cálculos que la suma o resta de un ángulo [referencia del libro de análisis de circuitos eléctricos] [4]. En este análisis se considera que las impedancias de los conductores que conectan los electrodos al secundario del transformador del horno están balanceadas, por tanto, este circuito puede resolverse mediante un modelo monofásico de horno de arco eléctrico.

Por otra parte, el modelado de cargas y de los diferentes componentes de una red eléctrica pueden seguir determinadas líneas que dependen del propósito de estudio. En general para reducir o simplificar los modelos y el tiempo de simulación, algunos elementos del sistema no son representados (por ejemplo, filtros y sistemas de compensación muy utilizados en la mayoría de este tipo de instalaciones), figura 2.5, y en su lugar se puede seguir una pauta [36]:



- Utilizar equivalentes que representen combinaciones serie y paralelos (equivalente de Thevenin), El teorema de Thevenin reduce un circuito a una fuente de voltaje y una resistencia. Su importancia se hace evidente cuando se trata de analizar un circuito como el del horno.
- Utilizar el modelo más simple de acuerdo a la aplicación
- Representar las características en terminales del elemento (voltaje y corriente).

A continuación, se describen los elementos del circuito del horno de arco eléctrico con referencia al diagrama de impedancias del circuito del horno, figura 2.6.

Una fuente ideal de voltaje es un elemento de circuito que mantiene un voltaje prescrito en bornes de sus terminales, independientemente de la corriente que fluya a través de esos terminales. La red de alimentación del horno en el nodo de conexión común, PCC, es modelada por un circuito equivalente de Thevenin que consta de una fuente de voltaje ideal trifásica de secuencia de fase positiva (secuencia de fase ABC) en serie con una impedancia de corto circuito RL (resistencia e inductancia)  $Z_{the}$ . La secuencia de fase es referida al orden en el cual ocurren los voltajes trifásicos. En la mayoría de las cargas balanceadas, la secuencia de fase no importa.

Después se encuentra la impedancia del transformador que conecta el horno a la línea de alto voltaje, la impedancia del transformador en la subestación del horno, la impedancia del circuito de conexión de los electrodos y por último la carga del horno de arco eléctrico.

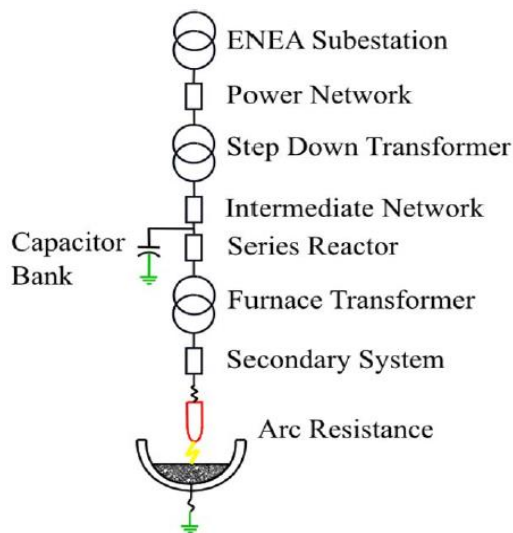


Figura 2.5 Ejemplo de un circuito equivalente de un HAE con sistemas de compensación (banco de capacitores y reactores en serie) [42].

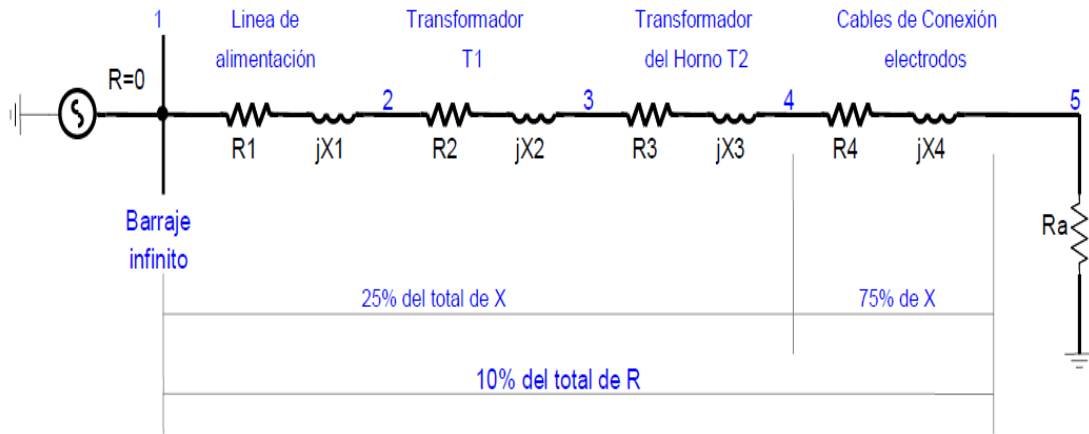


Figura 2.6 Diagrama de impedancias del circuito equivalente del horno de arco [27].







## 3. Modelo teórico del horno de arco eléctrico

### 3.1 Introducción

Una de las posibles cargas perturbadoras más importantes conectadas a un sistema de potencia son los hornos de arco. Este tipo de carga puede ser no lineal, variable en el tiempo e inestable con efectos desfavorables en la calidad de la energía del sistema de potencia al que está conectado. Diversos modelos matemáticos han sido presentados en la literatura para describir el comportamiento del horno. En este trabajo es utilizado un modelo relativamente sencillo y muy empleado en investigaciones relacionadas con la calidad de la energía; el modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo. Este modelo consiste en una resistencia que es obtenida mediante una relación empírica entre la longitud, voltaje y corriente de arco que captura con gran detalle la curva V-I. El comportamiento del HAE frecuentemente es caracterizado mediante la representación gráfica de esta curva. Además, se ha observado que este modelo proporciona las típicas formas de onda del voltaje y de la corriente del horno que pueden ser apropiadas en el estudio del efecto flicker y en el análisis armónico. El presente capítulo describe el modelo matemático de resistencia no lineal variable en el tiempo que es utilizado en la simulación de este trabajo y los distintos comportamientos dinámicos que pueden ser asignados en la variación en el tiempo de la longitud de arco para generar las fluctuaciones de voltaje.

### 3.2 Descripción de la curva característica V-I

Puesto que el propósito del modelo del horno es obtener una resistencia no lineal variable en el tiempo, cuyos valores son obtenidos una vez la característica V-I es descrita, el modelo de resistencia dinámica es estudiado del siguiente modo:

La característica teórica V-I del horno de arco, obtenida mediante una hoja de cálculo de Excel, es presentada en la figura 3.1. En la figura mencionada se pueden apreciar las zonas *I* y *I'*, las cuales indican el encendido del arco eléctrico en el semiciclo positivo y negativo, respectivamente de la corriente de arco. Las zonas *II* y *II'* representan la extinción del arco, en el semiciclo positivo y negativo respectivamente de la corriente de arco

$V_{at}$  es el voltaje de arco umbral que indica el voltaje de arco correspondiente al máximo valor de corriente, es decir, la caída de voltaje en un arco eléctrico para altos valores de corriente [27].

A continuación, se presenta la ecuación (1) que captura con gran precisión la curva característica  $V_a - I_a$  del arco eléctrico del horno de la figura 3.1:

$$V_a(I_a) = V_{at} + \frac{c}{D+I_a} \quad (3.1)$$

donde:

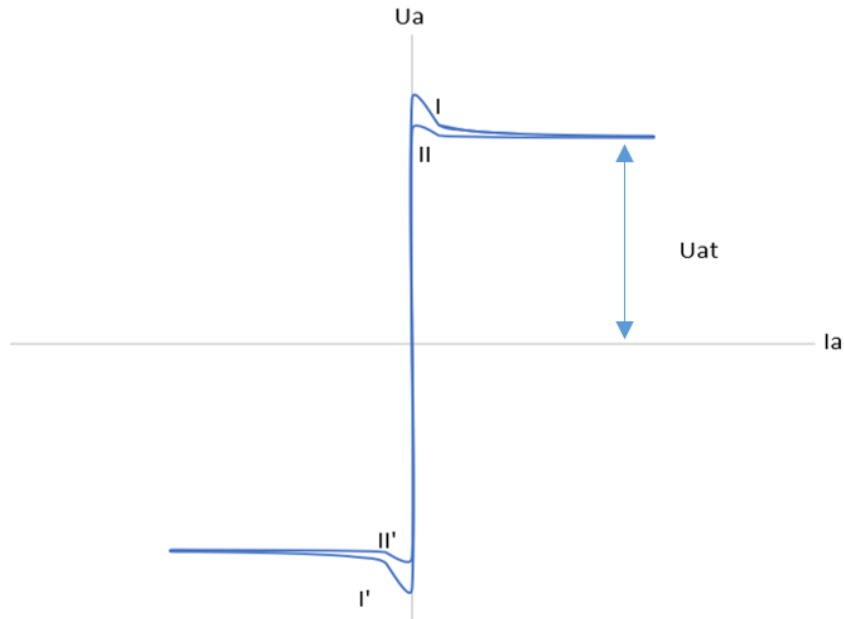


Figura 3.1 Curva característica teórica V-I del modelo de resistencia no lineal del horno de arco.

$V_a$  es el voltaje de arco.

$I_a$  es la corriente de arco

$V_{at}$  voltaje de arco umbral que puede ser positivo (semiciclo positivo) o negativo (semiciclo negativo) correspondiente al máximo valor de corriente ( $\pm I_{max}$ )

Los valores de  $C$  y  $D$  ( $C_I$ ,  $D_I$  y  $C_{II}$ ,  $D_{II}$ ), ver tabla 3.1, están relacionados con la evolución de la corriente del arco, es decir, dependen del incremento o decremento de la corriente de acuerdo con la curva V-I. Por ejemplo, cuando el arco es encendido (zona  $I$  o  $I'$ )  $C = \pm C_I$  y  $D = \pm D_I$  (+ para el semiciclo positivo y – para el semiciclo negativo). Después, a medida que la corriente crece, el voltaje de arco tiende al voltaje umbral  $\pm V_{at}$ . Cuando la corriente alcanza su máximo valor ( $\pm I_{max}$ ) y comienza a decrecer, los valores cambian ahora a  $C = \pm C_{II}$  y  $D = \pm D_{II}$  (+ para el semiciclo positivo y – para el semiciclo negativo).



la (kA)	Vat (V)	C (kW)	D (A)
0	238	190	5000
30000	205.42857	190	5000
60000	202.92308	190	5000
90000	202	190	5000
90000	200.41053	39	5000
60000	200.6	39	5000
30000	201.11429	39	5000
0	207.8	39	5000
0	-238	-190	5000
-30000	-205.42857	-190	5000
-60000	-202.92308	-190	5000
-90000	-202	-190	5000
-90000	-200.41053	-39	5000
-60000	-200.6	-39	5000
-30000	-201.11429	-39	5000
0	-207.8	-39	5000

Tabla 3.1 Valores de las variables y constantes de la curva V-I en un ciclo completo.

Estos valores de C y D se han determinado de acuerdo a las características reales de un horno de arco. Con referencia a una longitud de arco, se tiene que:  $V_{at} = 200 V$ ,  $C_I = 190 kW$ ,  $C_{II} = 39 kW$ , mientras que  $D_I$  y  $D_{II}$  tienen el mismo valor de 5000 A [7].

Cuando el arco es inestable, este se apaga en el cruce por cero de la corriente, por tanto, la condición  $I_a = 0$  expresa los valores de voltaje de arco de encendido y de extinción, que son  $V_s$  y  $V_e$  respectivamente, en el semiciclo positivo.

Los voltajes de encendido y extinción del arco son obtenidos con las ecuaciones [25]:

$$V_s = V_{at} + \frac{C_a}{D_a} \quad (3.2)$$

$$V_e = V_{at} + \frac{C_b}{D_b} \quad (3.3)$$

con  $V_s$  mayor que  $V_e$ , ver figura #. Para el semiciclo negativo estos voltajes cambian de signo.



### 3.3 Descripción de la resistencia no lineal

La resistencia es la oposición al movimiento de la carga (electrones) o al flujo de corriente. Cuanto más grande sea la oposición, es decir, entre mayor sea la resistencia, más pequeña será la corriente para un determinado voltaje aplicado ya que la corriente depende del voltaje y de la resistencia. Dicho de otro modo, la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia, este enunciado es conocido como la ley de Ohm.

Las variables de entrada del modelo del horno son la corriente y el voltaje en el punto de conexión del horno. Con referencia a la figura del circuito del HAE 2.6, en donde la carga del horno es la resistencia no lineal, en el tiempo  $t_i$ , la corriente del circuito es determinada y luego es derivada, evaluando la caída de voltaje en la carga de la resistencia  $R_c$  correspondiente a la resistencia del electrodo.

La resistencia del arco, del horno  $R_a$ , es determinada utilizando la ecuación:

$$R_a = \frac{V_a}{I_a} \quad (3.4)$$

### 3.4 Comportamiento dinámico de la resistencia no lineal

Las variaciones rápidas de la corriente que absorbe el horno de arco durante el tiempo de fusión están relacionadas con las variaciones en la longitud del arco que son causadas principalmente por ajustes de chatarra, fuerzas electromagnéticas y el desplazamiento variable arco-electrodo. La compleja naturaleza de estos fenómenos no favorece un enfoque físico para el estudio de la variación de la longitud de arco, de ahí que, algunas investigaciones del flicker se han realizado sobre la base de supuestos comportamientos periódicos [2] aleatorios [27] y caóticos [39]:

Comportamiento periódico del horno de arco. Es un primer acercamiento al comportamiento real del horno, el cual considera que la longitud de arco está sujeta a variaciones de tiempo en forma sinusoidal, con una frecuencia elegida adecuadamente en la banda de mayor perceptibilidad de flicker. El rango de valores típicos de flicker es de 0.5-30 Hz. Esta suposición puede estar asociada físicamente con el efecto de ondas de presión sobre la superficie del bala creadas por fuerzas electromagnéticas de las corrientes de arco que tienden a crear variaciones en la longitud del arco de naturaleza senoidal. Este comportamiento puede representar una condición de trabajo anormal para los hornos, además posee la ventaja de ser sencillamente manejable a través de la simulación por software y requiere simulaciones de corto tiempo. Este supuesto es una primera aproximación del comportamiento real de un horno de arco.



### 3.5 Resistencia no lineal variable en el tiempo

Siempre que la longitud del arco  $l$ , no cambie en el tiempo, la característica voltaje-corriente permanecerá invariable en el tiempo, en consecuencia, el modelo no reflejara el flicker. No obstante, los armónicos de voltaje y corriente se verán reflejados a causa de la no linealidad intrínseca del arco.

Puesto que uno de los propósitos del modelo de resistencia dinámica es simular las causas de la generación del efecto flicker, es decir, las fluctuaciones de voltaje, la característica V-I deberá experimentar variaciones en el tiempo correspondientes a una dependencia del tiempo de la longitud del arco. Con referencia a la figura 3.1, la relación en función de la longitud de arco se haya con la siguiente ecuación:

$$V_{at}(l_a) = A + Bl_a \quad (3.5)$$

donde:

$l_a$  es la longitud de arco real en cm

$A$  es una constante que considera la suma de caídas del voltaje en los electrodos y tiene un valor aproximado de  $40 V$ .

$B$  es una constante que representa la caída de voltaje por unidad de longitud del arco ( $B \approx 10 V/cm$ ) [29].

En general, el voltaje de arco correspondiente a una longitud de arco es asumido con la siguiente ecuación:

$$V_a(I_a) = k V_a(I_a) \quad (3.6)$$

con

$$k = \frac{V_{at}(l_a)}{V_{at}(l_{a0})} = \frac{A+Bl_a}{A+Bl_{a0}} \quad (3.7)$$

donde

$V_{a0}$  es el voltaje de arco correspondiente a la condición de referencia de máxima longitud de arco.

$l_{a0}$  es la longitud de arco relevante a la condición de referencia de máxima longitud de arco

$k$  genera la variación de la longitud de arco y es un parámetro que proporciona la relación entre el voltaje de arco umbral correspondiente a una longitud  $l_a$  y la correspondiente a una máxima longitud de arco  $l_{a0}$



En la simulación del modelo del horno  $k$  es configurada como una variable de entrada que permite realizar simulaciones con longitud de arco constante o variable en el tiempo, luego de que la ley de variación en el tiempo adecuada haya sido definida.

### 3.6 Resistencia no lineal con ley sinusoidal

El modelo de resistencia no lineal mencionado anteriormente, ecuaciones (1)(5)(6), puede ajustarse a un enfoque periódico asignando las leyes apropiadas a la longitud del arco.

Para aproximarse al comportamiento de flicker periódico, se puede realizar asignando a la longitud del arco una ley sinusoidal a una frecuencia sensible a la percepción del flicker. Una ley sinusoidal es elegida en un rango de frecuencia de 5 a 30 HZ, ya que son valores típicos del flicker. Con respecto a la ecuación (7), la ley de variación en el tiempo de longitud del arco es expresada con la siguiente relación.

$$l_a(t) = l_{a0} - \frac{\Delta l_a}{2}(1 + \sin(\omega t)) \quad (3.8)$$

donde:

$\Delta l_a$  es la máxima variación de longitud de arco

Las variaciones en el tiempo de la característica v-i del arco provienen de las ecuaciones (5)

(6) (7):

$$V_a(I_a) = k(t) V_{a0}(I_a) \quad (3.9)$$

Con

$$k(t) = \frac{A + B l_a(t)}{A + B l_{a0}} = 1 - \frac{B \frac{\Delta l_a}{2} (1 + \sin(\omega t))}{A + B l_{a0}} \quad (3.10)$$





## 4. El programa Atpdraw

### 4.1 Introducción

ATPDRAW es un editor gráfico de la versión ATP (Alternative Transients Program) del programa EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) comúnmente utilizado en la simulación de transitorios (electromagnéticos y electromecánicos) y en la simulación de los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos.

En la interfaz de AtpDraw, figura #, el usuario puede construir el modelo digital del circuito eléctrico mediante el uso del mouse y seleccionando los componentes que aparecen en los menús, para esto, el editor gráfico genera el archivo de entrada ATP en el formato apropiado basado en la información que el usuario ingresa al programa. AtpDraw permite el modelado jerárquico, esto significa que puede reemplazar un grupo de objetos por un icono en un número ilimitado de capas.

El editor gráfico Atpdraw es muy valorado por los nuevos usuarios de ATP-EMTP y es una excelente herramienta con fines educativos. No obstante, la capacidad del modelado multicapa convierte a AtpDraw en un potente software de simulación destinado a los profesionales en el análisis de transitorios de sistemas de energía eléctrica.

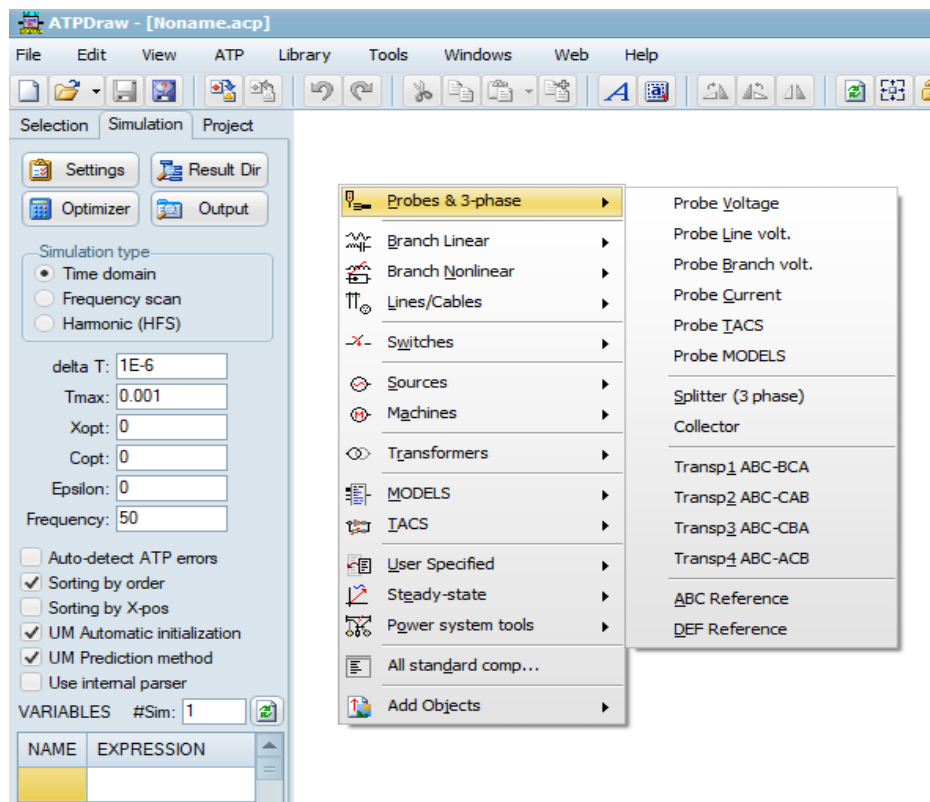


Figura 4.1 Espacio de trabajo (workspace) de la Interfaz gráfica del simulador para transitorios electromagnéticos ATPDRAW.





El programa AtpDraw se ha utilizado para resolver una gran variedad de problemas en estudios relacionados con la calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia [26]. En el análisis de modelos de horno de arco eléctrico, se ha observado que uno de los softwares de simulación más aceptados por la comunidad es el EMTP y por tanto será el programa que se utilizará en este trabajo de tesis.

## 4.2 ATP-EMTP

Debido a la necesidad de contar con información detallada relacionada al comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia, han surgido herramientas computacionales y métodos numéricos que permiten analizar los eventos que ocurren en el sistema eléctrico. Inicialmente para el análisis de sistemas eléctricos ante eventos transitorios se disponía de los Transient Network Analyzer (TNA), figura 4.2, que básicamente permitían un análisis analógico de transitorios electromagnéticos mediante la interconexión de dispositivos a escala que permitían simular la red eléctrica real.

En los años 60's, el profesor Hermann Dommel inicio la creación del EMTP El programa se desarrolló en el dominio público en la Bonneville Power Administration (BPA) de los Estados Unidos de América antes de la iniciativa comercial en 1984 por el grupo de coordinación de desarrollo de EMTP y el Instituto de Investigación de Energía (EPRI). El inicio de ATP data a principios del año 1984 por los Doctores W. Scott Meyer y Tsu-Huei Liu a partir de una copia del EMTP del dominio público de BPA. Desde entonces, ATP se ha desarrollado continuamente mediante contribuciones de algunas universidades y compañías internacionales para constituir lo que hoy en día es ATP-EMTP. Este software es reconocido a nivel mundial. En la actualidad existen grupos de usuarios en distintas partes

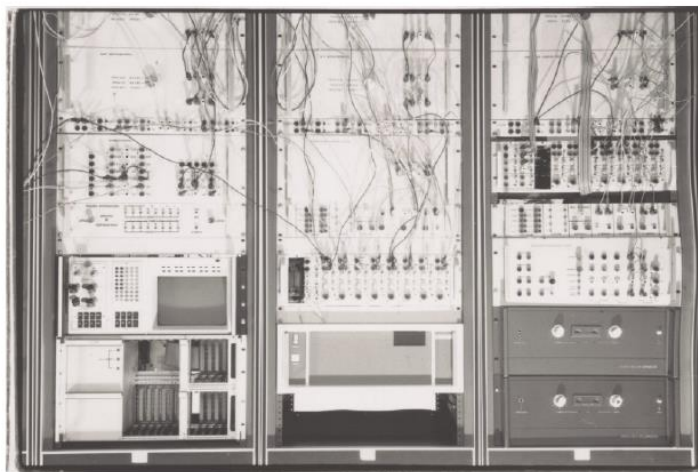


Figura 4.2 Antiguo simulador analógico “Transient Network Analyzer” para el análisis de transitorios en la red eléctrica [10].



del mundo con la finalidad de transferir el programa y facilitar la información para el uso adecuado del ATP [8].

Diferentes características destacan al EMTP que lo hacen único, una de estas características es la cantidad de elementos de red preprogramados a través de sus modelos matemáticos entre los cuales se encuentran las Líneas de transmisión, Maquinas síncronas y asíncronas, transformadores, entre otros, que han sido validados con pruebas de campo. Una segunda característica, que se mencionó anteriormente, es la capacidad de modelar redes híbridas: esto es, combinar redes eléctricas con sistemas de control en forma interactiva a través del uso de los Transient Analysis of Control System (TACS) o a través de programación estructurada, MODELS.

#### 4.2.1 Principio de operación

Se trata de un software que permite simular, de modo digital, fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica con propósitos de diseño (especificaciones de equipos y definición de parámetros fundamentales).

En general, un transitorio es un voltaje o corriente de carácter temporal o de transición. Los transitorios pueden ocurrir en los circuitos capacitivos y en los inductivos. Los transitorios ocurren siempre que cambien las condiciones del circuito, por ejemplo, la aplicación repentina de voltaje, conectar o desconectar un elemento de circuito o el mal funcionamiento de un componente. Los transitorios no duran mucho, por lo general solo una fracción de segundo, algunos son deseables y útiles, otros ocurren en condiciones anormales y son potencialmente destructivos por naturaleza. Un ejemplo claro es la caída de un rayo que impacta en una línea de potencia, el voltaje de la línea que pudo haber sido de algunos miles de volts antes del golpe, aumenta de manera momentánea a unos cientos de miles de volts o más, y luego disminuye con rapidez, lo mismo sucede con la corriente. Este es un ejemplo de un transitorio bastante severo.

A través del EMTP, se pueden plantear y resolver una gran variedad de escenarios que ocurren en las instalaciones eléctricas.

Esta herramienta fue diseñada para analizar individualmente y en su conjunto, cada uno de los elementos que componen un sistema eléctrico, al mismo tiempo que los sistemas de control asociados a los equipos eléctricos [3].

En ATP se pueden predecir variables de interés dentro de las complejas redes de energía eléctrica como funciones del tiempo. En general, la regla de integración trapezoidal es utilizada para resolver ecuaciones diferenciales de los elementos del sistema en el dominio del tiempo [10].

La biblioteca de ATP posee modelos que incluyen:



- Elementos R, L, C.
- Elementos con parámetros concentrados y distribuidos.
- Interruptores ordinarios, interruptores dependientes del tiempo y del voltaje, interruptores de conmutación estadística, interruptores controlados por TACS/MODELS.
- Fuentes analíticas: paso, rampa, sinusoidal, funciones de aumento exponencial, fuentes definidas por TACS/MODELS.
- Maquinas rotativas: maquina síncrona trifásica, modelo de maquina universal.
- Transformadores
- Pararrayos
- Líneas y cables de transmisión.

Los componentes mencionados son parametrizables y permiten flexibilizar sus características, de este modo, pueden ser adecuados a las variaciones requeridas para modelizar los diferentes elementos que se pueden hallar en el sistema eléctrico. El usuario puede incluir características no lineales en las resistencias, introducir interruptores con tiempos de operación basados en; estadística, definidos por el usuario, operados por control de otras variables, etc.

Sin embargo, algunos componentes no están disponibles en la librería de ATP, para compensar este inconveniente el usuario del programa tiene la ventaja de crear modelos complejos mediante el uso de los módulos de simulación integrada (TACS Y MODELS) [20].

La comunicación de ATP con TACS (Sistemas de control del análisis transitorio) y MODELS (lenguaje de programación), permite el modelado de sistemas de control y componentes con características no lineales, por ejemplo, el arco eléctrico en su sistema de potencia. Los sistemas dinámicos sin red eléctrica también pueden ser simulados utilizando únicamente las herramientas de TACS Y MODELS.

#### 4.2.2 Módulos de simulación integrada

TACS es un módulo de simulación para el análisis de sistemas de control en el dominio del tiempo. La programación a través de TACS utiliza la representación de diagramas de bloques de los sistemas de control que son resueltos mediante ecuaciones diferenciales y algebraicas relacionadas. Los elementos que permiten modelar los diagramas de bloques en TACS son:

- Señales de entrada, por ejemplo: impulsos, señales escalón, sinusoidales, voltaje de nudo, intensidades de los interruptores, etc.
- Variables suplementarias lógicas y algebraica, utilizando los operadores estándares y funciones de librerías FORTRAN
- Sumadores o bloques de orden cero, tipo:



- $SALIDA = GANANCIA * \Sigma(ENTRADAS)$ .
- Bloques representados por su función de transferencia en  $s$  (variable de Laplace) que siga la regla:
- $SALIDA = GANANCIA * \Sigma(ENTRADAS) * G(s)$ .
- Limitadores estáticos o dinámicos, con los valores límites constantes o variables, aplicados en las funciones de transferencia y en los bloques de orden cero.
- Dispositivos de aplicación especial, por ejemplo: medidores de frecuencia, triggers, retardos, digitalizadores, selectores de señal, acumuladores, contadores, etc.

La comunicación entre la red eléctrica y TACS es establecida mediante el intercambio de señales como: voltaje de nodo, corriente de conmutación, estado de conmutación, resistencia variable en el tiempo, fuentes de voltaje y corriente, etc.

MODELS. En ATP es un lenguaje de programación de propósito general para la representación y el estudio de sistemas variantes en el tiempo con características especiales. Los ficheros MODELS son creados de forma independiente al programa principal. La descripción de cada modelo es habilitada utilizando una sintaxis de contexto local basada en palabras clave. Su estructura es muy similar a la de otros lenguajes de programación, como por ejemplo FORTRAN, con sentencias del tipo FOR, IF, WHILE etc.

Rutinas de soporte o rutinas de apoyo. Son productos que forman parte del programa que ayudan a los usuarios en la conversión entre el formato de datos de los fabricantes y los requeridos por el programa, o para aproximar los parámetros eléctricos de; líneas y cables a partir de datos geométricos (y de materiales), cálculo de transformadores, modelización de pararrayos, etc. Algunos de los módulos de soporte en ATP son:

- Cálculo de parámetros eléctricos de líneas aéreas y cables mediante módulos de programa COSNTANTES DE LINEA, CONSTANTES DE CABLES y PARAMETROS DE CABLE.
- Generación de datos de entrada del modelo de línea dependiente de la frecuencia (Semlyen, J. Marti, modelos de línea Noda).
- Cálculo de datos para modelos de transformadores (XFORMER, BCTRAN).

### 4.2.3 Aplicaciones

Están permitidos los análisis de disturbios simétricos o asimétricos, fallas, sobrevoltajes, y varios tipos de operaciones de conmutación, por ejemplo, conmutación de válvulas. Además, se admite el análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia utilizando el método de inyección de corriente armónica.

Estas son algunas de las aplicaciones para las que resulta especialmente útil ATPDRAW:



- Sobretensiones atmosféricas, temporales y de maniobra.
- Análisis de faltas.
- Análisis de armónicos.
- Conexión/desconexión de transformadores, reactancias y condensadores.
- Arranque de motores.
- Estabilidad transitoria.
- Coordinación de aislamiento.
- Análisis y ensayo de protecciones.
- Transporte en corriente continua.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva: STATCOM, SVC, UPFC, TCSC.
- Ferro-resonancias.
- Regímenes estacionarios sinusoidales, incorporando tanto elementos lineales como no lineales.
- Simulación del control de las máquinas y del sistema de potencia.

#### 4.2.4 Capacidad

En cuanto a la capacidad de ATP, este permite la resolución de sistemas con estructuras de hasta 6000 nodos o buses, 10000 ramas, 900 fuentes, 1200 interruptores, 90 máquinas síncronas y hasta 2250 elementos no lineales.

#### 4.3 Descripción del espacio de trabajo

El paquete ATP-EMTP para el análisis de régimen transitorio integra varias aplicaciones. Dentro de las que se incluyen diferentes versiones del compilador ATP y programas complementarios destinados a simplificar el uso del software; editores de texto, un editor gráfico de circuitos eléctricos (ATPDRAW) y aplicaciones específicas para visualizar las gráficas de los resultados.

La interacción entre los principales programas que conforman la interfaz de ATP-EMTP es apreciada en la figura 4.3. La figura indica que los programas pueden ser utilizados de diversos modos. Por ejemplo:

- En ATPDRAW se construye el modelo gráfico del sistema a simular (fichero de extensión .adp o .cir).
- Del modelo gráfico se consigue el fichero fuente de extensión .atp que posee el código del modelo en un formato adecuado para el compilador
- ATP. El fichero .atp también puede ser generado mediante un editor de textos (PFE32).

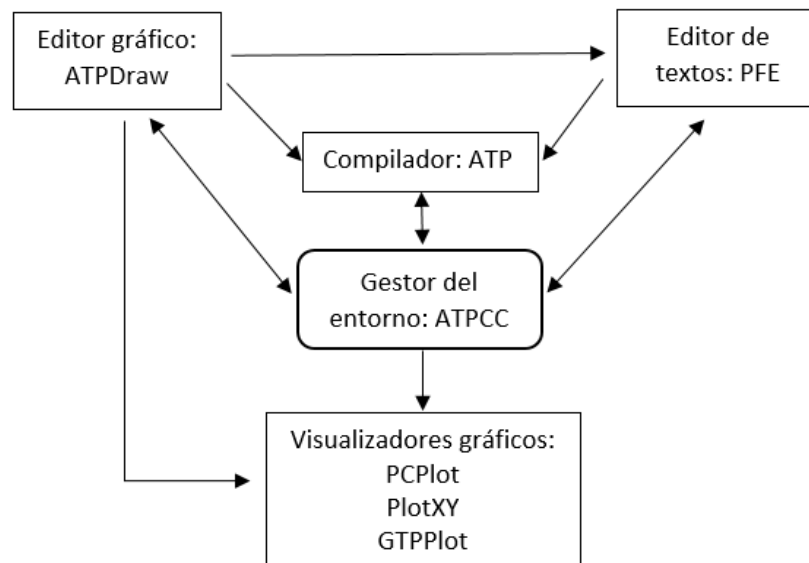


Figura 4.3 Esquema de comunicación entre los programas del ATP EMTP.

- Se ejecuta el compilador ATP utilizando como entrada el fichero. atp, luego, se obtienen los ficheros de extensión .lis y .pl4 donde se registran los resultados de la simulación
- Al final, se pueden visualizar los resultados de la simulación. Para visualizar los datos registrados en el fichero de extensión .lis es utilizado un editor de textos (PFE32), mientras que para monitorear los resultados almacenados en el fichero de salida grafica .pl4 utiliza el visualizador grafico apropiado.

#### 4.3.1 Gestor del entorno ATPCC

ATP Control Center (ATPCC) es la interfaz que el usuario puede utilizar para manejar el conjunto de programas que conforman la paquetería ATP-EMTP. Desde ese espacio se puede acceder a ATPDRAW, al editor de textos PFE32, a los graficadores (PCPlot, PlotXY, GTPPlot) o hacer que funcione directamente el compilador ATP. Las características más relevantes de esta aplicación, entre otras, son:

- Puede ejecutar ficheros de ATP, ATPDRAW, PCPlot, haciendo doble clic sobre el nombre del fichero.
- Permite definir proyectos de casos de simulación.



### 4.3.2 El compilador ATP

Se trata del núcleo fundamental del programa encargado de procesar los datos del circuito objeto de estudio. El compilador ATP conduce ficheros de tipo texto de extensión .dat o .atp que contienen la información del circuito. A partir de estos ficheros, las simulaciones que ejecuta ATP generan archivos de datos, denominados ficheros de salida .lis y .pl4.

Con los componentes de ATP (elementos eléctricos básicos, módulos de simulación integrados, subrutinas de apoyo) puede crear modelos, que pueden representar diferentes equipos hallados en los sistemas eléctricos. El arreglo de estos modelos depende en gran medida de las hipótesis que el usuario asuma, del conocimiento del modelo, de las características del sistema, así como de los fenómenos a simular. Los componentes eléctricos básicos en ATP son: resistencias, inductancias, condensadores, interruptores y fuentes que, con diversos arreglos, permiten el desarrollo de una gran variedad de modelos de sistemas eléctricos.

### 4.3.3 Editor de textos PF32

El desarrollo del procesador gráfico ATPDRAW simplifica la creación de ficheros compilados por ATP. No obstante, algunos usuarios más experimentados requieren del uso de un editor de textos que permita interactuar con ficheros de entrada a ATP (.atp o .dat) o de salida (.lis). La edición de estos ficheros puede permitir:

- Modelar casos más complejos
- Corregir errores
- Interpretar los ficheros
- Interpretar los resultados de la simulación grabados en el fichero de salida .lis
- Manejar los resultados en forma numérica.

### 4.3.4 Visualizador gráfico PLOTXY

Los resultados obtenidos con el programa ATP son almacenados en ficheros de salida con extensión .pl4. Estos ficheros se crean de modo automático y son designados con el mismo nombre del fichero. atp, de este modo se pueden visualizar los resultados con programas de salida gráfica. ATP-EMTP considera tres programas de este tipo: PCPlot para Windows, GTPPLOT y PlotXY, figura 4.4. A continuación, es descrito el graficador disponible de la aplicación de esta tesis:

PlotXY puede representar hasta ocho curvas en la misma gráfica, representar en la misma hoja curvas de tres ficheros distintos, representar las curvas en función del tiempo, hacer



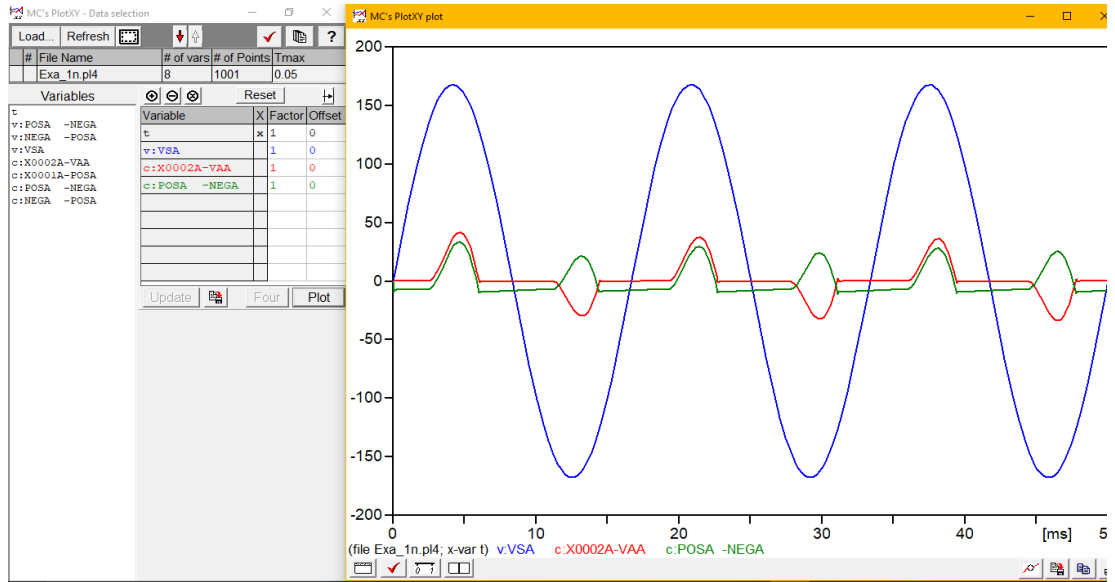


Figura 4.4 Espacio de trabajo del graficador PLOTXY del ATP.

una representación X-Y, capacidad de escalado automático de ejes, acceder al valor instantáneo de forma numérica, exportar datos, procesar curvas trazadas: operaciones algebraicas, cálculo de coeficientes de la serie de Fourier, etc.

#### 4.4 ATPDRAW

Inicialmente el programa ATP-EMTP fue escrito en lenguaje fortran, por lo que la interacción del usuario con el programa es mediante un archivo rígido que debe cumplir con ciertas normas de dicho lenguaje. Actualmente, para facilitar el uso de este programa de simulación, se ha desarrollado una interfaz gráfica, ATPDRAW, la cual permite dibujar el diagrama unifilar de la red eléctrica, así como también el diagrama de bloques correspondiente al sistema de control, a través de la conexión de componentes gráficos que aparecen en la librería de ATP en donde se incorporan un amplio abanico de elementos estándar predefinidos. Sus parámetros característicos se definen mediante sus correspondientes ventanas de dialogo, figura 4.5, y se conectan mediante el mouse.

El usuario puede crear sus propios modelos usando las opciones Data Base Module y \$INCLUDE. Asimismo, es posible trabajar en varios circuitos al mismo tiempo y copiar información de unos a otros, figura 4.6.

AtpDraw posee un diseño estándar de Windows en el que se encuentran disponibles todo tipo de funciones de edición de circuitos: copiar/pegar, agrupar, rotar, exportar/importar, deshacer/rehacer. Algunas de las aplicaciones integradas de AtpDraw son: editor de textos



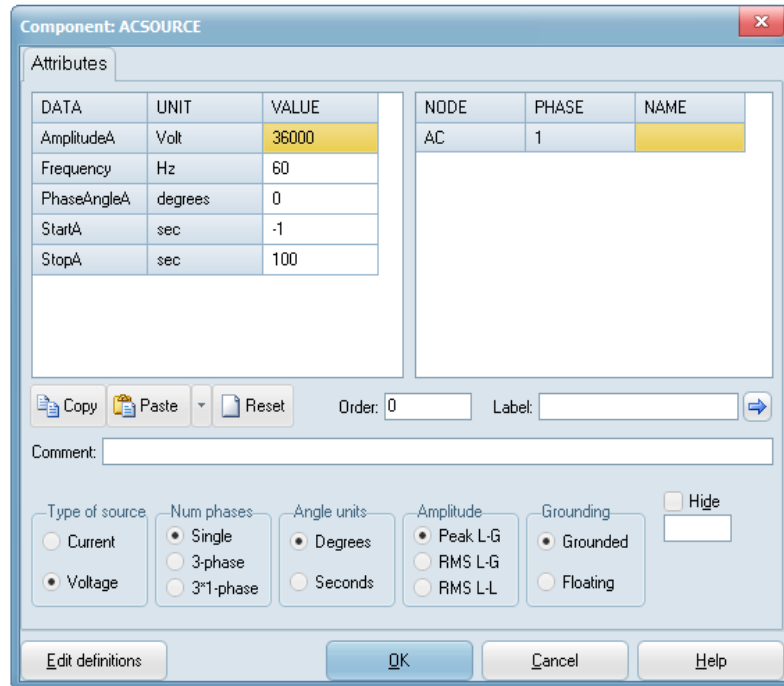


Figura 4.5 Ejemplo de una ventana de dialogo en ATPDRAW de una fuente de voltaje trifásico.

integrado para la edición de archivos ATP, visor de texto para mostrar el archivo tipo LIS de salida de ATP, verificación de archivos LIS con cadenas de activación para detectar errores de simulación y un visualizador gráfico.

El programa administra el nombre de los nodos de circuito, sin embargo, el usuario puede asignar un nombre a los nodos de su interés.

El circuito a construir se almacena en el disco en un archivo de proyecto que incluye todos los componentes y las opciones requeridas para ejecutar la simulación. El archivo del proyecto está en formato comprimido, de este modo, compartir archivos con otros usuarios es muy simple [8][10].

Los circuitos que se construyen de modo gráfico se guardan en ficheros con extensión .adp o .cir y se pueden convertir directamente a ficheros de texto con extensión .atp. ATPDRAW puede activar otras aplicaciones, por ejemplo, compilar los ficheros .atp previamente creados o graficar los resultados a través de las diferentes aplicaciones graficas.

#### 4.5 Configuración de los parámetros de simulación

Previo a la simulación de los circuitos deberán ser ajustados los parámetros o settings del proceso de simulación. Mediante estos parámetros son definidas las condiciones o ajustes

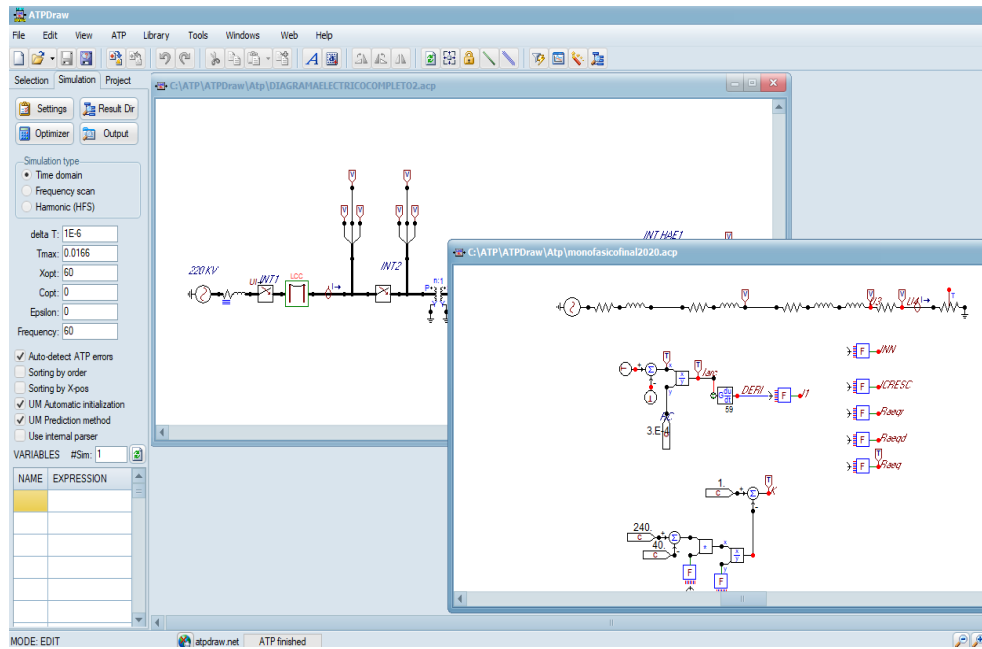


Figura 4.6 Visualización del modelado de circuitos eléctricos simultáneos en ATP.

generales de simulación del sistema eléctrico construido. Para realizar esta operación, se accede a ATADRAW a través de una ventana de dialogo denominada Simulation, figura 4.7.

En la pestaña Simulation son definidos los siguientes parámetros:

Delta T: es el intervalo de tiempo de la integración numérica. Es realizado un paso de simulación cada delta T segundos.

T Max: tiempo total de la simulación, en segundos. Al cumplirse este tiempo, se da por concluido el proceso de simulación.

Xopt: indica las unidades en que son definidos los valores de las autoinducciones:

- Si  $X_{opt} = 0$ ; el valor se debe indicar en  $mH$ .
- Si  $X_{opt} =$  frecuencia del sistema; el valor se debe indicar en  $\Omega$ .

Copt: indica las unidades en que son definidos los valores de las capacidades:

- Si  $C_{opt} = 0$ ; el valor se debe indicar en  $\mu F$ .
- Si  $C_{opt} =$  frecuencia del sistema; el valor se debe indicar en  $\Omega$ .

Simulation Type: indica el tipo de simulación que desea. En este caso se ha optado por la simulación en el dominio del tiempo.

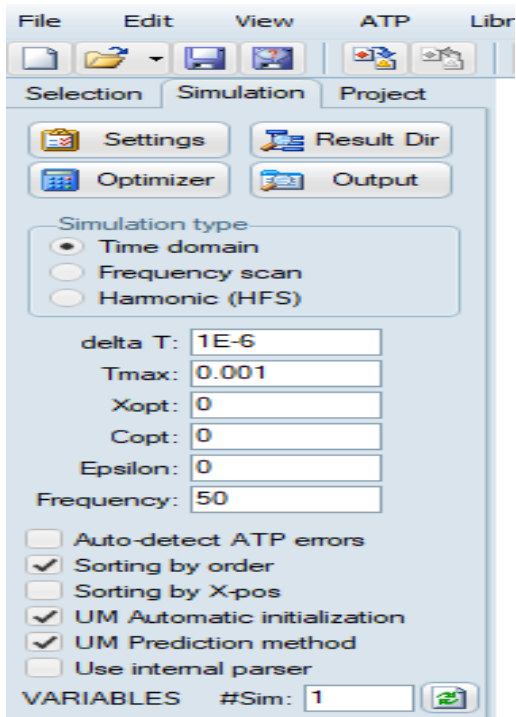


Figura 4.7 Ventana “Simulation” de ajustes generales en el programa Atpdraw



## 5. Marco experimental

### 5.1 Modelado del horno de arco eléctrico

El presente método descrito está conformado por las características de la red eléctrica de este tipo de carga y la representación del modelo matemático que describe el comportamiento eléctrico del horno, presentado en [7]. El modelo del horno de arco utilizado en este trabajo está basado en las relaciones empíricas la longitud, voltaje y corriente a través del arco que capturan la curva V-I la cual aproxima el comportamiento real del horno. Las fluctuaciones de voltaje se obtienen agregando un comportamiento dinámico mediante una ley sinusoidal a la longitud del arco eléctrico. A continuación, se describen los diferentes elementos utilizados en el desarrollo de la simulación en el espacio de trabajo de la interfaz gráfica de Atpdraw.

### 5.2 Ajuste de los componentes del circuito eléctrico

Enseguida es presentado el arreglo de los parámetros de los elementos que constituyen la simulación del modelo del horno de arco en AtpDraw. La figura 5.1 representa un circuito equivalente unifilar típico en la simulación de un sistema de potencia de 50 Hz que suministra a un horno de arco eléctrico.

Los valores de los parámetros utilizados en la simulación corresponden a los valores típicos de una planta siderúrgica de referencia que se haya en la literatura [7] semejantes a los parámetros de un sistema eléctrico con horno de arco que pertenece a la red de Puebla, figura 5.2.

Se estima que, una empresa siderúrgica con horno de arco del estado de Puebla está siendo suministrada de energía mediante una línea de transmisión proveniente de una subestación con un nivel de voltaje de 230 kV, mientras que la planta siderúrgica de referencia de la figura 5.1 es suministrada con un nivel de voltaje de 220kV.

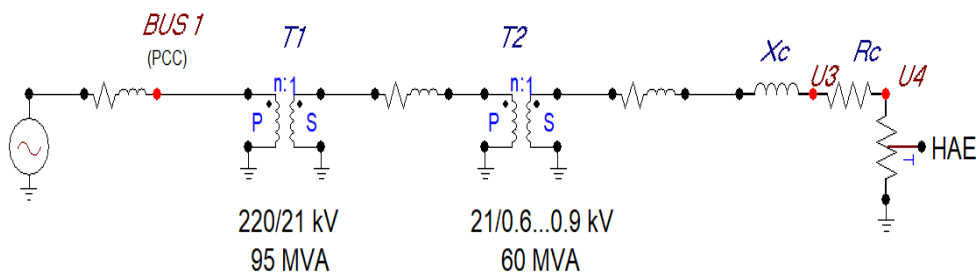


Figura 5.1 Esquema del circuito eléctrico del horno de arco utilizado en la simulación de este trabajo a través de AtpDraw.

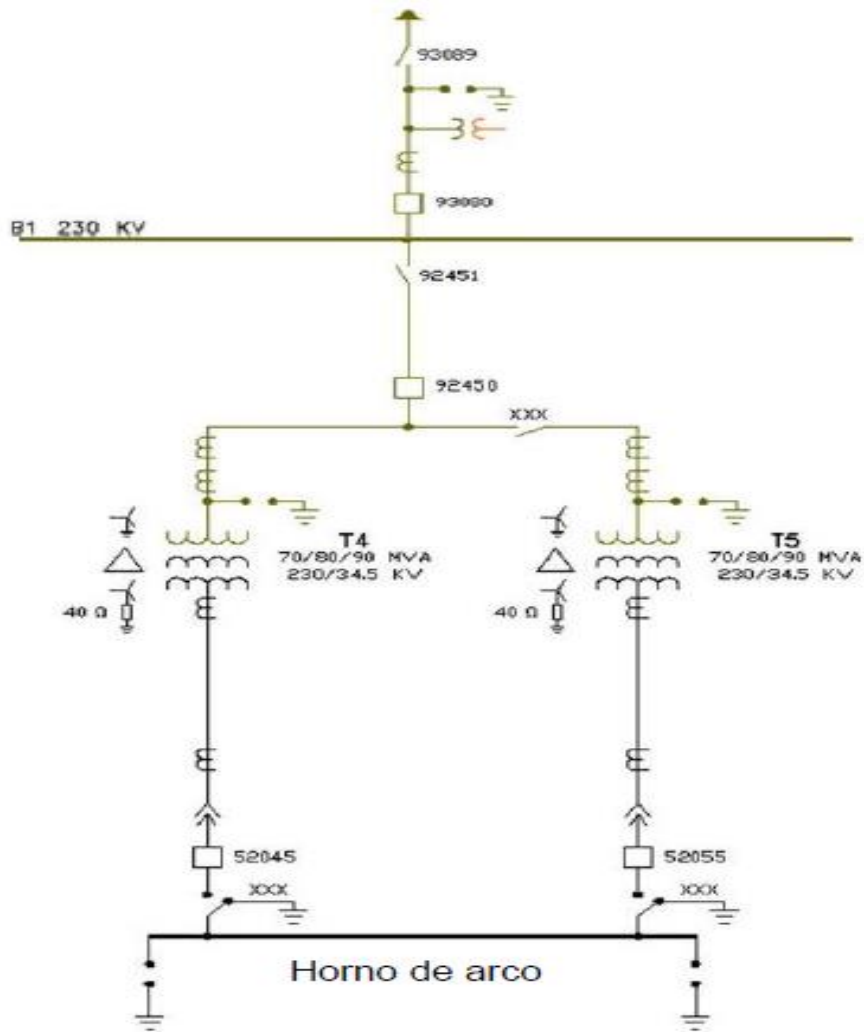


Figura 5.2 Diagrama unifilar semejante al circuito real de Puebla-Ternium de una planta con horno de arco.

### 5.3 Red de potencia (equivalente de Thevenin)

En el diagrama de la figura 5.1, un horno de arco eléctrico está conectado al bus 1, en el punto de conexión común (PCC). La red de alimentación de energía proveniente de la subestación de potencia que suministra al horno es representada mediante su equivalente de Thevenin, figura 5.3. En AtpDraw es utilizada una fuente ideal de voltaje en serie con una impedancia  $R + jX$ , figura 5.3, que es obtenida a partir de la potencia de corto circuito en el bus 1 (pcc). El voltaje RMS de la línea de la fuente es de 230 kV a la frecuencia de operación de 50 Hz. La potencia de corto circuito en el PCC es un parámetro de simulación y tiene un valor de 3500 MVA [7].



El valor de la impedancia del equivalente Thevenin es determinado conociendo el voltaje y la potencia de cortocircuito, a partir de la expresión:

$$Z_{Thev} = \frac{V^2 kV}{S_{cc} MVA} = \frac{220^2}{3500} = 13.8285 \Omega \quad (5.1)$$

En este nivel de voltaje el circuito es altamente inductivo, por lo tanto, la expresión  $X = 20R$  [27] es útil en la aproximación del valor de la resistencia y la reactancia del equivalente de Thevenin como sigue:

A partir de la geometría del triángulo

$$a = C \cos \theta \quad (5.2)$$

$$b = C \sen \theta \quad (5.3)$$

Donde

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (5.4)$$

y

$$\theta = \tan^{-1} \frac{b}{a} \quad (5.5)$$

Luego, la forma rectangular de una impedancia se describe como

$$Z = R \pm jX \quad (5.6)$$

Y en su forma polar la impedancia se escribe por

$$R = Z \cos \theta \quad (5.7)$$

$$X = Z \sen \theta \quad (5.8)$$

El valor  $Z$  es la magnitud en ohms del vector de impedancia  $Z$  y se determina como sigue

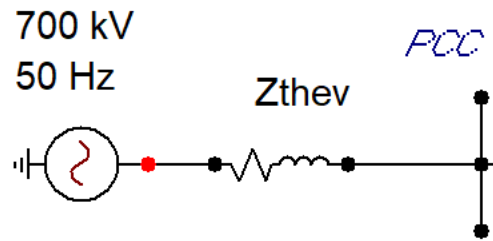


Figura 5.3 Modelado del equivalente de Thevenin de la red de potencia referido al secundario del transformador del horno T2.

$$Z = \sqrt{R \pm jX} (\Omega) \quad (5.9)$$

El ángulo del vector de impedancia correspondiente se determina como

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{X}{R} \right) \quad (5.10)$$

Por tanto

$$R = Z_{Thev} \left( \cos \left( \tan^{-1}(20) \right) \right) = 0.6905 \Omega \quad (5.11)$$

$$X = Z_{Thev} \left( \sin \left( \tan^{-1}(20) \right) \right) = 13.8112 \Omega \quad (5.12)$$

$$Z_{Thev} = (0.6905 + j13.8112) \Omega \quad (5.13)$$

Al referir  $Z_{Thev}$  al secundario del transformador del horno se obtiene que:

$$Z_{Thev} = \left( \frac{21}{220} \right)^2 \left( \frac{0.9}{21} \right)^2 (0.6905 + j13.8112) \quad (5.14)$$

$$Z_{Thev} = (1.1556 E^{-5} + j2.3113 E^{-4}) \Omega \quad (5.15)$$

#### 5.4 Transformador de conexión a la red de potencia

La carga del horno de arco conectada a la red de 220 kV haciendo uso del transformador de potencia con un valor de 95 MVA, relación de transformación 220 a 21 kV, valor de reactancia

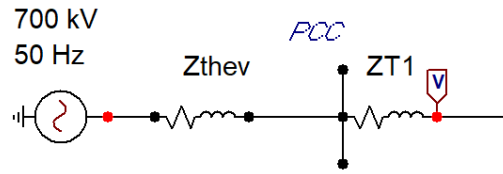


Figura 5.4 Impedancia del transformador T1 conectado a la red de potencia y referido al secundario del transformador T2

y resistencia de corto circuito de 12.5% y 1.25 %, respectivamente [7]. Se desprecian las pérdidas en vacío debido a que su efecto es despreciable cuando se tienen altos niveles.

Se utilizan los valores en por ciento de resistencia y reactancia de los devanados del transformador T1 para determinar los valores en ohms, de este modo se tiene que:

$$Z_{T1} = (1.25 + j12.5) \% \quad (5.16)$$

Luego, T1 en ohms referido a su secundario:

$$Z_{b_{T1}} = \frac{V_b^2 kV}{S_b MVA} (\Omega) \quad (5.17)$$

$$Z_{b_{T1}} = \frac{21^2 kV}{95 MVA} = 4.6421 \Omega \quad (5.18)$$

$$Z_{T1} = 4.6421 \left( \frac{(0.5 + j12.5)}{100} \right) = (0.058 + j0.5802) \Omega \quad (5.19)$$

Refiriendo la impedancia del transformador T1 al secundario del transformador del horno se tiene que:

$$Z_{T1} = \left( \frac{0.9}{21} \right)^2 (0.058 + j0.5802) = (1.0657 E^{-4} + j1.0657 E^{-3}) \Omega \quad (5.20)$$

La figura 5.4 muestra la impedancia del transformador ZT1 conectada a la red de potencia en el workspace de AtpDraw.



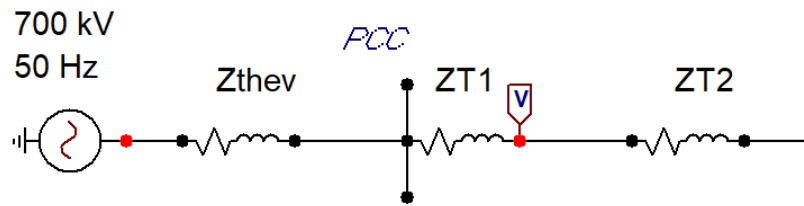


Figura 5.5 Impedancia del transformador T2 conectado al transformador T1 a través de Atpdraw.

### 5.5 Transformador en la subestación del horno

El transformador T2 del HAE utilizado en la simulación en Atp, figura 5.5, destacado por su robustez para soportar elevadas corrientes y grandes esfuerzos electrodinámicos en sus devanados. Este transformador cuenta con las siguientes características eléctricas de referencia: la potencia nominal es de 60 MVA, la relación de transformación es de 21 a 0.6-0.9 kV, el valor en por ciento de reactancia de dispersión y resistencia de los devanados de corto circuito es de 10% y 1.0 %, respectivamente. En este caso se puede despreciar la rama de magnetización.

Se utilizan los valores en por ciento de resistencia y reactancia de los devanados del transformador T2 para determinar los valores en ohms:

$$Z_{T2} = (1.0 + j10) \% \quad (5.21)$$

Luego, T2 en ohms referido a su secundario:

$$Z_{base} = \frac{0.9^2 kV}{60 MVA} = 0.0135 \Omega \quad (5.22)$$

$$Z_{T2} = 0.0135 \left( \frac{(1+j10)}{100} \right) = (0.000135 + 0.00135j) \Omega \quad (5.23)$$

### 5.7 Cable de conexión del electrodo

Una contribución significativa a la impedancia total vista por el horno de arco es dada por la conexión entre los electrodos del horno y su transformador. El valor de la impedancia del circuito de conexión del electrodo está relacionado con su longitud, distancia de separación entre fases (horno de arco eléctrico trifásico) y el número de conductores por fase.

En la figura 5.6, se muestra el modelado de la impedancia del electrodo, el elemento RL. Los valores típicos de resistencia y reactancia desde las barras de conexión del transformador T2



hasta el arco entre el electrodo y la carga, de la potencia aquí considerada, son:  $X_C = 3E^{-3}$  y  $R_C = 3E^{-4}$  ohms.

La figura 5.7, representa el equivalente del circuito completo de la figura 5.1, observado desde el lado de bajo voltaje del transformador del horno y que se utilizó en la simulación del modelo del horno a través de AtpDraw.

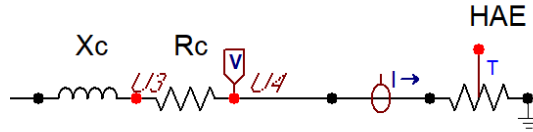


Figura 5.6, Implementación de la impedancia del cable que conecta el electrodo del horno y su transformador mediante Atpdraw.

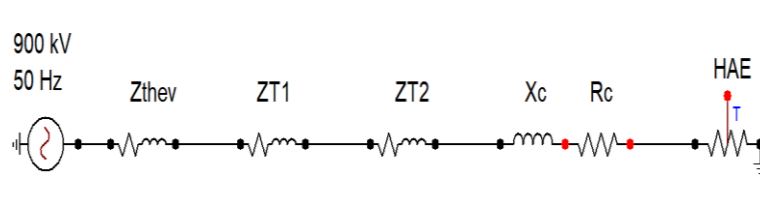


Figura 5.7 Circuito eléctrico equivalente referido a la carga del horno de arco en atpdraw.

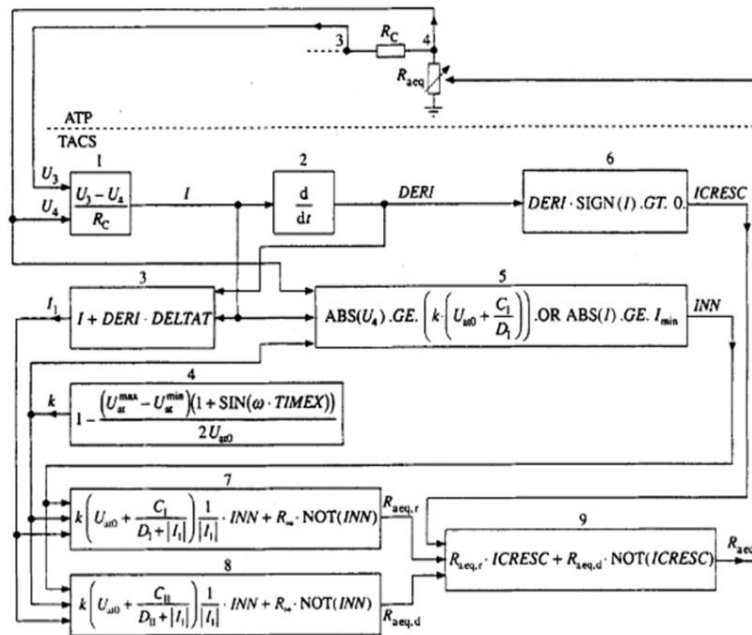


Figura 5.8 Diagrama de bloques completo del modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo que representa la carga del horno de arco.



## 5.8 Modelado de la resistencia no lineal

El modelo de resistencia de arco no lineal aproxima el comportamiento de la operación del horno. Los valores del modelado de la resistencia que se introducen en el circuito eléctrico del horno por medio del TACS de ATP son obtenidos mediante el diagrama de bloques que corresponde al trabajo de investigación “Atp simulation for arc furnace flicker investigation” [7], figura 5.8.

EL módulo de simulación integrada TACS del ATP es utilizado en la implementación del siguiente diagrama de bloques:

### Bloque 1

Las variables de entrada del modelo son; corriente y voltaje en el punto de conexión del horno de arco ( $I_{arc}$  y  $V_{arc}$ ). Con referencia a la figura 5.7, donde la carga del HAE es la resistencia no lineal, la corriente del arco es determinada  $I_{arc}$  figura 5.9,

evaluando la caída de voltaje en la resistencia de carga  $R_c$ . U3 y U4 en TACS son el voltaje entre el bus 3 y el punto de conexión del horno de arco, bus 4.

### Bloque 2

Se deriva la corriente de arco, figura 5.10, denominada  $DERI$ ;

$$DERI = \frac{dI_{arc}}{dt} \quad (34)$$

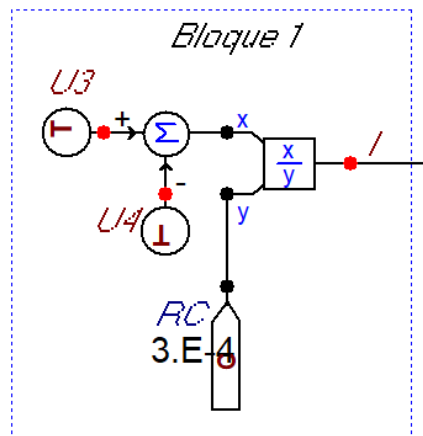


Figura 5.9 Estimación de la corriente de arco del horno mediante el bloque 1 en TACS del atp.

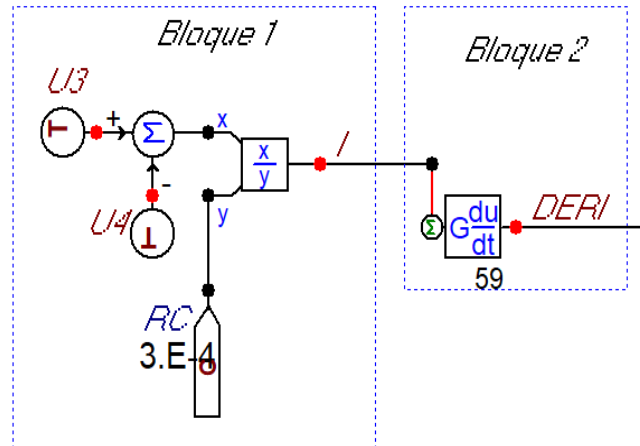


Figura 5.10 Diagrama del bloque 2, derivada de la corriente del horno en TACS.

### Bloque 3

El bloque 3, figura 5.11, estima el valor de  $k$ , de acuerdo con las ecuaciones (8) (9) (10) de la variación de la longitud de arco entre  $U_{at}^{min}$  y  $U_{at}^{max}$ . La longitud de arco varía en un rango 40-240V. Al valor de la amplitud de la longitud de arco es agregado el comportamiento dinámico sinusoidal (30 Hz) para efectos de experimentación.

### Bloque 4

En el diagrama del bloque 4, se define la variable lógica que indica el disparo del arco inicial  $INN$ .

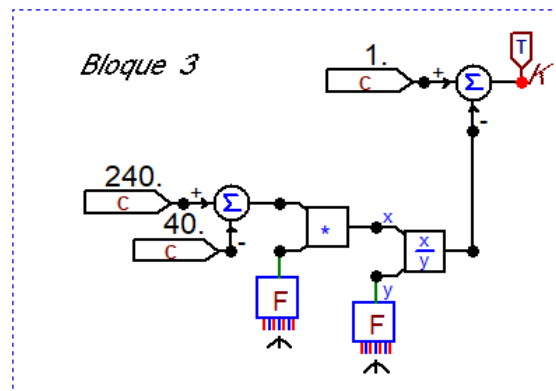


Figura 5.11 Variación en el tiempo de la longitud de arco mediante el diagrama del bloque 3 en ATP.

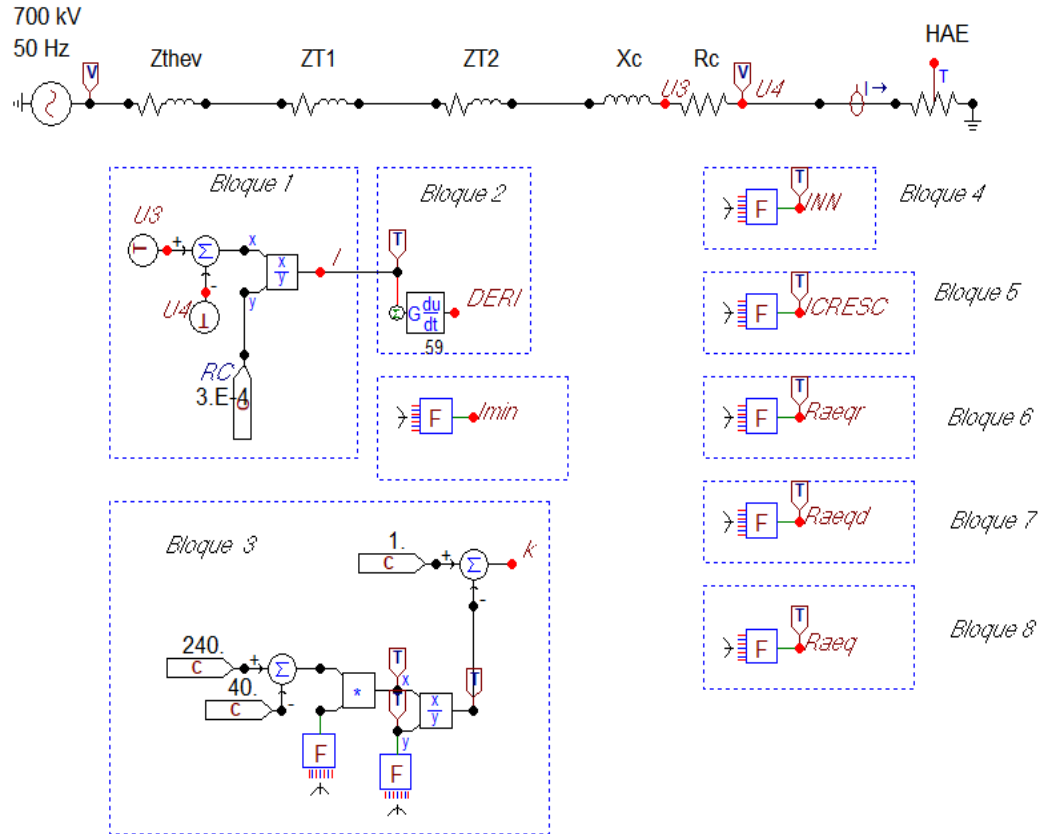


Figura 5.12 Circuito eléctrico y diagrama de bloques del modelo de resistencia dinámica implementado a través de TACS del atp.

### Bloque 5

El bloque 5 determina la variable lógica que indica la condición de incremento o decremento de la amplitud de la corriente *ICRESC*.

### Bloque 6, 7, 8

$R_{aeq,r}$  y  $R_{aeq,d}$  denotan las resistencias variables del arco cuyos valores dependen respectivamente del incremento y decremento en la corriente del modelo. Por último, el bloque 8 expresa la resistencia de arco equivalente  $R_{aeq}$ . Finalmente, en la figura 5.12 se puede observar el circuito y el diagrama de bloques completo del modelo del HAE implementado en AtpDraw.



## 5.9 Simulación del modelo estacionario del HAE

El voltaje medido en el nodo U4 y presentado en la figura 5.13, corresponde a la forma de onda que caracteriza al voltaje del horno de arco eléctrico similar a una onda cuadrada. Este voltaje es obtenido mediante el modelo de resistencia no lineal estacionario.

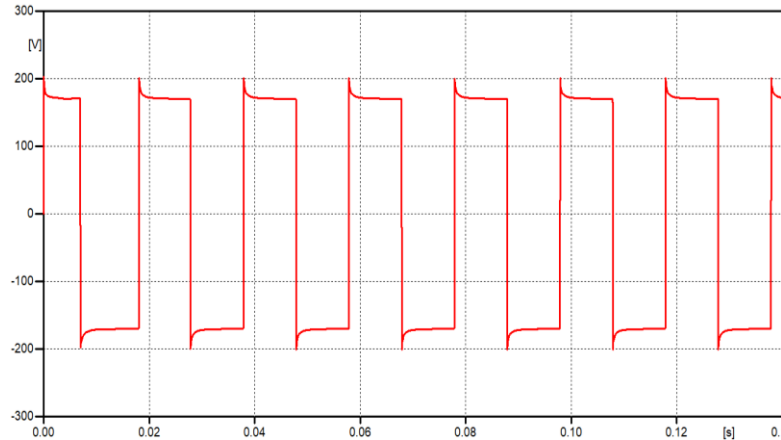


Figura 5.13 Formas de onda del voltaje de arco mediante el modelo de resistencia no lineal medido en la terminal de conexión del horno U4.

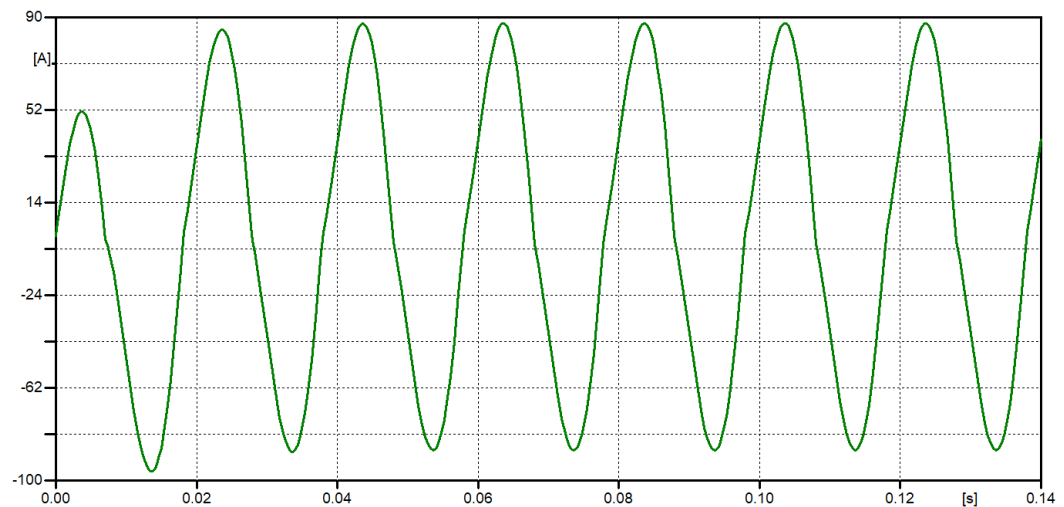


Figura 5.14 Forma de onda de la corriente de arco del horno mediante el modelo de resistencia no lineal.

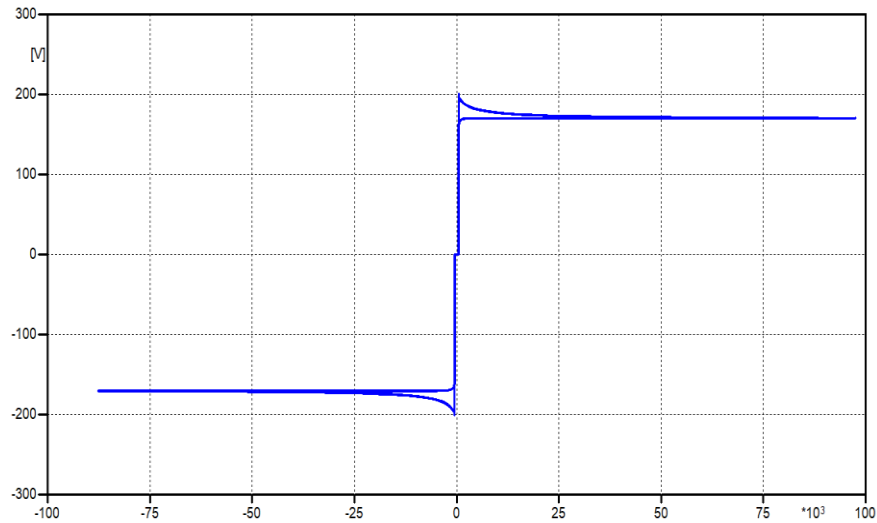


Figura 5.15 Curva característica V-I del horno mediante el modelo de resistencia no lineal.

La corriente de arco es presentada en la figura 5.14. Se puede apreciar que el voltaje del horno presenta una mayor distorsión en su forma de onda que la corriente del mismo. La figura 5.15 muestra la característica V-I evidenciando la no linealidad de este tipo de carga que conduce a la generación de armónicos.

### 5.10 Simulación del modelo dinámico del HAE

El valor de la amplitud del radio de arco es modificado agregando un comportamiento dinámico mediante una señal sinusoidal a una frecuencia típica de flicker de 30 Hz.

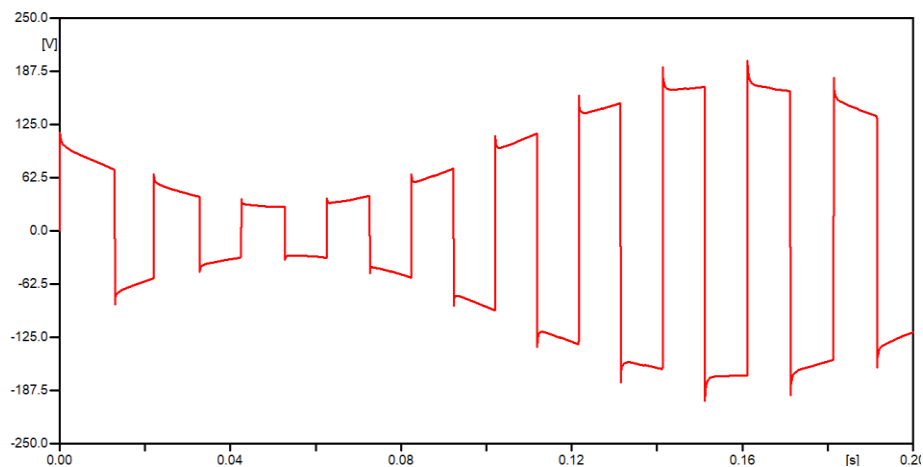


Figura 5.16 Voltaje dinámico del horno de arco mediante la variación en el tiempo de la longitud de arco.

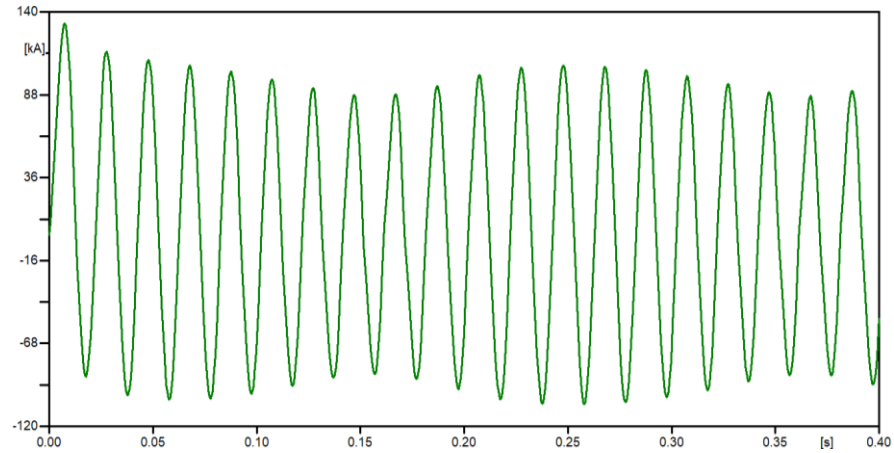


Figura 5.17 Forma de onda dinámica de la corriente del HAE mediante una ley sinusoidal de 30 Hz.

El voltaje del horno de arco es presentado en la figura 5.16, se observan las fluctuaciones de voltaje, ondas similares a las ondas cuadradas que cambian su valor en función de la variación periódica de la longitud de arco. La corriente de arco es presentada en la figura 5.17. Se pueden apreciar las fluctuaciones de corriente. El voltaje del horno presenta una mayor distorsión en su forma de onda que la corriente del mismo. La figura 5.18 muestra la característica dinámica V-I del horno con ley sinusoidal implementada en Atpdraw. Por último, el modelo propuesto de resistencia no lineal variable en el tiempo es validado mediante la comparación de las gráficas que corresponden al paper “Atp simulation for arc furnace flicker investigation” [7], del lado izquierdo, con las gráficas de las simulaciones de este trabajo, del lado derecho, figura 5.19.

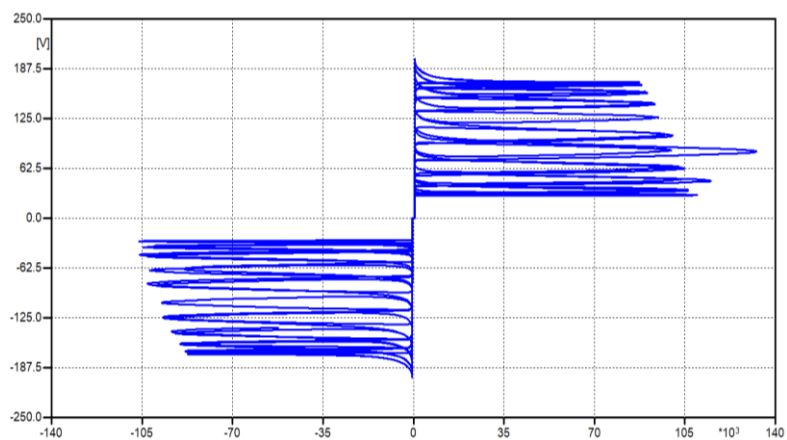


Figura 5.18 Curva dinámica V-I del horno mediante el modelo de resistencia no lineal variable en el tiempo.



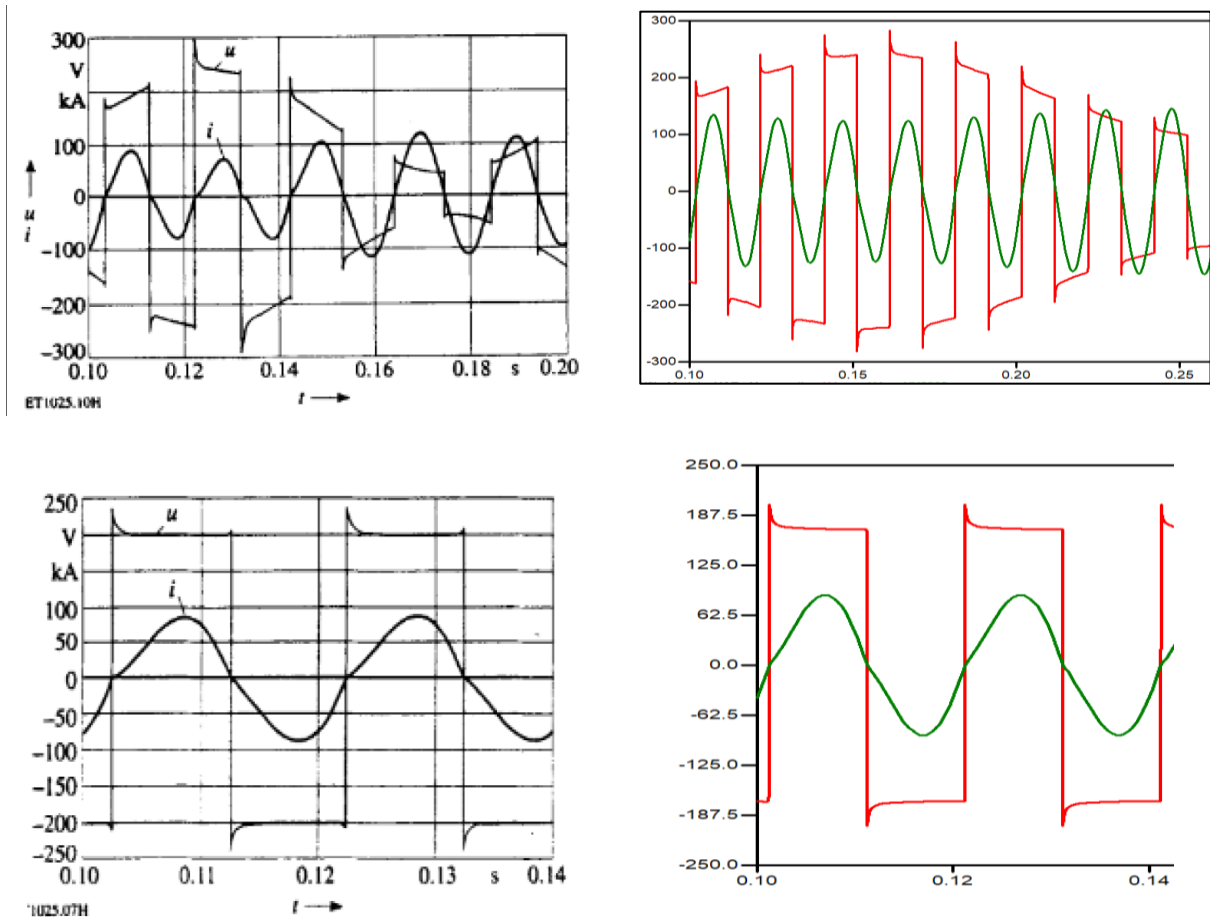


Figura 5.19 Validación del modelo mediante la comparación de los resultados que aparecen en [7].

Las siguientes figuras; 5.20, 5.21, y 5.22 indican los resultados de la simulación del modelo dinámico de horno de arco eléctrico trifásico.

En la figura 5.20, pueden ser observadas las alteraciones de naturaleza periódica, en la forma de onda del voltaje trifásico, el cual es caracterizado por ondas cuadradas que fluctúan en el tiempo y que indica la presencia de armónicos. La figura 5.21 representa la forma de onda de la corriente trifásica, la cual presenta una menor distorsión, sin embargo, pueden ser observados los cambios cíclicos en su amplitud.

La figura 5.22 muestra la curva V-I de cada una de las fases del horno de arco trifásico que evidencia la no linealidad de este tipo de carga.

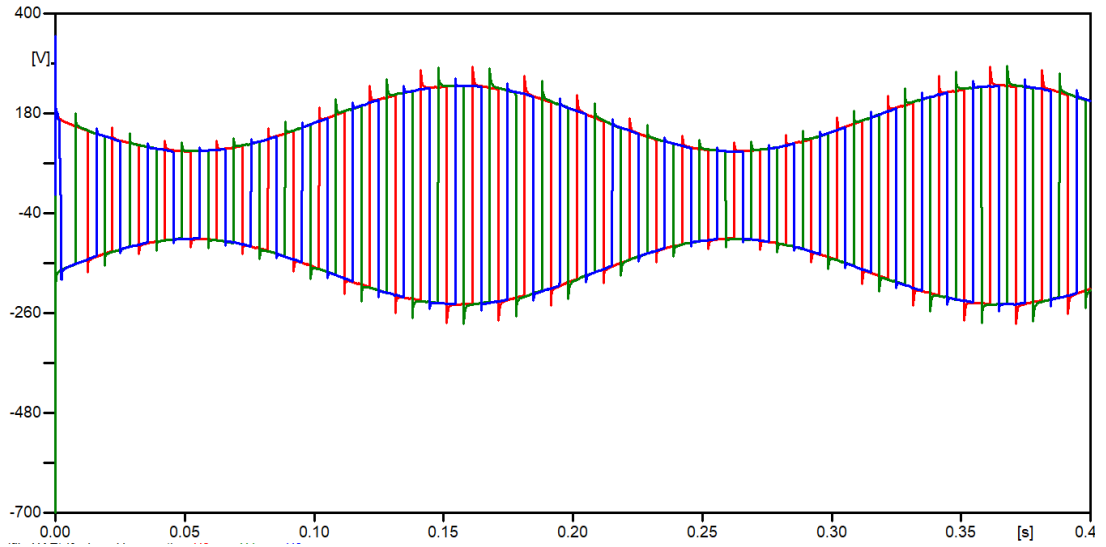


Figura 5.20 Formas de onda del voltaje fase a, b y c superpuestas del modelo dinámico del horno.

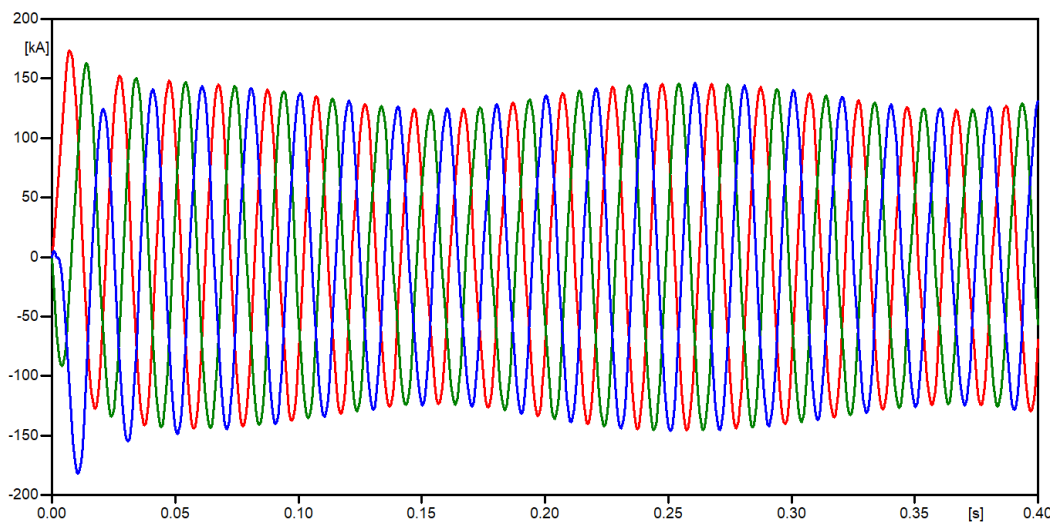


Figura 5.21 Formas de onda de la corriente de las tres fases del horno de arco.

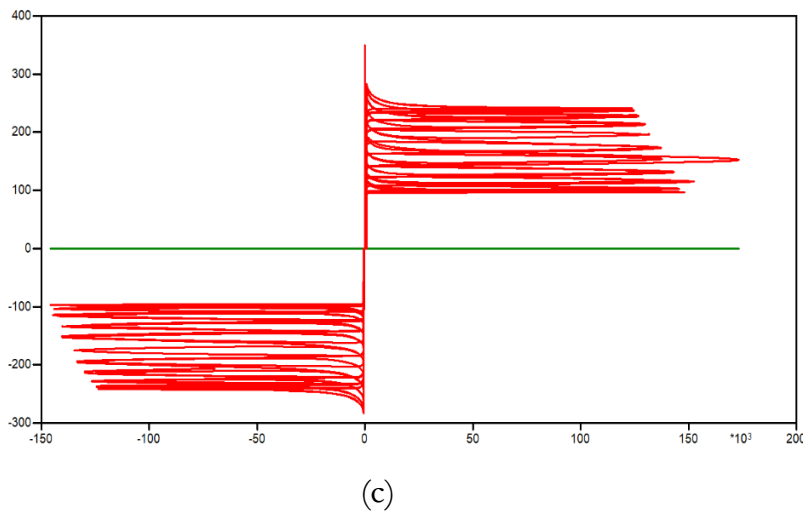
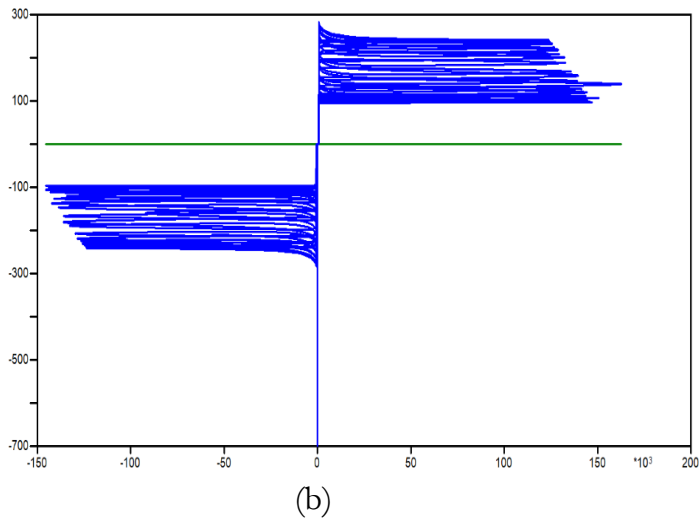
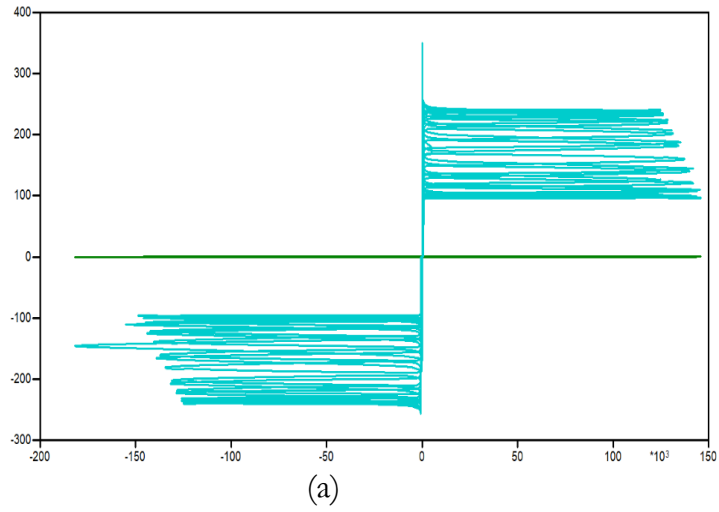


Figura 5.22 Curva característica V-I de cada una de las fases del horno trifásico.



## Conclusiones y trabajos futuros

### Conclusiones

El presente trabajo de tesis consistió en el modelado del circuito eléctrico que suministra a un horno de arco, que considera la representación matemática de la operación del horno en el programa Atpdraw. Las conclusiones generales son las siguientes:

- El programa atpdraw puede ayudar a los estudiantes en el proceso de aprendizaje ya que el software proporciona una representación visual del comportamiento del circuito, también puede servir para validar una solución estimada y para realizar iteraciones hasta encontrar un resultado deseado al utilizar el método de variación de parámetros.
- El modelo de horno de arco eléctrico que consiste en una resistencia no lineal variable en el tiempo es parametrizable y sencillo de adaptarlo a las condiciones reales de operación de un sistema de potencia que suministra a una planta con este tipo de carga.
- El comportamiento del horno causa distorsión de la forma de onda del voltaje y de la corriente en el punto de conexión del horno debido a la no linealidad y variabilidad en el tiempo de la naturaleza intrínseca del arco eléctrico.

### Trabajos futuros

Agregar el modelo de la línea de transmisión en el sistema eléctrico del horno con el fin de disponer de un sistema más completo. Utilizar diferentes leyes en la variación en el tiempo de la longitud de arco (ruido blanco, sistema caótico) para efectos de experimentación. Se ha observado que el ajuste de los parámetros mediante un método de optimización de parámetros es posible. Desarrollar y comparar modelos más complejos en caso de que el modelo propuesto no se ajuste a las condiciones reales de un caso en particular. Ajustar el modelo de resistencia dinámica a las condiciones reales de operación de una planta siderúrgica con horno de arco. Por último, proponer sistemas de compensación de disturbios que mejoren el rendimiento del sistema eléctrico del horno.



## Anexo A Cantidades por unidad

Los niveles de las líneas de transmisión de potencia operan en kV, debido a que el kV es la unidad más conveniente para expresar sus voltajes. Los términos comunes son los kW o MW y los kVA o MVA para las líneas que transmiten una gran cantidad de potencia. Estas cantidades, al igual que los ohms, frecuentemente se expresan en por ciento o en por unidad (p.u.) de un valor base o de referencia que se especifica para cada una de estas cantidades. En el análisis de sistemas de potencia es habitual el previo adimensionamiento y normalización de las magnitudes eléctricas y parámetros del sistema debido a la operación de elementos con diferentes niveles de voltaje potencias nominales y valores de sus parámetros. De modo que las variables y parámetros que intervienen en los cálculos estén en torno a la unidad. Por ejemplo, al seleccionar una base de voltaje de 120 kV, los voltajes de 108, 120 y 126 kV equivalen a 0.9, 1.00 y 1.05 en por unidad o a 90, 100 y 105 % respectivamente. Por tanto, el valor en por unidad de una cantidad está dada por el cociente entre el valor de la variable o parámetro y un valor definido como base. El valor en p.u. se expresa con un decimal. La relación en por ciento es 100 veces el valor en por unidad.

Tanto el método de cálculo porcentual y en por unidad, son más simples y proporcionan más información que los volts, los amperes y los ohms reales. El método en por unidad tiene una ventaja sobre el porcentual ya que el producto de dos cantidades en por unidad se expresa en por unidad, mientras que el producto de dos cantidades en por ciento se debe dividir entre 100 para conseguir el resultado en por ciento.

Los valores base se definen sobre el circuito en notación fasorial y se corresponden con los valores de módulo de las magnitudes eléctricas: voltaje eficaz, corriente eficaz, potencia aparente, módulo de la impedancia y módulo de la admitancia. Si se especifican los valores base de corriente y de voltaje, se pueden determinar las bases de impedancia y de kilovoltamperes, puesto que el voltaje, la corriente, los kilovoltamperes y la impedancia están relacionados de tal modo que al seleccionar los valores base para dos de ellos se determina la base de los dos restantes. Estas relaciones o ecuaciones modulares básicas en un sistema monofásico son:

$$S_{base} = V_{base} * I_{base} \quad (35)$$

$$V_{base} = Z_{base} * I_{base} \quad (36)$$

$$I_{base} = Y_{base} * V_{base} \quad (37)$$

La impedancia base es aquella que tiene una caída de voltaje igual a la del voltaje base, cuando la corriente que fluye a través de ella es igual a la del valor de la corriente base. Los kVA base en sistemas monofásicos son el producto del voltaje base en kV y de la corriente base en amperes. Por lo general, en el análisis de redes eléctricas, los MVAs base y el voltaje base en



kV son las cantidades que se seleccionan para especificar las bases. Para sistemas monofásicos o para los trifásicos, donde el termino corriente se refiere a corriente de línea, el de voltaje se refiere a voltaje al neutro y el de kilovoltamperes se refiere a kilovoltamperes por fase, las fórmulas que se presentan a continuación relacionan las diferentes cantidades:

$$\text{Corriente base, } A = \frac{kVA_{1\emptyset} \text{ base}}{\text{voltaje base, } kV_{LN}} \quad (38)$$

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{\text{voltaje base, } V_{LN}}{\text{corriente base, } A} \quad (39)$$

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{(\text{voltaje base, } kV_{LN})^2 * 1000}{kVA_{1\emptyset} \text{ base}} \quad (40)$$

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{(\text{voltaje base, } kV_{LN})^2}{MVA_{1\emptyset} \text{ base}} \quad (41)$$

$$\text{Potencia base, } kW_{1\emptyset} = kVA_{1\emptyset} \text{ base} \quad (42)$$

$$\text{Potencia base, } MW_{1\emptyset} = MVA_{1\emptyset} \text{ base} \quad (43)$$

$$\text{Impedancia en pu de un elemento} = \frac{\text{Impedancia real } \Omega}{\text{Impedancia base } \Omega} \quad (44)$$

En las ecuaciones anteriores los subíndices  $1\emptyset$  y  $LN$  significan monofásico y línea a neutro, cuando las ecuaciones se aplican a circuitos trifásicos. Cuando las ecuaciones se utilizan para circuitos monofásicos, los  $kV_{LN}$  representan el voltaje a través de la línea monofásica o el voltaje línea a tierra en caso de que uno de los lados este aterrizado.

Dado que los circuitos trifásicos balanceados se resuelven igual que una línea con un neutro, las bases para las distintas cantidades en los diagramas de impedancias son los kilovoltamperes por fase y los kilovolts de línea a neutro. Generalmente, los datos que se proporciona son los kilovoltamperes o megavoltamperes trifásicos totales y los kilovolts línea a línea, debido a la costumbre de especificar el voltaje línea a línea y los kVAs o MVAs totales. Por tanto, el voltaje para la solución del circuito monofásico es el voltaje a neutro. El voltaje base a neutro es el voltaje base línea a línea sobre  $\sqrt{3}$  puesto que es la relación entre los voltajes línea a línea y línea a neutro de un sistema trifásico balanceado, de ahí que, el valor en por unidad de un voltaje línea a neutro sobre el voltaje base línea a neutro es igual al valor en por unidad del voltaje línea a línea en el mismo punto sobre el voltaje base línea a línea cuando el sistema esta balanceado. Del mismo modo, los kilovoltamperes trifásicos son tres veces los kilovoltamperes monofásicos y la base de los kVAs trifásicos es tres veces la base de los kVAs



monofásicos. Por tanto, el valor en p.u. de los kVAs trifásicos sobre los kVAs trifásicos base es igual al valor p.u de los kVAs monofásicos sobre los kVAs monofásicos base.

Un valor de voltaje base en un sistema trifásico es un voltaje de línea a línea y un valor de kilovoltamperes o megavoltamperes base es el valor trifásico total a menos que algo diferente sea especificado.

La impedancia base y la corriente base se pueden calcular desde valores trifásicos de los kilovolts y kilovoltamperes base. Si se interpretan los kVAs base y el voltaje base en kilovolts como los kVAs totales de las tres fases y el voltaje base de línea a línea, se obtiene que:

$$\text{Corriente base, } A = \frac{kVA_{3\phi} \text{ base}}{\sqrt{3} * \text{voltaje base, } kV_{LL}} \quad (45)$$

y desde la ecuación 102

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{(\text{voltaje base, } kV_{LL} / \sqrt{3})^2 * 1000}{kVA_{3\phi} \text{ base} / 3} \quad (46)$$

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{(\text{voltaje base, } kV_{LL})^2 * 1000}{kVA_{3\phi} \text{ base}} \quad (47)$$

$$\text{Impedancia base, } \Omega = \frac{(\text{voltaje base, } kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ base}} \quad (48)$$

Se hacen evidentes las ventajas de los cálculos en por unidad cuando los problemas por resolver son más complejos y, en particular cuando se incluyen transformadores puesto que la elección de valores base adecuados significa la desaparición de la relación de transformación entre los devanados del transformador. Generalmente, cuando se proporcionan valores en por unidad de la impedancia y de otros parámetros de un componente del sistema sin especificar las bases, se da por hecho que estos valores base son los megavoltamperes y kilovolts nominales de ese componente.



## Referencias

- [1] **González Castaño C, Alzate Gómez A, & Marulanda Durango. J. J.** Modelos de horno de arco eléctrico para estudios del efecto flicker. *Revista Tecnura*, 20(48), 15-27. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.2.a01, 2016.
- [2] **Cavallini A, Montanari G.C, Pitti L, Zaninelli D,** "Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks" Volume 9, pág. 2026, 1994.
- [3] **Zamora Belver. M. I, Mazon Sainz Maza A. J,** "Simulaciones de Sistemas Eléctricos", Pearson Educación, págs. 333-420.
- [4] **Agüero. J. L, Issouribehere. F, Battaiotto. P. E,** "STATCOM Modeling for Mitigation of Voltage Fluctuations caused by Electric Arc Furnaces", Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Plata, 2006.
- [5] **Yongning. Wang, Heming. Li, Boqiang. Xu, Lih. Sun,** "Simulation Research of Harmonics in Electric System of Arc Furnace", International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004, Singapore, 21-24 November 2004.
- [6] **Mendis. S. R, González. D. A,** "Harmonic and Arc Transient Overvoltage Analyses in Furnace Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 2, 1992.
- [7] **Cavallini A, Montanari G.C, Pitti L, Zaninelli D,** "ATP Simulation for Arc- furnace Flicker Investigation, European Transactions on Electrical Power Engineering" Volume 5, pág. 165–169, 1995.
- [8] **Cardona Leonardo,** "Teoría y Práctica con el ATP", Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Cap.14, pág. 210-230, 1995.
- [9] **I. Pires, M. Murta, & B. Cardoso,** "An Active Series Reactor for An Electric Arc Furnace" IEEE Industry Applications Magazine, pag. 53-57.
- [10] **J. Guzman Miguel,** "Transitorios Electromagnéticos en Sistemas Eléctricos ATP – ATPDRAW", SEPI-ESIME-IPN, pág. 1-20, 2013.
- [11] **A. H. Robbins, W. C. Miller** "Análisis de Circuitos: Teoría y Práctica", Cengage Learning, 2008.
- [12] **G. Expósito Antonio,** "Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica". España, McGraw-hill, 2002.
- [13] **N. Hariyanto, M. Nurdin, G. A. Tanthio P,** "Characteristic Study of Three-phase AC Electric Arc Furnace Model", The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, pag. 203-204, 2014.
- [14] **G. Jang, W. Wang, G. T. Heydt Ari, S. S. Venkata, B. Lee** "Development of Enhanced Electric Arc Furnace Models for Transient Analysis", pag.1-3.





- [15] **Padilla Cantero. J G.** (2007). “Modelado del horno de arco eléctrico para estudios relacionados con la calidad de la energía eléctrica” Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
- [16] **A. A Gómez, J.J Marulanda, E. Mejia,** “Electric Arc Furnace Modeling for Power Quality Analysis” Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, pag. 1-4.
- [17] **S. Golestani, H. Samet,** “Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace Models” Journals IET The institution of Engineering and Technology, pag. 3364-3367, 2016.
- [18] **H. Andrei, C. Cepisca and S. Grigorescu** " Power Quality and Electrical Arc Furnaces" Valahia University of Targoviste & Politehnica University of Bucharest, pag. 77-83.
- [19] **I. Vervenne, K. Van Reusel, R. Belmans,** “Electric Arc Furnace Modelling from a “Power Quality” Point of View” Department of Electrical Engineering ESAT, Research Group ELECTA Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, pag. 3-5, 2007.
- [20] **Y. Najafi, M. H. Amrollahi, M. Babanejad, Sh. Mounesirad, M. A. Layegh and D. Habibinia,** "Electric Arc Furnace Power Modeling for STATCOM Controller Application" SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pag. 1547-1549, 2010.
- [21] **M. A. Golkar, S. Meschi,** “MATLAB Modeling of Arc Furnace for Flicker Study" K. N. Toosi. University of Technology, Department of Electrical Engineering, Tehran-Iran, pag 1-5. 2008.
- [22] **M. Čerňan, J. Tlustý** " Model of Electric Arc Furnace for Designing of Power Quality Improvement Equipment" Department of Electrical Power Engineering Faculty of Electrical Engineering, CTU Prague, Czech Republic, pag. 1-2, 2014.
- [23] **Chittora. Prakash, Singh. Alka, Singh. Madhusand,** “Modeling and Analysis of Power Quality Problems in Electric Arc Furnace”, Electrical Department Delhi Technological University, pag 1, 2015.
- [24] **G. W. Chang, Y. J. Liu, C. I Chen** “Modeling Voltage-Current Characteristics of an Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A Comparison of Classic and Advanced Models”, Department of Electrical Engineering, pag 1, 2008.
- [25] **J. J. Grainger, W. D. Stevenson.** “Análisis de Sistemas de Potencia”, McGraw-Hill, 1996.
- [26] **E.A Cano, A.J Ustariz, H.E Tacca,** “Hornos de Arco Eléctrico, Una visión desde la calidad de la potencia eléctrica”. Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Primera Edición, 2011.
- [27] **Gonzales. Catalina,** “Modelo de Horno de Arco Eléctrico para Estudios del Efecto Flicker y su Solución con Métodos de Compensación”, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, pag. 20, 2013.
- [28] **A.G Expósito, J.M Ramos, J.R Macias, E.R Ramos, J. M. Riquelme** “Sistemas Eléctricos de Potencia, Problemas y Ejercicios Resueltos”. Madrid, Prentice-Hall, 2003.



- [29] **G. Manchur, C.C Erven**, “Development of a Model for Predicting Flicker from Electric Arc Furnaces”, IEEE Trans, on Power del., Vol. 7, n.1, pág.1, 1992.
- [30] **J.J Marulanda, A. Alzate, C. Sepúlveda, M. Holguin**, “Regularización de Tikhonov para estimar los parámetros de un modelo de un horno de arco” Revista Tecnura Volumen 17, pág. 41 - 52, 2013.
- [31] **J. Sousa, M.T. Correia de Barros, M. Covas, A. Simões**, “Harmonics and Flicker Analysis in Arc Furnace Power Systems” IST - Technical University of Lisbon Instituto da Energía – INTERG Lisboa Codex LABELEC / EDP group PORTUGAL, pag. 1-5.
- [32] **F. Issouribehere** “Medición, caracterización y compensación de flicker en hornos de arco eléctrico” Departamento de Electrotecnia Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de la Plata, 2006.
- [33] **G.R Estrada, E.A. Cano Plata & A.J Ustariz**, “Modeling Electric Arc Furnace to Estimate Flicker Levels in Power Systems Using ATP”, Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Colombia, pag. 410-414, 2014.
- [34] **Zhu. Xiaohang, Chen. Hongkun, Hu Pan, Chen Ruonan**, “Reactive Compensation for AC Electric Arc Furnace Considering Power Quality Constraints” Department of Electrical Engineering Wuhan University Wuhan, China, pag. 919, 2016.
- [35] **Cavallini A, Montanari G.C, Pitti L, Zaninelli D**, “The Effects of Series Inductors for Flicker Reduction in Electric Power Systems Supplying Arc Furnaces”. IEEE/IAS, Toronto/Canada, 1993, pag. 1496-1503.
- [36] **Cano Plata E.A, Soto Marín O. J, Ustariz Farfan A.J**, “Validation and Reception of Electric Arc Furnace Transformers”
- [37] **Marín Valencia C, Marulanda Sierra M.F.** (2016). “Identificación de los parámetros de un modelo dinámico de horno de arco eléctrico basándose en la naturaleza estocástica del mismo.” Universidad Tecnológica de Pereira.
- [38] **E. A. Cano Plata, H. E. Tacca**, “Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP”, International Conference on Power Systems Transients (IPST’05) in Montreal, Canada, pág. 1-2, 2005.
- [39] <https://www.worldsteel.org/about-steel.html>
- [40] IEEE Power Engineering Society, “IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems,” IEEE Std 1453-2004 (Adoption CEI/IEC 61000-4-151997+A12003), 2005.
- [41] **G. Estrada Villa** “Evaluación del Modelo de Arco Eléctrico para Estimar Niveles de Flicker” Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, Manizales, Colombia. pág. 1-35. 2014.
- [42] **E. A. Cano, A. J. Ustariz, and O. J. Soto**, “Electric Arc Furnace Model in Distribution Systems” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 5, pag. 4313-4317, 2015.



[43] **J. W. Nilsson, S. A. Riedel** “Circuitos eléctricos” Pearson Prentice Hall, 2005.

