



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Evaluación del Modelo de Arco Eléctrico para Estimar Niveles de Flicker

Gabriel Ricardo Estrada Villa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2014

Evaluación del Modelo de Arco Eléctrico para Estimar Niveles de Flicker

Gabriel Ricardo Estrada Villa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:

Ph.D. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata

Codirector:

Ph.D. Ing. Armando Jaime Ustariz Farfán

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Departamento Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Manizales, Colombia

2014

Assessment of the Electric Arc Furnace Model to Estimate Flicker Levels

Gabriel Ricardo Estrada Villa

Thesis presented as partial requirement for the degree of:
Master of Engineering - Industrial Automation

Director:

Ph.D. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata

Codirector:

Ph.D. Ing. Armando Jaime Ustariz Farfán

Universidad Nacional de Colombia
Faculty of Engineering and Architecture,
Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering
Manizales, Colombia

2014

*"Sometimes I feel like giving up,
then I remember I have a lot
motherfuckers to prove wrong."*

Anonymous

Agradecimientos

A mi familia y amigos, quienes me acompañaron y dieron su apoyo.

A mi director Ph.D. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata y codirector Ph.D. Ing. Armando Jaime Ustariz Farfán, por su esfuerzo y colaboración en el desarrollo de la investigación.

Resumen

El horno de arco eléctrico y su influencia en el sistema de energía se estudian en este trabajo. Se muestran tres modelos que permiten evaluar su comportamiento durante su funcionamiento. Estos modelos tienen distinto nivel de complejidad; el primer modelo, es una simple relación entre la longitud del arco y tensión de arco; el segundo, tiene en cuenta las principales no linealidades de la carga; el tercer modelo supone que característica corriente-tensión en el arco es lineal por tramos. El programa de transitorios electromagnéticos ATP fue utilizado para simular sistema de potencia y la carga. Los resultados simulados se compararon con las mediciones reales. El sistema de alimentación se modeló incluyendo el punto de conexión común y la red de distribución.

Palabras clave: Modelo de horno de arco, Característica Corriente-Tensión, Simulación de sistemas de potencia, Calidad de la potencia, Fluctuaciones de tensión.

Abstract

Electric arc furnace and its influence in the power system are studied in this paper. Three models that allow to evaluate its behavior during operation are shown. These models has different complexity level; the first model, is a simple relationship between arc length and arc voltage; the second one, takes into account the main nonlinearities of the load; the third model assumes that current-voltage characteristic in the arc is piece-wise linear. Electromagnetic transients program ATP was used to simulate power system and load. Simulated results are compared with actual measurements. Power system was modeled including the point of common connection and electric utility grid.

Keywords: Arc furnace model, Current-voltage characteristics, Power system simulation, Power quality, Voltage fluctuations.

Contenido

	Pág.
Resumen	XI
Abstract.....	XII
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas	XVI
1. Introducción general.....	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Definiciones	2
1.2 Calidad de la energía.....	5
1.2.1 Fluctuaciones de tensión	6
1.3 Modelado de cargas.....	7
1.4 Justificación	10
1.5 Hipótesis	10
1.6 Objetivos.....	11
1.6.1 Objetivo general.....	11
1.6.2 Objetivos específicos	11
1.7 Metodología	11
1.8 Estructura del documento	13
Bibliografía del capítulo	14
2. Hornos de arco eléctrico	17
2.1 Introducción	17
2.2 El arco eléctrico.....	17
2.3 Operación del horno de arco eléctrico	18
2.3.1 Potencia del horno de arco eléctrico.....	21
2.4 Herramientas de modelado.....	23
2.4.1 Modelos físicos.....	23
2.4.2 Modelos tipo "caja negra"	23
2.4.3 Aproximación de la característica corriente-tensión	23
2.5 Modelos del arco eléctrico	24
2.5.1 Modelo Ayrton.....	24
2.5.2 Modelo Cassie.....	25
2.5.3 Modelo Mayr	26
2.5.4 Modelo S. Varadan.....	27
2.5.5 Modelo Cano-Plata.....	29

2.6	Análisis de modelos	30
2.7	Conclusiones del capítulo.....	31
	Bibliografía del capítulo	32
3.	<i>Flicker</i> y propagación de <i>flicker</i> en sistemas de potencia.....	35
3.1	Introducción	35
3.2	Fluctuaciones de tensión y <i>flicker</i>	35
3.2.1	Estimación del nivel de <i>flicker</i>	37
3.3	Síntesis del capítulo	41
	Bibliografía del capítulo	42
4.	Implementación y simulación en ATP	43
4.1	Introducción	43
4.2	Consideraciones generales.....	43
4.2.1	Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia	43
4.2.2	Programa para el cálculo de transitorios electromagnéticos	44
4.2.3	Modelado de los componentes del sistema	45
4.2.4	Errores de simulación.....	45
4.3	Sistema de potencia	46
4.3.1	Descripción de la red	46
4.4	Medidas en el sistema de potencia.....	48
4.5	Simulación de los modelos seleccionados.....	52
4.5.1	Modelo Ayrton	52
4.5.2	Modelo Mayr	54
4.5.3	Modelo Cano-Plata	56
4.6	Análisis de resultados	57
4.7	Conclusiones del capítulo.....	61
	Bibliografía del capítulo	62
5.	Síntesis final, conclusiones y trabajos futuros	63
5.1	Síntesis de la investigación	63
5.2	Revisión de cumplimiento y resultados obtenidos	64
5.2.1	En relación con la hipótesis	64
5.2.2	En relación con los objetivos	64
5.3	Conclusiones	65
5.4	Trabajos futuros.....	65
6.	Anexos.....	67
6.1	Modelo Ayrton en ATP.....	67
6.2	Modelo Mayr en ATP.....	68
6.3	Modelo Cano-Plata en ATP.....	69

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Modelado del arco eléctrico	9
Figura 1-2 Desagregación de la metodología	12
Figura 2-1 Configuraciones típicas del horno de arco eléctrico HEA.....	19
Figura 2-2 Ciclo de fundición típico.....	20
Figura 2-3 Característica tensión-corriente real y aproximación lineal por tramos [23]....	27
Figura 2-4 Aproximación lineal por tramos de la característica [14]	30
Figura 3-1 Ejemplo de fluctuación de tensión generada por un horno de arco [1].....	36
Figura 3-2 Curva de tolerancia de <i>flicker</i> de la IEEE Std 141-1993 y la IEEE Std 519-1992 [2], [4]	37
Figura 3-3 Diagrama de bloques simplificado del instrumento de medida [9].....	38
Figura 4-1 Diagrama unifilar del sistema de potencia	47
Figura 4-2 Forma de onda de tensión medida en el PCC de la instalación	48
Figura 4-3 Valores eficaces de tensión medidos en el PCC, ciclo de operación 1	49
Figura 4-4 Valores eficaces de tensión medidos en el PCC, ciclo de operación 2	49
Figura 4-5 Valores de <i>Pst</i> tomados en el PCC, ciclo de operación 1	50
Figura 4-6 Valores de <i>Pst</i> medidos en el PCC, ciclo de operación 2	50
Figura 4-7 Curva de probabilidad acumulativa de <i>Pst</i>	52
Figura 4-8 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo <i>Ayrton</i>	53
Figura 4-9 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo <i>Mayr</i>	55
Figura 4-10 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo <i>Cano-Plata</i>	56
Figura 6-1 Modelo <i>Ayrton</i> en ATP.....	67
Figura 6-2 Modelo de <i>Mayr</i> en ATP	69
Figura 6-3 Modelo <i>Cano-Plata</i> en ATP	70

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1 Parámetros del sistema de prueba	47
Tabla 4-2 Medidas en el PCC, ciclo de operación 1.....	51
Tabla 4-3 Medidas en el PCC, ciclo de operación 2.....	51
Tabla 4-4 Valores de $Pst_{95\%}$ calculados	52
Tabla 4-5 Resultados obtenidos utilizando el modelo <i>Ayrton</i>	54
Tabla 4-6 Resultados obtenidos utilizando el modelo <i>Mayr</i>	55
Tabla 4-7 Resultados obtenidos utilizando el modelo <i>Cano-Plata</i>	57
Tabla 4-8 Resultados de simulación y medidas en la instalación real.....	58

1. Introducción general

1.1 Introducción

Las diferentes acepciones y definiciones del término energía se relacionan con la idea de la capacidad de trabajo, transformación o movimiento. En tecnología y economía, energía se refiere a un recurso natural, así como la tecnología asociada para explotarla y hacer uso industrial y económico del mismo.

No existe actividad en la que no se requiera de manera directa o indirecta la energía para satisfacer las diferentes necesidades del hombre; de acuerdo a esto, la producción, transformación, distribución y consumo de energía tienen como fin satisfacer dichas necesidades.

Los cambios en la forma de obtención y uso de la energía han condicionado el desarrollo económico, social, cultural y ambiental de la humanidad. La electricidad, introducida como alternativa comercial de energía a finales del siglo XIX, ha sido un componente clave en el desarrollo de las naciones. Colombia no fue ajena a este adelanto y desde 1890 ha disfrutado de sus beneficios.

En su forma más básica, un circuito eléctrico de corriente alterna está formado por una carga eléctrica y una fuente que proporciona energía. Siempre que la fuente alimente la carga con una cantidad de energía por unidad de tiempo, es decir una determinada potencia eléctrica, la señal de tensión de la fuente forzará una señal de corriente a través del circuito [1].

La evolución de la tecnología ha provocado en los últimos años un cambio significativo en el tipo de cargas conectadas a la red eléctrica, cada vez son más los equipos que se alimentan a través de un sistema no lineal. Como consecuencia del aumento de cargas

no lineales en las redes de distribución de energía, que distorsionan la forma de onda, y a su vez la sensibilidad de los dispositivos que demandan del sistema un suministro óptimo de energía para su normal funcionamiento, surgen los conceptos de *calidad de la energía* y *calidad de la potencia* [1], [2].

Para los propósitos de este documento, los siguientes términos y definiciones aplican. Para la ampliación del concepto se recomienda consultar directamente la referencia citada o consultar *The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms*.

1.1.1 Definiciones

- **Sistema de alimentación:** "Todas las líneas, conmutadores y transformadores que operan a diferentes tensiones los cuales componen los sistemas de transmisión y los sistemas de distribución a la que las instalaciones de los clientes están conectados" [3].
- **Condiciones normales de operación:** "Condiciones de tensión, corriente y frecuencia que permiten atender la demanda del sistema, las maniobras de la red y la eliminación de fallas, en ausencia de condiciones de fuerza mayor" [4].
- **Corriente de corto circuito:** "Para propósitos de esta norma, es la mínima corriente de corto circuito trifásica que se tenga disponible para hacer la evaluación en el punto de conexión común (amperios rms). En el caso de un usuario monofásico se debe utilizar la corriente de corto monofásica" [4].
- **Potencia de corto circuito:** "Valor teórico expresado en MVA de la potencia de cortocircuito trifásica simétrica inicial en un punto en el sistema de alimentación. Se define como el producto de la corriente simétrica inicial de cortocircuito, la tensión nominal del sistema y el factor $\sqrt{3}$, con la componente aperiódica (DC) siendo despreciada" [3].
- **Punto de conexión común (PCC):** "Punto en el sistema público que es eléctricamente más cercano a la instalación afectada y a otras instalaciones que son o pueden ser conectadas. El PCC es un punto situado aguas arriba de la instalación considerada" [3].
- **Punto de conexión (POC):** "Punto en un sistema público de energía, donde la instalación en consideración está o puede estar conectada" [3].

- **Punto de evaluación (POE):** "Punto en un sistema público de suministro de energía, donde los niveles de emisión de una instalación dada se evaluarán contra los límites de emisión. Este punto puede ser el punto de conexión común (PCC) o el punto de conexión (POC) o cualquier otro punto especificado por el operador del sistema o propietario o acordado" [3].
- **Frecuencia de tensión de alimentación:** "Tasa de repetición de la componente fundamental de alimentación, medida durante un intervalo de tiempo dado" [4].
- **Calidad de la potencia:** "Conjunto de características de la electricidad en un punto dado de un sistema de potencia en un momento determinado, que permiten satisfacer las necesidades requeridas por el usuario de la electricidad. Estas características son evaluadas con respecto a un conjunto de parámetros técnicos de referencia" [4].
- **Carga no lineal:** "Una carga eléctrica cuya característica tensión/corriente es no lineal, es decir la señal de corriente no sigue la misma forma de onda de la señal de tensión, de la cual se está alimentando la carga" [4].
- **Componente armónica:** "Señal senoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental" [4].
- **Componente interarmónica:** "Componente senoidal de una cantidad periódica senoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir, cuya frecuencia no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental" [4].
- **Desbalance de tensión:** "En un sistema polifásico es el estado en el cual el valor eficaz de las tensiones de las fases o los ángulos entre fases consecutivas no son todos iguales" [4].
- **Fluctuación de tensión:** "Serie de cambios en la tensión o variaciones continuas de la tensión eficaz o en el valor pico de la tensión" [4].
- **Flicker:** "Impresión de inestabilidad de la percepción visual inducida por un estímulo de luz cuya luminancia o distribución espectral varía en el tiempo.

Nota: Las fluctuaciones de tensión provocan variaciones de luminancia del alumbrado, lo que produce el fenómeno ocular llamado parpadeo. Por encima de un cierto umbral el parpadeo se vuelve molesto, esta molestia aumenta rápidamente con la amplitud de la fluctuación. Para ciertas tasas de repetición amplitudes incluso débiles pueden resultar molestas" [4].

- **Flicker “a corto plazo” (“short term” flicker - Pst):** "Una medida de la percepción a corto plazo del parpadeo obtenido para un intervalo de diez minutos. Este valor es la salida estándar del flickermeter IEC" [5].
- **Flicker “a largo plazo” (“long term” flicker - Plt):** " Una medida de la percepción a largo plazo del parpadeo obtenidos en un período de dos horas. Este valor se compone de 12 valores consecutivos Pst por la fórmula siguiente:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} Pst_j^3} \text{ " [5].}$$

- **Umbral de perceptibilidad:** "Es el menor nivel de tensión de flicker para el cual un cambio en la intensidad luminosa es discernible para la mayoría de la población" [2].
- **Borde de irritación:** "Es el nivel de tensión de flicker para el cual cambio de intensidad luminosa empieza a ser molesta" [2]
- **Nivel de compatibilidad:** " El nivel de perturbación determinada, utilizado como nivel de referencia en un entorno específico para la coordinación en el establecimiento de límites de emisión e inmunidad. Normalmente es tomado como el nivel de Pst o Plt por encima de los cuales los clientes de baja tensión son propensos a percibir el parpadeo. Estos niveles no se utilizan para evaluar el cumplimiento de una carga individual" [5].
- **Nivel de planificación:** "El nivel de un disturbio en particular, en un ambiente particular, adoptado como valor de referencia para los límites establecidos para las emisiones de grandes cargas e instalaciones, con el fin de coordinar esos límites con todos los límites aprobados para los equipos destinados a ser conectados a el sistema de alimentación. En los estudios de planificación, este es el nivel de Pst o Plt utilizado para evaluar el impacto de la adición de cargas fluctuantes en el sistema de energía eléctrica" [5].
- **Modelo "caja negra" del arco eléctrico:** "Este tipo de modelos consiste en describir el arco eléctrico usando una ecuación diferencial que relaciona sus parámetros eléctricos más relevantes, obtenidos a partir de ensayos que se realizan en laboratorios a los que se le suman técnicas matemáticas para hallar las incógnitas que surjan de la fórmula elegida" [6].
- **Modelo físico del arco eléctrico:** "La utilización de este tipo de modelos requiere la descripción pormenorizada de los proceso físicos internos del arco eléctrico, para lo cual hay que utilizar ecuaciones de balance de energía, balance de masa o de

continuidad y balance del momento, a las que hay que sumarle también la ley de Ohm. El análisis se podrá realizar globalmente o si, se necesita, se deberá realizar utilizando las ecuaciones nombradas para cada una de las direcciones espaciales que posee el arco, radial y axial" [6].

- **Aproximación de la característica tensión-corriente:** "Modelos basados en la característica tensión-corriente a partir de mediciones de campo y con la intención de simplificar parámetros dentro de uno de los modelos anteriores (modelos llamados caja negra y modelos físicos de arcos). Como este modelo entrega las constantes de tiempo del arco, puede tenerse a partir de ellas una identificación de los parámetros necesarios cuando se usa un modelo de caja negra para un estudio de simulación en ATP" [2].
- **Ruido Blanco:** "Ruido, ya sea al azar o impulsivo, que tiene un espectro de frecuencia plana en el rango de frecuencias de interés" [7].
- **Extra alta tensión (EAT):** "Niveles de tensión mayores que 230 kV" [5].
- **Alta tensión (AT):** "Niveles de tensión mayores que 35 kV, pero menores o iguales que 230 kV" [5]
- **Media tensión (MT):** "Niveles de tensión mayores que 1 kV, pero menores o iguales que 35 kV" [5]
- **Baja tensión (BT):** "Niveles de tensión menores o iguales que 1 kV" [5]

1.2 Calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica hace referencia tanto a la calidad de las señales de tensión y de corriente como a la continuidad o confiabilidad del servicio de energía eléctrica. Por tanto, el concepto de calidad de la energía eléctrica puede dividirse en dos grandes tópicos [1]:

- *La calidad del servicio de energía eléctrica*, el cual tiene que ver directamente con el tiempo, es decir, la continuidad del servicio.
- *La calidad de la potencia eléctrica*, que se refiere a las variaciones en la forma de onda, la frecuencia y amplitud de las señales de corriente y tensión.

La calidad de la potencia en un sistema eléctrico, y los parámetros que la definen: amplitud, frecuencia y forma de onda, pueden verse afectados por diferentes tipos de

perturbaciones tales como transitorios electromagnéticos, variaciones de tensión de corta o larga duración, desbalance de tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones en la frecuencia [1], [8].

Las perturbaciones en la calidad de la potencia pueden ser clasificadas de forma simple como *eventos* y *variaciones* [9]. Los *eventos* son desviaciones significativas de la onda de tensión o corriente de su forma ideal que ocurren de forma ocasional. Por otro lado, las *variaciones* son pequeñas desviaciones de la forma de onda caracterizadas por un valor en un instante de tiempo (o un intervalo de tiempo significativamente más largo) que pueden ser monitoreados de manera continua.

Entre los denominados *eventos* se encuentran: interrupciones, huecos de tensión (*sags*), subidas de tensión (*swell*), cambios rápidos de tensión, sobretensiones transitorias y saltos de fase-ángulo [8], [9].

En la categoría de *variaciones* caen las siguientes perturbaciones: distorsiones de la forma de onda (incluye armónicos e interarmónicos), variaciones de tensión lentas, desbalances, fluctuaciones de tensión, superposición de señales de tensión en la red eléctrica, variaciones en la frecuencia nominal, muescas de tensión y ruido [8], [9].

1.2.1 Fluctuaciones de tensión

Las fluctuaciones de tensión son variaciones sistemáticas de la tensión o una serie de cambios de tensión aleatorios [8]. Si las fluctuaciones ocurren en el rango de frecuencia adecuado ocasionan cambios en la luminancia de las lámparas, el cual puede crear el fenómeno visual llamado parpadeo o *flicker* [9].

El término *flicker* hace referencia a la impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo de luz cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo [8].

Cargas con cambios cíclicos significativos en sus componentes reactivos y aquellas que presentan variaciones continuas y rápidas en la magnitud de la corriente de carga pueden causar fluctuaciones de tensión [1], [8].

Las cargas industriales, particularmente aquellas relacionadas con la industria metalúrgica, son consideradas la principal fuente de fluctuaciones de tensión; hornos de arco eléctrico, trenes de laminación y múltiples unidades de soldadura son comunes en este tipo de industrias. En otros casos, grandes cargas de motores de algunas industrias pueden ocasionar también este problema. Cargas domésticas de conmutación repetida, como hornillas, duchas eléctricas, sistemas de calefacción y aire acondicionado, tienen el potencial de causar perturbaciones de manera local [9].

El alto consumo de potencia activa y reactiva por parte de los hornos de arco eléctrico y la naturaleza misma del arco y del proceso de fundición hacen de esta carga una de las más influyentes en el decremento de la calidad de la potencia en una red de distribución [8], [10]–[12]. Tanto operadores de red como usuarios dirigen su atención en mitigar los problemas asociados a este tipo de cargas.

1.3 Modelado de cargas

El modelado de cargas, y de los diferentes componentes de una red eléctrica, puede seguir dos líneas básicas dependiendo principalmente del propósito del estudio.

La primera línea abarca de manera general la evaluación en estado estable; el objetivo es obtener la respuesta del sistema a los componentes no lineales de la carga. En este tipo de estudios la inyección de corrientes, por ejemplo, puede asumirse independiente de las variaciones de tensión en el punto de conexión común. La carga es vista como un subsistema no lineal independiente que puede ser reducido a un circuito equivalente en paralelo [13]–[15].

La segunda línea abarca problemas prácticos más complejos. En muchos casos, la operación de la carga depende estrechamente del estado de operación del sistema de potencia al que está conectado y los componentes no lineales afectan directamente la operación total del sistema, por tanto, las cargas no lineales no pueden ser tratadas por separado del sistema de alimentación [13], [15].

En general, para reducir la complejidad de los modelos y el tiempo de simulación, no se representan todos los elementos del sistema, en su lugar se sigue como pauta [13]:

- Utilizar equivalentes que representen combinaciones serie y paralelo.
- Utilizar el modelo más simple de acuerdo a la aplicación.
- Representar las características en terminales del elemento.
- Implementar el uso de modelos modulares para grandes sistemas.

Al realizar la simulación de circuitos eléctricos y sistemas de potencia se debe mantener un equilibrio entre la complejidad de los modelos y el tiempo de simulación necesario para obtener resultados dentro de una incertidumbre especificada [13].

En la práctica, la operación del horno de arco eléctrico ha sido entendida, la dificultad yace en llevar a un modelo matemático los fenómenos físicos de su operación que permita determinar el impacto de la conexión del horno de arco eléctrico a la red de distribución [16].

Los factores que influyen en la operación del horno de arco eléctrico usualmente incluyen el tipo de material a fundir o refinar, la posición del electrodo, y la tensión de alimentación, entre otros. Los modelos del horno dependerán entonces de diversos parámetros, por ejemplo la tensión, la corriente o la longitud del arco, determinados generalmente por la posición del electrodo [17].

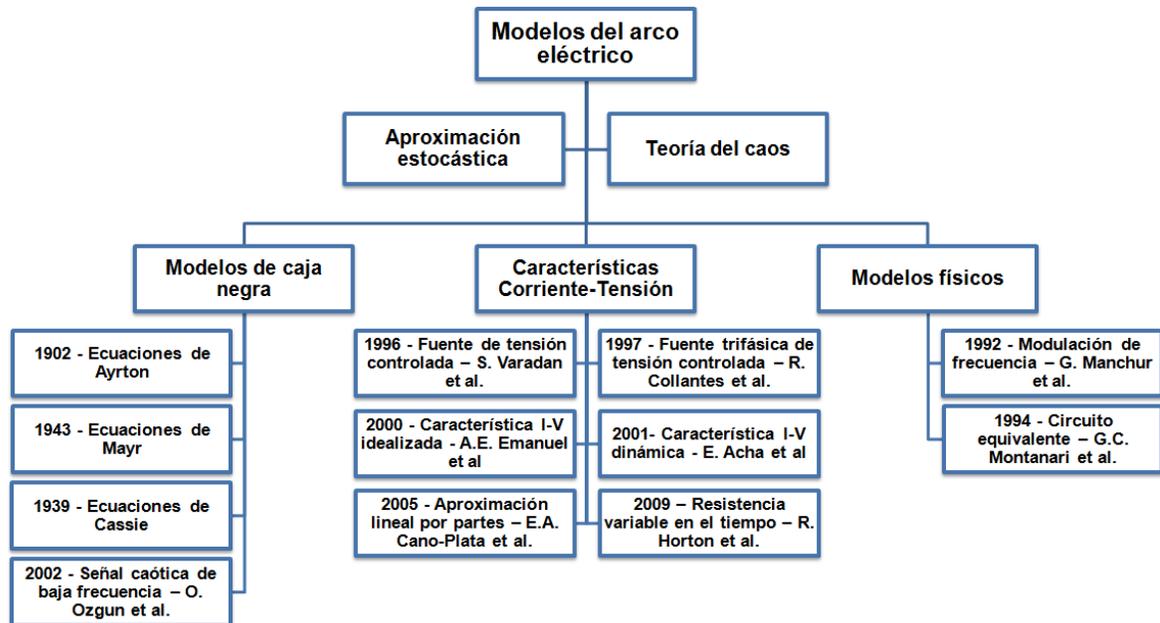
Puesto que no ha sido posible plantear un modelo claro del arco eléctrico que refleje su naturaleza aleatoria y no lineal, generalmente se realizan simulaciones en un punto de operación predefinido [2], [11].

Actualmente, como se observa en la Figura 1-1, las herramientas más comunes para el modelado del arco eléctrico se pueden dividir en tres grandes grupos [2] que no dependen necesariamente del enfoque teórico del autor [18]:

- Modelos llamados de “caja negra” que consideran el arco eléctrico como un dipolo y determina una función de transferencia a través de una fórmula matemática, aproximando el resto de parámetros, a partir de mediciones de campo, como los presentados por [18]–[20].

- Modelos físicos que incluyen una descripción en detalle de los procesos involucrados a partir de las leyes de conservación de la energía y teniendo en cuenta las propiedades físicas del plasma, un ejemplo de estos es planteado por [21], [22].
- Modelos basados en la característica corriente-tensión a partir de mediciones de campo y con la intención de simplificar parámetros dentro de uno de los modelos anteriores; modelos de este tipo son planteados por [10]–[12], [23]–[26]. Como estos modelos entregan las constantes de tiempo del arco, puede tenerse a partir de ellas una identificación de los parámetros necesarios cuando se usan modelos de caja negra [2].

Figura 1-1 Modelado del arco eléctrico



De acuerdo con la aplicación particular y el tipo de estudio a realizar, cada uno de estos modelos presenta fortalezas y debilidades respecto de otros. Para el análisis de mediante simulación digital, el modelo de caja negra puede ser el más adecuado. Esta técnica se basa en una relación de parámetros relevantes del objeto de estudio obtenidos a partir de ensayos a los que se suman técnicas matemáticas para la solución de incógnitas; se obtiene una respuesta en función de la excitación a través de una ecuación diferencial. El principal objetivo de un modelo de este tipo es predecir la conducta del arco sin entrar en detalle en los procesos físicos involucrados [6].

1.4 Justificación

En general, el horno de arco eléctrico es la carga individual más grande presente en una red de distribución. En efecto, una carga de esta magnitud cuyo consumo de potencia activa y reactiva es considerablemente alto, es una fuente potencial de problemas en la calidad de la potencia tales como armónicos, desbalance de tensión y *flicker* (asociado a fluctuaciones de tensión), en una red de distribución [11], [27], [28]. Tanto los operadores de red como los usuarios que cuentan con este tipo de cargas necesitan contar con un método que les permita estimar y evaluar ésta clase de problemas. Es de suma importancia que el horno de arco eléctrico pueda entrar en servicio sin ocasionar problemas a las cargas actuales o futuras [11], [27].

Por otro lado, el uso de herramientas de simulación para el estudio de los sistemas de potencia se ha masificado entre usuarios, investigadores y operadores de red puesto que es posible representar los componentes de un sistema eléctrico de potencia en un entorno seguro que facilita el análisis del comportamiento de la red y los elementos conectados a esta para así tomar decisiones respecto a la planificación, operación y mantenimiento del sistema.

Resulta entonces fundamental el contar con herramientas para el estudio del horno de arco eléctrico que permitan tener una visión previa del comportamiento de este tipo de cargas, su impacto en la red de distribución y poder determinar así la entrada en servicio de nuevas instalaciones. Obtener la respuesta en el tiempo de los hornos de arco eléctrico es de suma importancia en el análisis del impacto dada su no linealidad y el ser una carga variante en el tiempo.

1.5 Hipótesis

Los modelos basados en las características corriente-tensión ofrecen una mejor aproximación al comportamiento del horno de arco eléctrico sobre una red de distribución.

Es posible anticipar el nivel *flicker* al realizar simulaciones a partir de una característica corriente-tensión. Por esto, los esfuerzos se centran en evaluar el desempeño de este

tipo de modelos al momento de estimar la propagación del *flicker* (asociados a las fluctuaciones de tensión) en la red como parte importante en estudios de planificación.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar qué modelo de horno de arco eléctrico simula mejor las condiciones del sistema y su interacción con la red de distribución, tomando como parámetro comparativo el nivel de *flicker* asociado a la fluctuación de tensión de acuerdo con los criterios provistos por la IEC 61000-3-7 y la IEEE 1453.

1.6.2 Objetivos específicos

- Identificar los parámetros eléctricos que influyen en la operación del horno de arco eléctrico para conocer su respuesta y tener un criterio base en la selección de modelos.
- Analizar y simular tres modelos del arco eléctrico con diferente grado de complejidad, para determinar el que mejor se ajuste al estudio.
- Validar el desempeño de los modelos dentro de un sistema de prueba y comparar los resultados de simulación con medidas obtenidas en el punto de conexión común utilizando un instrumento de medida conforme la norma IEC 61000-4-15.

1.7 Metodología

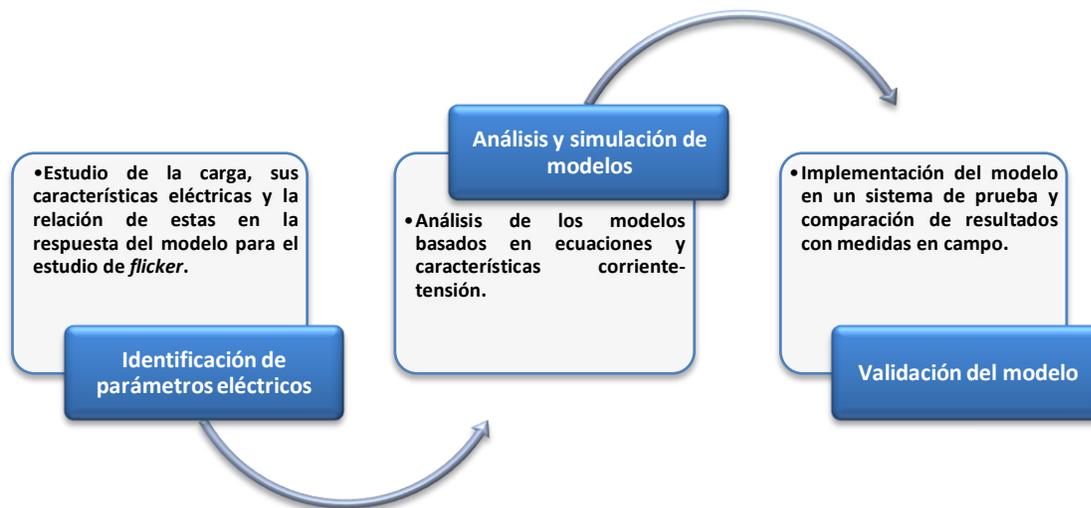
Para determinar qué modelo del horno de arco eléctrico ofrece la mejor aproximación del fenómeno, se hace necesario realizar una investigación descriptiva del fenómeno del arco eléctrico y las técnicas de modelado típicamente utilizadas. El cotejo de los diversos modelos, tanto clásicos como avanzados, permite identificar las fortalezas propias de cada modelo y su pertinencia en el caso de estudio. La implementación del modelo en un sistema de prueba proporciona una base para el análisis del comportamiento de la carga en la red y la estimación de su impacto en el punto de conexión común.

Puesto que la formulación matemática de los modelos puede variar conceptualmente de forma considerable, es necesario confrontar los resultados de simulación, obtenidos con los métodos en el dominio del tiempo comúnmente utilizados para calcular los niveles de

flicker, contra las medidas obtenidas en un horno existente utilizando un instrumento de medida conforme la norma IEC 61000-4-15, a través de la implementación de un sistema de prueba. En esta etapa del proceso de investigación se utilizará el estudio de campo presentado en [2] como complemento a las simulaciones.

Un resumen de la descripción de la metodología para cada objetivo específico es presentado en la Figura 1-2.

Figura 1-2 Desagregación de la metodología



Para dar cumplimiento con el objetivo del estudio se llevaron a cabo una serie de etapas las cuales se listan a continuación:

- Revisión bibliográfica
- Estudio descriptivo de la carga
- Estudio de las herramientas de cálculo y evaluación del nivel de flicker
- Estudio de las técnicas de modelado de la carga
- Comparación de modelos
- Implementación del sistema de prueba
- Cotejo de resultados con medidas en campo
- Puesta a punto del proceso de simulación

1.8 Estructura del documento

En el presente trabajo se define un protocolo de simulación como herramienta para anticipar el impacto del horno de arco eléctrico en el punto de conexión común con una precisión aceptable. Para esto se realizó una recopilación de información y un proceso de análisis y simulación siguiendo la siguiente estructura:

- En el capítulo 1 se presenta una introducción general al tema, términos y definiciones, la motivación y pertinencia del tema, los objetivos trazados y la metodología utilizada para su consecución.
- El capítulo 2 contiene la fundamentación teórica y matemática aplicada en los diferentes métodos de modelado y el análisis de los modelos descritos.
- En el capítulo 3 se definen las perturbaciones objeto de estudio y las herramientas utilizadas para el cálculo y evaluación de los niveles de *flicker* (asociados a fluctuaciones de tensión).
- En el capítulo 4 se encuentran los parámetros del sistema de prueba y se presentan los resultados obtenidos, las comparaciones realizadas, el análisis del error y sus posibles causas.
- En el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas y las posibles líneas de trabajo futuras.

Bibliografía del capítulo

- [1] H. Torres Sanchez, G. M. Acero G., J. Flechas Villamil, J. V. Saucedo B., and C. A. Quintana G., *Calidad de la Energía Eléctrica CEL*, 1st ed. Bogotá, 2001.
- [2] E. A. Cano Plata, A. J. Ustariz Farfán, and H. E. Tacca, *Hornos de arco eléctrico*, 1st ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2011.
- [3] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Guide — Adoption of IEC / TR 61000-3-7 : 2008 , Electromagnetic compatibility (EMC)— Limits — Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV , HV and EHV power systems," *IEEE Std 1453.1-2012*, 2012.
- [4] Norma Técnica Colombiana, "Calidad de la potencia eléctrica. Límites y metodología de evaluación de punto de conexión común," *NTC 5001-2008*, 2008.
- [5] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice — Adoption of IEC 61000-4-15 : 2010 , Electromagnetic Compatibility (EMC)— Testing and Measurement Techniques — Flickermeter — Functional and Design Specifications," *IEEE Std 1453-2011*, no. October, 2011.
- [6] W. F. Giménez Gutiérrez, "Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia - Capítulo 2: Representación del Interruptor de Potencia," Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [7] "IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines," *IEEE Std 539-2005 (Revision IEEE Std 539-1990)*, 2005.
- [8] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *IEEE Std 1159-2009 (Revision IEEE Std 1159-1995)*, 2009.
- [9] P. Caramia, G. Carpinelli, and P. Verde, *Power Quality Indices in Liberalized Markets*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [10] E. A. Cano-Plata and H. E. Tacca, "Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP," in *The 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST '05)*, 2005.
- [11] G. W. Chang, Y. J. Liu, and C. . Chen, "Modeling Voltage-Current Characteristics of an Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A Comparison of Classic and Advanced Models," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1–6.
- [12] R. Horton, T. A. Haskew, and R. F. Burch IV, "A Time-Domain AC Electric Arc Furnace Model for Flicker Planning Studies," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 24, no. 3, pp. 1450–1457, 2009.

- [13] W. Carvajal Carreño, G. Ordóñez plata, A. L. Moreno Wandurraga, and C. A. Duarte Gualdrón, "Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 19, no. 1, pp. 76–92, 2011.
- [14] J. G. Mayordomo, M. Izzeddine, S. Martinez, and R. Asensi, "A contribution for three-phase power flows using the current injection method," in *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 295–300.
- [15] A. M. Gole, A. Keri, C. Nwankpa, E. W. Gunther, H. W. Dommel, I. Hassan, J. R. Marti, J. A. Martinez, K. G. Fehrle, L. Tang, M. F. McGranaghan, O. B. Nayak, P. F. Ribeiro, R. Iravani, and R. Lasseter, "Guidelines for modeling power electronics in electric power engineering applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 505–514, 1997.
- [16] R. F. Burch IV, "Thoughts on improving the electric arc furnace model," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, no. Dc, pp. 1–5.
- [17] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion," in *Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On*, 1998, vol. 2, pp. 1079–1085.
- [18] O. Ozgun and A. Abur, "Flicker study using a novel arc furnace model," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 17, no. 4, pp. 1158–1163, Oct. 2002.
- [19] B. Bhargava, "Arc furnace flicker measurements and control," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 8, no. 1, pp. 400–410, 1993.
- [20] P. Schavemaker and L. Van der Slui, "An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements," *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 580–584, 2000.
- [21] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, and D. Zanielli, "ARC- FURNACE MODEL FOR THE STUDY OF FLICKER COMPESATION IN ELECTRICAL NETWORKS," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 9, no. 4, pp. 2026–2036, 1994.
- [22] G. Manchur and C. C. Erven, "Development of a model for predicting flicker from electric arc furnaces," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 7, no. 1, pp. 416–426, 1992.
- [23] S. Varadan, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "A New Time Domain Voltage Source Model for an Arc Furnace Using EMTP," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 11, no. 3, pp. 1685–1691, 1996.
- [24] R. Collantes-Bellido and T. Gómez, "Identification and modelling of a three phase arc furnace for voltage disturbance simulation," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 12, no. 4, pp. 1812–1817, 1997.

- [25] A. E. Emanuel and J. A. Orr, "An Improved Method of Simulation of the Arc Voltage-Current Characteristic," in *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, 2000, vol. 1, no. 2, pp. 148–154.
- [26] E. Acha and M. Madrigal, "Chapter 12: Electric Arcs," in *POWER SYSTEMS HARMONICS: Computer Modelling and Analysis*, 1st ed., Wiley, 2001, pp. 255–272.
- [27] J. M. Somerville, *The electric arc*, 1st ed. Butler & Tanner Ltd., 1959.
- [28] G. Frind, "Time Constants of Flat Arcs Cooled by Thermal Conduction," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 84, no. 12, pp. 1125–1131, Dec. 1965.

2. Hornos de arco eléctrico

2.1 Introducción

El arco eléctrico, su uso en aplicaciones industriales y las técnicas habituales para su representación han sido tratados desde diferentes enfoques teóricos. Dichas representaciones pueden ser realizadas mediante modelos físicos, sistemas de caja negra y características corriente-tensión.

Utilizando las definiciones del fenómeno del arco eléctrico, con el objeto de tener una interpretación de los eventos relacionados con el funcionamiento del horno de arco eléctrico, se presentan las bases para el modelado y la simulación de la carga.

2.2 El arco eléctrico

El arco eléctrico, caracterizado por una alta corriente y una baja tensión, es una descarga eléctrica en un gas que genera una ionización térmica del medio en contacto. En éste es notorio el crecimiento de la densidad de corriente lo que provoca un aumento considerable de en la temperatura debido al efecto Joule el cual es aprovechado en la industria siderúrgica [1], [2].

Al mantenerse las condiciones en las que fue establecido, la descarga de iones y electrones necesarios para la circulación de corriente, sobre la velocidad de recombinación de estos con el medio, dicho arco puede llegar a transformarse en autosostenido y permanecerá en equilibrio estable ya que la ionización del medio está garantizada por el propio calor del medio [3], [4].

En cada cruce por cero de la corriente, el arco se extingue (sistemas de corriente alterna), cuando esto ocurre, la tensión en el electrodo es aproximadamente igual a la

tensión de la fuente de alimentación. Esta tensión es decisiva para el reencendido del arco [2].

Los equipos eléctricos que utilizan el arco eléctrico en su funcionamiento pueden ser divididos en tres categorías [5]:

- Cargas en corriente alterna (AC por sus iniciales en inglés) alimentadas a través de un transformador, autotransformador o una inductancia en serie, como es el caso de los equipos de soldadura, hornos de arco eléctrico y balastos magnéticos en lámparas de descarga.
- Equipos de arco en corriente directa (DC por sus iniciales en inglés), los cuales utilizan un rectificador para alimentar el arco. En este tipo se ubican soldadores y hornos de arco eléctrico en DC.
- Dispositivos de arco de alta frecuencia, que incluye diversos tipos de lámparas de descarga y algunos equipos de soldadura. Estos equipos generalmente consisten de un rectificador, un filtro DC y un inversor que alimenta el arco. El espectro de frecuencia la corriente de entrada depende del tipo de rectificador, la topología del filtro y de las características del arco.

2.3 Operación del horno de arco eléctrico

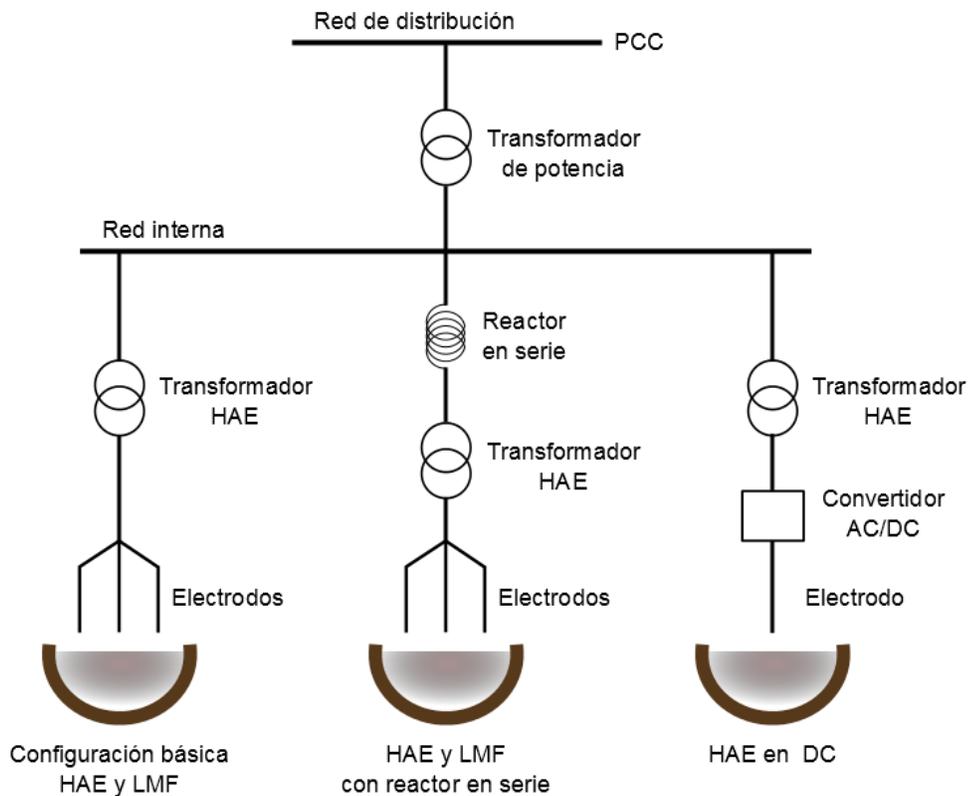
El horno de arco eléctrico (HAE), comúnmente utilizado en la industria siderúrgica, emplea las altas temperaturas ocasionadas por el arco eléctrico que se genera entre el electrodo y el material para la fundición y refinación de metales [1]. La disposición general del horno y su respuesta viene indicada por su geometría, la ubicación y control de los electrodos, además del movimiento ocasionado por el burbujeo de la chatarra en su paso de sólido a líquido.

La configuración básica de un horno de arco eléctrico en corriente alterna (AC), como se observa en la Figura 2-1, consiste en tres (3) electrodos de carbón o grafito conectados al secundario del transformador del horno a través de uno o varios conductores con gran capacidad de transporte de corriente. En la actualidad es usual que el transformador del HAE tenga una estrella-delta con el fin de eliminar algunos armónicos provenientes del horno y que cuente además con un reactor en serie conectado al primario de éste que

limite los cambios bruscos de corriente durante la operación, particularmente en la etapa de perforación [2].

Otro tipo de configuración existente para el HAE es en corriente directa (DC). En general, este tipo de hornos utiliza convertidores de potencia controlados por tiristores que se conectan al secundario del transformador para alimentar un único electrodo ubicado sobre el horno; una base conductora en el fondo completa el circuito eléctrico [6].

Figura 2-1 Configuraciones típicas del horno de arco eléctrico HEA

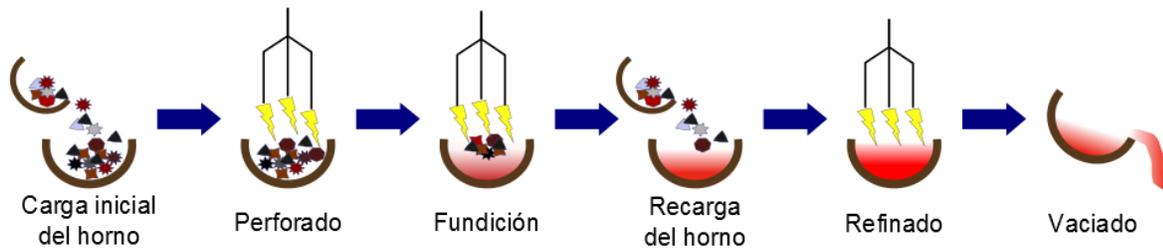


Adicionalmente, es posible encontrar en la industria otro tipo de horno de arco eléctrico llamado "horno de cuchara" (*ladle melt furnace* o LMF por sus siglas en inglés). Este tipo de horno es usado para ajustar la temperatura del metal y su química. Usualmente utilizan una configuración básica como la mostrada en la Figura 2-1.

Independientemente del tipo de configuración usada, la operación del HAE es en esencia la misma. La Figura 2-2 muestra el ciclo de fundición típico de un HAE. El material a

fundir, generalmente chatarra fragmentada, es depositado en el interior del horno y los electrodos bajados hacia el metal el cual sirve para completar el circuito eléctrico entre las fases causando en esencia un corto circuito intencional. El calor resultante por el corto circuito funde el material llevándolo a un estado líquido [2], [6].

Figura 2-2 Ciclo de fundición típico



En la fase inicial del proceso de fundición, o etapa de perforado, el sistema pasa de una condición de corto circuito a una de circuito abierto constantemente y de forma aleatoria debido al movimiento y burbujeo del material [2], [6].

Los fragmentos de metal, que se encuentran en trozos de diferentes tamaños y dispuestos en el horno de forma arbitraria, al comenzar a fundirse se reacomodan provocando colapsos o derrumbes del material que en ocasiones lo alejan de los electrodos causando la extinción del arco eléctrico; para reencender el arco es necesario desplazar los electrodos en dirección hacia el metal ejerciendo sobre ellos una acción de control independiente [6].

Desde el punto de vista eléctrico, este proceso repetitivo de extinción y reencendido del arco es la fuente de grandes variaciones de potencia en la carga que se ven reflejadas en la red como fluctuaciones de tensión [2], [6]. Por otro lado, al tratarse de eventos que se presentan de forma aleatoria para cada uno de los electrodos, es posible que se presenten desbalances de tensión al darse una condición de corto solo en alguna de las fases dejando las demás en una condición de circuito abierto [2].

Normalmente, cuando la carga inicial de material se encuentra fundida, una segunda carga es adicionada al horno y se reinicia el proceso de perforado ocasionando nuevamente el colapso de material y sus efectos sobre el arco eléctrico.

En la medida en la que más material se encuentra fundido, las variaciones de potencia se reducen dando como resultado una operación más suave del horno de arco eléctrico [6]; finalmente se procede a la etapa de refinado de la colada en la cual el nivel de potencia es prácticamente constante y por ende las fluctuaciones de tensión son mínimas, el consumo de potencia se reduce y se alcanza un factor de potencia de hasta nueve decimas (0.9) en el sistema de potencia [2].

2.3.1 Potencia del horno de arco eléctrico

Durante la etapa de fusión, los consumos de potencia activa y reactiva son de orden similar favoreciendo un factor de potencia bajo que permite un mayor aprovechamiento del horno a un costo menor. En el momento en que el arco se extingue la corriente se hace cero, un factor de potencia bajo permite que se establezca una mayor tensión de arco favoreciendo el reencendido de este. De este modo, la operación del horno se hace más estable [2].

En la referencia [2] el autor simplifica el circuito del horno despreciando las componentes resistivas en este, de modo que la potencia activa puede ser calculada como se muestra en la ecuación 2.1.

$$P = \frac{V_f^2}{2X} \sin 2\theta \quad (2.1)$$

donde:

P	potencia activa consumida por el horno;
V_f	tensión de alimentación;
X	reactancia por fase incluyendo la dispersión del transformador;
θ	ángulo de desfase.

La máxima transferencia de potencia hacia el horno es posible cuando $\theta=45^\circ$, es decir el factor de potencia es igual a 0.707. El factor de potencia deseado, dada la potencia nominal, es posible obtenerlo variando el nivel de tensión en el secundario [2].

El consumo de potencia reactiva en el horno durante la etapa de fusión presenta variaciones significativas de más o menos 70% del valor de plena carga en estado estacionario. La potencia reactiva está dada por la ecuación 2.2 [2].

$$Q = 3XI^2 \quad (2.2)$$

donde:

Q	potencia reactiva consumida por el horno;
I	corriente del circuito;
X	reactancia por fase incluyendo la dispersión del transformador.

Para compensar reactivos comúnmente son utilizados condensadores fijos, pero estos pueden ocasionar problemas como sobretensiones durante la operación del banco, sobrecompensación del sistema que pueden elevar los niveles de tensión por encima de los permitidos, y la posibilidad de magnificar los armónicos producidos por el horno si se llega a entrar en resonancia con el sistema a una frecuencia armónica [2].

Los sistemas síncronos de compensación ofrecen una solución al problema de la resonancia, además de ayudar a disminuir el problema de fluctuaciones de tensión generado por el horno, puesto que el rápido control sobre la corriente regula la tensión en la red. Estos sistemas cuentan con componentes de compensación tanto capacitiva como inductiva controlados a través de tiristores que determinan la entrada o salida de las reactancias [2].

En general, el proceso de fundición en el horno de arco eléctrico, de naturaleza variante en el tiempo, puede ser modelado utilizando planteamientos tanto deterministas como estocásticos. Factores que afectan la operación del horno de arco eléctrico, como los materiales a fundir, la posición de los electrodos y el control sobre estos, y los parámetros propios del sistema de potencia que alimenta la carga (como nivel de tensión e impedancia), dificultan en mayor o menor medida el modelado del horno. La descripción del arco eléctrico depende particularmente de tres componentes básicos: tensión del arco, corriente del arco y longitud del arco (la cual es dada por la posición del electrodo), y de la interrelación de estos factores [7].

2.4 Herramientas de modelado

2.4.1 Modelos físicos

Estos modelos utilizan una descripción en detalle de los procesos físico del arco eléctrico a partir de las leyes de conservación de la energía, balance de masa o de continuidad y teniendo en cuenta las propiedades físicas del plasma [2], [8].

Las formas de transmisión de calor desde el arco al medio son tenidas en cuenta, ya sea por movimiento térmico en las cercanías del arco, por transferencia de energía térmica, la cual es proporcional a la conductividad térmica del medio, y también la transferencia de energía por radiación. En general, es necesario conocer parámetros como el campo eléctrico, conductividad eléctrica y térmica, distribución de las temperaturas reinantes, entre otros[8].

2.4.2 Modelos tipo "caja negra"

Los modelos de este tipo consideran al carga como un dipolo y describen el arco eléctrico a través de una ecuación diferencial que relaciona los parámetros eléctricos más relevantes, obtenidos a través de mediciones de campo o ensayos en laboratorio, aproximando los parámetros restantes mediante técnicas matemáticas [2], [8].

Esta técnica se basa en que el sistema no ve qué hay en el interior de la "caja" que se está simulando, puesto que solo se obtiene una respuesta en función de una excitación a la entrada, gobernada por la ecuación diferencial utilizada [8]. Visto de este modo, lo que se pretende encontrar es la mejor y más adecuada relación matemática que proporcione una aproximación al proceso, usualmente, en un punto de operación establecido, y así predecir la conducta del arco sin tener en cuenta los procesos físicos involucrados.

2.4.3 Aproximación de la característica corriente-tensión

Son modelos basados en la curva tensión-corriente característica de la carga, obtenida a partir de mediciones y ensayos con la intención de simplificar parámetros dentro de un modelo del arco eléctrico. Puesto que entregan las constantes de tiempo del arco, puede

tenerse a partir de estas una identificación de los parámetros necesarios cuando se usan modelos de caja negra [2].

2.5 Modelos del arco eléctrico

Desde un punto de vista eléctrico, el entendimiento y descripción del arco eléctrico son los principales objetivos que sigue cualquier modelo. El grado de complejidad no determina el desempeño de un modelo, en realidad, las distintas aplicaciones y el grado de simplificación que se decida asumir, implican posibles imprecisiones con respecto al comportamiento real, válidas dentro del rango específico de la aplicación dada.

En la medida en que mejora el conocimiento de los fenómenos físicos involucrados, han surgido nuevos modelos que intentan reflejar alguna consideración o uso particular, tratando de establecer una relación entre el comportamiento del arco con algunos fenómenos presentes en la red eléctrica.

En la actualidad, gran parte de los modelos de arco eléctrico disponibles en la literatura, como los presentados en [1], [9]–[14], se derivan de los modelos básicos planteados por A.M. Cassie, en la década del 30, y O. Mayr, en la década del 40 [15]. Otros modelos disponibles en la literatura son los presentados por [1], [6], [16]–[21].

Para los propósitos del presente trabajo, los modelos de Mayr y Cassie, considerados básicos, y otros de los disponibles en la literatura son descritos a continuación.

2.5.1 Modelo Ayrton

La tensión del arco v_a , como función no lineal de la corriente de arco i_a , fue estudiada por Hermina Ayrton, planteando la ecuación 2.3 para el modelado del arco eléctrico[5].

$$v_a = A + Bl + \frac{C + Dl}{i_a} \quad (2.3)$$

donde, para electrodos de carbón en aire a una presión normal, los coeficientes son: $A=39$ V, $B=26$ V/cm, $C=11.7$ VA y $D=105$ VA/cm.

Para $C+Dl \ll i_a$ la tensión del arco v_a se aproxima al valor de $A+Bl=V_a$, el cual es constante. Esta observación simplifica matemáticamente el modelo, como se observa en la ecuación 2.4 [5], [22].

$$v_a = V_a \left[\text{sign}(i_a) \right] \quad (2.4)$$

Este modelo del arco eléctrico resulta práctico y conveniente para estudios en estado estacionario, en que la longitud del arco y el instante de re-ignición son relativamente fáciles de determinar[2]

2.5.2 Modelo Cassie

El modelo de Cassie considera la densidad de corriente y la temperatura del canal del arco eléctrico constantes, el campo eléctrico y el área de sección transversal variables en función de la corriente, y la conductancia proporcional a la sección transversal. La pérdida de energía se da por convección y es proporcional a la energía almacenada por unidad de volumen. La ecuación 2.5 muestra la expresión matemática del modelo [8], [12].

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{v_a^2}{U_0^2} - 1 \right) \quad (2.5)$$

donde:

- g conductancia del arco eléctrico;
- V_a tensión del arco eléctrico;
- U_0 tensión del arco en estado estático;
- τ_a constante de tiempo del arco eléctrico.

El modelo está descrito por dos parámetros en particular, la constante de tiempo τ_a y la tensión del arco en estado estacionario U_0 .

2.5.3 Modelo Mayr

El modelo de Mayr, considerado como uno de los modelos básicos del arco eléctrico, plantea que la transferencia de calor al medio se realiza en toda la periferia del arco, de sección transversal constante, por conducción y que la conductividad varía exponencialmente con la energía almacenada [5], [11]. La ecuación 2.6 presenta la expresión del modelo.

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_a} \left(\frac{v_a i_a}{p_{r0}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

donde:

- g conductancia del arco eléctrico;
- v_a tensión del arco eléctrico;
- i_a corriente del arco eléctrico;
- τ_a constante de tiempo del arco eléctrico;
- p_{r0} potencia del arco al momento de la interrupción

El comportamiento eléctrico del arco es simulado utilizando la relación entre la corriente del arco y la tensión del arco a partir la ecuación 2.6. El modelo de Mayr determina que una corriente sinusoidal como la descrita en la ecuación 2.7 ocasiona una tensión de arco como la que se expresa en la ecuación 2.8 [5], [14].

$$i_a = \sqrt{2}I \sin \omega t \quad (2.7)$$

$$v_a = \frac{2V_0 \sin \omega t}{1 - \frac{\sin(2\omega t + \psi_a)}{\sqrt{1 + (2\omega\tau_a)^2}}} \quad (2.8)$$

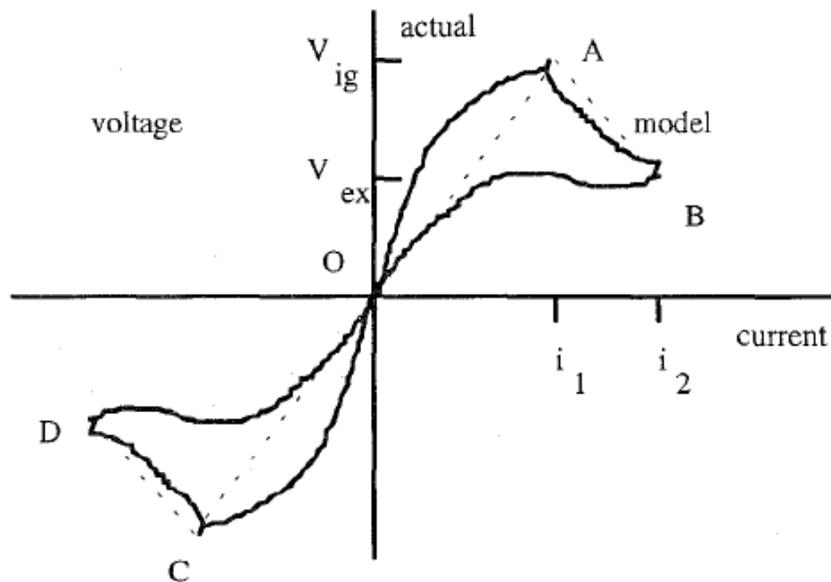
donde: $V_0 = \frac{p_{r0}}{\sqrt{2}I}$ y $\tan \psi_a = \frac{1}{2\omega\tau_a}$.

En este modelo la tensión se considera como no plana, y la solución se presenta en una sola dimensión considerando el canal plasmático como una estructura tubular [22]. La constante de tiempo τ_a y la potencia del arco al momento de la interrupción p_{ro} , son los parámetros que describen al modelo.

2.5.4 Modelo S. Varadan

El horno de arco eléctrico, modelado comúnmente como una carga, es modelado en [23] como una fuente de tensión controlada, a partir de una aproximación lineal por partes de la característica corriente-tensión de la carga, como se observa en la Figura 2-3. De este modo, los cambios en las condiciones de operación del horno son tenidas en cuenta mediante la modificación de la característica corriente-tensión sin importar si se considera el modelo de la carga de manera estática o dinámica.

Figura 2-3 Característica tensión-corriente real y aproximación lineal por tramos [23]



La aproximación de la característica está definida para el primer cuadrante de la Figura 2-3 en términos de la corriente de ignición y la corriente de extinción según la ecuación 2.9 y la ecuación 2.10, respectivamente [23].

$$i_1 = \frac{V_{ig}}{R_1} \quad (2.9)$$

$$i_2 = V_{ex} - V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.10)$$

La tensión del arco está dada por la ecuación 2.11.

$$v = \begin{cases} iR_1 & 0 \leq |i| \leq i_1 \\ iR_2 + V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) & i_1 \leq |i| \leq i_2 \end{cases} \quad (2.11)$$

donde:

R_1 pendiente del segmento OA ;

R_2 pendiente del segmento AB ;

V_{ig} tensión de ignición;

V_{ex} tensión de extinción;

i_1 corriente de ignición;

i_2 corriente de extinción;

Dado que el área bajo la curva en la Figura 2-3 es la potencia consumida por la carga, la resistencia del arco R_1 puede calcularse en términos de la potencia consumida P como se muestra en la ecuación 2.12 [23].

$$R_1 = \frac{V_{ig}^2}{\left(P + \frac{V_{ig}^2}{R_2} - \frac{V_{ex}^2}{R_2} \right)} \quad (2.12)$$

El modelo estático del horno de arco eléctrico puede ser obtenido a partir de las ecuaciones 2.11 y 2.12 para cualquier potencia dada y su característica corriente-tensión nominal. El modelo dinámico se obtiene considerando cambios periódicos o estocásticos de la resistencia de arco hallada con la ecuación 2.12 para una condición de carga dada.

La fuente de tensión controlada que representa el modelo tiene como parámetros la tensión de ignición V_{ig} , la tensión de extinción V_{ex} , la pendiente del segmento AB R_2 y la potencia consumida por la carga P .

2.5.5 Modelo Cano-Plata

Al igual que el modelo descrito en el numeral anterior (Modelo S. Varadan), este modelo se basa en una característica corriente-tensión, la cual se aproxima por tramos lineales teniendo la potencia activa consumida por la carga entre los parámetros de entrada, haciendo el modelo dependiente de las condiciones de carga. La Figura 2-4 muestra una característica típica de un horno de arco eléctrico aproximada en tres regiones de acuerdo con la ecuación 2.15, la cual está definida por las ecuaciones 2.13 y 2.14 [14].

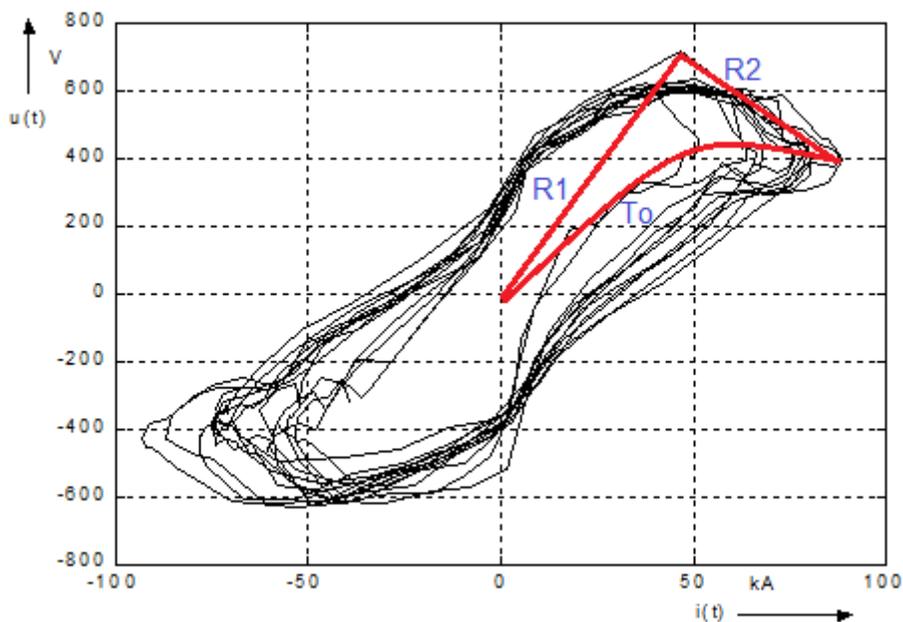
$$i_1 = \frac{V_{ig}}{R_1} \quad (2.13)$$

$$i_2 = V_{ex} - V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.14)$$

$$v = \begin{cases} iR_1 & 0 \leq |i| \leq i_1 \\ iR_2 + V_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1} \right) & i_1 \leq |i| \leq i_2 \\ (i_1 - i_2) e^{-(|p_{ro}|*(t/\tau_a))} & \frac{d|i(t)|}{dt} < 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

donde V_{ex} es la tensión de extinción, V_{ig} la tensión de ignición, i_1 la corriente de ignición y i_2 la corriente de extinción. La inercia térmica es modelada utilizando parte del modelo de Mayr, con una constante de tiempo τ_a [14].

Figura 2-4 Aproximación lineal por tramos de la característica [14]



El modelo toma como parámetros de entrada la pendiente R_1 , la pendiente R_2 , la potencia p_{ro} y la constante de tiempo τ_a .

2.6 Análisis de modelos

Los modelos físicos, cuyas ecuaciones describen el arco, usualmente utilizan tal cantidad de parámetros que su correcta aplicación no es posible para la mayoría de los usuarios, que no pueden determinar dichos parámetros con facilidad. De este modo, su utilización queda limitada a unos cuantos capaces de descifrar la gran cantidad de variables involucradas en el conjunto de ecuaciones. Su principal aplicación se da en el entendimiento de los procesos físicos involucrados en el arco eléctrico y la posibilidad de valorar su comportamiento.

Modelos tipo caja negra permiten describir la influencia de la red eléctrica sobre el arco y estudiar su comportamiento para variaciones del circuito, como la inclusión de reactores

en serie. Con estos, también es posible obtener valores estadísticos que permitan la evaluación de perturbaciones. Sus inconvenientes más notorios son la necesidad de contar con medidas y espectros de onda que permitan hallar los parámetros que gobiernan el arco.

La utilización de las características corriente-tensión como base para el modelado tiene la ventaja que integra las propiedades físicas del arco en parámetros eléctricos propios de la red, reduciendo de este modo los problemas típicos en la determinación de parámetros. Sin embargo, la necesidad de contar previamente con curvas características reduce la simpleza del análisis, perdiendo así parte de su ventaja sobre otros métodos.

Aunque las distintas técnicas de modelado pueden ser utilizadas para determinados casos, el estudio deja de lado los modelos físicos y se centra en las dos herramientas de modelado restantes. Finalmente, para analizar el comportamiento del horno de arco eléctrico se consideraran tres modelos con grados de complejidad diferente:

- Un modelo simple del arco eléctrico, como el modelo *Ayrton*, que resulta práctico para determinar la tensión del arco.
- Un modelo más completo, que considere a la conductancia del arco variable en el tiempo, como lo hace el modelo *Mayr*.
- Un modelo que sea capaz de representar el arco como una conductancia dinámicamente variable en función de los valores de tensión y corriente del arco, aproximándose a la característica corriente-tensión, planteamiento hecho en el modelo *Cano-Plata*.

2.7 Conclusiones del capítulo

El proceso de fundición en el horno de arco eléctrico es no estacionario y de tipo estocástico, por tanto, un modelo determinista que proporcione una aproximación con un buen grado de exactitud es difícil de conseguir.

Al incorporar un modelo de la carga en sistema de "caja negra", la representación de todos los elementos se hace innecesaria, generalmente se simula únicamente la característica en los terminales de la carga.

Bibliografía del capítulo

- [1] G. W. Chang, Y. J. Liu, and C. . Chen, "Modeling Voltage-Current Characteristics of an Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A Comparison of Classic and Advanced Models," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1–6.
- [2] E. A. Cano Plata, A. J. Ustariz Farfán, and H. E. Tacca, *Hornos de arco eléctrico*, 1st ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2011.
- [3] J. M. Somerville, *The electric arc*, 1st ed. Butler & Tanner Ltd., 1959.
- [4] G. Frind, "Time Constants of Flat Arcs Cooled by Thermal Conduction," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 84, no. 12, pp. 1125–1131, Dec. 1965.
- [5] A. E. Emanuel and J. A. Orr, "An Improved Method of Simulation of the Arc Voltage-Current Characteristic," in *Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on*, 2000, vol. 1, no. 2, pp. 148–154.
- [6] R. F. Burch IV, "Thoughts on improving the electric arc furnace model," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, no. Dc, pp. 1–5.
- [7] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "Effect of Different Arc Furnace Models on Voltage Distortion," in *Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On*, 1998, vol. 2, pp. 1079–1085.
- [8] W. F. Giménez Gutiérrez, "Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia - Capítulo 2: Representación del Interruptor de Potencia," Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [9] M. Torabian Esfahani and B. Vahidi, "A New Stochastic Model of Electric Arc Furnace Based on Hidden Markov Model: A Study of Its Effects on the Power System," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 4, pp. 1893–1901, Oct. 2012.
- [10] D. M. Vilathgamuwa, K.-J. Tseng, and Y. Wang, "An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 3, pp. 429–436, May 1997.
- [11] P. Schavemaker and L. Van der Slui, "An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements," *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 15, no. 2, pp. 580–584, 2000.
- [12] M. Alonso and M. Donsion, "An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis," *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 19, no. 1, pp. 367–373, 2004.
- [13] A. A. Gomez, J. J. M. Durango, and A. E. Mejia, "Electric arc furnace modeling for power quality analysis," in *2010 IEEE ANDESCON*, 2010, pp. 1–6.

-
- [14] E. A. Cano-Plata and H. E. Tacca, "Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP," in *The 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST '05)*, 2005.
- [15] W. F. Giménez Gutiérrez, "Modelización de Interruptores Eléctricos de Potencia - Capítulo 3: Metodología para la Modelización de Interruptores," Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [16] L. Spasojević, I. Papič, and B. Blažič, "A new approach to the modelling of electric arc furnaces with representative voltage samples," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, p. n/a–n/a, Mar. 2014.
- [17] E. Acha and M. Madrigal, "Chapter 12: Electric Arcs," in *POWER SYSTEMS HARMONICS: Computer Modelling and Analysis*, 1st ed., Wiley, 2001, pp. 255–272.
- [18] Y. N. Toulouevski and I. Y. Zinurov, *Innovation in Electric Arc Furnaces*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [19] O. Ozgun and A. Abur, "Flicker study using a novel arc furnace model," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 17, no. 4, pp. 1158–1163, Oct. 2002.
- [20] G. Jang, W. Wang, G. T. Heydt, S. S. Venkata, and B. Lee, "Development of Enhanced Electric Arc Furnace Models for Transient Analysis," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 29, no. 11, pp. 1060–1073, Nov. 2001.
- [21] T. Zheng and E. Makram, "An adaptive arc furnace model," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 15, no. 3, pp. 931–939, 2000.
- [22] S. Ramírez Castaño and E. A. Cano Plata, *Calidad del servicio de energía eléctrica*, 1st ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2003.
- [23] S. Varadan, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "A New Time Domain Voltage Source Model for an Arc Furnace Using EMTP," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 11, no. 3, pp. 1685–1691, 1996.

3. *Flicker* y propagación de *flicker* en sistemas de potencia

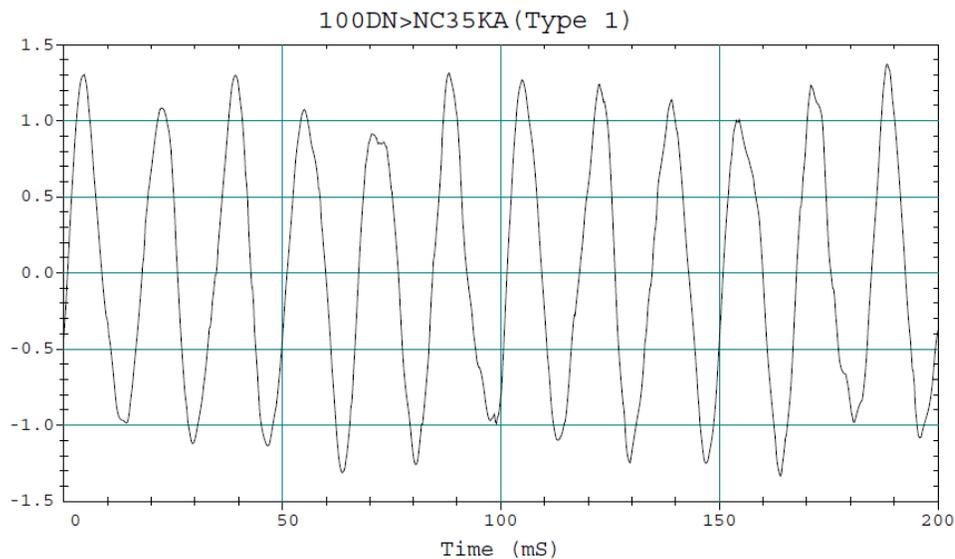
3.1 Introducción

Fluctuaciones de tensión en una red de distribución pueden ocasionar un cambio perceptible en la luminancia de equipos de iluminación. Este fenómeno, referido normalmente como *flicker*, puede ser medido y evaluado a través de soluciones de instrumentación, con medidas directas sobre la red, o a través de cálculos realizados a partir de espectros de tensión obtenidos por simulación, siguiendo siempre los lineamientos de la IEC 61000-4-15.

Para propósitos de estudios de impacto, los métodos de cálculo y evaluación de los niveles de *flicker* son descritos de acuerdo con los criterios establecidos en las normas que lo regulan.

3.2 Fluctuaciones de tensión y *flicker*

Las fluctuaciones de tensión se presentan generalmente como una modulación de la forma de onda a frecuencia fundamental, similar a la modulación de amplitud en una señal de radio *am*. Por tanto, para el fenómeno *flicker*, atribuido a las variaciones de tensión, es posible definir fácilmente la magnitud de la fluctuación de tensión como el valor *RMS* de la señal de modulación. Esta puede ser obtenida mediante la demodulación de la onda para remover la frecuencia fundamental y así medir la magnitud de los componentes de modulación. Si la frecuencia se encuentra en un rango de 6 Hz a 8 Hz, magnitudes tan pequeñas como 0.25 pueden resultar en un notable parpadeo de las lámparas [1]. La Figura 3-1 muestra un ejemplo de una forma de onda de tensión que ocasiona parpadeo en lámparas.

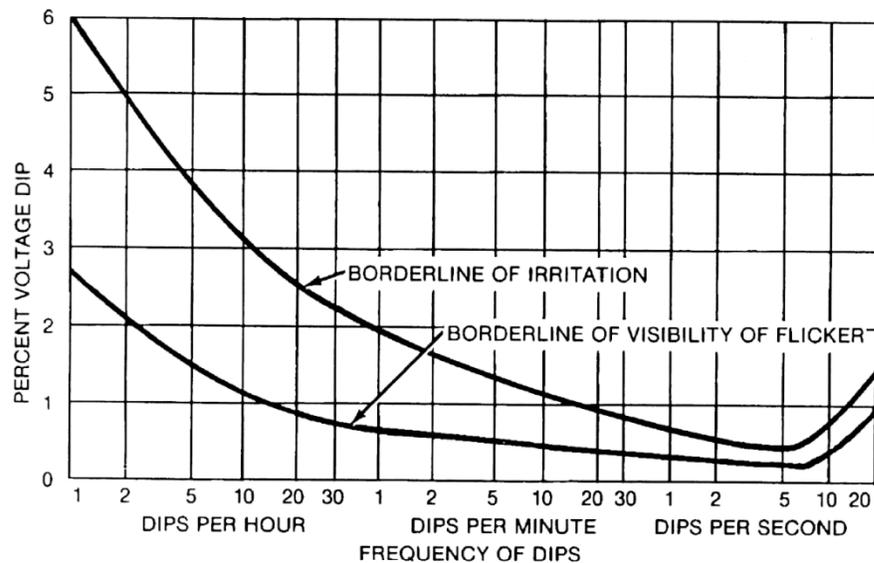
Figura 3-1 Ejemplo de fluctuación de tensión generada por un horno de arco [1]

Arranque de motores y corto circuitos en líneas cercanas pueden ocasionar desde parpadeo de luces hasta huecos de tensión momentáneos que afectan el correcto funcionamiento de equipo sensible. Hornos de arco y soldadores pueden ocasionar fluctuaciones de tensión de manera repetida en un intervalo de tiempo; esto ocasiona un efecto estroboscópico particularmente irritante para las personas [2].

Los sistema de iluminación son particularmente sensibles a las variaciones en la tensión de alimentación, y las personas perciben con facilidad ese cambio repentino en el nivel de iluminación. Variaciones entre el 0.25 y el 0.5% pueden provocar una notable reducción en el nivel de iluminación de lámparas incandescente e incluso de lámparas de descarga de alta presión (*High Intensity Discharge - HID*) [1], [2].

La Figura 3-2, comúnmente conocida como la curva de *General Electric*, muestra los límites aceptables para lámparas incandescentes. Las curvas muestran que la magnitud de la variación de tensión aceptable depende de la frecuencia de ocurrencia. En la curva inferior se observa el límite a partir del cual es posible observar el parpadeo, mientras la superior presenta el punto a partir del cual el fenómeno es irritante. Por ejemplo, con un frecuencia de ocurrencia de 10 veces por hora, el ojo humano comienza a percibir fluctuaciones de tensión mayores de 1%, y se hace inadmisible cuando la magnitud supera el 3% [2], [3].

Figura 3-2 Curva de tolerancia de *flicker* de la IEEE Std 141-1993 y la IEEE Std 519-1992 [2], [4]



3.2.1 Estimación del nivel de *flicker*

El alto consumo de potencia activa y reactiva del horno de arco eléctrico y la naturaleza variante en el tiempo del arco eléctrico y del proceso de fundición, ocasionan durante su operación distorsiones tales como desbalances de carga, armónicos, interarmónicos y fluctuaciones de tensión (que se manifiestan en el cambio perceptible de luminosidad de lámparas incandescentes o *flicker*), haciendo de este tipo de cargas una de las más influyentes en el decremento de la calidad de la potencia [5]–[7]. Tanto operadores de red como usuarios dirigen su atención en mitigar los problemas de calidad de la potencia asociados a las cargas [5]. Por todo esto, el nivel de *flicker*, como parámetro a evaluar, debe ser incluido en los estudios de planificación (como flujos de carga) que determinan la entrada en servicio de instalaciones con horno de arco eléctrico y su conexión a una red de distribución [6].

La IEC 61000-3-7 [8] y la IEEE Std 1453 [3] proveen los criterios para determinar la severidad y evaluar el impacto en el sistema de cargas generadoras de *flicker* como los hornos de arco eléctrico.

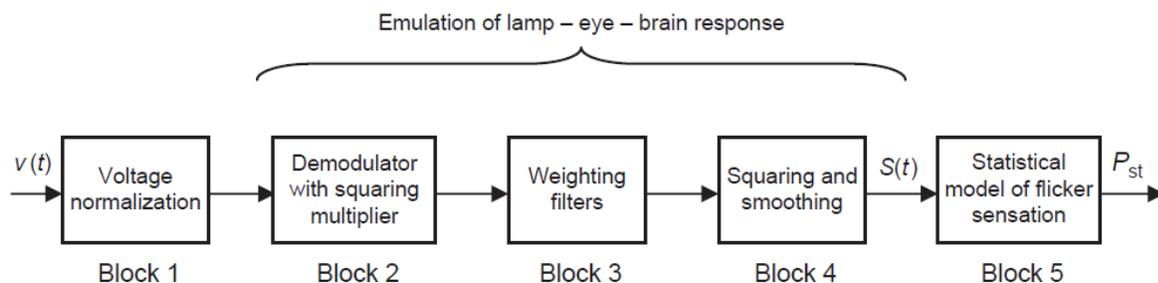
Los criterios utilizados en [8] y [3] para el estudio y evaluación del impacto en el sistema de las fluctuaciones son el *flicker* “a corto plazo” (“*short term flicker - Pst*”) y el *flicker* “a

largo plazo" ("long term" flicker - Plt). El Pst se basa en intervalos de medida de diez (10) minutos, mientras el Plt es basado en intervalos de dos (2) horas.

El nivel de flicker es medido utilizando un instrumento diseñado para tal fin de acuerdo con la norma IEC 61000-4-15 denominado *flickermeter*, el cual estima la variación de luminosidad a partir de las fluctuaciones de tensión que las ocasiona. La Figura 3-3 muestra el diagrama de bloques simplificado del *flickermeter* según la norma. Las distintas partes de dicho medidor son:

- Bloque 1: Contiene un circuito adaptador de tensión que escala la señal de tensión de entrada a un nivel de referencia interno. De este modo, la evaluación del flicker es puede ser realizada en porcentaje de manera independiente al nivel de tensión de la entrada.
- Bloque 2: Obtiene las fluctuaciones de tensión elevando al cuadrado la señal de entrada escalada para simular el comportamiento de una lámpara.
- Bloque 3: Está compuesto por dos filtros en cascada, el primer filtrado se encargan de eliminar las componentes DC y el rizado residual de la onda a la salida del demodulador, y el segundo simula la respuesta en frecuencia a una fluctuación sinusoidal de la lámpara y el ojo humano.
- Bloque 4: Contiene un multiplicador cuadrado para representar la percepción visual no lineal del parpadeo por la combinación ojo-cerebro. La salida de este bloque representa el sensación inmediata de parpadeo.
- Bloque 5: Realiza el análisis estadístico en línea del nivel de flicker instantáneo, permitiendo el cálculo directo de los parámetros de evaluación.

Figura 3-3 Diagrama de bloques simplificado del instrumento de medida [9]



La medida de severidad designada Pst es obtenida mediante el análisis estadístico realizado en el bloque 5 del instrumento de medida utilizando la ecuación 3.1 [3], [10].

$$Pst = \sqrt{k_{0.1}P_{0.1} + k_1P_{1s} + k_3P_{3s} + k_{10}P_{10s} + k_{50}P_{50s}} \quad (3.1)$$

Donde $K_{0.1}$, K_1 , K_3 , K_{10} , y K_{50} son constantes definidas por la IEC en [10] y $P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , y P_{50} son los niveles de flicker excedidos para 0.1%, 1%, 3%, 10%, y 50% de tiempo del periodo de observación. El sufijo s en la formula indica que valores suavizados deben ser usados en la fórmula siguiendo las ecuaciones 3.2-3.5.

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \quad (3.2)$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \quad (3.3)$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2.2} + P_3 + P_4}{3} \quad (3.4)$$

$$P_{1s} = \frac{P_{0.7} + P_1 + P_{1.5}}{3} \quad (3.5)$$

El término $P_{0.1}$ no varía bruscamente debido a la constante de tiempo en el instrumento, por tanto no es necesario el suavizado de este percentil [10].

La IEC 61000-3-7 indica que niveles de probabilidad basados en una distribución acumulativa son utilizados para determinar el cumplimiento de los límites de compatibilidad. Si un nivel de probabilidad del 95% es utilizado, dados los 1008 intervalos de Pst en una semana, una carga puede exceder los valores recomendados de Pst por 50 intervalos de tiempo y aún así seguir cumpliendo [3], [8], [11].

En estudios de planificación para una instalación futura de un horno de arco eléctrico, el nivel de flicker puede ser calculado utilizando el método propuesto por la IEC 67000-3-7.

De acuerdo con [8], el nivel de *flicker* creado por un horno de arco eléctrico puede ser estimado utilizando la ecuación 3.6.

$$Pst_{95\%} = K_{st} \frac{S_{SCf}}{S_{SC}} \quad (3.6)$$

donde:

- K_{st} coeficiente característico de emisión para el *Pst*;
- S_{SCf} potencia de corto circuito en la punta de los electrodos del horno;
- S_{SC} potencia de corto circuito del sistema en el punto de evaluación.

Es sabido que si la potencia de corto circuito aumenta, el nivel de flicker producido decrece en la misma proporción. En el caso de niveles de corto circuito muy bajos, el nivel de flicker puede ser mayor de lo esperado, esto se debe al hecho que la inestabilidad del arco aumenta cuando es operado en un sistema de potencia débil [8].

Posterior a la conexión de la carga, es posible evaluar los niveles de flicker mediante una medición de tensión simple en el punto de evaluación (POE), siguiendo el método propuesto en [8]. Para esto, la instalación a evaluar deberá ser la única fuente de flicker importante en el sistema durante el periodo de medida. Generalmente, un nivel de *Pst* existente en el sistema inferior a 0,35 no es tenido en cuenta [8], [11].

Si la potencia de corto circuito declarada para la evaluación de la instalación difiere de la real en el momento de la medida, los niveles de emisión de *flicker* de la instalación obtenidos pueden ser referenciados a términos de la potencia de corto circuito declarada usando la ecuación 3.7.

$$Pst_{referenciado,95\%} = Pst_{medido,95\%} \frac{S_{SC,real}}{S_{SC,declarado}} \quad (3.7)$$

donde:

$S_{SC,real}$	potencia de corto circuito real en el punto de evaluación durante la medición;
$S_{SC,declarado}$	potencia de corto circuito declarada, la cual ha sido especificada por el operador del sistema para la evaluación de la emisión de <i>flicker</i> de la instalación;
$Pst_{medido,95\%}$	nivel de flicker medido en el punto de evaluación;
$Pst_{referenciado,95\%}$	nivel de flicker medido en el punto de evaluación referenciado a la potencia de corto circuito declarada.

Para determinar el nivel de emisión con respecto a la potencia de corto circuito declarada, la potencia de corto circuito real durante la medición debe ser determinada y no deberá variar significativamente durante todo el periodo de medida [8], [11].

3.3 Síntesis del capítulo

El nivel de *flicker* creado por una carga puede ser conocido a través de cálculos o medidas directas en los que se aplican los criterios mencionados.

En estudios de planificación para una instalación futura de un horno de arco eléctrico, el nivel de *flicker* puede ser calculado utilizando métodos como el propuesto en la IEC 61000-4-15.

Los parámetros del sistema afectan en gran medida la operación del horno de arco eléctrico, por tanto, las medidas realizadas en otras instalaciones similares no pueden ser utilizadas para estimar el nivel de fluctuación en la locación propuesta para una carga futura.

Bibliografía del capítulo

- [1] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," *IEEE Std 1159-2009 (Revision IEEE Std 1159-1995)*, 2009.
- [2] "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants," *IEEE Std 141-1993*, 1994.
- [3] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Recommended Practice — Adoption of IEC 61000-4-15: 2010 , Electromagnetic Compatibility (EMC)— Testing and Measurement Techniques — Flickermeter — Functional and Design Specifications," *IEEE Std 1453-2011*, no. October, 2011.
- [4] IEEE Industry Applications Society and IEEE Power Engineering Society, "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *IEEE Std 519-1992*, 1993.
- [5] G. W. Chang, Y. J. Liu, and C. . Chen, "Modeling Voltage-Current Characteristics of an Electric Arc Furnace Based on Actual Recorded Data: A Comparison of Classic and Advanced Models," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1–6.
- [6] R. Horton, T. A. Haskew, and R. F. Burch IV, "A Time-Domain AC Electric Arc Furnace Model for Flicker Planning Studies," *Power Deliv. IEEE Trans.*, vol. 24, no. 3, pp. 1450–1457, 2009.
- [7] E. A. Cano-Plata and H. E. Tacca, "Arc Furnace Modeling in ATP-EMTP," in *The 6th International Conference on Power Systems Transients (IPST '05)*, 2005.
- [8] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 3-7: Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems," *IEC 61000-3-7*, pp. 1–10, 2008.
- [9] P. Caramia, G. Carpinelli, and P. Verde, *Power Quality Indices in Liberalized Markets*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [10] International Electrotechnical Commission, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications," *IEC 61000-4-15*, 2010.
- [11] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Guide — Adoption of IEC / TR 61000-3-7 : 2008 , Electromagnetic compatibility (EMC)— Limits — Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV , HV and EHV power systems," *IEEE Std 1453.1-2012*, 2012.

4. Implementación y simulación en ATP

4.1 Introducción

Las diversas formas de abordar el estudio de la naturaleza del fenómeno del arco eléctrico, y las diferencias en los enfoques metodológicos de los autores, se ven reflejados en la formulación matemática de los modelos del arco eléctrico haciendo que estos varíen conceptualmente de manera considerable. Es necesario entonces confrontar los resultados que arrojan los modelos con medidas reales mediante la implementación de un sistema de prueba basado en una instalación existente. Inicialmente se comparan los valores eficaces de tensión de las señales simuladas y reales, y posteriormente los valores de Pst (“short term” flicker).

Las simulaciones son realizadas en el dominio del tiempo utilizando las herramientas provistas por el programa de cálculo de transitorios electromagnéticos *Alternative transients program - ATP* para la solución de problemas de calidad de la potencia.

4.2 Consideraciones generales

4.2.1 Dominio del tiempo y dominio de la frecuencia

Existen dos enfoques básicos como métodos de solución para el análisis de problemas de calidad de la potencia en sistemas de distribución, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia [1], [2]. Los circuitos son simulados utilizando intervalos discretos de tiempo o frecuencia (pasos Δf o Δt), lo cual puede llevar a errores de truncamiento en las simulaciones [2].

El tratamiento directo que le da a los fenómenos físicos la formulación en el dominio del tiempo, resulta conveniente al momento de modelar los elementos no lineales presentes en el sistema. Por su parte, el planteamiento que se hace para el trabajo en el dominio

de la frecuencia se basa en transformaciones matemáticas, las cuales, para el caso particular de los sistemas lineales cuya respuesta en estado estacionario tiene una relación lineal con la excitación sinusoidal, son ampliamente difundidas [1].

Una simulación en el dominio de la frecuencia, comparado con el cálculo en el dominio del tiempo, resulta más robusta debido a que la solución del circuito es hallada en cada frecuencia de manera independiente, por lo cual el error de truncamiento no es acumulativo. En este tipo de soluciones las no linealidades del sistema son tratadas típicamente utilizando el método conocido como inyección de corrientes [1], [2].

Para la evaluación de armónicos, simulaciones en el dominio de la frecuencia requieren menos tiempo computacional que en el dominio del tiempo; sin embargo, pueden presentar dificultades en el manejo de sistemas dinámicos, interfaces de control y transitorios de frente rápido [2].

La solución en el dominio del tiempo se basa en la integración sobre intervalos discretos de tiempo aplicando métodos numéricos a través de diferentes programas que utilizan técnicas iterativas o de solución directa. La estabilidad y precisión de los resultados dependerá directamente de el paso de tiempo establecido. Si este se selecciona de manera inapropiada el error de truncamiento acumulado en cada paso puede hacer que la solución diverja considerablemente [2].

Dada la flexibilidad para el modelado de las no linealidades y el manejo sobre los sistemas dinámicos y los transitorios, las simulaciones en el dominio del tiempo presentan ventajas significativas sobre los métodos en el dominio de la frecuencia, aunque su tiempo de cálculo es mayor cuando se trata de redes grandes y poco amortiguadas [1].

4.2.2 Programa para el cálculo de transitorios electromagnéticos

El programa para el cálculo de transitorios electromagnéticos *Electromagnetic Transients Program - EMTP*, y su versión alternativa *Alternative transients Program - ATP*, son herramientas computacionales desarrolladas para el análisis de fenómenos transitorios en las redes eléctricas de potencia, aplicables también al estudio de circuitos electrónicos [1], [3].

La filosofía de simulación del programa tiene como fin la representación de un sistema eléctrico de potencia regulado bajo el efecto de regímenes transitorios, donde las fuentes de los fenómenos transitorios están definidas siguiendo el contexto y las condiciones de operación de la instalación. El análisis de dichos fenómenos tiene como objetivo la estimación de los efectos sobre la estabilidad del sistema, con miras a definir los protocolos que deberán implementarse para mejorar su funcionamiento [3].

Puesto que una red eléctrica bajo estudio de regímenes transitorios puede llegar a ser un sistema complejo por causa de la interacción de los fenómenos eléctricos, magnéticos y mecánicos, la descripción numérica mediante ecuaciones diferenciales de los elementos representativos deberá ser estable. Por esto, el método de integración trapezoidal es escogido por su simplicidad y eficacia en los así llamados sistemas rígidos. Dicho método hace que la simulación de un sistema de potencia con n nodos, que contenga impedancias complejas, máquinas eléctricas estáticas y rotativas y otra variedad de dispositivos, se reduzca a la solución de un conjunto de ecuaciones algebraicas reales simultáneas y expresadas bajo la forma de conductancia nodal (formulación nodal), las cuales pueden ser resueltas en cada paso de tiempo Δt [3].

4.2.3 Modelado de los componentes del sistema

Los elementos que conforman un sistema de potencia pueden ser representados a través de cargas lineales o no lineales de acuerdo a las características predominantes del elemento. Entre aquellos que pueden representarse a través de impedancias lineales se encuentran las líneas de transmisión y algunas cargas. Dispositivos de electrónica de potencia y aquellos con características no lineales, pueden ser representados utilizando elementos equivalentes en combinaciones serie y paralelo, o dipolos que representan las características en terminales del elemento [3].

4.2.4 Errores de simulación

Durante el proceso de simulación pueden presentarse errores provenientes de diversas fuentes, por ejemplo, la aproximación de los modelos del sistema, elementos para el control de la oscilación numérica [4], truncamiento relacionado con el paso de integración, estructura del algoritmo, condiciones iniciales incorrectas, entre otros [5].

Al integrar las ecuaciones diferenciales en los elementos no lineales, se presentan variaciones bruscas en la corriente al pasar de un tramo a otro de su característica, se producirá entonces una oscilación de tensión por el paso de la corriente por elementos inductivos [5].

La definición de las condiciones en un problema es parte fundamental en el proceso de solución. Un problema mal condicionado, cuya solución no sea única o que no presenta continuidad en los datos de su función, podrá generar una gran variabilidad en su solución si se llegará a presentar una pequeña variación en sus datos [6].

Al modelar sistemas de control y su respuesta, es importante entender que el programa introduce un retraso de tiempo entre el sistema primario y la interfaz de control. Es posible que esto no ocasione problemas en algunas simulaciones, sin embargo, sí la lógica de control modelada hace que este retraso de tiempo cause un error acumulativo en el tiempo, esto puede resultar en divergencia de la solución [2].

4.3 Sistema de potencia

4.3.1 Descripción de la red

La Figura 4-1 representa el sistema de potencia implementado. En esta se observa una fuente trifásica de tensión ideal (conectada al *BUS1*), configurada con una tensión de línea a línea de 115kV y una frecuencia de 60 Hz; en serie con esta fuente, se conecta la impedancia de cortocircuito en el PCC, o impedancia de Thevenin, la cual consiste en un arreglo RL serie, cuyos valores fueron determinados a partir de una potencia de cortocircuito de 1653 MVA en el PCC, con una relación $X/R= 10$.

El sistema cuenta con dos transformadores de potencia *T1* y *T2*, con una relación de transformación 115/13.8 kV y 13.8/0.6 kV, respectivamente. Para las líneas de distribución y el cable de alimentación del horno fueron utilizados los modelos de línea RL simétricos. Por otro lado, para la red interna (*BUS2*), por tratarse de una red subterránea, fueron utilizados componentes RLC que permiten tener en cuenta el efecto capacitivo predominante en este tipo de conductores dejando de lado en las simulaciones el efecto inductivo. De igual manera, el banco de condensadores es tenido

en cuenta dentro del sistema de prueba. La Tabla 4-1 se presenta un resumen de los parámetros del sistema de potencia.

Figura 4-1 Diagrama unifilar del sistema de potencia

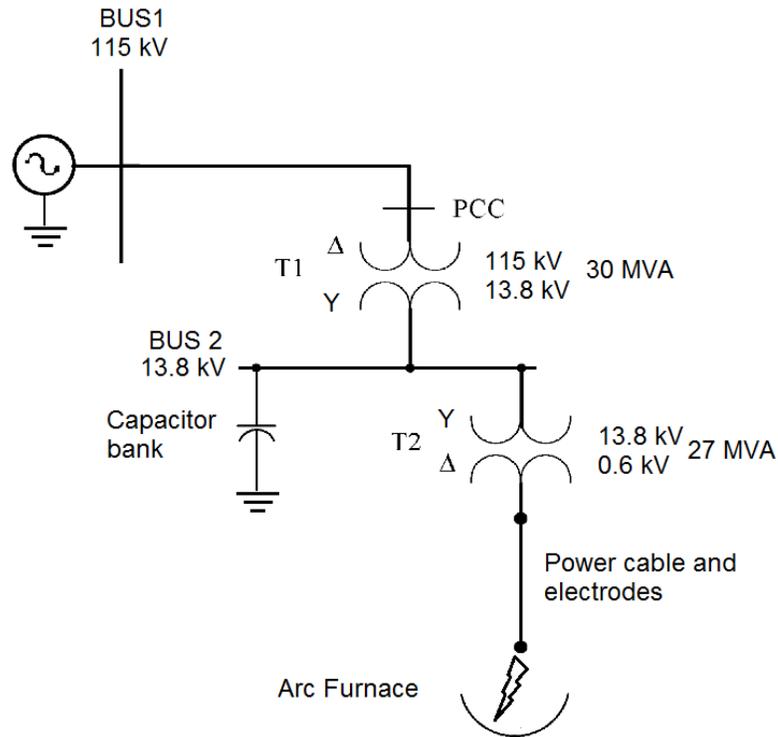


Tabla 4-1 Parámetros del sistema de prueba

	PARÁMETRO
BUS1	$Z_+ = 0.2494 + j0.7252 \Omega$ $Z_0 = 0.6766 + j2.3655 \Omega$
BUS2	$R = 0.0123 \Omega$ $C = 0.0227 \mu F$
T1	$Z\% = 10.27\%$ on 27 MVA bases, $X/R = 10$
T2	$Z\% = 6.2\%$ on bases, $X/R = 40$
BANCO DE CAPACITORES	$C = 38.05 \mu F$ $R = 0.657 \Omega$
CABLE DE ALIMENTACIÓN	$Z_+ = 0.00025 + j0.003121 \Omega$ $Z_0 = 0.0566 + j0.90549 \Omega$

Dicha instalación es utilizada en las simulaciones como sistema de prueba para estudiar el comportamiento de los modelos y su impacto sobre la red. Con el propósito de observar el efecto de las distorsiones ocasionadas por la carga, el sistema de potencia es simulado incluyendo el punto de conexión común (PCC) y la red de distribución a la cual está conectada la instalación.

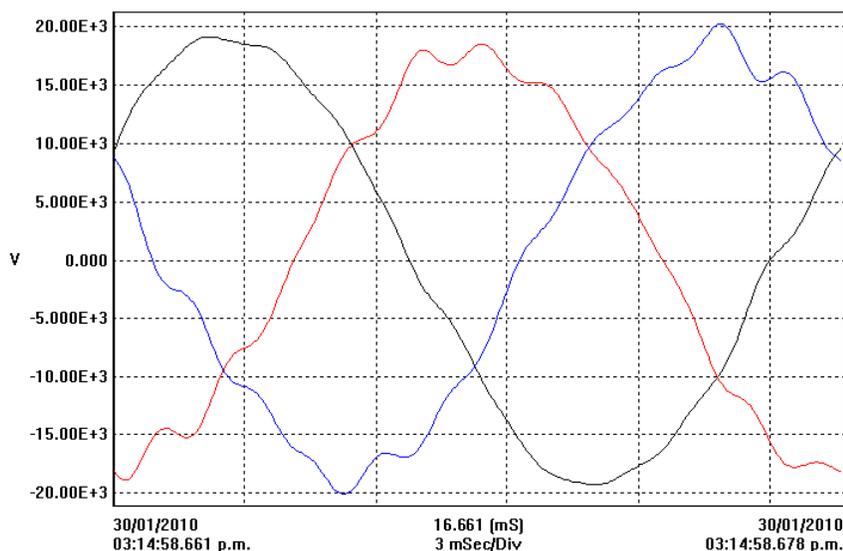
El sistema de prueba utilizado se basa en el presentado en [1], y corresponde a una instalación existente, localizada en Manizales, que cuenta con un horno de arco eléctrico en servicio.

4.4 Medidas en el sistema de potencia

Un sistema de potencia trifásico, que contenga una o más cargas no lineales, alimentará dichas cargas con corrientes no sinusoidales. En este esquema de funcionamiento, las tensiones en los nodos de la red estarán distorsionadas, por tanto se hace necesario representarlas por medio de su espectro.

La Figura 4-2 presenta una forma de onda de tensión medida en el punto de conexión común del sistema de potencia real. En este se observan notorias distorsiones debidas a las diferentes perturbaciones que se presentan típicamente durante la operación de un horno de arco eléctrico.

Figura 4-2 Forma de onda de tensión medida en el PCC de la instalación



Típicamente, valores eficaces de tensión, medidos sobre el punto de conexión común, son presentados como indicador de calidad inicial para conocer el estado del sistema de potencia. La Figura 4-3 y la Figura 4-4 presentan tendencias de valores eficaces de tensión medidos a lo largo de todo un ciclo de operación, durante dos (2) horas, en dos ocasiones distintas. En ambas figuras se observan cambios bruscos en los valores que indican la entrada en operación del horno de arco eléctrico.

Figura 4-3 Valores eficaces de tensión medidos en el PCC, ciclo de operación 1

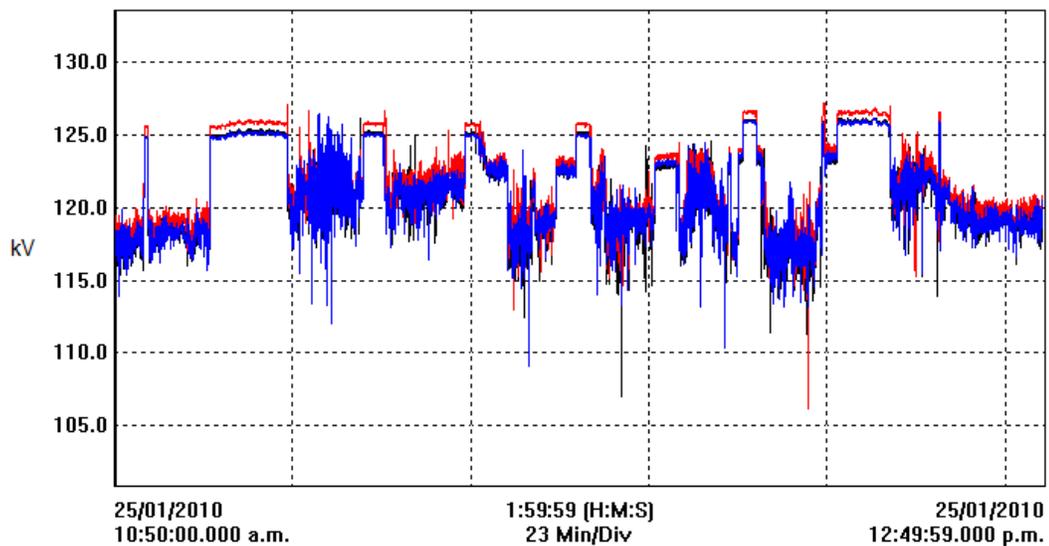
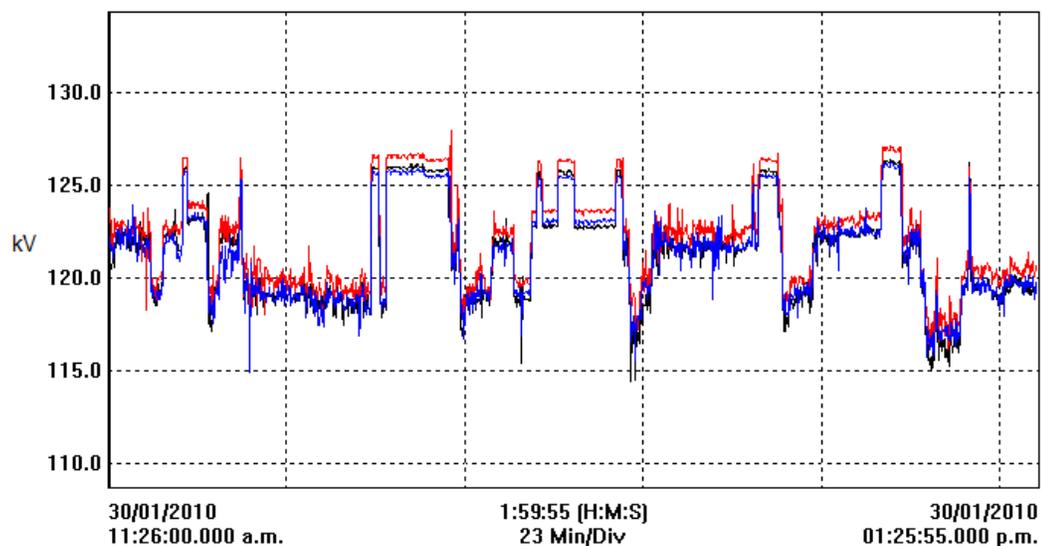


Figura 4-4 Valores eficaces de tensión medidos en el PCC, ciclo de operación 2



Las tensiones eficaces pueden resultar insuficientes en la evaluación de la calidad de la potencia. Por esto, adicional a las medidas de tensión ya observadas, se cuenta con medidas de Pst tomadas sobre el nodo PCC. Las medidas fueron tomadas a largo de todo el ciclo de operación del horno en dos ocasiones distintas y en simultanea con los valores eficaces de tensión mencionados anteriormente. La Figura 4-5 y la Figura 4-6 presentan los valores medidos durante los dos ciclos de operación, abarcando en ambas ocasiones una ventana de tiempo de dos (2) horas.

Figura 4-5 Valores de Pst tomados en el PCC, ciclo de operación 1

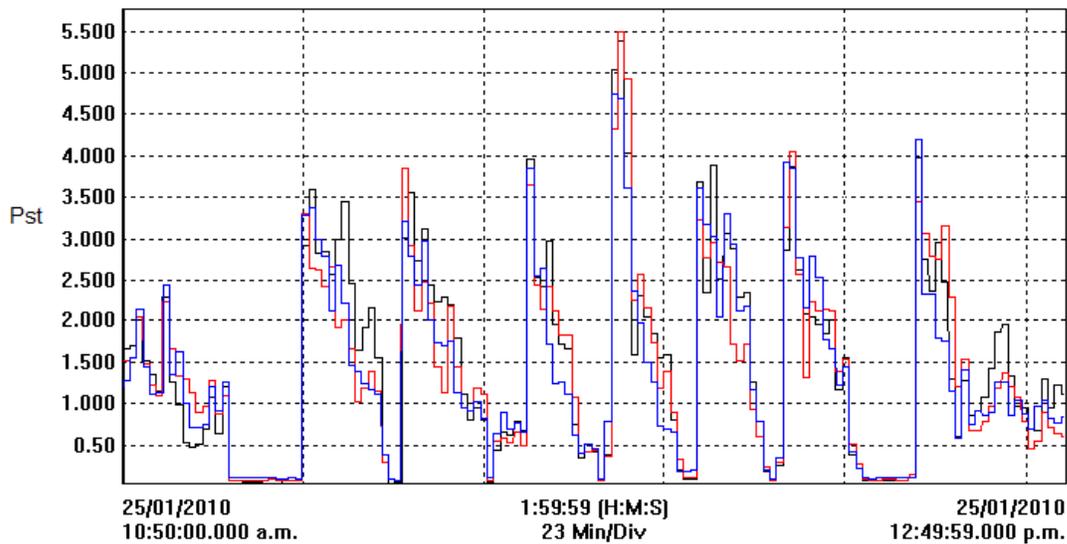
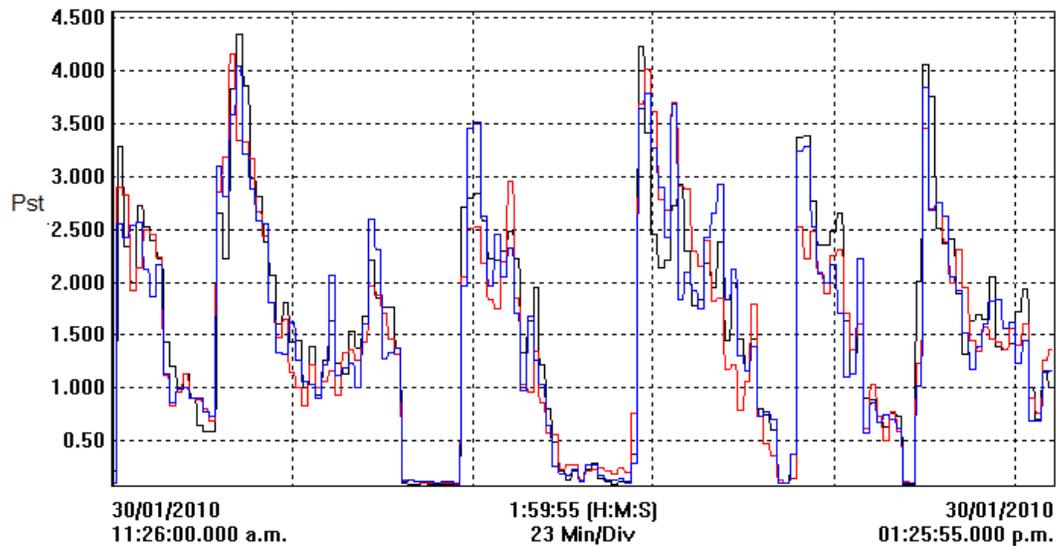


Figura 4-6 Valores de Pst medidos en el PCC, ciclo de operación 2



Los cambios abruptos que se observan en la Figura 4-5 y la Figura 4-6 (valores de Pst) se corresponden con los observados anteriormente en la Figura 4-3 y la Figura 4-4 (valores eficaces de tensión), indicando en ambos casos el encendido y apagado del arco en algún momento del proceso. Es claro entonces que existe una relación entre las fluctuaciones de tensión y el fenómeno *flicker*.

A continuación, en la Tabla 4-2 y la Tabla 4-3, se relacionan los valores eficaces de tensión medidos en el PCC durante dos diferentes ciclos de operación del horno de arco eléctrico.

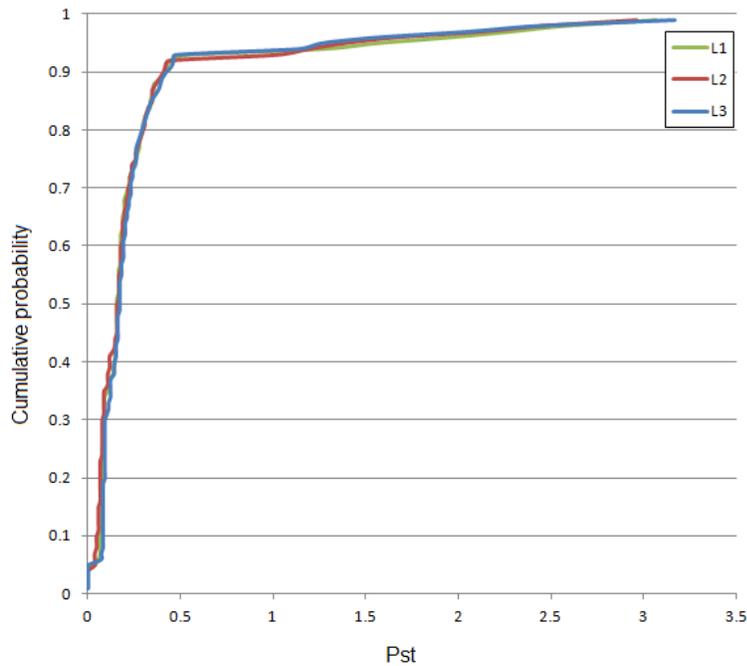
Tabla 4-2 Medidas en el PCC, ciclo de operación 1

	Valor eficaz de tensión (kV)		
	Promedio	Mínima	Máxima
Línea 1	121.0	107.0	126.2
Línea 2	121.8	106.1	127.2
Línea 3	121.2	109.0	125.5

Tabla 4-3 Medidas en el PCC, ciclo de operación 2

	Valor eficaz de tensión (kV)		
	Promedio	Mínima	Máxima
Línea 1	121.3	114.4	126.4
Línea 2	122.1	116.1	127.9
Línea 3	121.3	114.9	126.2

De acuerdo con la IEC 61000-3-7, la cual indica que deben utilizarse niveles de probabilidad basados en una distribución acumulativa para determinar el cumplimiento de los límites de compatibilidad, se calcula el percentil 95, o $Pst_{95\%}$, de los valores de Pst registrados por el instrumento de medida, relacionados en la Tabla 4-4, y su respectiva curva de distribución, la cual se observa en la Figura 4-7.

Figura 4-7 Curva de probabilidad acumulativa de P_{st} **Tabla 4-4** Valores de $P_{st_{95\%}}$ calculados

	Línea 1	Línea 2	Línea 3
$P_{st_{95\%}}$	1.41	1.25	1.23

Estos percentiles de P_{st} , calculados sobre las medidas realizadas en el nodo PCC, serán los valores de referencia para la posterior comparación entre los modelos analizados. La comparación de los resultados simulados con las mediciones de campo se centra particularmente en el PCC, puesto que este es el punto de evaluación típico en estudios de planificación y de la calidad de la potencia.

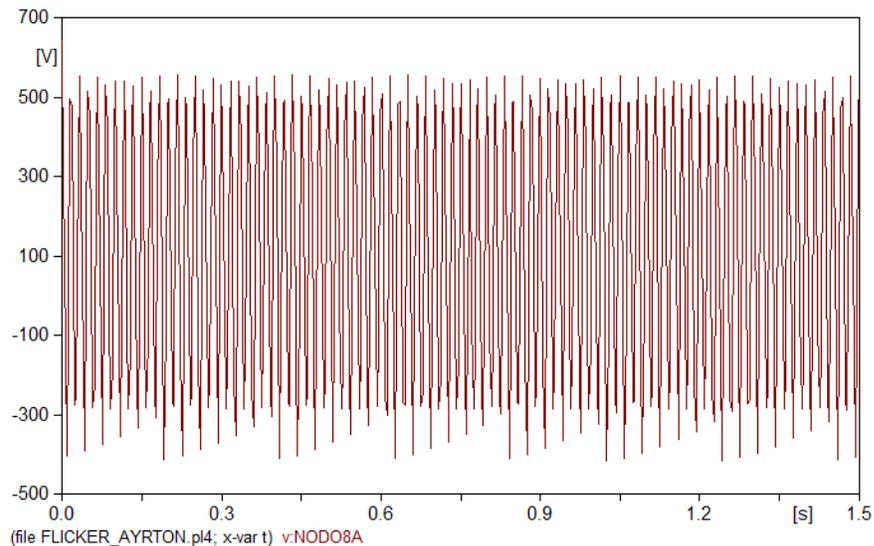
4.5 Simulación de los modelos seleccionados

4.5.1 Modelo Ayrton

Utilizando el modelo simple del arco eléctrico planteado por Ayrton, se realiza la implementación de la carga sobre la instalación modelada. Este modelo se caracteriza la estrecha relación entre la longitud del arco y la tensión de arco. Cuando se da la extinción del arco, la tensión del arco cambia y se aproxima al valor de la tensión de fase del secundario del transformador del horno.

Como resultado de la simulación, se obtuvieron formas de onda de tensión distorsionadas por causa de las perturbaciones introducidas por la carga, como la que se observa en la Figura 4-8.

Figura 4-8 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo *Ayrton*



La Figura 4-8 fue tomada en los terminales de baja tensión del transformador del horno de arco. Aunque el modelo *Ayrton* es considerado como un modelo simple, es posible apreciar el decremento en la calidad de la potencia que genera la carga y las fluctuaciones de tensión características de esta.

Dichas fluctuaciones de tensión podrán verse reflejadas en variaciones perceptibles en la luminancia del alumbrado, tanto del usuario mismo como de otros usuarios conectados a la misma red de servicio. Dependiendo de la magnitud de la perturbación y de las características del sistema de potencia, el fenómeno *flicker* se podrá propagar a lo largo de la red llegando incluso a verse reflejado en la subestación que alimenta el sistema.

Los resultados de la propagación del *flicker* en la red, tomados en los tres puntos de evaluación (POE) seleccionados, se muestran en la Tabla 4-5. Adicionalmente, se muestran los valores eficaces de tensión tomados en el PCC.

Tabla 4-5 Resultados obtenidos utilizando el modelo *Ayrton*

	Línea 1	Línea 2	Línea 3
<i>Pst</i> BUS1	2.2658	1.4292	0.9531
<i>Pst</i> PCC	2.2669	1.4359	0.9597
<i>Pst</i> Lado de BT T2	9.2894	9.0926	8.0765
Tensión eficaz PCC (kV)	116.22	114.49	115.47

Los valores de *Pst* fueron obtenidos a través de un algoritmo simulador de *flickermeter*, siguiendo la metodología de la IEC 61000-4-15, el cual utiliza los valores de tensión que arroja la simulación para el cálculo de los niveles de flicker de corto plazo.

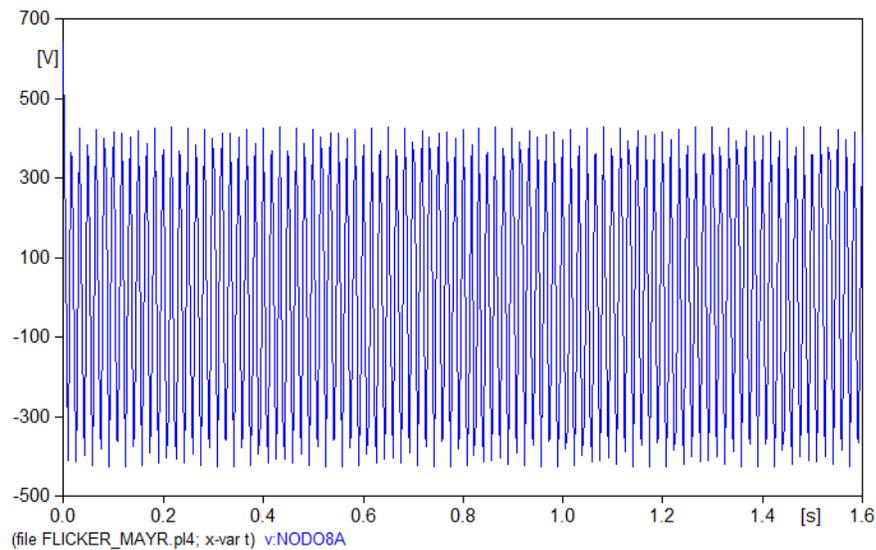
Los tres nodos seleccionados (*BUS1*, PCC y lado de baja tensión de *T2*) son considerados los más relevantes para evaluar el impacto de la carga y estimar la propagación del fenómeno a largo del sistema de potencia. En estos se observa una reducción progresiva del nivel de *Pst*, al paso por los transformadores, en la medida en que se avanza aguas arriba por el sistema.

Los valores eficaces de tensión obtenidos con la simulación son poco dicentes por sí solos, por esto, el análisis en detalle de los resultados será presentado en una sección posterior (véase Análisis de resultados), así como las comparaciones de los valores de referencia seleccionados para este estudio.

4.5.2 Modelo Mayr

Mediante el uso de las ecuaciones de Mayr, se realiza la implementación inicial del modelo para simular el comportamiento del arco eléctrico. Este modelo tiene en cuenta las principales características no lineales de la carga.

La forma de onda en la Figura 4-9, tomada en el secundario del transformador del horno mediante simulación en ATP, muestra una señal de tensión distorsionada a causa de las fluctuaciones que darán lugar posteriormente al fenómeno *flicker*.

Figura 4-9 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo *Mayr*

Aplicando un algoritmo simulador de *flickermeter*, conforme la IEC 61000-4-15, los valores de Pst en los tres nodos más relevantes (*BUS1*, PCC y lado de baja tensión de *T2*) fueron calculados a partir de los valores de tensión obtenidos mediante simulación. La Tabla 4-6 presenta los valores obtenidos mediante el simulador de *flickermeter*, además de los valores de tensión eficaces medidos en el PCC.

Tabla 4-6 Resultados obtenidos utilizando el modelo *Mayr*

	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Pst BUS1	2.2656	1.3783	0.9258
Pst PCC	2.2658	1.3771	0.9272
Pst Lado de BT T2	2.2731	1.3242	0.9867
Tensión eficaz PCC (kV)	115.22	115.14	115,12

Se observa como los valores de Pst disminuyen, aguas arriba en la instalación evaluada, debido a la atenuación ocasionada por los transformadores del sistema. Por otro lado, los valores de tensión obtenidos con este modelo no varían significativamente con respecto a los observados en la simulación anterior. Este es un resultado esperado puesto que se trata de una red eléctrica con las mismas características donde solo varía el modelo de la carga, más no sus condiciones de operación.

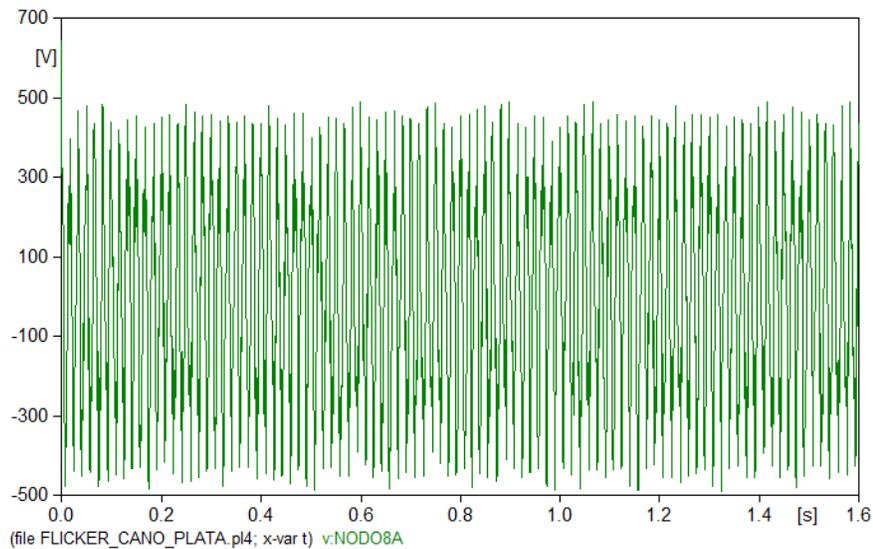
4.5.3 Modelo Cano-Plata

El modelo Cano-plata se basa en una aproximación lineal por partes de la característica corriente-tensión de la carga, modificada de acuerdo a la potencia consumida especificada por el usuario.

Las fuerzas electromagnéticas en los electrodos y la oscilación aleatoria del cable de alimentación son representadas a través de un patrón dinámico en los parámetros R_1 y R_2 con valores entre 0.0001Ω y 0.0009Ω mediante una variación de ruido blanco de banda limitada entre 4Hz y 16Hz.

La Figura 4-10 muestra una forma de onda de tensión distorsionada tomada en el lado de baja tensión de $T2$ en la simulación.

Figura 4-10 Forma de onda de tensión simulada en ATP, modelo *Cano-Plata*



Nuevamente el algoritmo simulador de *flickermeter*, conforme la IEC 61000-4-15, es aplicado para el cálculo de los valores de Pst en los tres nodos más relevantes (*BUS1*, PCC y lado de baja tensión de $T2$). La Tabla 4-7 presenta los valores obtenidos mediante el simulador de *flickermeter*, al igual que los valores eficaces de tensión tomados en el PCC.

Tabla 4-7 Resultados obtenidos utilizando el modelo *Cano-Plata*

	Línea 1	Línea 2	Línea 3
<i>Pst</i> BUS1	1.1548	1.1559	1.1541
<i>Pst</i> PCC	1.2566	1.2580	1.2561
<i>Pst</i> Lado de BT T2	13.5929	13.5581	13.6131
Tensión eficaz PCC (kV)	115.22	115.41	115.26

Es posible observar una reducción en los valores de *Pst* al ir aguas arriba en sistema de potencia, es decir, el nivel de *flicker* se ve atenuado de forma considerable a su paso ambos transformadores. Nuevamente se observan similitudes en los valores eficaces de tensión obtenidos con este modelo y los obtenidos en las anteriores simulaciones.

Un análisis en detalle de los resultados obtenidos con este modelo, y los demás modelos simulados, además de las comparaciones entre valores de referencia y la discusión acerca de las inexactitudes de los modelos y sus posibles causas, se presenta en la sección Análisis de resultados.

4.6 Análisis de resultados

El análisis final del desempeño de los modelos, así como del comportamiento de la carga y la propagación del *flicker* a través de la red, es realizado a partir de los valores eficaces de tensión y los niveles de *Pst* calculados ($Pst_{95\%}$ para el caso de las medidas en campo) obtenidos mediante simulación y a través de medidas en campo. Estos valores se encuentran relacionados en la Tabla 4-8.

Al comparar entre si los valores de tensión obtenidos mediante las simulaciones, no se encontraron variaciones considerables entre estos. Un resultado de este tipo se esperaba, puesto que las condiciones de operación de la instalación no cambian de una simulación a otra, el único factor que se modifica es el modelo implementado para representar la carga.

Tabla 4-8 Resultados de simulación y medidas en la instalación real

	Tensión eficaz en el PCC (kV)			<i>Pst</i> en el PCC		
	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Modelo Ayrton	116.22	114.49	115.47	2.2669	1.4359	0.9597
Modelo Mayr	115.22	115.14	115.12	2.2658	1.3771	0.9272
Modelo Cano-Plata	115.22	115.41	115.26	1.2566	1.2580	1.2561
Medidas en campo	121.15	121.95	121.25	1.41	1.25	1.23

Sin embargo, los valores eficaces de tensión medidos sobre la instalación distan significativamente de los resultados de simulación. Es posible que esta disparidad se deba al uso de compensadores de reactivos variables, los cuales son utilizados en la instalación pero que no fueron modelados como tal dentro del sistema de prueba, sino que, para efectos prácticos de la simulación, se implementaron bancos de capacitores estáticos con valores calculados de acuerdo con los requerimientos del sistema.

Como se observó en la Figura 4-3, la Figura 4-4, la Figura 4-5 y la Figura 4-6, las medidas en campo confirman la existencia de una relación causa efecto entre las fluctuaciones de tensión y el fenómeno *flicker*, lo cual ha sido ampliamente referenciado por diversos autores.

Dichas figuras muestran como el valor eficaz de la tensión permanece relativamente constante en los instantes de tiempo en los que el valor de *Pst* se aproxima a cero (0), es decir, en los periodos en que la señal de tensión no presentó una distorsión significativa no es posible percibir variaciones de luminancia en las lámparas, más cuando la tensión comienza a fluctuar, el parpadeo en las luminarias se hace visible para el ojo humano y, en la medida en que este aumenta, puede llegar a tornarse irritante.

Por otro lado, en los resultados de simulación no es posible apreciar esta relación entre fluctuaciones de tensión y el fenómeno de parpadeo de luminarias, puesto que aunque existe *flicker* en el sistema, tal como lo demuestra los niveles de *Pst* encontrados, los valores de tensión obtenidos se aproximan al valor nominal en la instalación (115 kV).

Partiendo de la base teórica de que las fluctuaciones de tensión se presentan como una modulación de la onda a frecuencia fundamental, ocasionada por una componente de modulación de amplitud y frecuencia determinada, y que dicha fluctuación de tensión es la causante del *flicker*, es posible afirmar que, una variación perceptible en la luminancia puede ser ocasionada por una fluctuación a una frecuencia tal que no implique necesariamente una variación significativa en la amplitud de la onda, es decir, se presentará *flicker* aunque el valor eficaz de la tensión permanezca sin variaciones considerables, tal como se presentó en los resultados de simulación.

Se ha mostrado entonces que, aunque los valores eficaces de tensión pueden brindar una idea inicial del estado de operación de la red, resultan insuficientes en la evaluación de la calidad de la potencia, particularmente en la evaluación de las perturbaciones que son objeto de este estudio. Por esto, fue necesario disponer de un valor de referencia que fuese pertinente al caso de estudio y permitiera comparar el desempeño de los modelos y evaluar la calidad de la potencia en el sistema.

Al realizar la comparación de los valores de Pst estimados a partir de las simulaciones con el valor de $Pst_{95\%}$ calculado utilizando los valores medidos sobre la instalación (véase Tabla 4-8), se encontró que los modelos *Ayrton* y *Mayr* presentaron porcentajes de error superiores al 60% en el peor de los casos (*línea 1*), lo cual los hace poco fiables para la estimación del nivel de *flicker* generado por el horno de arco eléctrico.

No obstante, las formas de onda de tensión simuladas con los modelos *Ayrton* y *Mayr* (Figura 4-8 y Figura 4-9 respectivamente), y los valores de Pst hallados en la *línea 2* (véase Tabla 4-8), que se aproximan en ambos casos al $Pst_{95\%}$ de la misma línea con un porcentaje de error del 14.87% para el caso *Ayrton* y de 10.16% para el caso *Mayr*, hacen pensar que las imprecisiones en los resultados no se deban necesariamente a fallas en el modelo, sino más bien a algunos parámetros asumidos en su implementación, por ejemplo la longitud del arco para el modelo *Ayrton*, problemas en la definición de la constante de tiempo del arco en el modelo *Mayr*, o cualquiera de los problemas mencionados anteriormente (véase Errores de simulación).

Analizando los niveles de Pst del modelo *Cano-Plata*, presentados en la Tabla 4-8, se encontraron algunas diferencias entre estos valores y los $Pst_{95\%}$ medidos en campo. El

modelo presenta un porcentaje de error para la *línea 1* de 10.8%, 0.64% para la *línea 2* y 2.12% para la *línea 3*.

En la Tabla 4-7, que presenta los resultados obtenidos al simular el modelo *Cano-Plata*, se observa un mayor valor de *Pst* en los terminales de baja tensión del transformador del horno (lado de BT *T2*). Este valor decrece en la medida en que se avanza aguas arriba en el sistema de potencia, es decir, el *flicker* se ve atenuado durante su propagación por la red al pasar a través de los transformadores *T2* y *T1*, hasta finalmente llegar a un valor mínimo al alcanzar el nodo *BUS1*, que corresponde a la subestación de que alimenta la instalación. Este hecho lleva a pensar que es posible reducir la propagación del flicker en una instalación eléctrica modificando algunos de los parámetros del transformador.

La falta de medidas en otros nodos del sistema de potencia no permitieron validar el comportamiento del modelo para estudios de propagación sobre una red de distribución completa, aún así, basados en los resultados obtenidos en el PCC, el desempeño del modelo *Cano-Plata* puede ser considerado satisfactorio para estudios de niveles de *flicker* en un punto de evaluación particular.

Sin embargo, aunque el modelo *Cano-Plata* ha mostrado una buena precisión en los niveles de *Pst* de la *línea 2* y la *línea 3*, el error en el valor de *Pst* de la *línea 1* es considerable y es importante discutir las posibles razones para la discrepancia entre las líneas.

En el sistema de prueba, no fueron incluidas otras cargas diferentes al horno de arco eléctrico, mientras que en la instalación real se cuenta con otros dispositivos eléctricos, como motores, los cuales también influyen en el decremento de la calidad de la potencia.

Las líneas de transmisión fueron modeladas utilizando sus impedancias de secuencia de componentes simétricas las cuales, por definición, asumen el mismo acoplamiento mutuo entre cada fase de una línea de transmisión dada. Adicionalmente, cuando se involucran cables de apantallamiento un error del orden del 1% es introducido.

Por otro lado, los parámetros del modelo en cada fase del horno son iguales, por tanto, es posible que resultados similares o duplicados sean obtenidos. Acorde con esto, los

supuestos durante el proceso de modelado son la principal causa de error entre los resultados de simulación y las medidas en campo.

4.7 Conclusiones del capítulo

Los resultados de simulación obtenidos permitieron validar el desempeño de los modelos implementados. Se definió el Pst como valor de referencia para la comparación de resultados y validación del modelo.

La falta de precisión en los resultados no implica necesariamente fallas en un modelo, ya que pueden ser debido a suposiciones en algunos parámetros. Algunas simplificaciones pueden lograr agilizar los estudios, pero también pueden incrementar el error.

Se observó la propagación del *flicker* a lo largo del sistema y como los valores de Pst decrecen a su paso por ambos transformadores.

Bibliografía del capítulo

- [1] E. A. Cano Plata, A. J. Ustariz Farfán, and H. E. Tacca, *Hornos de arco eléctrico*, 1st ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 2011.
- [2] A. M. Gole, A. Keri, C. Nwankpa, E. W. Gunther, H. W. Dommel, I. Hassan, J. R. Marti, J. A. Martinez, K. G. Fehrle, L. Tang, M. F. McGranaghan, O. B. Nayak, P. F. Ribeiro, R. Iravani, and R. Lasseter, "Guidelines for modeling power electronics in electric power engineering applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 505–514, 1997.
- [3] E. A. Cano Plata and H. E. Tacca, *Modelado y Simulación en Electrónica de Potencia con ATP*, 1st ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [4] J. Lin and J. Marti, "Implementation of the CDA procedure in the EMTP," *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 5, no. 2, pp. 394–402, 1990.
- [5] W. Carvajal Carreño, G. Ordóñez plata, A. L. Moreno Wandurraga, and C. A. Duarte Gualdrón, "Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variantes en el tiempo," *Ingeniare. Rev. Chil. Ing.*, vol. 19, no. 1, pp. 76–92, 2011.
- [6] J. J. MARULANDA DURANGO, A. ALZATE GOMEZ, C. D. SEPULVEDA LONDONO, and M. HOLGUIN LONDONO, "Regularización de Tikhonov para estimar los parámetros de un modelo de un horno de arco," *Tecnura*, vol. 17, no. 37, pp. 41–52, 2013.

5. Síntesis final, conclusiones y trabajos futuros

5.1 Síntesis de la investigación

Partiendo de las definiciones del fenómeno del arco eléctrico presentadas en el Capítulo 1 y el Capítulo 2, los eventos relacionados con el funcionamiento del horno de arco eléctrico fueron estudiados e interpretados, sentando las bases para su modelado e implementación.

Las herramientas comunes para el modelado del arco eléctrico fueron estudiadas, analizando su metodología y posibles casos de aplicación, con lo cual se determinó que los modelos físicos, dada su complejidad inherente y cantidad de variables, no se ajustaban al estudio, por lo que no fueron considerados en el estudio del comportamiento del arco eléctrico. Se consideraron entonces tres de los modelos descritos, con distinto grado de complejidad, para el análisis del comportamiento del horno de arco eléctrico en el sistema de potencia

Para los propósitos del estudio, en el Capítulo 3 se realizó una revisión de las herramientas disponibles para la evaluación de las perturbaciones en la onda de tensión, sentando las bases que definirían más adelante al P_{st} como valor de referencia para realizar las comparaciones de los resultados de simulación con las medidas en campo.

La revisión final del funcionamiento e impacto sobre la red de los modelos seleccionados, fue realizado a partir de los resultados de simulación obtenidos mediante la implementación de un sistema de prueba en el programa ATP. La comparación de los valores eficaces de tensión de las señales simuladas contra las medidas en campo, fue el punto de partida para el análisis presente en el Capítulo 4, el cual es completado con la comparación de valores de P_{st} , seleccionado como valor de referencia para la validación del desempeño de los modelos.

5.2 Revisión de cumplimiento y resultados obtenidos

5.2.1 En relación con la hipótesis

Se determinó que, los modelos planteados a partir de las características corriente-tensión, pueden ser utilizados para evaluar el funcionamiento del horno de arco eléctrico en sus diferentes etapas permitiendo así anticipar el impacto de la carga en un sistema de distribución.

5.2.2 En relación con los objetivos

Se encontró que, la operación del horno de arco eléctrico se ve afectada los parámetros propios del sistema de potencia que alimenta la carga (como nivel de tensión e impedancia).

En la descripción del arco eléctrico, se identificaron tres componentes básicos que influyen en su funcionamiento: tensión del arco, corriente del arco y longitud del arco, y de la interrelación de estos factores.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones fueron comparados con medidas en campo, tomando como valor de referencia el Pst calculado, de modo tal que todos los modelos fueran validados de forma equitativa, y se encontró que:

- El modelo *Ayrton*, que es uno de los modelos más simples del arco eléctrico, tuvo un desempeño eficiente para el cálculo de tensiones, pero resultó ser insuficiente en la evaluación del impacto de la carga sobre un sistema de potencia.
- El modelo *Mayr*, que modela de una forma más completa el arco eléctrico al considerar la conductancia del arco variable en el tiempo, representó el impacto del arco sobre el sistema de manera similar que el modelo *Ayrton*. Por ser un modelo que no permite considerar la influencia de la red en la carga el error fue considerable, haciéndolo inapropiado para la evaluación del *flicker*.
- Un modelo que representa el arco como una conductancia dinámicamente variable en función de los valores de tensión y corriente del arco, como el modelo *Cano-Plata*, permite analizar el comportamiento de la carga de una manera más acertada y evaluar el impacto de esta sobre la red.

5.3 Conclusiones

Se identificaron tres componentes básicos que definen la operación y respuesta de la carga en el sistema de potencia: tensión del arco, corriente del arco y longitud del arco (dados por la posición del electrodo).

Se determinó que el modelo planteado a partir de la característica corriente-tensión (*Cano-Plata*), ofrece un desempeño satisfactorio para ser utilizados en la evaluación el funcionamiento del horno de arco eléctrico anticipando el impacto de la carga en un sistema de distribución

Se validó el desempeño se los modelos y su posible inclusión en estudios de estimación de flicker, al comparar los resultados de simulación contra medidas de campo, teniendo como valor de referencia el *Pst*.

Parámetros asumidos durante el proceso modelado son la principal causa de error entre los resultados de simulación y las medidas en campo. Algunas simplificaciones pueden lograr agilizar los estudios, pero también pueden reducir la precisión en los resultados.

5.4 Trabajos futuros

El modelo del sistema de potencia presenta una clara estructura dinámica, rica en eventos y perturbaciones a la calidad de la potencia. La investigación en este área es de interés tanto para la comunidad académica como para el sector privado.

Dada su importancia en el análisis del sistema en condiciones de alta "cargabilidad" y su aplicación práctica, se espera a futuro poder dar continuidad al trabajo en los siguientes tópicos:

- Estudios de conectividad y análisis de responsabilidad para nuevas cargas generadoras de *flicker* instaladas en redes con antecedentes del problema.
- Caracterización del comportamiento de la carga y evaluación de las perturbaciones generadas a través de la entropía.

Se sugiere también, realizar una investigación en la aplicación de métodos de optimización durante el proceso de definición y estimación de los parámetros eléctricos, que permitan una variación de los sistemas de potencia, permitiendo la aplicación del modelo al estudio de diferentes perturbaciones.

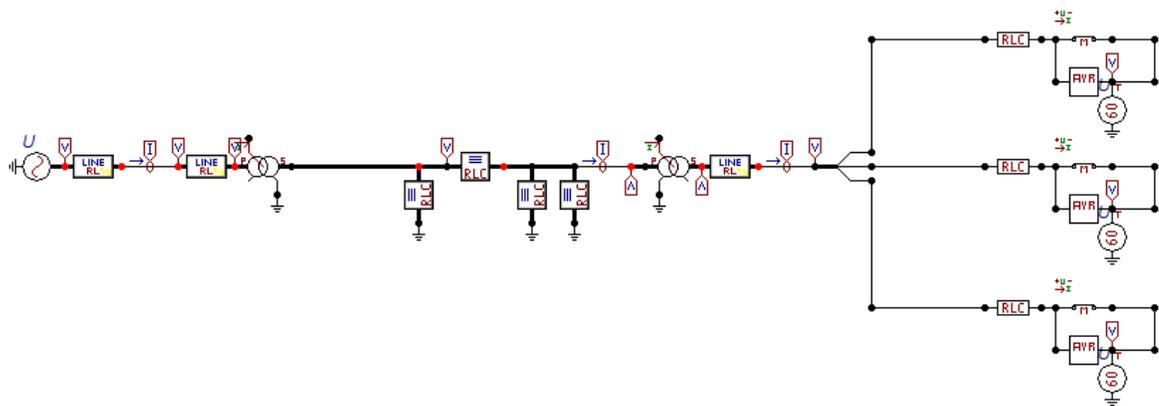
6. Anexos

6.1 Modelo Ayrton en ATP

Para la implementación en ATP del modelo de *Ayrton* fue utilizada la herramienta *models*, tal como se ilustra en la Figura 6-1. El código se presenta a continuación:

```
MODEL AYRTON
COMMENT
    MODELO ARCO SEGUN AYRTON
ENDCOMMENT
INPUT IS
OUTPUT VO
DATA AMPLIT
var es,VO
INIT
    es:=sign(IS)
ENDINIT
EXEC
    VO:=(AMPLIT*es)*sign(IS)
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Figura 6-1 Modelo *Ayrton* en ATP



6.2 Modelo Mayr en ATP

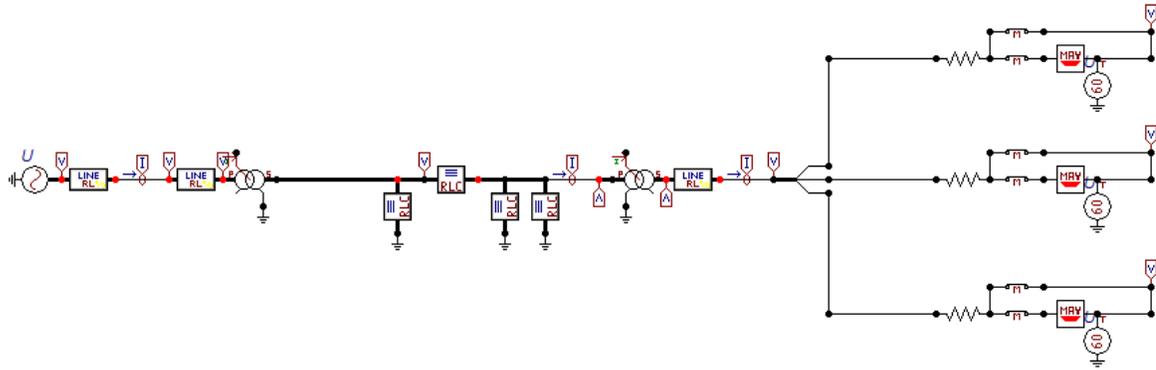
Como se observa en la Figura 6-2, el modelo de *Mayr* se incluyó en la simulación utilizando *models* en ATP. El código se presenta a continuación:

```

MODEL MAYR
CONST
  maxconduc {VAL:1.E6}
DATA
  AP {DFLT:1.0}
  BP {DFLT:1.0}
  AQ {DFLT:0.1}
  BQ {DFLT:1.0}
  imax {DFLT:30000}
INPUT
  curr
VAR
  ten
  power
  tau
  derc
  deri
  conduc
  arcres
  driving
OUTPUT
  ten
HISTORY
  curr, conduc {dflt:1000}
C *****
C Inicializacion del modelo
INIT
  CONDUCT:=1000
  arcres:=recip(conduc)
  tau:=AQ*conduc**BQ
  power:=AP*conduc**BP
ENDINIT
C *****
C Ejecucion del modelo
EXEC
  conduc:=curr**2/AP
  tau:=AQ*conduc**BQ
  power:=AP*conduc**BP
  driving:=curr**2/power
  DIFFEQ( 1.0|D0 + tau|D1 ) |conduc:=driving
  arcres:=recip(conduc)
  ten:=arcres*curr
  derc:=deriv(conduc)*1.0e-6
  deri:=abs(deriv(curr))*1.0e-6
ENDEXEC
C *****
ENDMODEL

```

Figura 6-2 Modelo de Mayr en ATP



6.3 Modelo Cano-Plata en ATP

La implementación de este modelo fue realizada utilizando la herramienta *TACS* en ATP, para esto, es necesario realizar una desagregación del modelo en pequeños módulos los cuales pueden incluir una o más partes de la ecuación del modelo. La Figura 6-3 muestra los *TACS* del modelo en ATP. Parte del código del archivo ATP de la simulación, donde se incluyen las funciones de cada uno de los elementos *TACS* del modelo, es presentado a continuación:

```

/TACS
TACS HYBRID
91VMA                                     80.
98POPR      =25400000
98VIG       =240
98VEX       =200
98RES2      =(VEX-VIG)/55000
98RES1      =(VIG*VIG/(POPR+VIG*VIG/RES2-VEX*VEX/RES2))
98FACT      =(1/RES1-1/RES2)
98NIMX      =VIG*FACT*(-1)-VEX/RES2
98NIMN      =-1*VIG/RES1
98PIMX      =VIG*FACT+VEX/RES2
98PIMN      =VIG/RES1
98VAR1      =VMA.GT.NIMN
98VAR2      =VMA.LT.PIMN
98LVAR1     =VAR1.AND.VAR2
98VAR3      =VMA.GE.PIMN
98VAR4      =VMA.LT.PIMX
98LVAR2     =VAR3.AND.VAR4
98VAR5      =VMA.GT.NIMX
98VAR6      =VMA.LE.NIMN
98LVAR3     =VAR5.AND.VAR6
24RAMP      .01666      .01666      -1.      80.
98STAIR     =TIMEX-RAMP
98SINVAR    =SIN(2*PI*10*STAIR/2)
98REST      =RES1*(1+0.5*SINVAR)
98VOL1      =VMA*REST
98VOL2      =VMA*RES2-VIG*RES2*FACT

```

98VOL3	=VMA*RES2+VIG*RES2*FACT	
98VA	=LVAR1*VOL1+LVAR2*VOL2+LVAR3*VOL3	
91VMAB		80.
98VAB	=LVAR1B*VOL1B+LVAR2B*VOL2B+LVAR3B*VOL3B	
91VMAC		80.
98VAC	=LVAR1C*VOL1C+LVAR2C*VOL2C+LVAR3C*VOL3C	
98VOL1B	=VMAB*REST	
98VOL2B	=VMAB*RES2-VIG*RES2*FACT	
98VOL3B	=VMAB*RES2+VIG*RES2*FACT	
98VOL1C	=VMAC*REST	
98VOL2C	=VMAC*RES2-VIG*RES2*FACT	
98VOL3C	=VMAC*RES2+VIG*RES2*FACT	
98VAR1B	=VMAB.GT.NIMN	
98VAR2B	=VMAB.LT.PIMN	
98LVAR1B	=VAR1B.AND.VAR2B	
98VAR3B	=VMAB.GE.PIMN	
98VAR4B	=VMAB.LT.PIMX	
98LVAR2B	=VAR3B.AND.VAR4B	
98VAR5B	=VMAB.GT.NIMX	
98VAR6B	=VMAB.LE.NIMN	
98LVAR3B	=VAR5B.AND.VAR6B	
98VAR1C	=VMAC.GT.NIMN	
98VAR2C	=VMAC.LT.PIMN	
98LVAR1C	=VAR1C.AND.VAR2C	
98VAR3C	=VMAC.GE.PIMN	
98VAR4C	=VMAC.LT.PIMX	
98LVAR2C	=VAR3C.AND.VAR4C	
98VAR5C	=VMAC.GT.NIMX	
98VAR6C	=VMAC.LE.NIMN	
98LVAR3C	=VAR5C.AND.VAR6C	

Figura 6-3 Modelo *Cano-Plata* en ATP

