INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MODELADO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

P R E S E N T A:

JORGE GABRIEL PADILLA CANTERO

MÉXICO, D. F. JUNIO 2007

SIP-14

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 29 del mes de Mayo del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

"MODELADO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA CALIDAD DE LA ENERGÍA"

Presentada por el alumno:

PADILLA	**CANTERO**	**JORGE GABRIEL**
Apellido paterno	materno	nombre(s)

Con registro:

B	0	4	0	9	5	4

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***SU APROBACION DE LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

M. EN C. GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

Presidente

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Segundo Vocal

DR. PABLO GOMEZ ZAMORANO

Tercer Vocal

DR. ELMER SANTOS MORA

Secretario

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

Suplente

DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

I. P. N. SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día **12** del mes **Junio** del año **2007**, el (la) que suscribe **Jorge Gabriel Padilla Cantero** alumno(a) del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** con número de registro **B040954**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la **ESIME Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **M. en C. Gilberto Enríquez Harper** y cede los derechos del trabajo intitulado: **"Modelado del Horno de Arco Eléctrico para Estudios Relacionados con la Calidad de la Energía"**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: gabrielman_df@hotmail.com, rgomeze@cfe.gob.mx.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Jorge Gabriel Padilla Cantero
Nombre y firma

RESUMEN

El horno de arco eléctrico es actualmente la forma más común de reciclar acero a partir de chatarra, mediante la fusión de esta chatarra en el horno con la ayuda de electrodos de grafito y corriente eléctrica, un acero nuevo y funcional puede ser producido a partir de viejos productos. En lugar de utilizar nuevo recursos de materia prima, elementos de acero básicos y aleaciones valiosas pueden ser utilizados, lo que es venéfico tanto desde un punto de vista económico como ambiental.

Sin embargo, los hornos de arco eléctrico son cargas grandes, dinámicas, concentradas, desbalanceadas, no lineales y variantes en el tiempo; estas características en la carga son causa de fluctuaciones de corriente que originan variaciones en la potencia reactiva, las cuales causan una caída de voltaje momentánea o flicker, en el bus de alimentación y en los buses cercanos, además se crean corrientes de carga armónicas, estas pueden causar condiciones de operación indeseable tales como pérdidas excesivas en transformadores.

En este trabajo se propone un modelo del horno de arco eléctrico, para ello se implementa el modelo de Cassie para modelar el arco eléctrico en forma determinista, agregando una señal caótica desde el Oscilador de Chua para ocasionar un comportamiento caótico al modelo de Cassie. El resultado de esto es un modelo general con un componente caótico del arco eléctrico, que es capaz de representar el voltaje flicker y corrientes de carga armónicas para estudios relacionados con la calidad de la energía. Las ecuaciones de estados que definen la dinámica del modelo general, son resueltas en el entorno de simulación Matlab y su interfaz grafica Simulink.

ABSTRACT

The electrical arc furnace currently is the most common way to recycle steel from the scrap, by using the fusion of this scrap into the furnace helped by graphite electrodes and electrical current, a brand new and functional steel can be produced from old products, instead of using new resources of raw material, basic steel elements and valuable alloys can be saved, which is beneficial from economic and environmental point of views.

From electrical power system perspective, electrical arc furnaces represent very large loads: dynamic, concentrated, unbalanced, nonlinear and variant in the time. These characteristics are the main cause of current fluctuations that originate variations in the reactive power, which cause a momentary voltage drop and voltage flicker, in the electrical point where they are interconnected and also along the neighborhood, in addition harmonic currents are created from the load, which produce conditions of undesirable operation such as excessive transformers losses, as well as overheating and poor power factor.

This work proposes an approach following Cassie's model to represent in a determinist way the electric arc furnace, adding a chaotic signal from Chua's Oscillator to create a chaotic behavior. The result gives a general model with a chaotic component of the electrical arc able to represent the voltage flicker and harmonic currents from the load for studies related to power quality. The state equations defining the dynamics of the general model are solved using Matlab software and its graphic interface Simulink.

Í N D I C E

RESUMEN i

ABSTRACT ii

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1

1.2 JUSTIFICACIÓN 3

1.3 OBJETIVO 4

1.4 APORTACIONES 4

1.5 ESTADO DEL ARTE 5

1.5.1 Método basado en la característica V-I 6

1.5.2 Métodos en el dominio del tiempo 6

1.5.3 Método en el dominio armónico 7

1.5.4 Método de procesos aleatorios 7

1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES 8

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS 9

CAPÍTULO 2

LA INDUSTRIA ACERERA EN MÉXICO Y EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

2.1 INTRODUCCIÓN 10

2.2 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO 11

2.2.1 Tecnologías para fabricación de acero en México 13

2.2.1.1 Hornos de hogar abierto 13

2.2.1.2 Horno de Oxigeno Básico 14

2.2.1.3 Horno de arco eléctrico 15

2.2.2 Producción de acero con HAE en México 15
2.3 IMPACTO DE LAS ACERERAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS 16
2.4 EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO 18
2.4.1 Operación del Horno de Arco Eléctrico 20
2.4.1.1 Carga del Horno Eléctrico 21
2.4.1.2 Fundición de la Chatarra 21
2.4.1.3 Periodo de Refinamiento 22
2.5 EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL HAE 23
2.5.1 El transformador del EAF 24
2.5.2 Cables flexibles de potencia del horno de arco 24
2.5.3 Los electrodos

CAPÍTULO 3

LA TEORÍA DEL CAOS DETERMINISTA

3.1 INTRODUCCIÓN 26
3.2 DEFINICIÓN DEL CAOS DETERMINISTA 27
3.2.1 Definición de conceptos relacionados con la teoría del caos 28
3.3 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE LA TEORÍA DEL CAOS 30
3.3.1 Dependencia sensible a las condiciones iniciales 31
3.3.2 Cumple con la propiedad de mezcla dinámica en el espacio de estado 32
3.3.3 Los puntos periódicos son densos en el espacio de fases 32
3.4 LA TEORÍA DEL CAOS APLICADA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS 33

CAPÍTULO 4

MODELADO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

4.1 INTRODUCCIÓN 37

4.2 MODELADO DEL ARCO ELÉCTRICO 38

4.2.1 Modelo de Balance de Energía 38

4.2.2 Modelo de Cassie. 41

4.3 MODELADO DEL SISTEMA CAÓTICO 44

4.3.1 Oscilador Chua 44

4.3.1.1 Implementación en Simulink. 47

4.3.1.2 Escalando el Oscilador de Chua. 47

4.4 INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE CAÓTICO AL MODELO DEL ARCO ELÉCTRICO. 51

4.5 SIMULACIÓN DEL MODELO DEL EAF 52

4.5.1 Simulación de los modelos deterministas del arco eléctrico. 53

4.5.2 Simulación de los modelos del arco eléctrico con aportación caótica 56

4.5.2.1 Modelo de Cassie con aporte caótico desde el oscilador de Chua. (MCC) 56

4.5.2.2 Modelo de balance de energía con aporte caótico desde el oscilador de Chua. (MBEC). 58

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PROPUESTO CASSIE-CHUA EN UNA RED ELÉCTRICA

5.1 INTRODUCCIÓN 63

5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO 64

5.2.1 Simulación del modelo determinista de Cassie. 65

5.2.2 Simulación del modelo propuesto Cassie-Chua. 67

5.2.3 Comparación de simulaciones contra mediciones reales. 70

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES GENERALES 72

6.1 LOGROS 74

6.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS 74

REFERENCIAS 75

APÉNDICE A 88

CONCEPTOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

APÉNDICE B 89

IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR DE PARPADEO DE TENSIÓN

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1	V-I Característica Del horno de arco eléctrico.	6

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Consumo de electricidad en México por sector	12
Figura 2.2	Producción de acero por compañía, 1997-2006	12
Figura 2.3	Producción de acero por proceso, 1996-2006	13
Figura 2.4	Representación de un Horno de Arco Eléctrico	19
Figura 2.5	Diagrama de flujo para un ciclo del HAE	20
Figura 2.6	Configuración de doble transformador para alimentar el EAF	24

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Atractor extraño de un sistema caótico	29
Figura 3.2	Dependencia a las condiciones iniciales en sistemas caóticos	31
Figura 3.3	a) Comportamiento en el tiempo de la variable x, b) Atractor extraño con condiciones iniciales (0,0,0)	35
Figura 3.4	a) Comportamiento en el tiempo de la variable x, b) Atractor extraño con condiciones iniciales (0.1,0.1,0.1)	35

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Modelo de balance de energía implementado en Simulink	40
Figura 4.2	Modelo de Cassie implementado en Simulink	43
Figura 4.3	Oscilador de Chua.	44
Figura 4.4	Característica Piezolineal del elemento N_R en el oscilador de Chua	45

Figura 4.5	Icono y cuadro de dialogo de la implementación del oscilador Chua en Simulink.	47
Figura 4.6	Atractor del oscilador de Chua.	48
Figura 4.7	Voltaje del capacitor C_1 en el oscilador Chua.	48
Figura 4.8	Espectro de frecuencia del voltaje en el capacitor C_1, del oscilador de Chua.	49
Figura 4.9	a) y b) Voltaje v_1 en el oscilador Chua escalado.c) Espectro de frecuencias del voltaje v_1. d) Atractor caótico del Oscilador Chua escalado.	50
Figura 4.10	Diagrama de bloques del modelo de balance de energía implementado en Simulink.	51
Figura 4.11	Diagrama de bloques del modelo de Cassie en Simulink.	52
Figura 4.12	Sistema eléctrico utilizado para las simulaciones del presente capítulo.	52
Figura 4.13	a) Voltaje del arco eléctrico, b) Corriente del arco eléctrico.	54
Figura 4.14	a) Conductancia del arco eléctrico. , b) Resistencia del arco eléctrico	54
Figura 4.15	a) Característica voltaje vs corriente del arco eléctrico. , b) Potencia activa del arco eléctrico.	55
Figura 4.16	a) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico, b) Espectro de frecuencias del voltaje del arco eléctrico.	55
Figura 4.17	a) Comportamiento caótico del voltaje del arco eléctrico. b) Corriente del arco eléctrico en el modelo MCC.	56
Figura 4.18	a) Característica voltaje vs corriente del modelo MCC. b) Potencia simulada desde el modelo MCC del arco eléctrico.	57
Figura 4.19	a) Conductancia del arco simulada desde el modelo MCC. b) Resistencia del arco eléctrico simulada desde el modelo MCC del arco eléctrico.	57
Figura 4.20	a) y b) Espectro de frecuencias del voltaje de arco eléctrico del modelo MCC,. b) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico desde el modelo MCC.	58
Figura 4.21	a) Comportamiento caótico del voltaje del arco eléctrico desde el modelo MBEC. b) Corriente del arco eléctrico en el modelo MBEC.	59
Figura 4.22	a) Conductancia del arco simulada desde el modelo MBEC,. b) Resistencia del arco eléctrico simulada desde el modelo MBEC del arco eléctrico	59
Figura 4.23	a) Característica voltaje vs corriente simulada desde el modelo MBEC,. b) Potencia simulada desde el modelo MBEC del arco eléctrico.	60
Figura 4.24	a) y b) Espectro de frecuencias del voltaje de arco eléctrico del modelo MBEC,. b) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico desde el modelo MBEC.	60

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	Red eléctrica de una planta acerera.	64
Figura 5.2	a) Onda de tensión en el bus 1 y su espectro armónico, b) Onda de tensión en el bus 2 y su espectro armónico.	66
Figura 5.3	a) Onda de tensión en el bus 3 y su espectro armónico, b) Onda de tensión en el bus 4 y su espectro armónico.	66
Figura 5.4	a) Onda de tensión en el bus 1 y su espectro armónico, b) Onda de tensión en el bus 2 y su espectro armónico, empleando el modelo propuesto.	68
Figura 5.5	a) Onda de tensión en el bus 3 y su espectro armónico, b) Onda de tensión en el bus 4 y su espectro armónico, empleando el modelo propuesto.	68
Figura 5.6	Onda de tensión del arco eléctrico desde el modelo de Cassie-Chua.	69
Figura 5.7	Onda de corriente del arco eléctrico desde el modelo de Cassie-Chua.	69

APÉNDICE A

Figura A.1	Tensión y corriente en cargas lineales y no lineales	79
Figura A.2	Forma de onda típica no senoidal de corriente	80
Figura A.3	Consumo de potencia activa y reactiva del un EAF	86
Figura A.4	Fluctuaciones en la tensión	87

APÉNDICE B

Figura 5.1	Arquitectura de un medidor flicker	89
Figura 5.2	Calibración del generador de señales	90
Figura 5.3	Implantación del bloque 2 en SimulinK	90
Figura 5.4	Implementación del Bloque 3 en Simulink	91
Figura 5.5	Figura B.5. Implementación del Flickermeter en Simulink	92

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1	Producción de acero por país, en millones de toneladas.	16

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Índice de severidad Pst, producido por cada modelo simulado.	61

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1	Datos de líneas de distribución.	64
Tabla 5.2	Datos de transformadores.	65
Tabla 5.3	Valores de tensión, THD y flicker en cada bus, para el modelo Cassie.	65
Tabla 5.4	Valores de tensión, THD y flicker en cada bus, para el modelo Cassie-Chua.	67
Tabla 5.5	Comparación de simulaciones del modelo Cassie-Chua, Cassie determinista y mediciones reales.	70

APÉNDICE A

Tabla A.1	Límites en la distorsión de la corriente según IEEE Std. 519	84
Tabla A.2	Límites de distorsión de voltaje según IEEE Std. 519	85
Tabla A.3	Limites del Pst y Plt según las normas IEC 1000-4-15 y CEI-61000-3-7	88

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO

1

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El número de componentes en las plantas de energía eléctrica capaces de producir considerables problemas en la calidad de la energía en las redes de distribución eléctricas han proliferado muy rápidamente. Este problema tiende a seguir incrementándose y, por consiguiente también se incrementan los problemas en la calidad de la energía eléctrica. Por lo anterior existe un gran interés en desarrollar softwares y modelos que permitan la evaluación exacta de los problemas relacionados a la calidad de la energía para los componentes de una planta de energía eléctrica individual y también para el sistema de potencia completo.

Existen diversas fuentes que originan problemas en la calidad de la energía eléctrica, ésta mala calidad de la energía es debida a los distintos disturbios que se presentan en los sistemas eléctricos. Dichos disturbios son por ejemplo, sags o swells de voltaje, corrientes de carga armónicas, voltaje flicker, desbalance, entre otros y son producidos por diversos factores desde que algunos sobrevoltajes transitorios son producidos por descargas atmosféricas, apertura o cierre de interruptores, o por conmutación de capacitares, hasta la operación de cargas no lineales conectadas a la red eléctrica.

Cargas no lineales conectadas al sistema eléctrico y que causan problemas en la calidad de la energía eléctrica son: convertidores de potencia, variadores de velocidad (adjustable frequency drive), lámparas fluorescentes, cargadores de baterías, saturación de transformadores, hornos de arco eléctrico y de inducción, entre otros. Una de las cargas no lineales que mas problemas causa a la calidad de la energía son los hornos de arco eléctrico, estos representan una carga desbalanceada, no lineal y variante en el tiempo, y puede causar desbalance entre fases, armónicas e iterarmónicas, colapso de voltaje y voltaje flicker [1].

Los hornos de arco eléctrico (EAF) son usados en la producción de aluminio, cobre, plomo, y otros metales, pero principalmente para la producción de acero. Los EAF son cargas grandes, dinámicas, variantes en el tiempo y cargas concentradas. Existen dos principales clases de EAF; en el primero un transformador energiza directamente los electrodos del horno en un circuito de alta corriente en un EAF de corriente alterna (AC), por otro lado un horno de corriente directa (DC) emplea un rectificador controlado por una fuente de DC para alimentar los electrodos del horno. Típicamente los EAF operan en niveles de potencia de 10 MW a 100 MW, el nivel de potencia esta directamente relacionado con el volumen de producción.

La operación del EAF puede ser clasificada en dos etapas, fundición y refinamiento, durante el periodo de fundición, las piezas de acero crean cortos circuitos momentáneos en el lado secundario del transformador del horno. Estos cambios en la carga afectan las características del arco, causando fluctuaciones de corriente. Las fluctuaciones de corriente causan variaciones en la potencia reactiva, las cuales causan una caída de voltaje momentánea o flicker, en el bus de alimentación y en los buses cercanos. Durante este periodo también se crean corrientes de carga armónicas, las cuales causan condiciones de operación indeseable tales como pérdidas excesivas en transformadores. Las corrientes del arco son mas uniformes durante el periodo de refinamiento y resultan en un menor impacto en la calidad de la energía del sistema eléctrico [2].

La formación del arco eléctrico es un fenómeno que ocurre cuando los electrodos son movidos sobre la chatarra. Como los electrodos se aproximan a la chatarra, la corriente comienza a saltar de los electrodos a la chatarra, creando arcos eléctricos. Dependiendo de la magnitud del voltaje de entrada de los electrodos, la distancia del arco puede variar, usualmente, el arco ocurre a centímetros de la chatarra (aproximadamente de 10 a 15 centímetros). Por lo tanto, debido a la naturaleza no lineal y estocástica del EAF como una carga, varios parámetros del arco eléctrico tales como el voltaje y corriente, la potencia real y reactiva, así como la resistencia y reactancia exhiben significantes y súbitas variaciones en el tiempo especialmente durante la fundición de la chatarra. Esas variaciones causan problemas de voltaje flicker y corrientes de carga armónicas en el punto común de acoplamiento (PCC). Los problemas de voltaje flicker y armónicas pueden ser sobre llevados incrementando los megavoltamperes en el PCC y/o usando sistemas de compensación flicker y filtros armónicos [3].

1.2 JUSTIFICACIÓN

El voltaje flicker y las corrientes de carga armónicas son los principales tipos de disturbios que son introducidos al sistema de potencia como resultado de la operación del EAF. La industria esta conciente sobre estos efectos adversos y trata de tomar precauciones para minimizarlos, por lo tanto es necesario un modelo preciso de un EAF para probar y verificar soluciones propuestas para este fin. Entonces obtener la respuesta en el tiempo de un horno de arco eléctrico llega a ser muy importante en este punto, de ahí que desarrollar un modelo preciso y fácil de usar del EAF, es una tarea muy necesaria.

Sin embargo, esto ha sido hasta ahora absolutamente una tarea desafiante para distintos investigadores debido a la naturaleza aperiódica, altamente no lineal e impredecible de los EAF. Aunque distintos estudios han sido hechos para construir un modelo genérico de un EAF, un modelo de circuito exacto para representar la operación del horno de arco aun no esta disponible.

El estudio de los EAF tiene potenciales beneficios para consumidores y suministradores de energía eléctrica, nuevos y mejorados modelos ayudaran a tratar los problemas causados por la operación del EAF. La minimización del impacto de la carga del EAF puede proveer eficiencia eléctrica y reducción en las fluctuaciones de la potencia eléctrica en el sistema. Reducir el flicker, es reducir las fluctuaciones de corriente, lo que también beneficia a los operadores del EAF, ya que el consumo del electrodo es menor. Reduciendo el impacto de estas cargas implica que menos potencia reactiva es demandada, y mas potencia activa puede ser usada en el periodo de fundición. Esto resulta en mejorar el factor de potencia y mejorar la economía en la producción. Los usuarios cercanos al sitio de operación del EAF también pueden mejorar la calidad de suministro de energía a sus instalaciones [4].

Históricamente, han existido dos aproximaciones generales para representar el problema del modelado del EAF: estocástico y caótico. Sin embargo prácticamente en todos los estudios previos, las ideas estocásticas han sido usadas para representar el comportamiento aperiódico, no lineal y variante en el tiempo de los EAF. Hacer uso de la teoría del Caos en el modelado del EAF permite hacer una nueva comparación con las ideas estocásticas. Actualmente, la

teoría del Caos ha llegado a ser un tópico en el modelado del EAF después de que fuera probado que las fluctuaciones eléctricas en el voltaje del EAF son de naturaleza caótica [2].

1.3 OBJETIVO

El objetivo fundamental del presente trabajo de tesis es proponer un modelo del EAF implementando un componente caótico dentro de un modelo dinámico del arco eléctrico, con el fin de representar el comportamiento totalmente aleatorio del EAF y sus efectos adversos como corriente de carga armónicas y voltaje flicker. Así como también implementar un medidor de voltaje flicker de acuerdo con el estándar internacional IEC 1000-41-5.

1.4 APORTACIONES

- Se presenta un modelo de horno de arco eléctrico para estudios relacionados con la calidad de la energía eléctrica; dicho modelo se basa en el modelo de Cassie para arcos eléctricos de alta corriente con un comportamiento caótico debido a la integración del oscilador de Chua en el modelo general del arco eléctrico. El modelo puede ser utilizado para evaluar el impacto de una carga existente en el sistema y para encontrar formas de reducir tales impactos, también puede ser utilizado para propósitos de planeación, es decir para estudiar el impacto de una instalación propuesta en un sistema de potencia. Y finalmente el mismo modelo puede ser aplicable a otras cargas no lineales que se comporten similarmente, tales como quemador de plasma (plasma torches) y soladoras de arco eléctrico (arc welders).

- Se hace una comparación entre el modelo de balance de energía basado en características físicas del arco eléctrico específicamente en el radio del arco, y el modelo de Cassie basado en características eléctricas como la conductancia eléctrica; se comparan en forma determinista (sin la incorporación del oscilador Chua), e incluido el componente caótico, las señales comparadas son: tensión y corriente eléctrica, resistencia del arco eléctrico, característica voltaje-corriente del arco y el espectro armónico en tensión y corriente.

- Se implementa un medidor de voltaje flicker según el estándar internacional IEC 1000-41-5, el modelo del "IEC Flickermeter" es implementado digitalmente en el entorno Matlab/Simulink.

1.5 ESTADO DEL ARTE

Dándose cuenta de la importancia del modelado preciso de la carga EAF, los investigadores tanto en la industria como académicos tiene dirigidos sus esfuerzos a desarrollar modelos que representen la operación precisa del EAF. Considerando la complejidad de la operación del EAF y la aleatoriedad asociada con cada etapa de su operación, es razonable especular que el desarrollo de modelos de carga sea de ninguna manera simple. Metodologías de modelado previo, en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y en el dominio armónico pueden ser clasificadas como sigue de acuerdo a su principio de operación.

1. Uso de formulas empíricas que relacionan el radio y el largo del arco, voltaje y corriente del arco.
2. Uso de características típicas Voltaje-Corriente de la carga del EAF.
3. Uso de cantidades reales registradas en el desarrollo de modelos de inyección de corriente.
4. Modelos de resistor variante en el tiempo y no lineal.
5. Solución de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo y el dominio armónico.

La mayoría de los modelos de carga del EAF propuestos hasta el momento están basados en el dominio del tiempo y dan una flexibilidad inherente asociada con el modelado de cargas no lineales en el dominio del tiempo. Incluso, estudios han mostrado que modelos del horno de arco monofásicos son adecuados para representar el comportamiento del voltaje flicker en un circuito trifásico.

Los factores que afectan la operación del EAF son los materiales a fundir y refinar, la posición de los electrodos, el esquema de control del brazo del electrodo y el voltaje y la impedancia suministrada por el sistema. De este modo, la descripción de la carga de EAF depende de los siguientes puntos: voltaje de arco, corriente del arco y largo del arco (el cual es determinado

por la posición de los electrodos), los esfuerzos alcanzados en el modelado del EAF consideran los parámetros anteriores y su interrelación [5].

1.5.1 Método basado en la característica V-I.

La figura 1.1 muestra la aproximación no lineal de una curva típica V-I de un EAF, este método que utiliza la característica voltaje-corriente se basa en relaciones empíricas, es simple y directo, puede satisfacer una cierta condición de operación, y la simplificación de la característica V-I es el principal factor de exactitud.

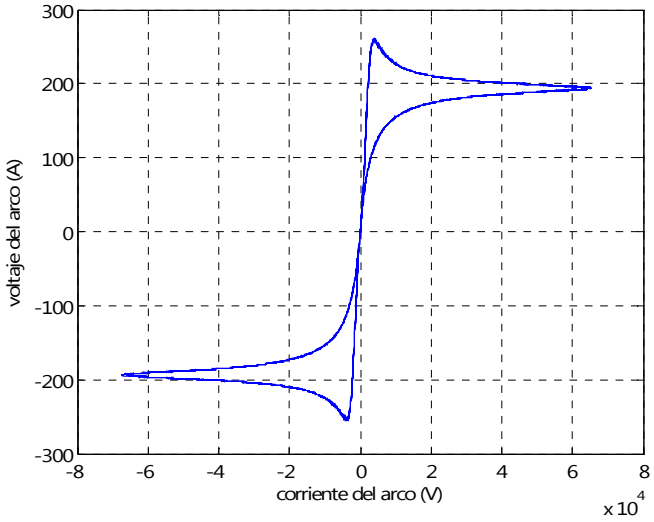

Fig. 1.1. Característica voltaje-corriente de un EAF.

1.5.2 Métodos en el dominio del tiempo.

Este método utiliza básicamente tipos de modelos basados en ecuaciones diferenciales, como el modelo de balance de energía, que es una ecuación diferencial no lineal y que es una formula experimental, cuya principal desventaja es que cambia con diferentes cargas de EAF. Por otro lado utiliza los llamados modelos de "caja negra" del arco eléctrico, los modelos de caja negra se basan en el concepto básico de la energía almacenada en el arco, *Q*, asociada con su conductancia eléctrica, *G*, se puede decir que la conductancia es función de la energía almacenada dado que a un incremento en la energía almacenada corresponde un incremento en su conductancia.

M. Cassie asumió el canal de arco como un cilindro con gas altamente ionizado y de temperatura constante. De esta forma el contenido calórico (energía almacenada) por unidad de volumen permanece constante y de igual forma la conductancia por unidad de volumen. El diámetro del canal del arco varía cuando la corriente varíe. Se tiene, que tanto la conductancia como la energía y la potencia de salida son proporcionales al área de la sección transversal del canal. El modelo de O. Mayr describe el comportamiento del arco eléctrico cercano al cruce por cero, donde la temperatura del arco es menor. Por este motivo su aplicación se limita a pequeñas corrientes de hasta 100 amperes. Al igual que Cassie, Mayr asumió que el canal del arco tiene una forma cilíndrica, pero en este caso el diámetro del cilindro es constante y la temperatura es variable. Para el rango bajo en el que Mayr consideró la variación de temperatura, la conductividad del canal del arco puede asumirse con una variación aproximadamente exponencial con la temperatura [6].

1.5.3 Método en el dominio armónico.

En el método de solución en el dominio armónico de ecuaciones diferenciales, la carga del EAF es desarrollada desde una ecuación de balance de energía, la cual es actualmente una ecuación diferencial no lineal que relaciona el radio del arco y la corriente del arco. La forma de onda del radio del arco puede ser calculada desde una forma de onda de corriente dada, y el método usado aquí es el método Newton-Raphson armónico. Como una función de la corriente del arco y del radio del arco con una expresión analítica, el voltaje del arco puede también ser calculado. Este modelo usa algunos parámetros experimentales para reflejar la operación del horno de arco, pero ignora la influencia del sistema de alimentación. Este método depende de una formula experimental, la cual es diferente con diferentes cargas de EAF por lo tanto este método aun se encuentra en una etapa experimental [5].

1.5.4 Método de procesos aleatorios.

Una aproximación alterna para modelar el EAF es incluir el caos determinista en la caracterización de las corrientes de arco. El análisis no lineal y dinámica caótica han sido conjeturados en distintas ares de la ingeniería. Varios estudios se han ocupado a la relación del caos y condiciones tales como colapso de voltaje, operación y control de sistemas de potencia, y el modelado de varios fenómenos tales como ferro resonancia y fallas de alta

impedancia. Los intentos previos con el uso de ideas deterministas en el estudio de EAF no representan adecuadamente el comportamiento aperiódico del arco eléctrico. La dinámica caótica supera este problema y parece estar mas cerca de la naturaleza del fenómeno que las técnicas estocásticas usadas en el pasado.

El modelado del EAF de AC ha sido tradicionalmente hecho con cualquier de dos posibilidades, con elementos de circuito fijos o elementos fijos sumados a un elemento estocástico. Sin embargo, pruebas recientes que usan datos reales de la carga del EAF sugieren que puede haber un componente caótico en el modelo. El término caótico en este contexto implica una propiedad matemática en la cual el modelo dinámico es altamente sensible a las condiciones iniciales del vector de estado del sistema. Si la evolución de un estado inicial es denotado por X (t), y la evolución desde un estado inicial muy cercano es X' (t), entonces X-X' es crear divergencia incluso si los estados iniciales llegan a ser muy cercanos uno del otro. Las propiedades caóticas son observadas en algunos sistemas físicos que son no lineales y de alto orden. Existen algunos estudios referentes al comportamiento caótico y datos sobre el EAF que permiten matizar que el modelo del EAF puede existir un componente caótico, es importante notar que el caos es un fenómeno determinístico, y no un elemento estocástico. Por lo tanto es posible que un modelo de una carga de EAF actual tenga un componente lineal y no lineal, un componente caótico y un componente estocástico [5].

1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES

El modelo del EAF propuesto en este trabajo, no toma en consideración el control eléctrico e hidráulico de los electrodos de grafito, que determina el largo del arco eléctrico. Tampoco es considerado el cambiador de taps del transformador del horno, que permite el control de la potencia eléctrica para un ciclo completo en la operación del EAF.

El modelo propuesto, permite representar tanto la etapa de fundición como la de refinamiento en la operación del EAF, para ello es necesario ajustar los parámetros del modelo de carga del EAF. A diferencia de la mayoría de los modelos de carga del EAF que únicamente representan armónicas o voltaje flicker, el modelo propuesto en este trabajo es capaz de representar

corrientes de carga armónicas y voltaje flicker, además de que captura armónicas pares e impares. .

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Enseguida se da una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos de este trabajo de tesis:

- En el **Capítulo 1** se presenta la justificación de esta tesis, haciendo énfasis en la importancia del modelado de la carga del EAF, se define el objetivo principal de esta tesis, se presentan las aportaciones, y se describe brevemente el estado del arte mediante una revisión de los métodos de modelado del EAF y de sus ventajas y desventajas.

- En el **Capitulo 2** se trata la generación de corrientes de carga armónicas y voltaje flicker debido a la operación de una carga de EAF, así como sus efectos adversos en la calidad de la energía en la red eléctrica, y la forma de mitigar estos disturbios.

- En el **Capítulo 3** se aborda el proceso de operación de un EAF, los elementos que componente una instalación eléctrica con una carga de EAF y se describe brevemente la teoría del caos y algunos conceptos relacionados a esta.

- En el **Capítulo 4** se presenta la formulación matemática del modelo del EAF propuesto; implementándolo en el software Matlab mediante su interfaz grafica Simulink. Además se simulan los modelos del arco eléctrico deterministas y con un componente caótico, para finalmente analizar el comportamiento de los parámetros del arco eléctrico.

- En el **Capítulo 5** se implementa el modelo propuesto en una red eléctrica real para validarlo, comparándolo con mediciones reales.

- Finalmente, en el **Capítulo 6** se establecen las conclusiones generales del trabajo de tesis, así como recomendaciones para trabajos futuros en el tema.

LA INDUSTRIA ACERERA EN MÉXICO Y EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

CAPÍTULO

2

2.1 INTRODUCCIÓN

A mediados de la década de los años ochenta, junto con la recesión económica y el progresivo deterioro y obsolescencia de la industria nacional del acero, se puso en marcha el proceso de reestructuración y modernización productiva de la industria siderúrgica mexicana. El proceso de modernización permitió la actualización de la planta productiva y un avance importante hacia la elaboración de productos de mayor valor agregado. Para lograrlo, se optó por la privatización, lo que se tradujo en inversiones cuantiosas para la actualización tecnológica de las empresas. El cambio tecnológico en la siderúrgica mexicana se ha hecho continuo, por lo que las plantas mas importantes operan con tecnología avanzada lo cual les otorga una ventaja competitiva desde el punto de vista tecnológico [1]. Hoy en día, la industria acerera en México representa el mayor consumidor industrial de energía eléctrica y el sector industrial con más crecimiento en la última década, además, México es el segundo productor de acero en América Latina. Este importante desarrollo de la industria acerera mexicana, se debe en gran medida a la proliferación del horno de arco eléctrico (HAE) en las grandes plantas de acero integradas y en las mini plantas acereras.

El horno de arco eléctrico (EAF), es actualmente la forma más común de reciclar acero a partir de chatarra, mediante la fusión de la chatarra junto con algunas otras materias primas usando una fuente eléctrica como la principal entrada de energía. Los electrodos de grafito, conectados a la fuente eléctrica, son usados para convertir energía eléctrica en calor por medio

de arcos eléctricos de altas corrientes, producidos entre los electrodos y la carga metálica. Los arcos eléctricos causan que la chatarra sólida sea transformada en estado líquido. El acero fundido es entonces convertido a un grado especificado de calidad con la adicción de sustancias químicas por medio de inyección de carbón y oxigeno.

Los EAF's son normalmente caracterizados por la máxima capacidad de producción de acero, en toneladas, que son capaces de producir durante una sola fase de producción. Otros parámetros que caracterizan el EAF son la capacidad de potencia de entrada (MVA) y el tipo de fuente que es utilizada. Los EAF's son clasificados en hornos de arco de corriente alterna o corriente directa, dependiendo del tipo de alimentación eléctrica; este trabajo se enfoca principalmente a EAF de corriente alterna o simplemente EAF trifásicos [3].

2.2 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA EN MÉXICO

La producción de acero en México tiene lugar en instalaciones que pueden clasificarse ya sea como plantas de acero integradas o como mini plantas. Las plantas de acero integradas usan como insumo principal el hierro y en menor medida pedacería o chatarra. Las mini plantas se apoyan principalmente en chatarra como insumo a un horno de arco eléctrico (HAE). Las mini plantas fabrican un rango limitado de productos relativamente simples, la mayor parte de ellos destinados a la construcción. Las mini plantas generalmente son más pequeñas que las plantas integradas y sirven en mercados locales. La concentración en productos más simples también significa que se usa menos energía en la conformación y tratamiento que en las plantas integradas. Sin embargo, una mini planta típica requiere de una cantidad considerablemente mayor de electricidad por tonelada de producto que una planta de acero integrada, especialmente si esta ultima no usa un HAE [2].

La industria acerera es el usuario industrial más grande de electricidad y coque y el segundo consumidor de gas natural en México. La industria del acero en México es un sector económico estratégico, tanto por el número de empleos que genera como por su contribución a las exportaciones nacionales. En México, existen aproximadamente 618 compañías en operación, entre plantas de acero integradas y mini plantas, que tuvieron una producción

promedio de acero de 701,243 ton/año durante el año 2006. La figura 2.1, muestra que el consumidor de electricidad más grande, que absorbe prácticamente el 60% del total de la producción de energía eléctrica en el país, es el sector industrial. De donde, la industria del acero consume el 7% del total nacional siendo así el primer consumidor industrial de electricidad [4].

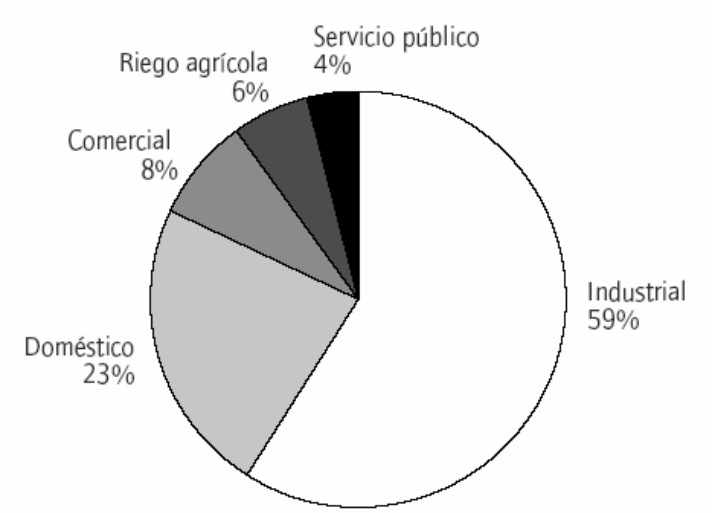

Figura 2.1 Consumo de electricidad en México por sector.

La figura 2.2, muestra que la producción mexicana de hierro y acero aumento 7.1% por año de 1997 a 2006. Se estima que el 80 % de la producción de acero en México fue generada por cinco empresas: AHMSA, HYLSA, Imexsa, Sicartsa y TAMSA. Mientras que las mini acereras representan el 20 % restante de la producción [4].

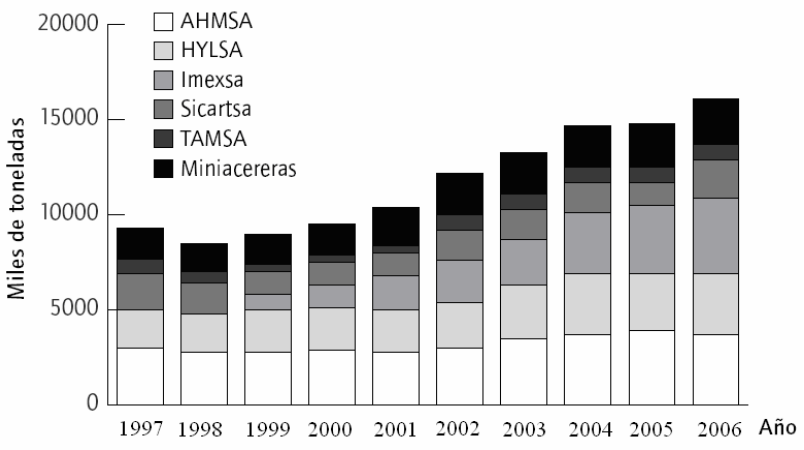

Figura 2.2 Producción de acero por compañía, 1997-2006.

2.2.1 Tecnologías para fabricación de acero en México

La tecnología también ha modificado la distribución de la producción primaria de acero entre procesos de horno de hogar abierto (HHA), horno básico de oxigeno (HBO) y honor de arco eléctrico (HAE). La producción de acero con HHA prácticamente ha desaparecido y fue sustituida por la producción de acero con HBO y HAE en las plantas integradas. Mientras tanto, en mini plantas la producción de acero con HAE ha aumentado debido a la expansión de la capacidad instalada de estas plantas y debido a las ventajas que ofrece la producción de acero con HAE sobre la producción con HBO. La figura 2.3, muestra la producción de acero de acuerdo a la tecnología empleada en México de 1996 a 2006 [4].

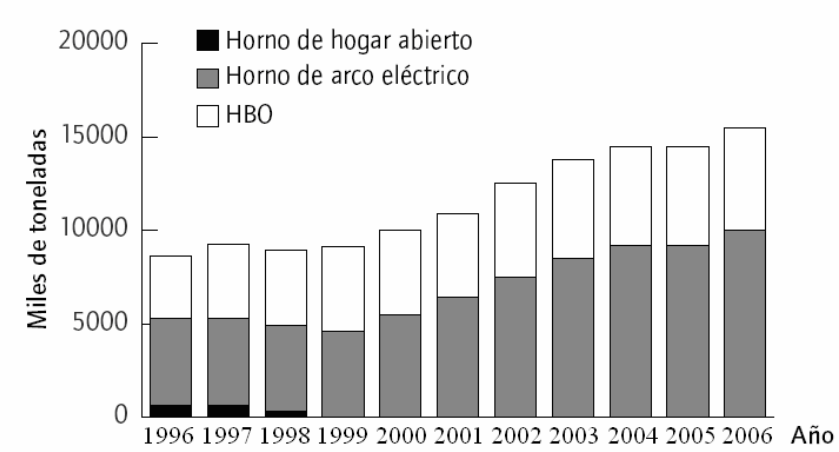

Figura 2.3 Producción de acero por proceso, 1996-2006.

2.2.1.1 Hornos de hogar abierto

El horno de hogar abierto semeja un horno enorme, y se le denomina de esta manera porque contiene en el fondo una especie de piscina larga y poco profunda (6m de ancho, por 15m de largo, por 1m de profundidad aproximadamente). El horno se carga en un 30 % a un 40 % con chatarra y piedra caliza, empleando aire pre-calentado, combustible líquido y gas para la combustión, largas lenguas de fuego pasan sobre los materiales, fundiéndolos. Al mismo tiempo, se quema o se oxida el exceso de carbono y otras impurezas como el fósforo, silicio y manganeso. Este proceso puede acelerarse introduciendo tubos refrigerados por agua, los que suministran un grueso flujo de oxigeno sobre la carga. Periódicamente, se revisan muestras de

la masa fundida en el laboratorio para verificar la composición y determinar los niveles de carbono. Si se esta fabricando acero de aleación, se agregarán los elementos de aleación deseados. Cuando las lecturas de composición son correctas, el horno se cuela y el acero fundido se vierte en una olla de colada. El proceso completo demora de cinco a ocho horas, mientras que el horno de oxigeno básico produce la misma cantidad de acero en 45 minutos aproximadamente. Debido a esto, este horno ha sido virtualmente reemplazado por el de oxigeno básico.

2.2.1.2 Horno de Oxigeno Básico

Es un horno en forma de pera que puede producir una cantidad aproximadamente de 300 toneladas de acero en alrededor de 45 minutos. El horno se inclina desde su posición vertical y se carga con chatarra de acero fría (cerca de un 25 %) y luego con hierro derretido, después de ser devuelto a su posición vertical, se hace descender hacia la carga un tubo de oxigeno refrigerado por agua y se fuerza sobre el flujo de oxigeno puro a alta velocidad durante veinte minutos. Este actúa como fuente de calor y para la oxidación de las impurezas.

Tan pronto como el chorro de oxigeno comienza, se agrega la cal y otros materiales fundentes. La reacción química resultante desarrolla una temperatura aproximadamente de 1650^{o} C. El oxigeno se combina con el exceso de carbono acabando como gas y se combina también con las impurezas para quemarlas rápidamente. Su residuo es absorbido por la capa flotante de escoria. Después de haberse completado la inyección del oxigeno, se analiza el contenido de carbono y la composición química de diversas muestras de la masa fundida. Cuando la composición es correcta, el horno se inclina para verter el acero fundido en una olla de colada. Aunque se puede producir algunos aceros de aleación con este proceso, el ciclo de tiempo aumenta considerablemente, eliminando así su ventaja principal. Consecuentemente, el proceso de oxigeno básico, como el de hogar abierto, se emplean generalmente para producir altos tonelajes de acero con un bajo nivel de carbono.

2.2.1.3 Horno de arco eléctrico

Es el más versátil de todos los hornos para fabricar acero. No solamente puede proporcionar altas temperaturas, hasta 1930º C, sino que también puede controlarse eléctricamente con un alto grado de precisión. Debido a que no emplea combustible alguno, no se introduce ningún tipo de impurezas. El resultado es un acero más limpio. Consecuentemente, puede producir todo tipo de aceros, desde aceros con regular contenido de carbono hasta aceros de alta aleación, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidables y aceros especiales para los cuales se emplea principalmente. Otra ventaja sobre el horno de oxígeno básico es que puede operar con grandes cargas de chatarra y sin hierro fundido. El HAE se carga con chatarra de acero cuidadosamente seleccionada. El arrabio fundido se emplea raramente. Si la carga de chatarra es muy baja en carbono, se agrega coque (el cual es casi puro carbono) o electrodos de carbono de desecho, para aumentar así su nivel. Al aplicarse la corriente eléctrica, la formación del arco eléctrico entre los electrodos gigantes produce un calor intenso. Cuando la carga se ha derretido completamente, se agrega dentro del horno cantidades medidas de los elementos de aleación requeridos.

La masa fundida resultante se calienta, permitiendo que se quemen las impurezas y que los elementos de aleación se mezclen completamente. Para acelerar la remoción del carbón, el oxígeno gaseoso se introduce generalmente en forma directa dentro del acero fundido por medio de un tubo. El oxígeno quema el exceso de carbono y algunas de las impurezas, mientras otras se desprenden como escoria por la acción de varios fundentes. Cuando la composición química de la masa fundida cumple con las especificaciones, el horno se inclina para verter el acero fundido dentro de una olla de colada. Este horno puede producir una hornada de acero en un período de dos a seis horas, dependiendo del horno individual [3].

2.2.2 Producción de acero con HAE en México

Durante la década de los años noventa, la industria acerera mexicana produjo tres quintas partes con base en los convertidores de oxigeno y dos quintas partes con hornos de arco eléctrico. Sin embargo el uso de los HAE en México ha ido adquiriendo cada vez mas

importancia y este hecho esta relacionado con el avance de las mini plantas o mini acereras. Para 1998, las cifras se dispararon al aumentar la producción de acero a un 62 % utilizando la tecnología HAE, mientras que la participación del procedimiento HBO fue de 37.3 %. Actualmente, México es el segundo productor de acero basado en la tecnología HAE en América Latina, sin embargo, ocupa el lugar 16º a nivel mundial y 4º en América Latina en la producción de acero considerando todas las tecnologías disponibles para producir acero [5], tal como lo muestra la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Producción de acero por país, en millones de toneladas. [5]

País	Mundial		América Latina			
	Ranking	Todas las tecnologías	Ranking	Tecnología HAE	Ranking	Tecnología HBO
Brasil	9º	31.6	1º	15.68	1º	14.95
Venezuela	12º	20.7	3º	11.78	2º	8.12
Colombia	14º	18.4	4º	10.56	3º	6.55
México	16º	16.2	2º	12.53	4º	3.15

Cabe destacar que es especialmente notorio en las principales mini acereras de México la incorporación de los HAE de ultra alta potencia, tecnología de última generación que se está difundiendo en países industrializados. En base a todo lo anterior, se puede decir que la tecnología basada en los HAE esta bien desarrolla y con perspectivas de crecimiento en México [5], sin embargo, este desarrollo y crecimiento de los HAE tiene consecuencias en los sistemas eléctricos, tales consecuencias se discuten en la siguiente sección.

2.3 IMPACTO DE LAS ACERERAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

En México las plantas acereras constituyen un grupo, dentro del sector industrial, caracterizado por grandes consumos de potencia activa y consumos muy variables de potencia reactiva. Trabajan con HAE que transforman la energía eléctrica en calor para la fusión y refino de metales principalmente hierro, para la producción de acero. Debido a la naturaleza del arco eléctrico y del proceso de fundición, las plantas acereras pueden producir grandes perturbaciones sobre la red eléctrica. Para una compañía suministradora de energía eléctrica, una planta de acero moderna representa un usuario riesgoso, debido a que la naturaleza de su

carga podría provocar disturbios en la calidad de la energía para otros consumidores conectados a la red eléctrica. Por otro lado, esta misma planta acerera podría ser el mas grande consumidor en el sistema de distribución. Los HAE son considerados como la carga que más disturbios genera entre los sistemas eléctricos industriales en la actualidad. Sus efectos pueden percibirse no solo en el mismo sitio donde el HAE esta en operación, si no que sus efectos también pueden ser percibidos por otros usuarios conectados a la misma compañía de suministro de energía eléctrica, aun en lugares bastante alejados de la ubicación del HAE. Los disturbios producidos en las redes eléctricas por los HAE pueden afectar significativamente la calidad de la energía distribuida por las compañías eléctricas.

Los ciclos de fundición de las plantas acereras que emplean HAE son caracterizados por un comportamiento eléctrico altamente variante en el tiempo. Variaciones rápidas de potencia activa y corriente, causan parpadeo de tensión, así como generación de corrientes armónicas cuya magnitud cambia con el tiempo y fase del proceso de fundición, ambos disturbios son asociados con la operación normal del HAE. Las variaciones en el tiempo de los parámetros eléctricos del HAE, son debidas a las fluctuaciones en el largo del arco eléctrico, lo cual puede ser causado por fuerzas electromagnéticas, colapso de la chatarra durante la fundición y movimiento de los electrodos debido a la acción del sistema de control de los mismos. Los impactos que tiene una planta acerera sobre los sistemas eléctricos, pueden ser agrupados en dos categorías: impactos sobre el sistema eléctrico de la misma planta acerera e impactos sobre usuarios conectados a la red eléctrica de la misma compañía suministradora.

Las corrientes de carga armónica y fluctuaciones de voltaje, principales disturbios generados por la operación del HAE, impactan tanto en el sistema eléctrico de la misma planta acerera como en los usuarios conectados a la misma red de alimentación. Las variaciones de la longitud del arco provocan fluctuaciones de tensión que se propagan por el sistema eléctrico de alimentación hasta llegar a los usuarios de baja tensión. Desafortunadamente, la frecuencia de esas fluctuaciones coincide con la frecuencia de fluctuación de la iluminación que es detectada por el ojo humano, provocando una cierta incomodidad a los consumidores residenciales. Los niveles de fluctuaciones de tensión son proporcionales a la relación entre la

potencia del HAE y la potencia de cortocircuito del punto común de acoplamiento con otros consumidores.

Por otra parte, las armónicas pueden excitar circuitos resonantes produciendo muy altos valores de voltajes rms y pico, los cuales pueden degradar y dañar equipo y eventualmente fallas en los equipos de alimentación. La distorsión de voltaje severa puede interferir con los sistemas de control en la planta de fundición. Perdidas adicionales en el sistema eléctrico, reducción en la vida útil del equipo eléctrico e interferencia con equipo de protección, control y comunicación, son algunos de los problemas generados por la circulación de corrientes armónicas tanto en la planta industrial como en las instalaciones eléctricas de otros consumidores cercanos a la planta acerera.

El mayor costo de producción para una planta acerera es la energía utilizada para alimentar el HAE. Una operación con bajo factor de potencia resulta en una caída adicional de tensión a través del sistema de potencia, produciendo una tensión menor a la nominal en los buses de la planta eléctrica. Esto incrementa el tiempo de fundición e incrementa los costos de operación por tonelada de la planta acerera. Un bajo factor de potencia, también resulta en costos adicionales en forma de penalizaciones por parte de la compañía suministradora de energía eléctrica. Se puede decir que los disturbios y problemas generados por la operación de los HAE, impactan directamente en costos de producción, reducción de vida útil de equipos eléctricos, perdidas económicas e incomodidad debido a la fluctuación en la intensidad luminosa tanto en las plantas acereras como en los usuarios conectados a la misma red de alimentación que esta ultima.

2.4 EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

El HAE consiste en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30mm de espesor) forrado de material refractario que forma la solera y alberga el baño de acero líquido y escoria, como se aprecia en la figura 2.4. El resto del horno está formado por paneles refrigerados por agua. La bóveda es desplazable para permitir que la chatarra sea cargada a través de unas cestas adecuadas. La bóveda está dotada de una serie de orificios por los que se introducen los

electrodos, generalmente tres, que son gruesas barras de grafito de hasta 700mm de diámetro. Los electrodos se desplazan de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo, y están conectados a un transformador que proporciona las condiciones de voltaje e intensidad adecuadas para hacer saltar el arco con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno.

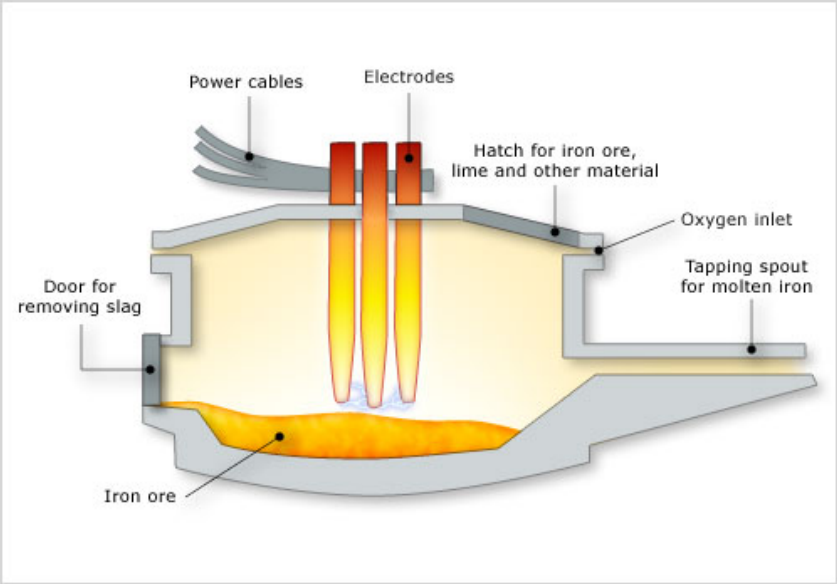

Figura 2.4 Representación de un Horno de Arco Eléctrico.

Otro orificio practicado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño. El proceso de fabricación se divide básicamente en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino.

El principal objetivo en la industria acerera, es conseguir la máxima producción de acero de alta calidad al costo mas bajo como sea posible. La corriente eléctrica en los electrodos de grafito permanecerá constante, si el largo de los arcos eléctricos es constante también, y el cambiador de Taps del transformador del horno es la principal fuente para controlar la potencia eléctrica. Sin embargo, el largo constante del arco implica que la potencia de entrada a la carga del EAF sea estable alrededor de un punto de operación determinado por el cambiador de taps, lo cual resulta en una producción efectiva [12].

2.4.1 Operación del Horno de Arco Eléctrico.

El horno de arco eléctrico opera mediante un proceso de fundición por lotes, produciendo lotes de acero fundido conocidos como “heats”, y es hecho con las siguientes tres operaciones básicas: carga del horno, fundición y refinación. Cada lote de acero fundido toma un ciclo de operación, el cual es llamado el ciclo “tap-to-tap”. Un ciclo tap-to-tap es típicamente de menos de una hora y es llevado a cabo por diferentes operaciones como se ilustra por el diagrama de flujo en la figura 2.5; las especificaciones de energía y la carga de la materia prima son diferentes para cada periodo de fundición [14].

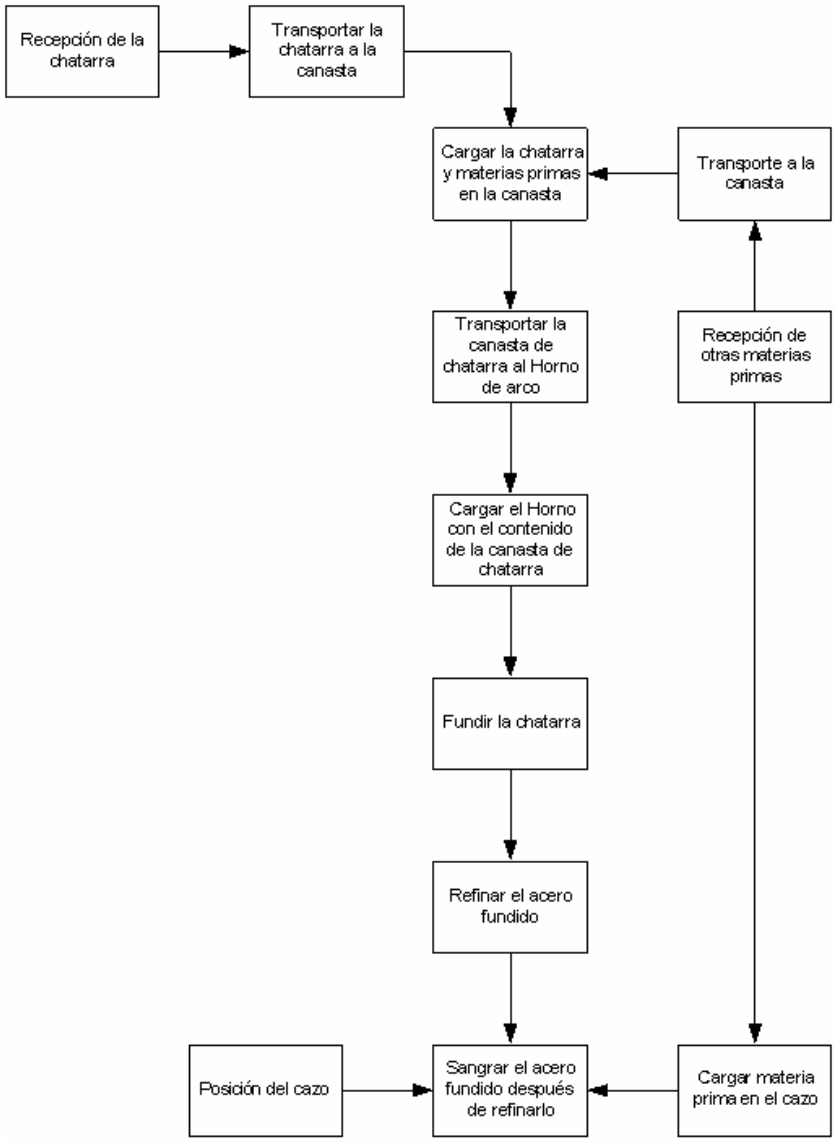

Figura 2.5 Diagrama de flujo para un ciclo del EAF.

2.4.1.1 Carga del Horno Eléctrico

El primer paso en la producción de acero vía un EAF trifásico, es cargar la olla del horno con chatarra de acero y otras materias primas. La carga de un horno de arco puede ser continua o discontinua, en un horno con carga continua la materia prima es cargada en la olla con el horno energizado; en cambio cuando se carga la materia prima con el horno desenergizado se dice que es una carga discontinua. Un muy importante paso en la producción de cualquier "heat" es definir el grado de acero requerido, esto determinara las especificaciones de la chatarra y otras materias primas necesarias para una fundición eficiente.

La canasta de la chatarra es pesada antes de transportarla al EAF. Cuando el horno es cargado, los electrodos y el techo del horno son elevados y desplazados hacia un costado. Entonces una grúa mueve la el cubo de chatarra sobre la olla del horno, el cubo se abre retrayendo dos segmentos ubicados en el fondo del cubo lo cual origina que la chatarra caiga dentro de la olla del horno, el techo del horno es entonces cerrado y los electrodos son bajados, después de esto la potencia eléctrica es aplicada.

2.4.1.2 Fundición de la Chatarra

El periodo de fundición es el proceso principal en la operación del EAF, cuando la energía es aplicada al horno, los arcos eléctricos encienden desde las puntas de los electrodos, convirtiendo la energía eléctrica en calor. Esto causa que la carga metálica se convierta en estado líquido. Esta fase de fundición puede ser dividida típicamente en los siguientes periodos:

- **Periodo de encendido del arco.** Este es el instante cuando la energía es inicialmente aplicada al horno. Sin penetrar en la carga, los arcos son muy inestables y la corriente de arco aplicada debe ser mantenida relativamente baja para esta duración. Otra condición importante para este periodo es proteger el techo del horno de la radiación del arco y sumergir rápidamente los electrodos en la chatarra.

- **Periodo Boring.** Después del encendido del arco las puntas de los electrodos penetraran dentro de la chatarra sin causar un corto circuito. Con los electrodos ahora

estando rodeados por la chatarra los arcos son relativamente estables y la potencia puede ser incrementada.

- **Periodo de formación de acero fundido.** El acero fundido comenzara a formarse en el fondo de la olla del horno, las puntas de los electrodos penetraran completamente a través de la chatarra y el arco permanecerá por encimadle acero fundido. Con una pequeña cantidad de acero en estado líquido es importante proteger el fondo del horno, debido a que el daño puede darse debido al contacto directo con el arco eléctrico.

- **Periodo de fundición principal.** Con el arco en su condición más estable, la máxima potencia es ahora aplicada para transformar rápidamente toda la chatarra en estado líquido. Los costados de la olla del horno son expuestos a una radiación intensa debido al arco durante este periodo. La transferencia de energía desde las puntas de los electrodos al acero fundido será entonces más eficiente. Con la mayoría de la primera carga ahora convertida en estado liquido, una segunda carga es a veces necesaria para asegurar la densidad adecuada del acero líquido.

2.4.1.3 Periodo de Refinamiento

El periodo de refinamiento puede típicamente ser dividido en un periodo de pre-refinamiento y el periodo de refinamiento principal. Estos dos periodos son descritos a continuación [14]:

- **Periodo de pre-refinamiento.** Una vez que la carga final de chatarra es completamente fundida, mediciones obtenidas en este periodo son evaluadas y un proceso de ajuste son hechos para propósitos del periodo de refinación.

- **Periodo de Refinamiento.** El proceso del arco continúa según los ajustes hechos para alcanzar las especificaciones del acero deseado. Quemadores de oxigeno y carbón son usados para ajustar la composición y temperatura del acero requerido. Una vez concluido este periodo, el siguiente paso de producción es refinar el acero en un horno de cuchara, este refinamiento es mucho más específico y exacto.

2.5 EL SISTEMA ELÉCTRICO DEL HAE

El sistema de potencia eléctrico consiste de un sistema primario y un sistema secundario, el sistema primario alimenta en alto voltaje desde la compañía suministradora de energía, en voltajes típicos de 130 a 230 kV. Este sistema primario, alimenta al transformador del horno donde el voltaje es bajado a un nivel adecuado para las condiciones de operación del horno, normalmente entre 400-1000 V. En el caso de corriente alterna, tres fases son utilizadas y tres electrodos serán necesarios, cada una de las tres fases es conectada a cada uno de los tres electrodos.

2.5.1 El transformador del EAF

En un proceso de un EAF trifásico, el transformador del horno es típicamente conectado en una configuración estrella-delta, esta configuración es comúnmente usada en transformadores reductores, y puede tratar efectivamente con las altas corrientes requeridas por la operación del horno; otra ventaja de la conexión estrella-delta es que las armónicas “triplen” o múltiplos de tres quedan atrapadas en la delta. Obviamente otros sectores en una planta de producción de acero también requieren potencia eléctrica, por esta razón la transformación de la potencia eléctrica para alimentar el EAF es normalmente hecha en dos pasos, usando una configuración de doble transformador. Tal configuración es ilustrada en la figura 2.6, note que esta configuración podría ser diferente de una planta acerera a otra.

Durante la operación del EAF existe variación en los requerimientos de voltaje y corriente del arco, razón por la cual es necesario seleccionar los voltajes del secundario del transformador, adecuados para la correcta operación del EAF, por lo anterior el transformador del EAF cuenta con un cambiador de taps en el devanado primario, lo que permite proporcionar las especificaciones de potencia, lo cual es muy importante en la producción del EAF. Dos métodos básicos son usados en la industria del acero para cambiar el número de espiras en el devanado primario del transformador del horno, esto se hace con un cambiador de tap o con un interruptor con carga. Con el interruptor con carga, el conjunto de pasos es cambiado con el horno de arco en operación, es una técnica muy complicada debido a las grandes magnitudes de corrientes que demanda el EAF. Con el cambiador de taps sin carga, es necesario abrir el

circuito eléctrico levantando los electrodos, esto es considerado como tiempo muerto, lo cual es indeseable en el proceso de operación del horno de arco, y tiene un efecto negativo en la eficiencia de la producción del acero [15].

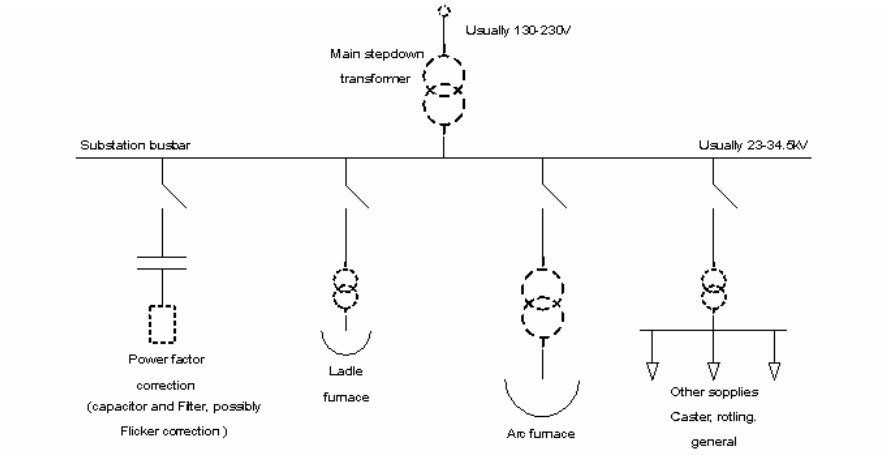

Figura 2.6. Configuración de doble transformador para alimentar el EAF.

2.5.2 Cables flexibles de potencia del horno de arco

Los cables de potencia del horno con enfriamiento por agua, proveen la conexión flexible entre el secundario del transformador del horno y los electrodos, estos cables deben ser flexibles para permitir el movimiento de los brazos del electrodo hacia arriba y hacia abajo, así como para permitir el desplazamiento de los brazos del electrodo y el techo del horno cuando la chatarra es cargada en el EAF.

2.5.3 Los electrodos.

Los electrodos entregan la potencia eléctrica al horno en forma de un arco eléctrico entre la punta del electrodo y la carga del horno; los electrodos son regularmente de grafito, muy resistentes, densos y tienen una baja resistividad eléctrica. Históricamente el consumo del electrodo había sido tan alto como 12 a 14 libras por tonelada de acero, pero atreves del continuo mejoramiento en su fabricación y de la efectividad en el proceso de fundición del acero, el consumo del electrodo ha sido reducido entre 3.5 a 4.5 libras por tonelada de acero aproximadamente; el consumo del electrodo es debido principalmente a la oxidación y al desgaste mecánico causado por el hundimiento del electrodo dentro de la chatarra. Tres actuadotes hidráulicos son usados en el proceso del EAF, para mover cada electrodo de grafito

en una posición vertical para ajustar el largo del arco eléctrico y de manera horizontal para cargar la chatarra dentro del EAF [16].

LA TEORÍA DEL CAOS DETERMINISTA

CAPÍTULO

3

3.1 INTRODUCCIÓN

En 1961, el meteorólogo Edgard Lorenz esta intentando predecir el clima. Para ello necesitaba resolver numéricamente un sistema de ecuaciones diferenciales que modelaban el comportamiento de la atmósfera. Se dio cuenta que cada vez que ejecutaba su programa para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, el ordenador obtenía resultados diferentes como solución al sistema de ecuaciones. Lo que ocurría era que su programa trabaja con seis cifras decimales de precisión, mientras que el introducía como condición inicial solo tres cifras. Las tres cifras restantes, eran introducidas por el ordenador en cada ejecución. Aunque Lorenz conocía esto, no pensaba que un error de inicialización en las milésimas fuera a importar mucho en el resultado final. Lorenz se había topado con un sistema de ecuaciones caótico. Fue así, como comenzó la consolidación de una incipiente ciencia, el Caos, cuando Lorenz meteorólogo del Massachusetts Institute of Technology diera a conocer su curioso modelo climático que posteriormente fascinaría a muchos físicos por su extraño comportamiento, algunos años más tarde el Caos se ha convertido en el nombre conciso de una teoría que constituye una verdadera eclosión en el ámbito científico [17].

El caos viene a desbancar definitivamente con una idea bastante antigua, el determinismo. Desde los tiempos de Newton, se dispone de una teoría matemática capaz de predecir el comportamiento de los sistemas físicos. Conociendo la configuración inicial de un sistema y aplicando las leyes físicas, el comportamiento de un sistema está totalmente determinado en un instante posterior. La teoría del caos nos advierte que, en determinados sistemas físicos, la

evolución temporal es tremendamente compleja y depende dramáticamente de las condiciones iniciales hasta el punto que no se puede predecir con seguridad la evolución real del sistema.

La teoría del caos determinista es una rama de las ciencias exactas. No se admiten imprecisiones, indefiniciones. Los teoremas demostrados continúan siendo resultados obtenidos por deducción lógica clásica y con precisión científica. No estudia sistemas totalmente desorganizados ni confusos. Es cierto que el nombre de la teoría del caos estuvo inspirado en el significado usual de la palabra, porque el objeto de su estudio era percibido como desordenado, cualitativamente y antes de descubrir un ordenado abordaje matemático. La teoría matemática del caos no estudia sistemas caóticos en el sentido literal de la palabra [2]. Las ciencias exactas tienen la ventaja de que sus conceptos son abstracciones que se definen a medida de las necesidades, y no permanecen inmutables. Constantemente se está adaptando, modificando, ampliando y particularizando, para empujar la frontera de lo desconocido y generalizar los teoremas ya conocidos, haciéndolos más abstractos y menos casuísticos. Este es el proceso en que se encuentra la teoría del caos en la actualidad, y esta siendo utilizada por investigadores de diversas áreas, en particular en trabajos recientes desarrollados en nuestro país. La teoría del caos determinista es una rama de las ciencias exactas actual y en desarrollo [2].

3.2 DEFINICIÓN DEL CAOS DETERMINISTA

Podemos denominar teoría del caos determinista a la rama de la teoría de los sistemas dinámicos que se dedica al estudio de los sistemas dinámicos no lineales que presentan caos determinista, es decir la teoría del caos, es el estudio cualitativo del comportamiento aperiódico e inestable en sistemas dinámicos no lineales y deterministas. Se observa un comportamiento aperiódico cuando no hay una variable reflejando una repetición regular de valores, describiendo el estado del sistema. El comportamiento aperiódico inestable es altamente complejo, este nunca se repite y continúa manifestando los efectos de cualquier pequeña perturbación. Un Sistema Dinámico podemos considerarlo como una colección de partes que interactúan entre sí y se modifican unas a otras a través del tiempo, es decir, que son dependientes del tiempo. El objetivo de la teoría de los sistemas dinámicos es el estudio

del comportamiento a largo plazo o comportamiento asintótico de un sistema que depende del tiempo. Ahora, un sistema dinámico es lineal cuando la superposición lineal de dos de sus soluciones también es solución del mismo, el comportamiento asintótico de un sistema lineal es sencillo simplemente el sistema puede ser estable o inestable. Los sistemas dinámicos lineales son estables cuando pequeños cambios en las condiciones iniciales del sistema no originan grandes cambios en el proceso y resultado final del mismo y son inestables en el caso contrario. La realidad que nos rodea es estrictamente no lineal, y los modelos lineales son sólo una aproximación local (en un periodo pequeño de tiempo o en una región pequeña del espacio) [17].

Desafortunadamente, el análisis de los sistemas no lineales es mucho más complejo, incluso su comportamiento asintótico presenta grandes dificultades matemáticas. En algunos sistemas dinámicos no lineales, la dependencia entre las partes que configuran el sistema es muy sensible y pequeñas variaciones en las condiciones iniciales provocan cambios substanciales en el resultado final, entre estos sistemas inestables se encuentran ciertos sistemas que presentan una dinámica compleja que es robusta ante pequeñas perturbaciones, es decir, sus trayectorias cambian mucho pero su comportamiento cualitativo general se mantiene. Esta dinámica tan compleja se suele denominar caos determinista, aunque no se conoce una definición precisa de este término, una consecuencia inmediata de la dependencia sensible a las condiciones iniciales es la imposibilidad de realizar predicciones respecto al comportamiento asintótico de las trayectorias, de ahí la componente “caótica” o irregular en su comportamiento.

3.2.1 Definición de conceptos relacionados con la teoría del caos.

El concepto de caos determinista se refiere a un comportamiento determinista pero impredecible a largos tiempos, de sistemas no lineales con muy pocos grados de libertad. A continuación se definen algunos conceptos relacionados con el caos determinista.

Sistemas deterministas. Se trata de sistemas descritos, sin ninguna clase de estocasticidad, ruido o fluctuación, por sistemas de ecuaciones diferenciales o por sistemas de aplicaciones iterativas. Cuando un sistema esta descrito por ecuaciones deterministas, se puede predecir su

comportamiento a tiempos largos, o se puede obtener una solución completa del sistema, con lo cual la predictibilidad es total.

Sistemas no lineales. Se trata de sistemas controlados por aplicaciones o ecuaciones no lineales. En la mayoría de los casos la no linealidad no es muy grande, talvez con productos de las variables. Esta caracteristica es imprescindible pues los sistemas lineales no pueden presentar comportamientos caoticos, etan perfectamente estudiados, y no hay sorpresas, en el sentido de que siempre tienen solución.

No predictibilidad. Aunque un sistema venga descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales o aplicaciones, y aunque estas se pudieran integrar exactamente, para seguir su evolución se hace necesario conocer un valor inicial, las condiciones iniciales. Y aquí es donde aparece una de las principales caracteristicas de los sistemas caóticos: dos puntos iniciales tan cercanos como se quiera, terminan por evolucionar de forma completamenete diferente, dando lugar a recorridos separados por completo. Esta circunstancia se conoce como sensibilidad a las condiciones iniciales [3].

Atractor extraño. Un atractor extraño es una imagen o gráfico en el espacio de fases de algún concreto sistema caótico, viene a representar el comportamiento a largo plazo de dicho sistema; el atractor extraño viene a ser similar a la función de densidad de probabilidad para los posibles estados del sistema dinámico, el atractor es una nube de probabilidad, más densa en aquellas zonas por las que el sistema pasa con mayor frecuencia tal y como se muestra en la figura 3.4.

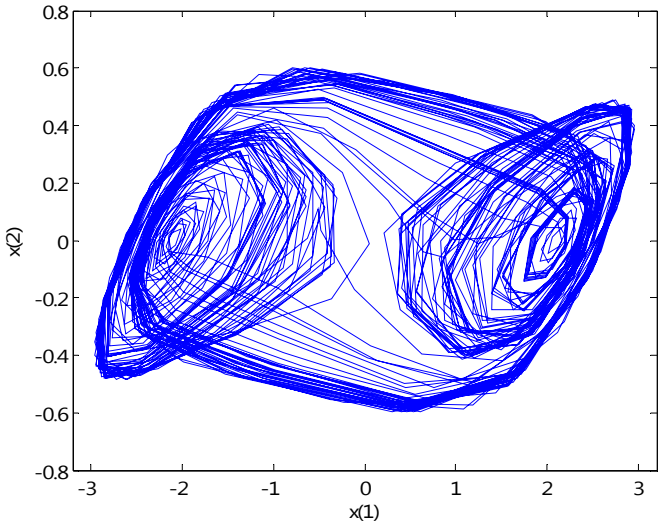

Figura 3.1 Atractor extraño de un sistema caótico.

Dimensión Fractal. Todos tenemos un concepto intuitivo de dimensión. De un punto decimos que no tiene dimensiones; de un segmento, que tiene una dimensión; una figura plana, dos dimensiones y un poliedro, tres. Pensar en un objeto que tenga, por ejemplo, más de dos dimensiones pero menos de tres, es algo que escapa a la intuición sensible. Fue éste, precisamente, el abstracto pensamiento de Lorenz, cuyos planteamientos en un plano meramente teórico dieron origen al concepto de dimensión fractal. La pregunta subsiguiente fue si objetos que poseyesen esta dimensión podrían darse en la realidad, al menos de un modo aproximado, los trabajos posteriores de varios matemáticos demostraron que no sólo pueden darse estos objetos, sino que la geometría de la naturaleza es eminentemente fractal [1]. Sorprendentemente, todos los sistemas dinámicos caóticos tienden asintóticamente a evolucionar en su espacio de fases hacia una región acotada cuya dimensión geométrica no es entera, es decir, es un fractal, que se denomina atractor extraño. Podemos decir que el atractor extraño es el compendio de una serie de trayectorias asintóticas muy irregulares, casi al azar, del sistema dinámico no lineal.

Espacio de fases. En la teoría del caos los sistemas dinámicos son estudiados a partir de su espacio de fases, es decir, la representación coordenada de sus variables independientes. En estos sistemas caóticos, es fácil encontrar trayectorias de movimiento no periódico, pero cuasi-periódicas. Sorprendentemente, todos los sistemas dinámicos caóticos tienden asintóticamente a evolucionar en su espacio de fases hacia una región acotada cuya dimensión geométrica no es entera, es decir, es un fractal, que se denomina atractor extraño. Podemos decir que el atractor extraño es el compendio de una serie de trayectorias asintóticas muy irregulares, casi al azar, del sistema dinámico no lineal [18].

3.3 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DE LA TEORÍA DEL CAOS

Desde un punto de vista matemático, un sistema dinámico (f, X) es caótico si cumple con las siguientes propiedades:

- Dependencia sensible a las condiciones iniciales.
- Cumple con la propiedad de mezcla dinámica en el espacio de fases.
- Los puntos periódicos de f son densos en el espacio de fases X.

3.3.1 Dependencia sensible a las condiciones iniciales.

Un sistema (*f, X*) es sensible a las condiciones iniciales si $\exists\delta>0$ tal que para cualquier $x \in X$ y $\varepsilon > 0$ existen y $\in X$ y n verificando que:

$$|x - y| < \varepsilon \tag{3.1}$$

$$\left|f^n(x) - f^n(y)\right| > \delta \tag{3.2}$$

Es decir, que por muy juntas que estén las condiciones iniciales, el sistema tiende a separlarlas muy deprisa, tanto que no depende de lo juntas que lleguen a estar, pues δ no depende de ε. Todo sistema depende de las condiciones iniciales, pero no necesariamente de forma tan dramática como es el caso de los sistemas caóticos [4].

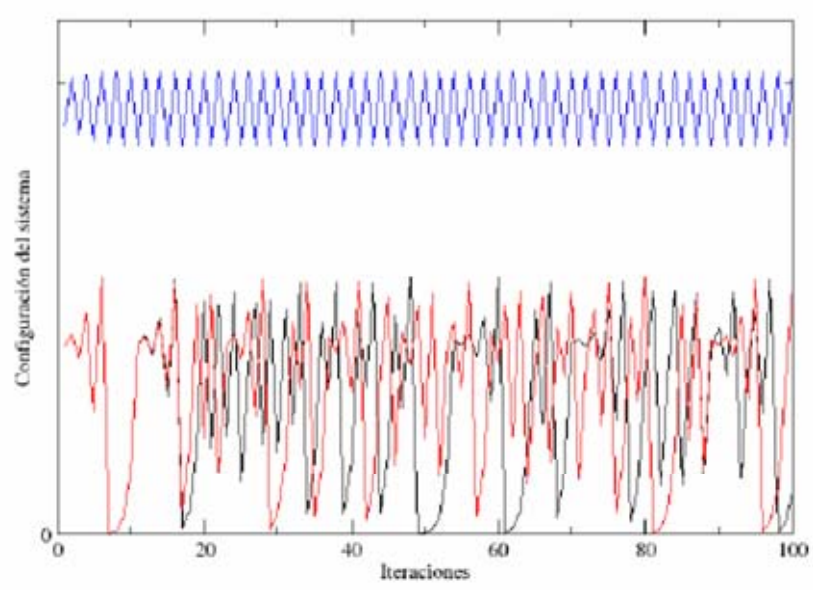

Figura 3.2 Dependencia a las condiciones iniciales en sistemas caóticos..

En la figura 3.2, se representan dos sistemas diferentes, uno encima del otro. La línea azul es la evolución temporal de un sistema, aunque se aprecia una sola línea oscilando entre los dos puntos fijos, en realidad hay dos orbitas diferentes, cada una correspondiente a una configuración inicial dada, pero muy similares entre sí. En las líneas de la parte posterior de la figura 3.2, se muestran las órbitas de las mismas condiciones iniciales pero en un sistema caótico. Se aprecia que al principio el sistema evoluciona de la misma manera, pero pronto se

separan las orbitas para no volver a encontrarse. Esto es sensibilidad a las condiciones iniciales, característica de los sistemas caóticos [4].

La dependencia sensible es una característica intrínseca de los fenómenos caóticos, es decir, una pequeña variación en cualquiera de sus elementos puede provocar una desviación importante en los resultados; así, podemos decir que un fenómeno es caótico cuando, pareciendo comportarse como un fenómeno de azar, no lo es, y además las partes que los conforman son sensiblemente dependientes respecto de las condiciones iniciales [18].

3.3.2 Cumple con la propiedad de mezcla dinámica en el espacio de estado.

Se dice que un sistema dinámico (*f, X*) tiene la propiedad de mezcla si para cuales quiera conjuntos $I, J \subset X$ arbitrariamente pequeños existe un *n* tal que $f^n(I) \cap J \neq 0$.
Es decir, que independientemente de la configuración inicial, el sistema no deja ningún punto del espacio de fases sin pisar. En otras palabras, es que el sistema llena el espacio de fases, o que las orbitas no son cerradas [4].

3.3.3 Los puntos periódicos son densos en el espacio de fases.

Sean $A \subset B$ dos conjuntos no vacíos, y sean a $\in A$ y $b \in B$ dos puntos de estos conjuntos. Sea d(a,b) una distancia. Se dice que A es denso en B si se cumple la ecuación (3.3). Por ejemplo, los racionales del intervalo [0,1] son densos en este intervalo [4].

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \text{y} \quad \forall b \in B,\ \exists a \in A \quad \text{tal que} \quad d(a, b) < \varepsilon \tag{3.3}$$

Finalmente el comportamiento caótico determinista resulta ser tan interesante porque, en un sistema caótico determinista coexisten sin cruces infinitas órbitas periódicas, ninguna de las cuales predomina en circunstancias normales. En contraste, los sistemas lineales tienen trayectorias muy simples, por lo que cualquier actuación sobre el sistema genera movimientos más irregulares. Además, aunque el caos es impredecible, es determinista. Aunque la trayectoria aparezca a primera vista como aleatoria, no lo es. Dos sistemas caóticos casi

idénticos si son excitados por una señal adecuada producirán una señal de salida esencialmente idéntica, aunque no se podrá determinar de antemano su forma [*3].

3.4 LA TEORÍA DEL CAOS APLICADA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

En las décadas pasadas, el caos fue mal interpretado en la práctica industrial: fue considerado como ruido cuando el conocimiento del comportamiento caótico era reducido, posteriormente fue clasificado como un fenómeno inestable. Hoy en día, el caos ha sido identificado para ser un fenómeno real en los sistemas de potencia eléctricos. La condición necesaria de que el fenómeno caótico ocurra en un circuito o sistema de potencia eléctrico es la existencia de una resistencia negativa no lineal, por ejemplo un diodo zener o la resistencia del arco eléctrico [A]. El concepto del caos desde el punto de vista de los sistemas eléctricos puede ser explicado discutiendo cuatro comportamientos en estado estable de sistemas dinámicos no lineales: puntos de equilibrio, soluciones periódicas, soluciones cuasiperiódicas y caos. El comportamiento en estado estable se refiere al comportamiento asintótico de un sistema cuando el tiempo llega a ser infinito. Se considerara un sistema general no lineal descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales en un espacio euclidiano de *n* dimensiones, definido por:

$$\dot{x} = f(x) \tag{3.4}$$

Se asume que el vector de campo $f : R^n \rightarrow R^n$ es C^1; esto es una condición suficiente para que la solución exista y sea singular. La solución de la ecuación (3.4), también llamada trayectoria, bajo condición inicial $x(t_0)=x_0$ es escrita como $x(t)=\phi_t(x_0)$. Por lo tanto, $\phi_t(x_0)$ satisface la ecuación (3.4).

$$\phi_t(x_0) = f(\phi_t(x_0)), \qquad \phi_{t_0}(x_0) = x_0 \tag{3.5}$$

Un vector de estado $\hat{x}$ es llamado punto de equilibrio de (3.4) si $f\left(\hat{x}\right) = 0$. Alternativamente, un punto de equilibrio es una trayectoria la cual esta en el punto de equilibrio todo el tiempo. Un punto de equilibrio es asintóticamente estable si todos los eigenvalores de su

correspondiente Jacobiano tienen partes reales negativas. Los sistemas de potencia son generalmente operados en un punto de equilibrio estable.

$\phi_t(x^*)$ es una solución periódica si $\phi_t(x^*)=\phi_{t+T}(x^*)$ para todo t y algún periodo mínimo $T>0$. Una solución periódica tiene una transformada de Fourier consistente de una componente fundamental $F=1/T$ y armónicas en k/T, $k=2,3,\ldots$ Algunas de estas componentes pueden ser cero. Se sabe que las soluciones periódicas existen en los sistemas de potencia. Por ejemplo, el fenómeno de la resonancia subsíncrona y oscilaciones de baja frecuencia son soluciones periódicas que ocurren en la generación y transmisión de sistemas. La estabilidad de una solución periódica es determinada por sus múltiples características las cuales son una generalización de los eigenvalores en un punto de equilibrio. Una solución cuasiperiódica es una que puede ser expresada como una suma de funciones periódicas:

$$x(t)=\sum_i h_i(t)\ x(t)=\sum_i h_i(t) \tag{3.6}$$

donde h_i tiene un periodo mínimo T_i y frecuencia $F_i=1/T_i$. Es más, la existencia de un conjunto finito de de frecuencias base $f_1,\ldots,f_p$ con la característica de que el conjunto de frecuencias base es linealmente independiente. Este tipo de soluciones también existe en los sistemas de potencia. El caos, usualmente desde un punto de vista práctico puede ser definido como un comportamiento en esta estable limitado el cual no cae dentro de las categorías de los otros tres comportamiento en estado estable discutidos con anterioridad. Mientras que los puntos de equilibrio son adimensionales y las soluciones periódicas caen en una dimensión, el caos es más complejo y su dimensión es un fractal. Para explicar más fácilmente el fenómeno del caos, consideraremos el sistema caótico clásico de Chua. Este sistema ha sido objeto de múltiples estudios teóricos y experimentales en el are del caos en los años mas recientes. El sistema caótico de Chua es descrito por:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{d\tau}&=\alpha\left[y-x-f(x)\right]\\ \frac{dy}{d\tau}&=x-y+z\\ \frac{dz}{d\tau}&=-\beta y-\gamma z\end{aligned} \tag{3.7}$$

donde *(x,y,z) Є R3* y *α, γ, β* son parámetros positivos. Con el propósito de ilustrar el fenómeno del caos, se escogen condiciones iniciales iguales a (0,0,0), entonces la variable *x* y un atractor extraño son encontrados los cuales se muestran en la figura 3.3.

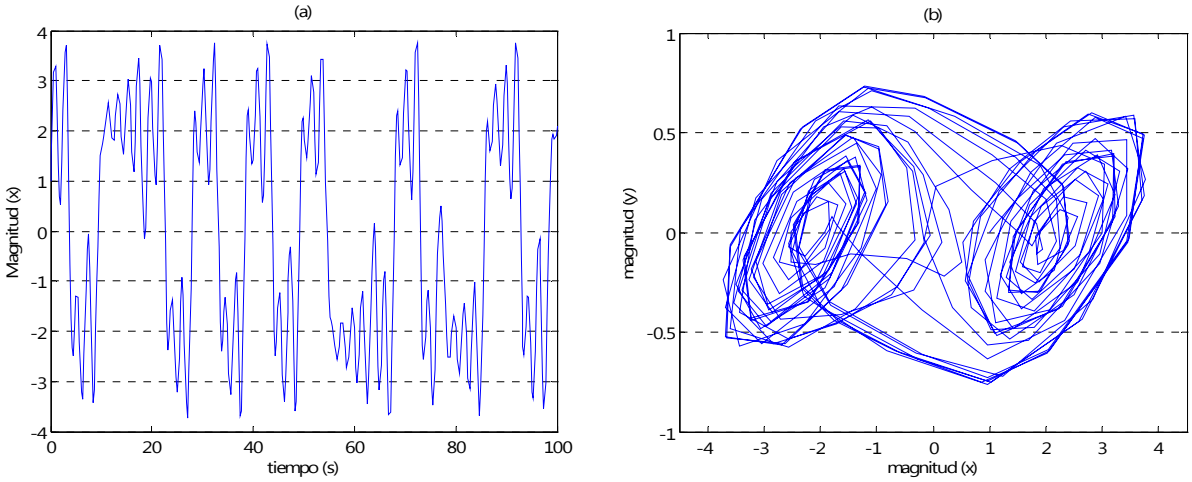

Figura 3.3 a) Comportamiento en el tiempo de la variable x,
b) Atractor extraño con condiciones iniciales (0,0,0).

Para mostrar la dependencia a las condiciones iniciales de los sistemas caóticos, se escoge una condición inicial diferente pero muy cercana a la anterior, la nueva condición inicial es (0.1, 0.1, 0.1) para integrar el sistema el resultado es mostrado en la figura 3.4.

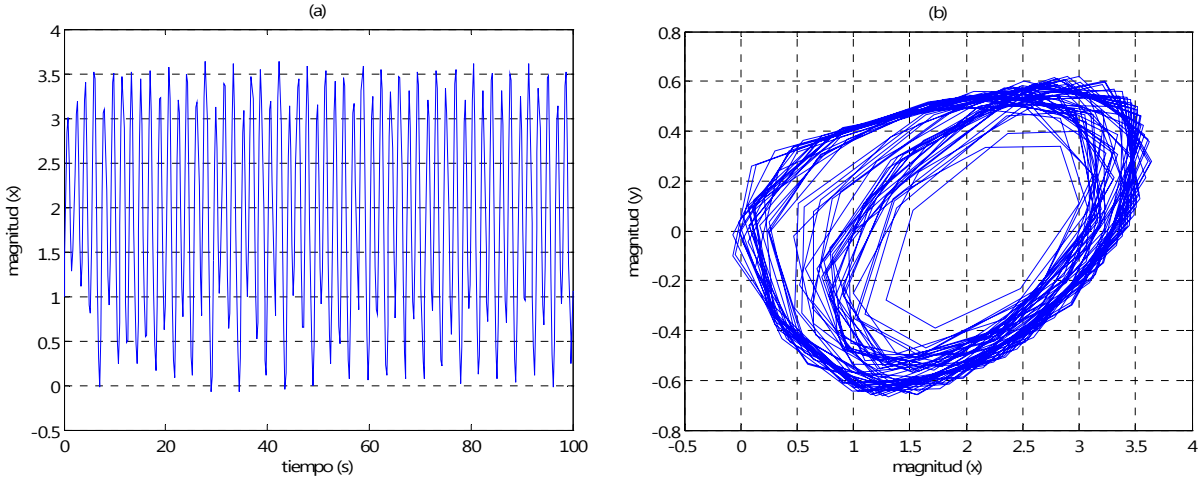

Figura 3.4 a) Comportamiento en el tiempo de la variable x,
b) Atractor extraño con condiciones iniciales (0.1,0.1,0.1).

Las figuras 3.3 y 3.4, describen la característica principal del comportamiento de un sistema caótico y es la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Dados dos diferentes estados iniciales cercanos uno del otro, las trayectorias divergen considerablemente una de la otra.

MODELADO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

CAPÍTULO

4

4.1 INTRODUCCIÓN

La operación de un EAF es caracterizada por rápidos cambios en las potencias absorbidas que ocurren especialmente en las etapas iniciales del periodo de fundición; la naturaleza no lineal y variante en el tiempo de los EAF es la causa de distorsiones en las formas de onda y fluctuaciones de voltaje. Por lo tanto, es necesario construir un modelo práctico del EAF para emplearlo en la simulación de plantas industriales con fines de mejorar la calidad de la energía eléctrica. Históricamente muchos métodos han sido propuestos para representar las características del EAF y estudiar sus impactos en el sistema de potencia, estos incluyen modelos de resistencia no lineal, modelos de fuente de voltaje o corriente, modelos en el dominio de la frecuencia, modelos de balance de energía, modelos basados en redes neuronales o en la teoría de la lógica difusa, etc.

Generalmente, la mayoría de estos modelos tratan solo con algunas propiedades de la carga del EAF, por lo que el uso de ideas únicamente deterministas en el estudio de los EAF, no representan adecuadamente el comportamiento aperiódico del arco en un horno de arco. Recientemente se ha demostrado que las fluctuaciones eléctricas en el EAF son de naturaleza caótica y consecuentemente, la teoría del caos ha llegado a ser un nuevo tópico en el modelado del EAF. Entonces una alternativa para modelar un EAF es incluir caos determinista en la caracterización de las corrientes del arco, ya que la dinámica caótica parece estar más cerca de la naturaleza del fenómeno que técnicas estocásticas usadas en el pasado [1].

Existen dos perspectivas en el estudio de dinámica caótica en EAF. La primera es la detección del problema en la cual el nivel de operación del EAF podría ser determinada desde una serie de mediciones en el tiempo de la carga del EAF, esta perspectiva fue el enfoque de [2]. La

segunda perspectiva, se enfoca en el modelado, trata con la formulación de un modelo que capture adecuadamente la mayor cantidad de dinámicas presentes en la carga del EAF; esta ultima perspectiva es el enfoque de este capitulo.

4.2 MODELADO DEL ARCO ELÉCTRICO

Un arco eléctrico es definido como una descarga de gas entre dos electrodos (ánodo y cátodo) los cuales son conectados a una fuente de voltaje. La descarga del arco es también conocida como plasma y consiste de electrones cargados negativamente e iones de gas positivos. El arco eléctrico es la principal no linealidad en el proceso de un horno de arco, la polaridad de los electrodos de grafito con referencia a la carga metálica tiene un efecto significativo en la estabilidad del arco eléctrico, entonces con una conexión negativa del electrodo de grafito se origina una descarga de gas en forma cilíndrica.

Existen varios modelos deterministas del arco eléctrico disponibles en la literatura, para este trabajo se utilizaron dos modelos de arco eléctrico: Modelo de Cassie y el Modelo de Balance de Energía, debido a que ambos modelos ofrecen la ventaja de que el arco eléctrico altamente no lineal esta en función de una variable de carga, como lo es la corriente eléctrica. Ambos modelos han sido utilizados para propósitos de estudios armónicos, sin embargo la principal desventaja es que no tienen la capacidad de capturar armónicas pares y no ofrecen un buen comportamiento para representar el voltaje flicker. En este trabajo se agrega un componente caótico a estos modelos, por lo que estos modelos se complementan y están disponibles para realizar estudios harmónicos y de voltaje flicker, con las ventajas de capturar armónicas pares e impares y al mismo tiempo representar el fenómeno flicker.

4.2.1 Modelo de Balance de Energía

La ecuación diferencial que representa la dinámica general del modelo de arco eléctrico es basada en el principio de conservación de la energía. La aproximación es fundamentalmente diferente de otros modelos donde el arco eléctrico es representado por alguna relación empírica, es decir, una característica corriente-voltaje. En este modelo dinámico tales relaciones están implícitas para condiciones de estado estable pero no son predefinidas y resultan diferentes para diferentes condiciones, dependiendo de frecuencia y magnitud de la

corriente [1]. La ecuación de balance de energía para el arco eléctrico esta representado por la ecuación (4.1).

$$p_1 + p_2 = p_3 \tag{4.1}$$

Donde:

- **p_1** representa la potencia transmitida en forma de calor al ambiente externo.
- **p_2** representa la potencia la cual incrementa la energía interna en el arco, y la cual por lo tanto afecta su radio.
- **p_3** representa la potencia total desarrollada en el arco y convertida en calor.

En la ecuación (4.2) es asumido que el efecto de enfriamiento, es una función del radio del arco "r" únicamente. Entonces:

$$p_1 = K_1 r^n \tag{4.2}$$

De hecho, el enfriamiento del arco es también una función de la temperatura del arco, esta dependencia es asumida para ser menos significativa y es por lo tanto ignorada para mantener el modelo simple, y el radio del arco aparece como la única variable de estado. Si el entorno cercano al arco es caliente, el enfriamiento del arco podría no depender de su radio del todo, en este caso n=0. Si este no es el caso y el arco es largo, entonces el área de enfriamiento es principalmente su superficie lateral, entonces n=1. Si el arco es corto, entonces el enfriamiento es proporcional a su sección transversal en los electrodos, por lo tanto n=2.

El termino p_2 es proporcional a la derivada de la energía dentro del arco, la cual es proporcional a r^2, tal como lo muestra la ecuación (4.3).

$$p_2 = K_2 r \frac{dr}{dt} \tag{4.3}$$

$$p_3 = vi = \frac{K_3 / r^m}{r^2} i^2 \tag{4.4}$$

En la ecuación (4.4), la resistividad de la columna del arco es asumida para ser inversamente proporcional a r^m, donde m=0…2, para reflejar el hecho de que el arco podría ser mas caliente en el interior, si tiene un radio mas largo. Sustituyendo las ecuaciones (4.2), (4.3), (4.4), en la

ecuación (4.1) resulta la ecuación diferencial (4.5) que define el comportamiento del arco eléctrico.

$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \tag{4.5}$$

En la ecuación (4.5), "r" es el radio del arco y es la variable de estado en lugar de la resistencia o conductancia del arco, como en el caso del modelo de Cassie descrito en la sección 4.2.2, mientras que la conductancia "g" del arco y el voltaje "v" del arco son definidas por las ecuaciones (4.6) y (4.7) respectivamente.

$$g = \frac{r^{m+2}}{K_3} \tag{4.6}$$

$$v = \frac{i}{g} = \frac{k_3}{r^{m+2}} i \tag{4.7}$$

Es posible representar diferentes etapas del proceso del arco eléctrico en un EAF, simplemente modificando los parámetros de m y n en la ecuación (4.5).

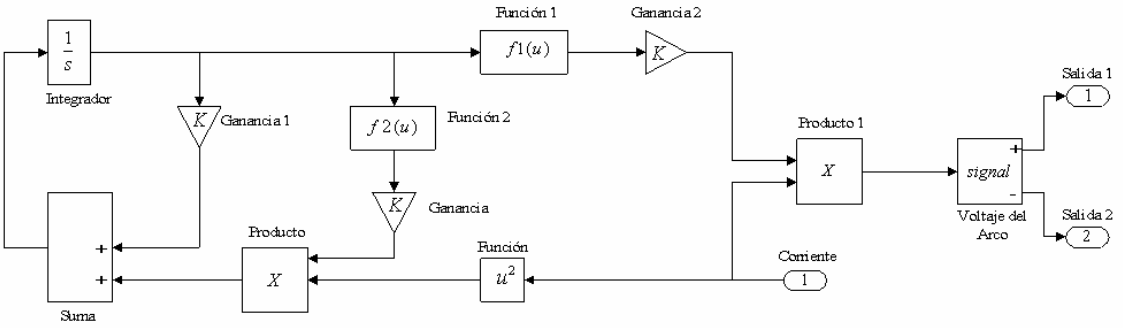

Figura 4.1. Modelo de balance de energía implementado en Simulink

El entorno de simulación Simulink/Matlab, es el software seleccionado para la elaboración del presente trabajo; la figura 4.1 muestra el modelo de balance de energía implementado en Simulink. El diagrama de bloques en la figura 4.1, es utilizado para resolver la ecuación (4.5), donde el bloque "Corriente" representa la única señal de entrada al modelo y que es la corriente del arco. A la salida del bloque "Integrador" se obtiene el radio del arco que es la variable de estado del modelo y posteriormente el bloque llamado "Función1" sustituye la

solución de la ecuación (4.5) en la ecuación (4.7) para que de esta manera la salida del modelo sea el voltaje del arco, por medio de una fuente de voltaje controlada [1].

4.2.2 Modelo de Cassie.

El modelo de Cassie se basan en el concepto básico de la energía almacenada en el arco, Q, asociada con su conductancia eléctrica, G; la conductancia es función de la energía almacenada dado que a un incremento en la energía almacenada corresponde un incremento en su conductancia, entonces conductancia del arco esta dada por la ecuación (4.8):

$$G(Q) = \frac{i}{v} \tag{4.8}$$

Donde **i y v** son la corriente y el voltaje del arco, respectivamente.

La derivada de la conductancia con respecto al tiempo es dada por la ecuación (4.9), donde Pin es la potencia suministrada al arco y Pout es la potencia disipada por el arco.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{dG}{dQ}\frac{dQ}{dt} = \frac{dG}{dQ}\left(P_{in} - P_{out}\right) \tag{4.9}$$

A. M. Cassie asumió el canal de arco como un cilindro con gas altamente ionizado y de temperatura constante, por lo tanto el contenido calórico (energía almacenada) por unidad de volumen permanece constante y de igual forma la conductancia por unidad de volumen. El diámetro del canal del arco varía cuando la corriente varíe. Por lo anterior, se tiene que tanto la conductancia como la energía y la potencia de salida son proporcionales al área de la sección transversal del canal. Las ecuaciones (4.10), (4.11) y (4.12) muestran los valores respectivos por unidad de longitud [6].

$$G = G_0 A \tag{4.10}$$

$$Q = Q_0 A \tag{4.11}$$

$$Pout = P_0 A \tag{4.12}$$

Donde **G, Qo, Po** son la conductancia, energía y potencia disipada, por unidad de volumen.

Entonces se define la potencia de entrada y la potencia disipada en (4.13) y (4.14) respectivamente, donde Vo es el voltaje inicial del arco en estado estable.

$$P_0 = G_0 V_0^2 \tag{4.13}$$

$$P_{in} = GV^2 \tag{4.14}$$

De (4.10) y (4.11) se tiene que:

$$G = G_0 \frac{Q}{Q_0} \tag{4.15}$$

Derivando la ecuación (4.15) con respecto a Q se tiene que:

$$\frac{dG}{dQ} = \frac{G_0}{Q_0} \tag{4.16}$$

De (4.11) y (4.12) se tiene:

$$P_{out} = P_0 \frac{Q}{Q_0} \tag{4.17}$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.16) y (4.17) en (4.9) se tiene que:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0}\left(P_{in} - P_0 \frac{Q}{Q_0} \right) \tag{4.18}$$

Si se sustituye (4.13) y (4.14) en la ecuación (4.18) se tiene que:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G_0}{Q_0}\left(GV^2 - G_0 V_0^2 \frac{Q}{Q_0} \right) \tag{4.19}$$

Volviendo a sustituir (4.13) y (4.15) en la ecuación (4.19) se tiene que:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{P_0}{V_0^2 Q_0}\left(GV^2 - G_0 V_0^2 \right) \tag{4.20}$$

Rescribiendo la ecuación (4.20) se tiene que:

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{V^2}{V_0^2}-1\right) \tag{4.21}$$

La ecuación (4.21) es el modelo de Cassie para representar el arco eléctrico, donde:

- $\tau=\frac{Q_0}{P_0}$ se conoce como la constante de tiempo.
- τ tiene unidades de tiempo que indican cuanto tarda la sección transversal del arco en adaptarse ante una variación en el voltaje del arco.

El modelo de Cassie es aplicable a la simulación del comportamiento del arco a corrientes relativamente altas (del orden de 100 A-100 KA) para las cuales la temperatura del plasma de arco es muy alta (en el orden de 8000° K o más). La ecuación de Cassie (4.21) puede escribirse en función de la corriente de arco que se obtiene despejando la corriente de la ecuación (4.8) y sustituyendo en (4.21) lo cual queda como en la ecuación (4.22):

$$\frac{1}{G}\frac{dG}{dt}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{i^2}{G^2V_0^2}-1\right) \tag{4.22}$$

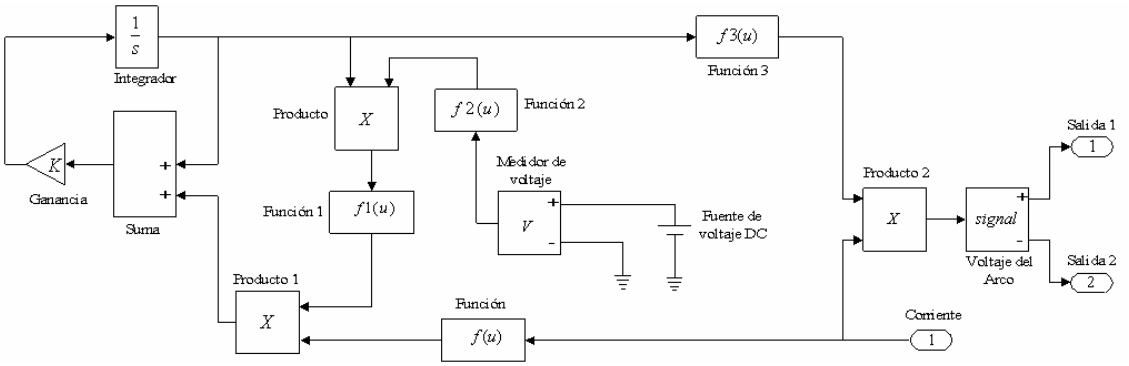

Figura 4.2. Modelo de Cassie implementado en Simulink.

El modelo de Cassie es implementado en Simulink y presentado en la figura 4.2. Este diagrama de bloques resuelve la ecuación (4.22), donde la señal de entrada al modelo es la corriente del arco y se logra por medio del bloque "Corriente"; a la salida del bloque "integrador" se tiene la conductancia del arco, posteriormente el bloque "Función3" permite obtener la resistencia del arco la cual es multiplicada por la señal de entrada en "Producto2",

para que finalmente se obtenga el voltaje del arco eléctrico como una fuente de voltaje controlada.

4.3 MODELADO DEL SISTEMA CAÓTICO

Como punto de partida, un sistema caótico bien conocido fue probado e investigado para modelar las dinámicas del EAF. El sistema caótico usado para el modelo propuesto fue el oscilador de Chua. El circuito de Chua es el circuito autónomo más simple que exhibe un comportamiento caótico y es el único sistema físico para el cual la presencia del caos ha sido comprobada; una propiedad más de este circuito es su habilidad para generar una señal caótica a cualquier frecuencia escalando los valores de los elementos almacenadores de energía. Estas propiedades del circuito de Chua motivaron su uso en la generación de caos en el presente trabajo [19].

4.3.1 Oscilador Chua

El circuito de la figura 4.3, fue presentado por primera vez por Leon Chua y consiste en un oscilador (un condensador C_2 y en paralelo con un inductor L y su resistencia parasita R_0), una resistencia R en serie con el oscilador y un condensador C_1 en paralelo, con un dispositivo piecewise-linear (piezolineal) NR, cuya relación de transferencia (i_R vs v_1) se observa en la figura 4.3, y es llamado diodo Chua [20].

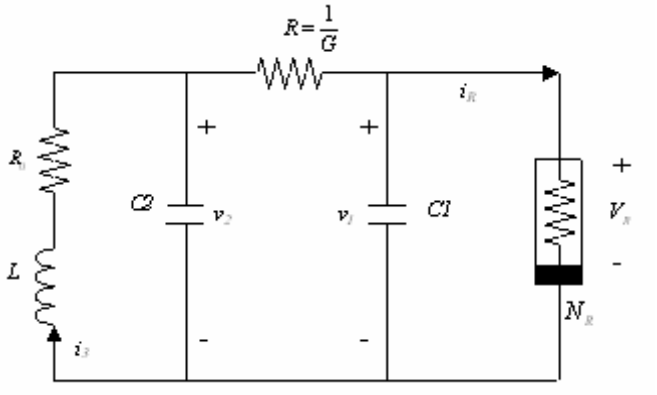

Figura 4.3. Oscilador de Chua.

Aplicando las leyes de Kirchhoff y teniendo en cuenta las variables señaladas en la figura 4.3, obtenemos las variables de estado del oscilador de Chua tal como la muestra la ecuación (4.23).

$$\begin{aligned}\frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{C_1}\left[\frac{v_2 - v_1}{R} - f\left(v_1\right)\right] \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C_2}\left[\frac{v_1 - v_2}{R} + i_3\right] \\ \frac{di_3}{dt} &= \frac{1}{L}\left[-v_2 - R_0 i_3\right]\end{aligned} \qquad (4.23)$$

Donde **f (v_1)** representa la característica piezolineal del elemento N_R y es definida por la ecuación (4.24):

$$f(v_1) = G_b v_1 + \frac{1}{2}\left(G_a - G_b\right)\left[\left|v_1 + E\right| - \left|v_1 - E\right|\right] \qquad (4.24)$$

Donde **Ga y Gb** son las pendientes de la región interior y exterior respectivamente.

El punto de corte del voltaje E puede ser normalizado en la unidad, sin un cambio en el comportamiento cualitativo del circuito. Escogiendo adecuadamente los valores para Ga, Gb y E cualquier característica piezolineal simétrica de tres segmentos puede ser especificada para el diodo Chua.

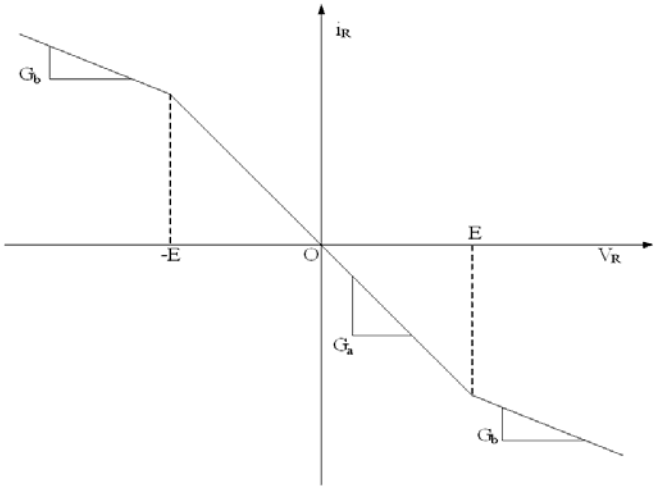

Figura 4.4. Característica piezolineal del elemento N_R en el oscilador de Chua.

Tomando en cuenta que el sistema de variables de estado de la ecuación (4.23) es demasiado rígido, debido a la característica piezolineal y a los valores de los elementos pasivos, además de que nos interesa el comportamiento cualitativo del circuito de Chua, podemos reescalar el tiempo para simplificar los parámetros y obtener el siguiente sistema equivalente adimensional que muestra la ecuación (4.25)

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\tau} &= \alpha\left[y - x - f(x)\right] \\ \frac{dy}{d\tau} &= x - y + z \\ \frac{dz}{d\tau} &= -\beta y - \gamma z \end{aligned} \tag{4.25}$$

Donde la característica piezolineal toma la forma de la ecuación (4.26):

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)\left[\left|x+1\right| - \left|x-1\right|\right] \tag{4.26}$$

Ahora las variables adimensionales se definen como lo en la ecuación (4.27):

$$\begin{aligned} x &= \frac{v_1}{E} \\ y &= \frac{v_2}{E} \\ z &= i_3\left(\frac{R}{E}\right) \end{aligned} \tag{4.27}$$

Y los parámetros son definidos como en las ecuaciones (4.28), (4.29) y (4.30):

$$\alpha = \frac{C_2}{C_1} \qquad \beta = \frac{R^2 C_2}{L} \qquad \gamma = \frac{RR_0 C_2}{L} \tag{4.28}$$

$$a = RG_a \qquad b = RG_b \tag{4.29}$$

$$\tau = \frac{t}{RC_2} \tag{4.30}$$

Por ultimo, el tiempo adimensional definido por (4.30) es negativo si R < 0 o C2 < 0. En ambos casos al hacer la integración, la dinámica de la ecuación adimensional (4.25) es idéntica a la ecuación de estado (4.23).

4.3.1.1 Implementación en Simulink.

El sistema de estados de la ecuación (4.25), es resuelto en Simulink, en la figura 4.5 se presenta el icono y el cuadro de dialogo del bloque llamado "Differential Equation Editor", utilizado para implementar el oscilador Chua. El bloque "DEE", permite escribir las ecuaciones directamente en el cuadro de dialogo, especificar las condiciones iniciales y las salidas del sistema.

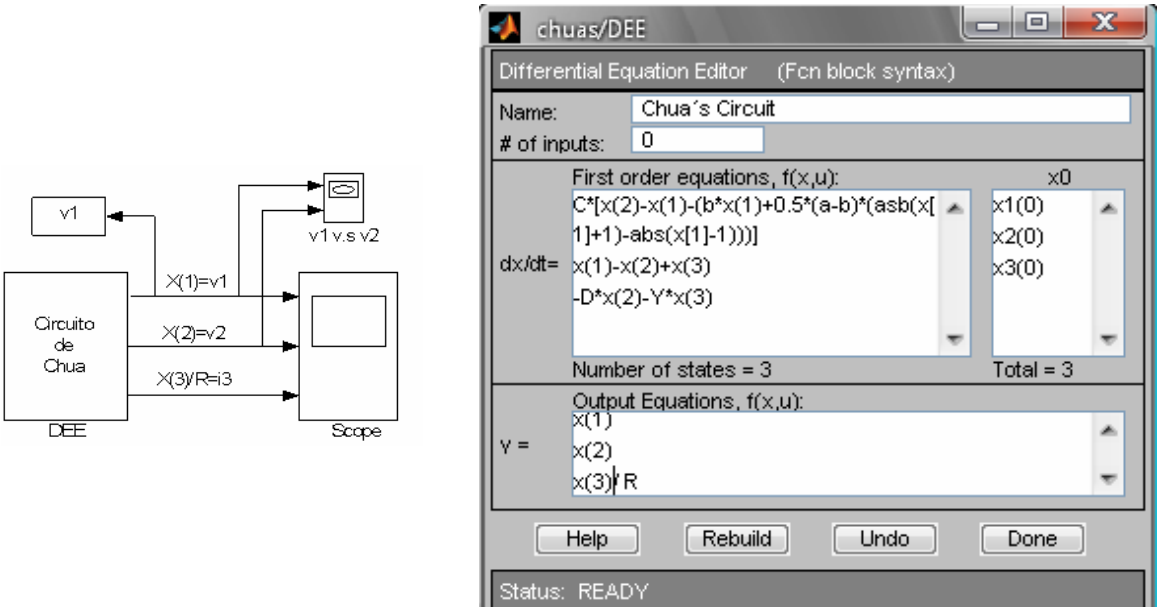

Figura 4.5. Icono y cuadro de dialogo de la implementación del oscilador Chua en Simulink.

4.3.1.2 Escalando el Oscilador de Chua.

El sistema caótico deber ser escalado en magnitud y en frecuencia, para controlar su impacto al contaminar con su comportamiento caótico el modelo del arco eléctrico, de acuerdo con la sección 4.3.1 se definen $x=v_1$, $y=v_2$ y $z=i_3$, donde v_1 es el voltaje del capacitor C_1, v_2 es el voltaje del capacitor C_2, mientras que i_3 es la corriente del inductor L en la figura 4.3.

Para escalar el oscilador en frecuencia y magnitud, partimos con los valores clásicos de los parámetros dados por Chua al presentar el circuito de la figura 4.3, los cuales son: L=12mH, C_2=100nF, C_1=10nF, R_0=12.5Ω y R puede variar en el rango de 0≤ R ≥2000Ω; sustituyendo los valores de los parámetros en las ecuaciones (4.28) y (4.29) se tiene que α=10, β=0.18759, γ=0.001276; y resolviendo la ecuación (4.25) se obtiene el atractor en el espacio de fases *x*-*y*, la variable de estados *x*, así como su espectro de frecuencias en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente [21].

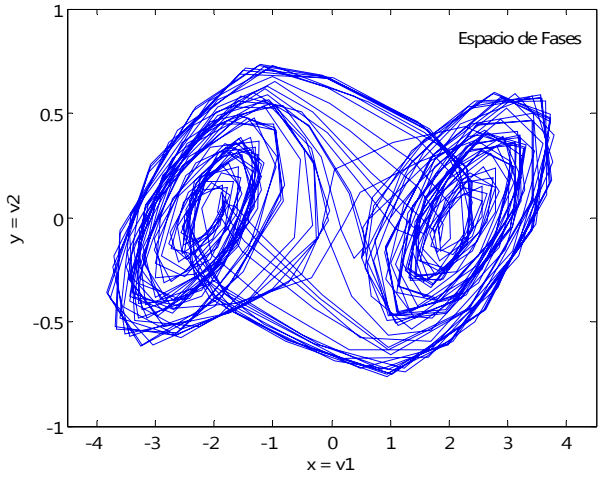

Figura 4.6. Atractor del oscilador de Chua.

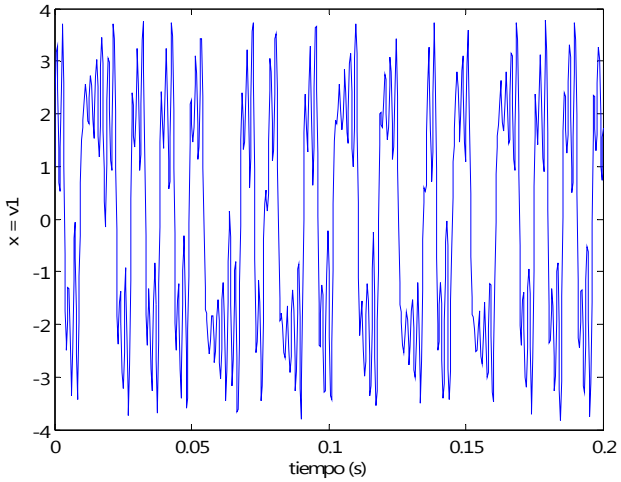

Figura 4.7. Voltaje del capacitor C_1 en el oscilador Chua.

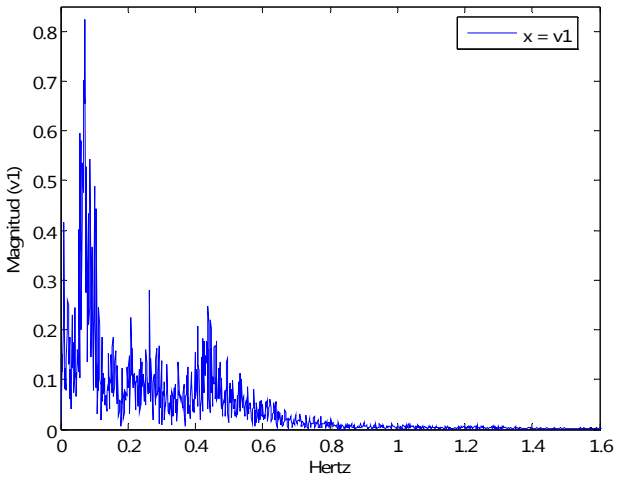

Figura 4.8. Espectro de frecuencia del voltaje en el capacitor C_1, del oscilador de Chua.

La figura 4.7 muestra el comportamiento en el tiempo de la variable *x* que es el voltaje del capacitor C_1 en la figura 4.3, este voltaje v_1 es la señal de entrada que aporta el comportamiento caótico al modelo del arco eléctrico, mientras tanto, la figura 4.8 muestra el rango de frecuencias en el que el voltaje v_1 impactara el modelo del arco eléctrico.

El voltaje v_1 en la figura 4.7, debe tener un valor en magnitud igual a la unidad para que su impacto en el modelo del arco eléctrico sea cualitativo, es decir, con magnitud igual a la unidad, v_1 afectara el voltaje del arco en su comportamiento más no en su magnitud. De forma similar, el sistema caótico tendrá que ser sintonizado a la misma frecuencia en la cual trabaja el modelo del arco eléctrico es decir 60Hz. Por lo tanto, se variaran los parámetros del oscilador Chua hasta obtener los requerimientos de magnitud y frecuencia mencionados con anterioridad.

Finalmente los parámetros escalados del oscilador Chua tienen los siguiente valores: L=3.6H, C_1=200nF, C_2=0.2uF, R_0=12.5Ω y R=1837.56, también se agrego el parámetro η=1080 para sintonizar la frecuencia en 60Hz y variando la magnitud de los elementos eléctricos del oscilador de Chua se controla la magnitud de v_1, con lo que la ecuación (4.25) se convierte en la ecuación (4.31). En la figura 4.9 se aprecia el resultado final de escalar en magnitud y frecuencia el oscilador Chua, así como el atractor que ahora se genera; hecho el procedimiento anterior, es posible agregar el comportamiento caótico del oscilador Chua al modelo del arco eléctrico.

$$\frac{dx}{d\tau} = \eta\alpha\left[y - x - f(x)\right]$$

$$\frac{dy}{d\tau} = \eta(x - y + z) \qquad (4.31)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = \eta(-\beta y - \gamma z)$$

De la figura 4.9, se aprecia en (a) y (b) el comportamiento del voltaje del cacapitor C1 en el oscilador de Chua con magnitud igual a la unidad aproximadamente y un ligero comportamiento caótico, en (c) se observa que el oscilador Chua fue sintonizado a una frecuencia de 60Hz, y en (d) se tiene el atractor caótico del oscilador Chua generado debido a los cambios realizados en los parámetros del oscilador.

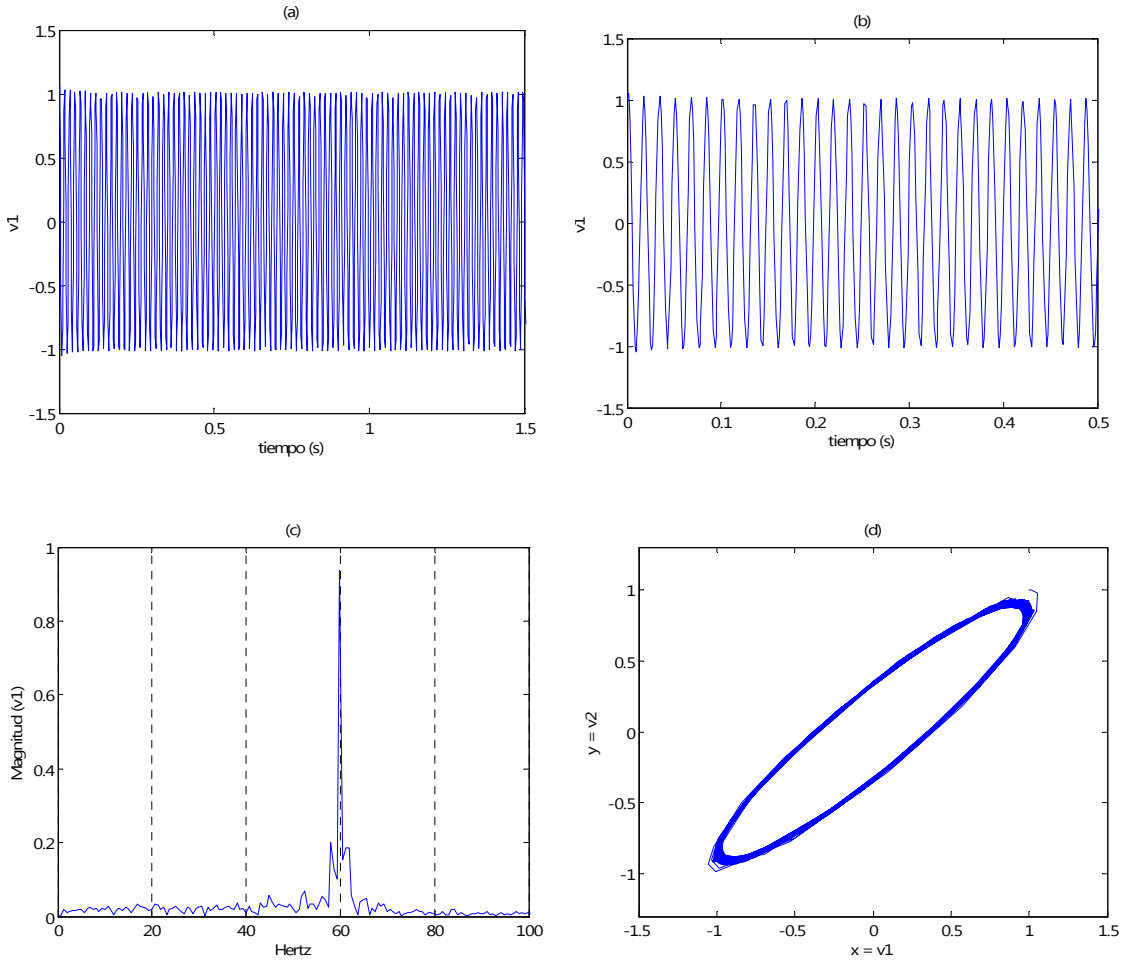

Figura 4.9. a) y b) Voltaje v_1 en el oscilador Chua escalado. c) Espectro de frecuencias del voltaje v_1. d) Atractor caótico del Oscilador Chua escalado.

4.4 INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE CAÓTICO AL MODELO DEL ARCO ELÉCTRICO.

Una vez que se han implementado los modelos del arco eléctrico (modelo de Cassie y modelo de balance de energía), y también se implemento y se escalo el sistema caótico autónomo (Oscilador de Chua), se puede ya incorporar el componente caótico dentro del modelo determinista del arco eléctrico. Entonces, se contara con dos modelos generales del arco eléctrico, cuya implementación se describe en las siguientes secciones y las figuras 4.10 y 4.11, presenta la implementación de los dos modelos del arco eléctrico en Simulink.

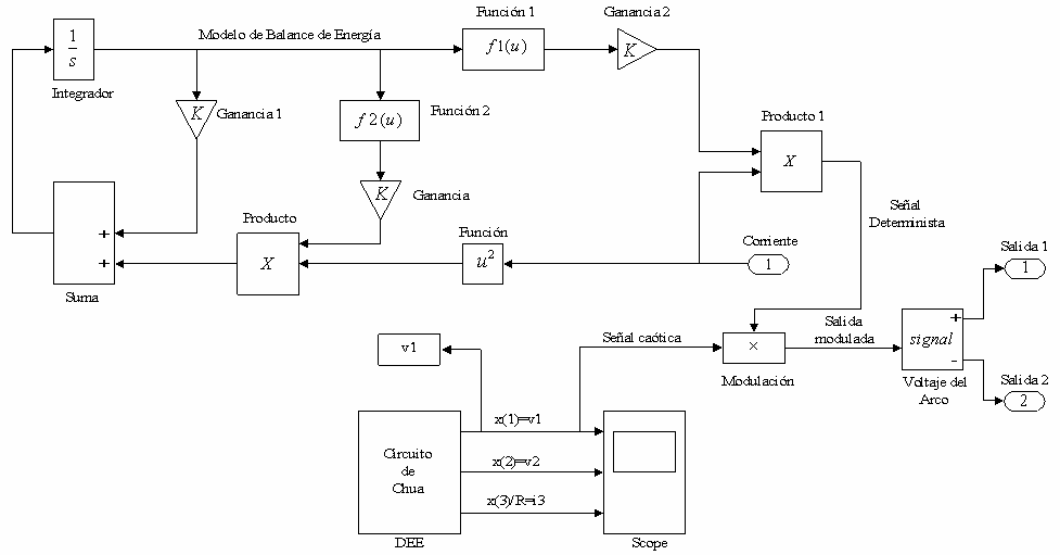

Figura 4.10. Diagrama de bloques del modelo de balance de energía implementado en Simulink.

El modelo de balance de energía es implementado en Simulink, y representado por el diagrama de bloques de la figura 4.10, de donde, en la parte superior se resuelve la ecuación diferencial que representa el modelo del arco eléctrico; mientras que en la parte inferior de la figura y en el icono "DEE" se resuelve el sistema de estados del oscilador Chua, cuya salida (señal caótica) es combinada con la salida del modelo del arco eléctrico (señal determinista) mediante el bloque "modulación", para que finalmente se obtenga el voltaje del arco eléctrico contaminado caóticamente. La misma descripción es valida para la figura 4.11, solo que ahora se trata del modelo de arco eléctrico de Cassie contaminado caóticamente desde el mismo oscilador de Chua.

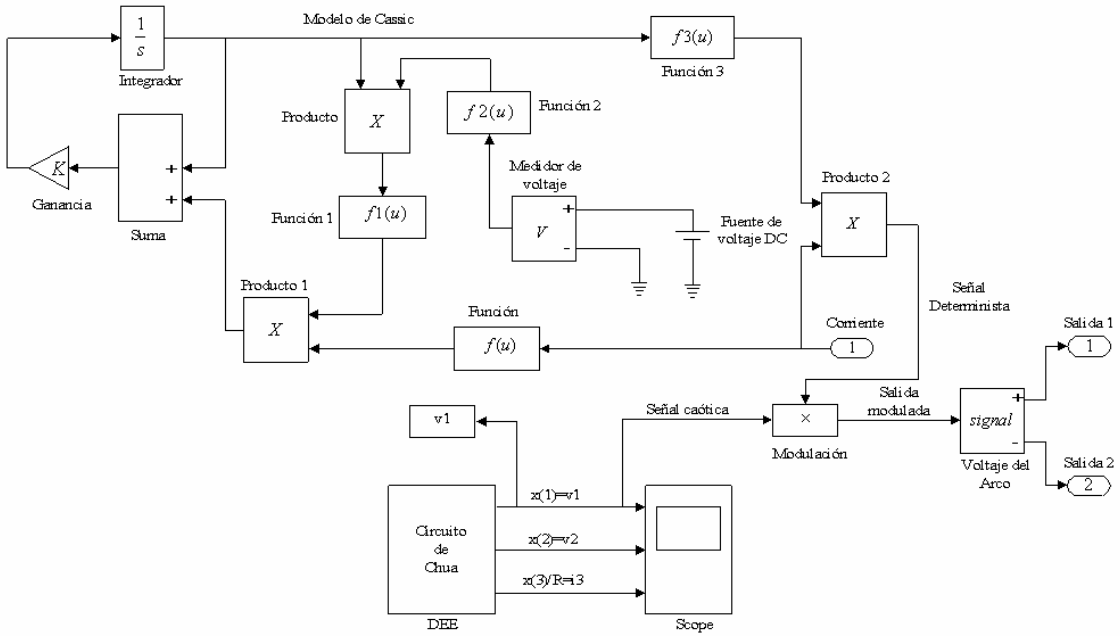

Figura 4.11. Diagrama de bloques del modelo de Cassie en Simulink.

4.5 SIMULACIÓN DEL MODELO DEL EAF

La metodología que se utilizara para analizar los resultados de las simulaciones será la siguiente:

- El sistema eléctrico monofásico de la figura 4.12, es utilizado para las simulaciones tanto de los modelos de arco eléctrico deterministas, como para los modelos generales de arco eléctrico con un componente caótico desde el oscilador de Chua.

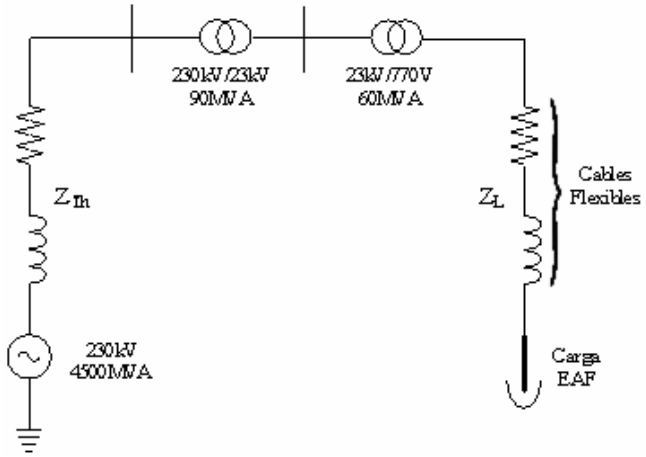

Figura 4.12. Sistema eléctrico utilizado para las simulaciones del presente capítulo.

- Primeramente se comparan los resultados obtenidos de la simulación de los modelos de arco deterministas (sin el componente caótico), con la finalidad de comprobar su correcta implementación de acuerdo con resultados reportados en la literatura sobre el tema y para conocer su comportamiento en forma determinista.

- Posteriormente se analizan y compararan los resultados obtenidos de la simulación de los modelos del arco eléctrico considerando el componente caótico, para determinar diferencias entre los distintos modelos y su validación de acuerdo con resultados reportados en la literatura.

- Los modelos generales del arco eléctrico a considerar serán los siguientes: modelo de balance de energía con aporte caótico desde el oscilador de Chua (MBEC) y modelo de Cassie con aporte caótico desde el oscilador de Chua (MCC); a partir de ahora se hará referencia a dichos modelos con las abreviaciones correspondientes.

4.5.1 Simulación de los modelos deterministas del arco eléctrico.

Para la simulación del modelo de arco eléctrico de Cassie y del modelo de balance de energía se utilizo el sistema eléctrico de la figura 4.12, donde el voltaje de alimentación es en 230kV, entonces un transformador (T1) en la subestación principal reduce la tensión de 230kV a 65kV, para que posteriormente el transformador del horno (T2) suministre la tensión en 770V, la impedancia Zp_L representa la impedancia de los cables flexibles que conectan el secundario del transformador del horno a los electrodos y la impedancia de los propios electrodos.

La finalidad de esta simulación es demostrativa, es decir, conocer el comportamiento de estos modelos sin un componente caótico y conocer que similitudes tienen entre si estos dos modelos. El modelo de Cassie se basa en las características eléctricas del arco, como la conductancia; mientras que el modelo de balance de energía se basa en las características físicas del arco eléctrico.

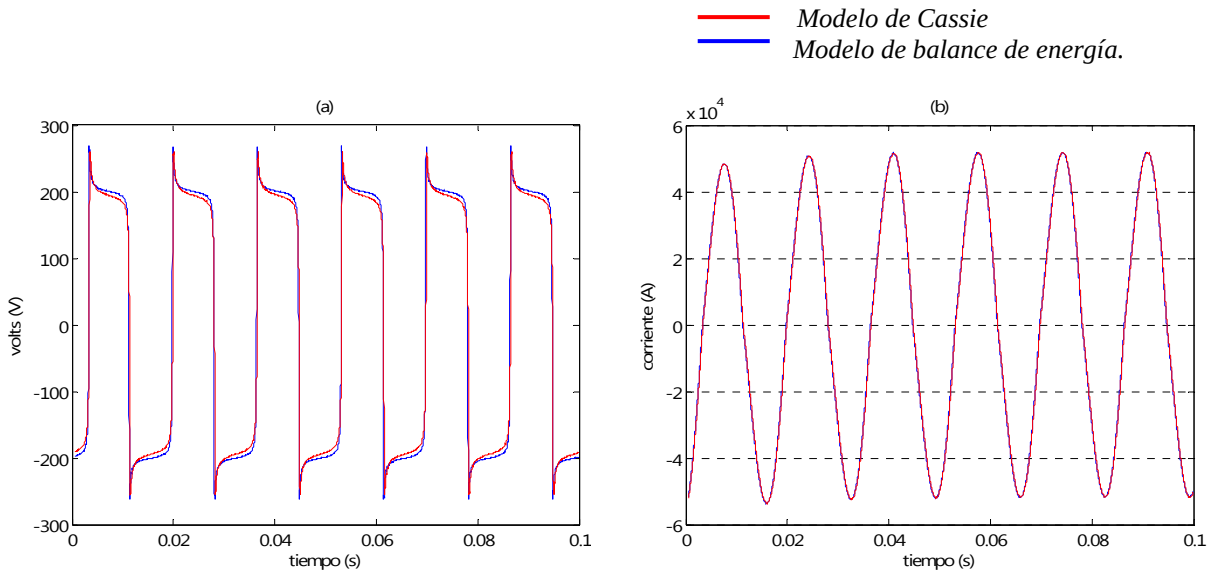

Figura 4.13. a) Voltaje del arco eléctrico, b) Corriente del arco eléctrico.

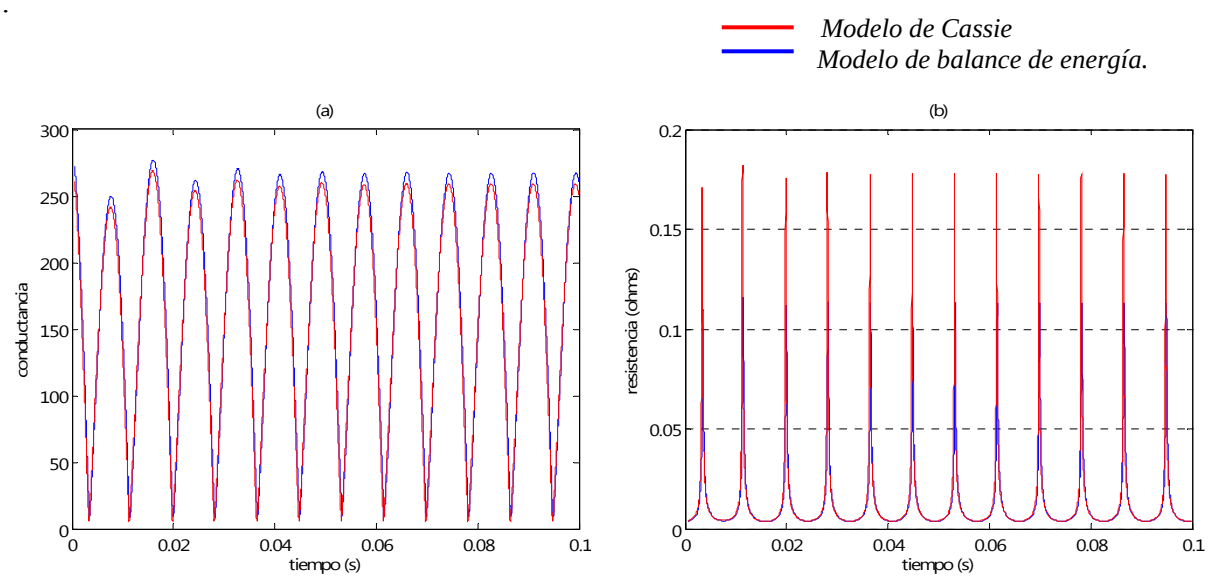

Figura 4.14. a) Conductancia del arco eléctrico. , b) Resistencia del arco eléctrico.

En las figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se presentan los parámetros del arco eléctrico simulado, en todas las graficas mencionadas se presentan tanto los parámetros del modelo de Cassie como los del modelo de balance de energía, con el fin de comparar fácilmente la similitud de los resultados. En la figura 4.13a, se aprecia el comportamiento determinista típico del voltaje del arco eléctrico, que podría llegar a presentarse en la etapa de refinamiento de la chatarra; en

la figura 4.13b, se puede observar que no existe fenómeno flicker y la distorsión armónica es mínima en la corriente del arco eléctrico.

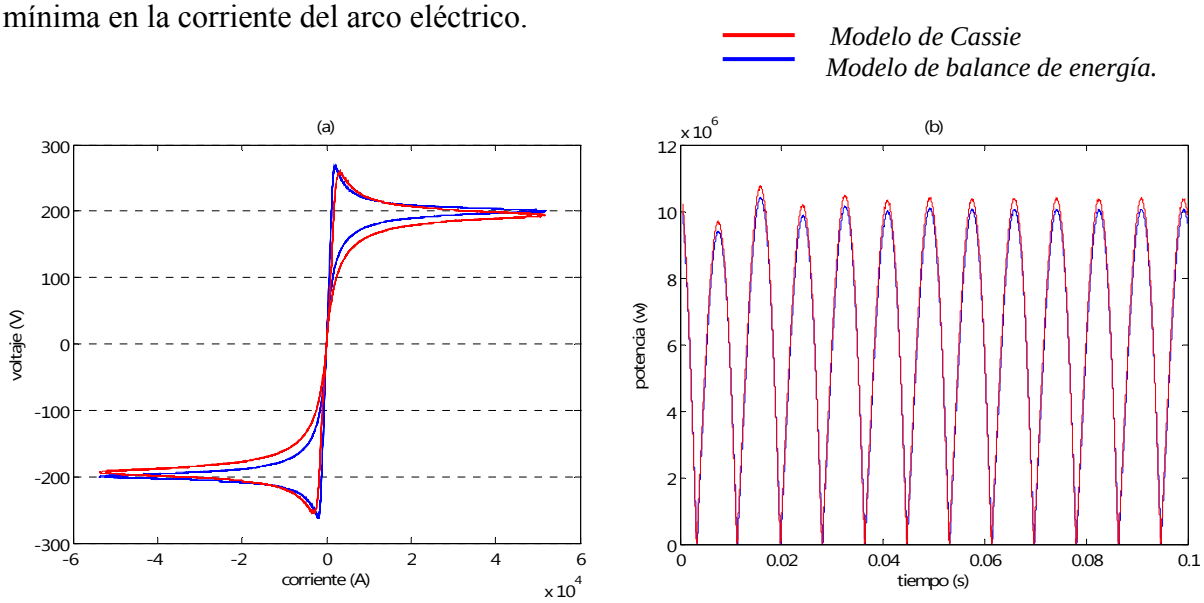

Figura 4.15. a) Característica voltaje vs corriente del arco eléctrico. , b) Potencia activa del arco eléctrico.

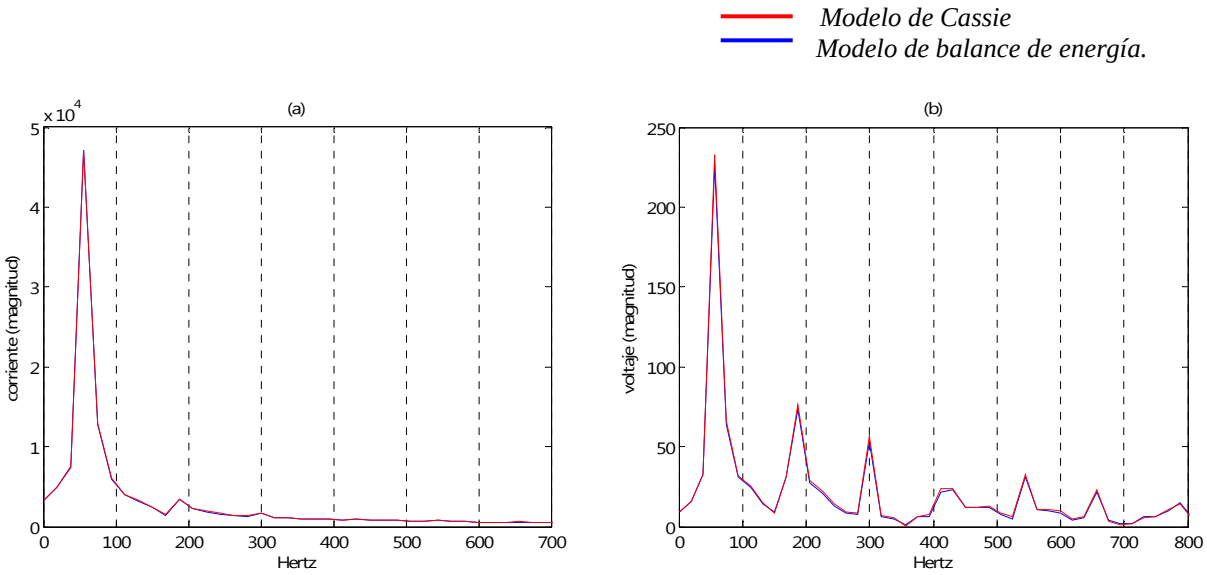

Figura 4.16. a) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico, b) Espectro de frecuencias del voltaje del arco eléctrico.

En la figura 4.15a se presenta la característica voltaje vs corriente del arco eléctrico, base para muchos otros modelos empíricos. Mientras que, la figura 4.15b presenta el consumo de potencia activa del arco eléctrico, que aunque tiene variaciones súbitas en su consumo también tiene un comportamiento determinista.

Por otro lado, la figura 4.16a muestra el espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico, donde se puede apreciar la principal desventaja de estos modelos del arco eléctrico para estudios de corrientes de carga armónicas, que es que no son capaces de capturar armónicas pares las cuales tienen una contribución significativa en la operación real del EAF.

4.5.2 Simulación de los modelos del arco eléctrico con aportación caótica

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones de los modelos generales del arco eléctrico (modelos de Cassie y balance de energía contaminados caóticamente); utilizando la nomenclatura definida en la sección 4.5, los modelos simulados en esta sección son MCC y MBEC, cuyos resultados se presentan y describen a continuación.

4.5.2.1 Modelo de Cassie con aporte caótico desde el oscilador de Chua. (MCC)

En las figuras 4.17, 4.18, 4.19, y 4.20 se muestra el comportamiento de los parámetros simulados desde el MCC, de inmediato se aprecia un comportamiento diferente a los resultados obtenidos en la sección 4.5.1, esto es debido a la incorporación del componente caótico dentro del modelo del arco eléctrico.

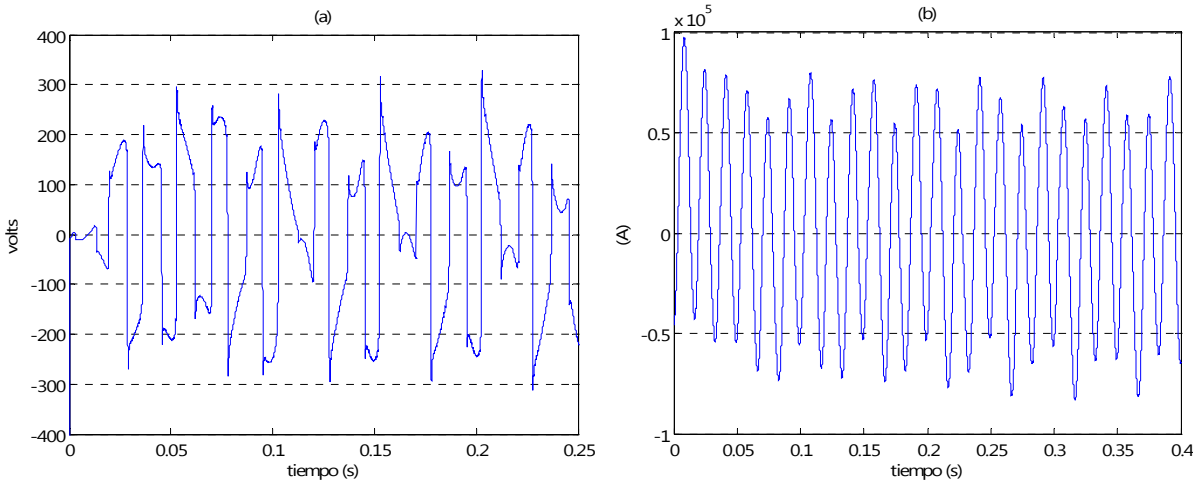

Figura 4.17. a) Comportamiento caótico del voltaje del arco eléctrico. b) Corriente del arco eléctrico en el modelo MCC.

. Por otro lado, en la figura 4.17a se aprecia el comportamiento caótico del voltaje del arco eléctrico, que en teoría se debe al movimiento de los electrodos, que a su vez hace variar el largo del arco eléctrico.

La primera y sustancial ventaja de considerar el comportamiento caótico en el modelado del EAF puede observarse precisamente en la figura 4.17b, donde es evidente la presencia del flicker. La figura 4.17b muestra las fluctuaciones de la corriente eléctrica, que dan origen a un gran consumo de potencia reactiva y por lo tanto a una operación en bajo factor de potencia del EAF.

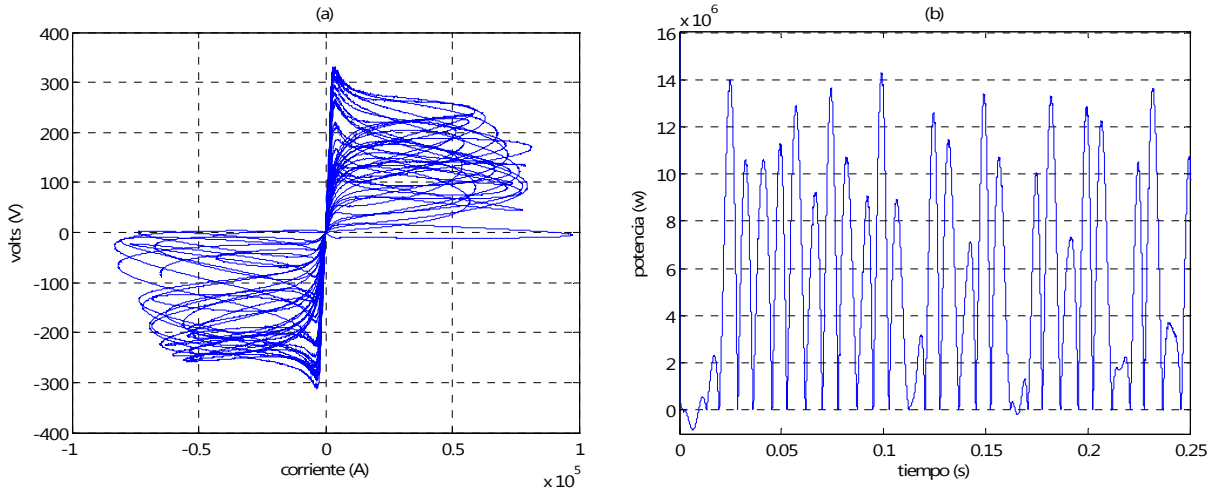

Figura 4.18. a) Característica voltaje vs corriente del modelo MCC,. b) Potencia simulada desde el modelo MCC del arco eléctrico.

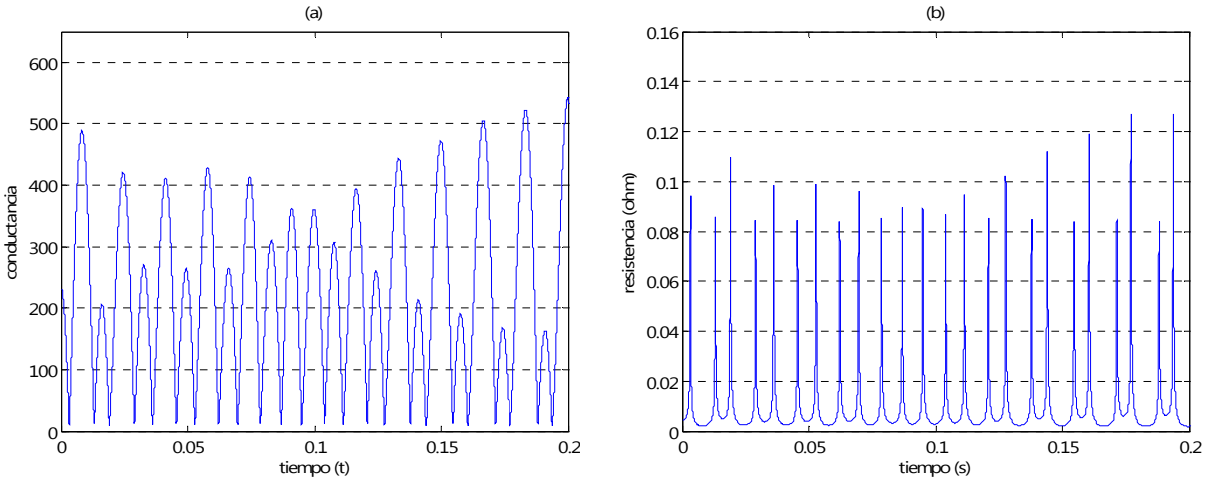

Figura 4.19. a) Conductancia del arco simulada desde el modelo MCC. b) Resistencia del arco eléctrico simulada desde el modelo MCC del arco eléctrico.

La figura 4.20a y 4.20b, permiten apreciar otra de las ventajas principales del modelo MCC y de considerar un componente caótico para modelar la dinámica del EAF. Dicha ventaja, radica en el hecho que este modelo es capaz de capturar armónicas pares tanto en la tensión como en

la corriente del arco eléctrico. Si consideramos que en la mayoría de los casos, en que un EAF esta en operación la segunda armónica tiene una contribución significativa en el espectro de frecuencias ya sea de voltaje o de corriente, este modelo ofrece ya una buena ventaja sobre los modelos deterministas.

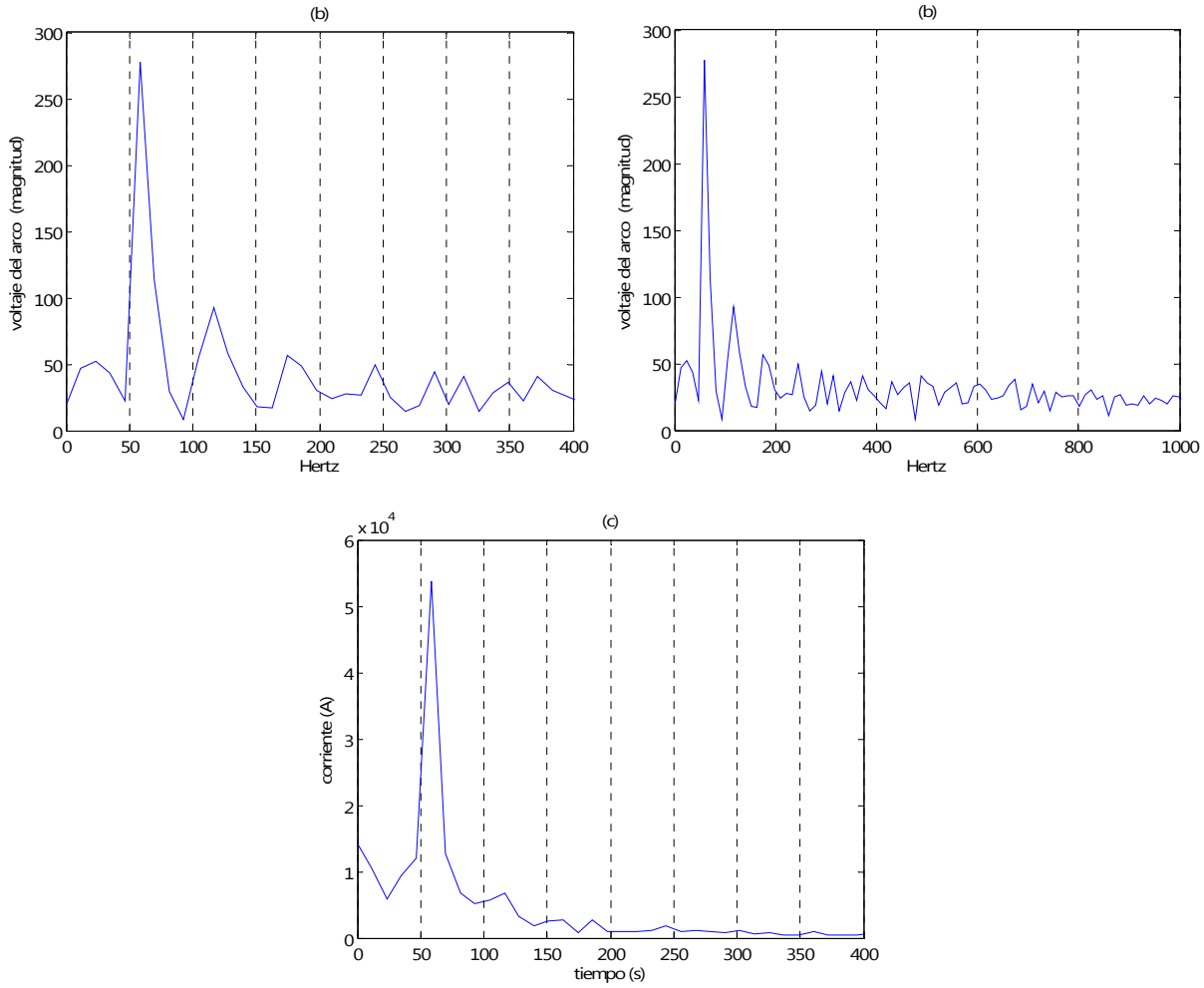

Figura 4.20. a) y b) Espectro de frecuencias del voltaje de arco eléctrico del modelo MCC,. c) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico desde el modelo MCC.

4.5.2.2 Modelo de balance de energía con aporte caótico desde el oscilador de Chua. (MBEC).

Si comparamos los resultados de las simulaciones del modelo MCC (sección 4.6.2.1) con los resultados referentes al modelo MBEC, encontramos algunas diferencias significativas. La primara de ellas se observa en las figuras 4.17a y 4.21a, donde los picos debido a la oscilación

del voltaje del arco eléctrico son ligeramente mas pronunciados en el modelo MBEC y obviamente las fluctuaciones en la corriente son del mismo modo ligeramente mayores. Esto llama la atención, ya que en la sección 4.5.1 se comprobó que los modelos deterministas tienen prácticamente un comportamiento idéntico, por lo tanto se esperaría que al contaminarlos con la misma señal caótica presentaran un comportamiento prácticamente similar, sin embargo no es así y existen algunas diferencias entre ambos modelos.

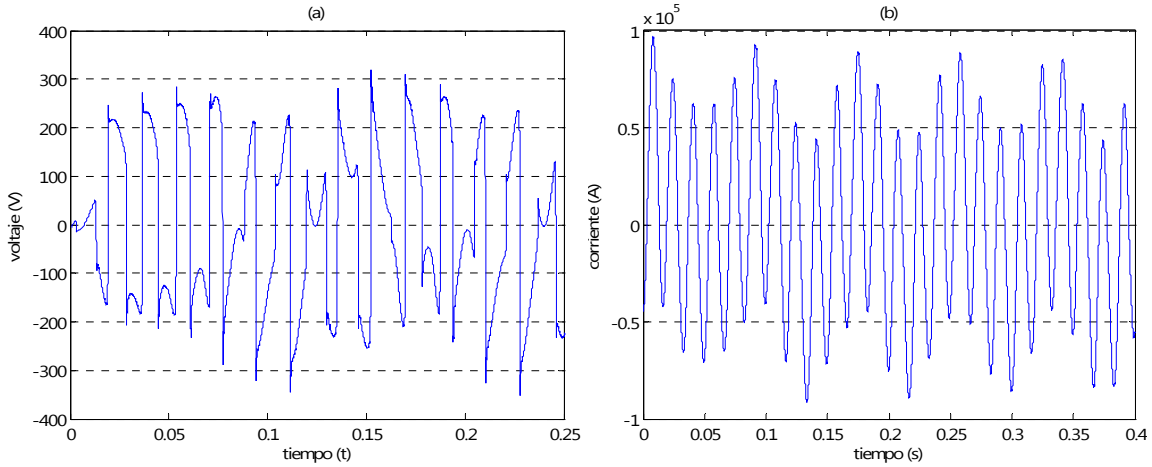

Figura 4.21. a) Comportamiento caótico del voltaje del arco eléctrico desde el modelo MBEC. b) Corriente del arco eléctrico en el modelo MBEC.

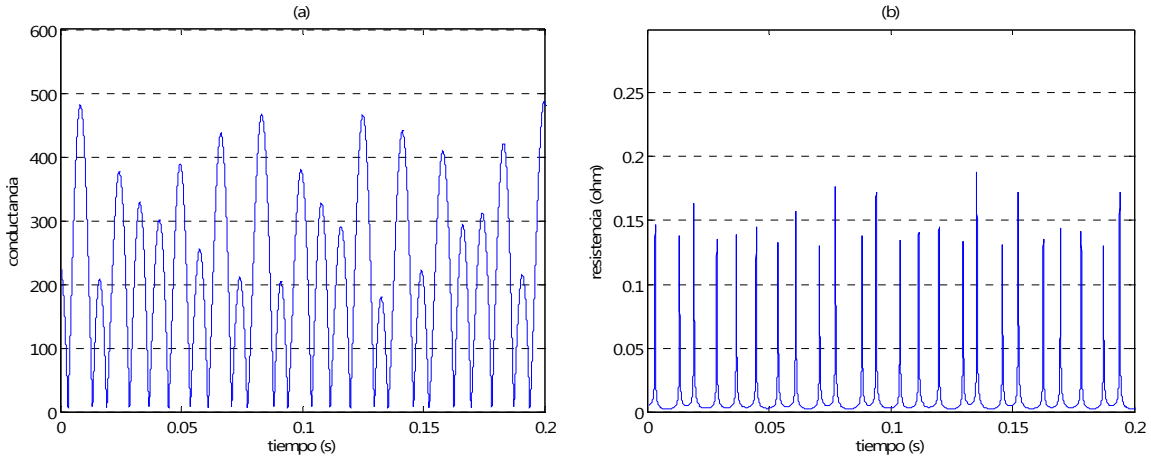

Figura 4.22. a) Conductancia del arco simulada desde el modelo MBEC,. b) Resistencia del arco eléctrico simulada desde el modelo MBEC del arco eléctrico

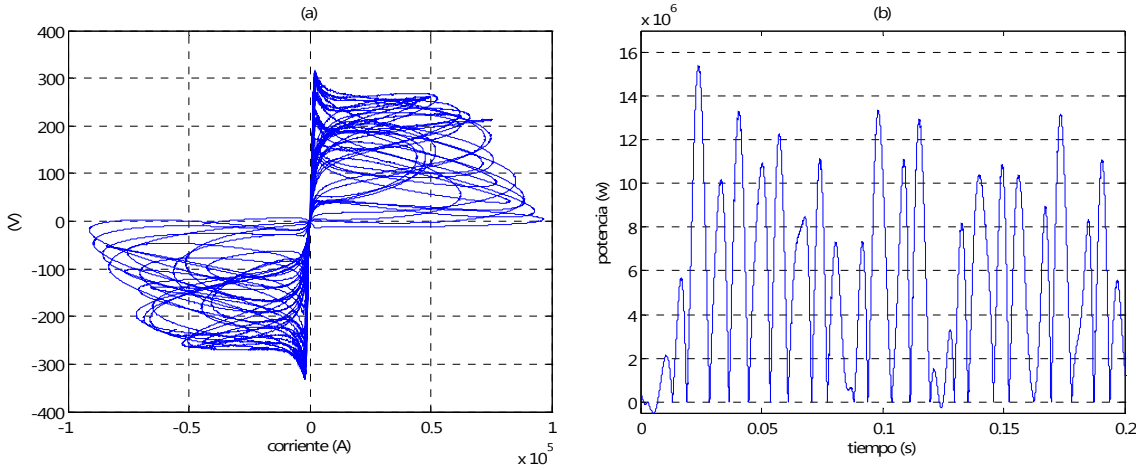

Figura 4.23. a) Característica voltaje vs corriente simulada desde el modelo MBEC,. b) Potencia simulada desde el modelo MBEC del arco eléctrico.

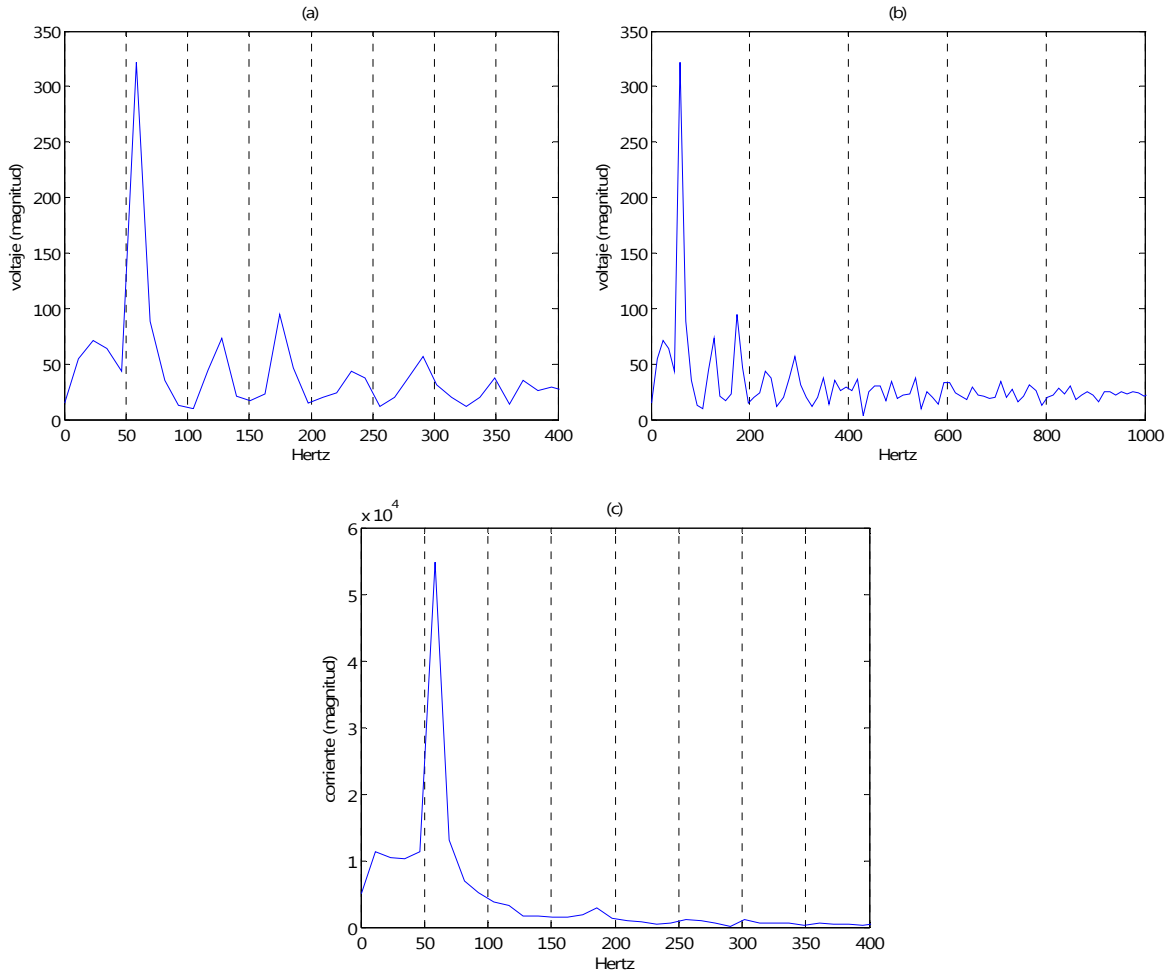

Figura 4.24. a) y b) Espectro de frecuencias del voltaje de arco eléctrico del modelo MBEC,. c) Espectro de frecuencias de la corriente del arco eléctrico desde el modelo MBEC.

Otra diferencia importante entre el modelo MCC y MBEC radica en el hecho de que existe una diferencia en cuanto al impacto que tiene la segunda armónica en el espectro de frecuencias tanto en tensión como en corriente, esto se observa en las figuras 4.20a, 4.20b y 4.20c comparadas con las figuras 4.24a, 4.24b y 4.24c.

Haciendo la medición del voltaje flicker en el primario del transformador del EAF, con el Flickermeter (medidor de flicker) cuya implementación se especifica en el apéndice B, y la única entrada al Flickermeter es el voltaje del cual se desea conocer su índice de severidad de corta duración Pst. En la tabla 4.1 se muestran los valores medidos por el Flickermeter durante las simulaciones.

Tabla 4.1. Índice de severidad Pst, producido por cada modelo simulado.

Modelo	Pst
Modelo de balance de energía determinista.	0.23
Modelo de Cassie determinista.	0.15
Modelo de balance de energía con aportación caótica desde el oscilador de Chua.	1.53
Modelo de Cassie con aportación caótica desde el oscilador de Chua.	1.35
Valores típicos, para EAF con alimentación entre 600-800 volts.	1.3 – 1.7

De la tabla 4.1 se pude establecer que los modelos deterministas no representan de manera adecuada el fenómeno flicker producido por la operación del EAF, mientras que los modelos con un comportamiento caótico son más fieles a este fenómeno, esto se puede afirmar en base a que existe un rango típico del índice Pst en la literatura sobre el tema, durante la operación del EAF el rango del índice Pst se establece entre 1.2 y 1.6 sin compensación [13].

Es difícil compara los resultados obtenidos con mediciones reales, debido a que no toda la información esta disponible en la mayoría de los casos, además de que es difícil reproducir las condiciones exactas en que determinadas mediciones se hayan realizado. Sin embargo, es posible comparar el comportamiento en el tiempo de los parámetros del arco eléctrico con comportamientos típicos reportados en la literatura sobre el tema. Por esta razón se ha incluido

el apéndice A, en el cual se presentan graficas de comportamientos típicos de los parámetros del arco eléctrico reportados en [22].

Finalmente se propone el modelo MCC (Cassie-Chua), como un modelo mejorado e innovador para representar la dinámica del EAF, de acuerdo con las simulaciones realizadas en este capítulo, el modelo MCC es el que mejor comportamiento presenta y más fielmente representa la variación de los parámetros del EAF; por lo tanto, es un modelo que puede representar de manera adecuada el contenido armónico y el voltaje flicker debido a la operación del EAF. El modelo MEBC presenta también una buena aproximación del comportamiento de los parámetros del EAF, sin embargo la principal desventaja de este modelo es que es necesario conocer variables físicas del arco eléctrico como por ejemplo el largo del arco. Mientras que los modelos deterministas distan mucho de representar el comportamiento de los parámetros del EAF. También se concluye que, la teoría del caos y específicamente el oscilador de Chua no son únicamente conceptos teóricos y matemáticos, sino que son conceptos que pueden implementarse en la realidad y ofrecer posibles soluciones a diversos problemas de ingeniería.

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PROPUESTO CASSIE-CHUA EN UNA RED ELÉCTRICA

CAPÍTULO

5

5.1 INTRODUCCIÓN

En el capitulo anterior, se propuso un modelo del EAF que se ha llamado modelo Cassie-Chua. Fue probado en el circuito monofásico experimental de la figura 4.12, cuya implementación y resultados son reportados en [10] y se presentan en el apéndice A. En el presente capítulo el modelo propuesto se implementa en una planta acerera con datos reales, cuya red eléctrica se presenta en la figura 5.1. El objetivo de este capitulo es resaltar la gran diferencia que existe entre un modelado determinista del EAF (Modelo de Cassie) y otro en el que se considera el comportamiento caótico y aleatorio del EAF (Modelo Cassie-Chua), eso se logra al comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con mediciones reales hechas en la red eléctrica de la figura 5.1, misma que se emplea para realizar las simulaciones, dichas mediciones fueron una aportación al presente trabajo hecho por [23].

En cuanto a la comparación que se hace entre las simulaciones y los datos medidos reales, se compara la THD en la tensión, debido a que son las mediciones reales que se conocen, además de que el modelo del EAF que se propone en este trabajo es para estudios de calidad de la energía específicamente armónicas y voltaje flicker. También se considera, que el modelo de Cassie determinista solo representa armónicas y no voltaje flicker, por lo tanto, tampoco es posible comparar la magnitud de este disturbio, que sin embargo esta presente debido a la operación del EAF.

5.2 SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO.

En la red eléctrica de la figura 5.1, la alimentación en la acometida es en 230 kV, el transformador 1 en la subestación principal reduce la tensión a 23 kV; el transformador 2 alimenta diferentes cargas en la planta como servicios propios y procesos secundarios en la producción del acero en una tención de 440V. El transformador 3 es el transformador del EAF, que alimenta a los electrodos a una tención de 728V; el resto de los datos de la red eléctrica se presentan en la tabla 5.1 y 5.2 respectivamente.

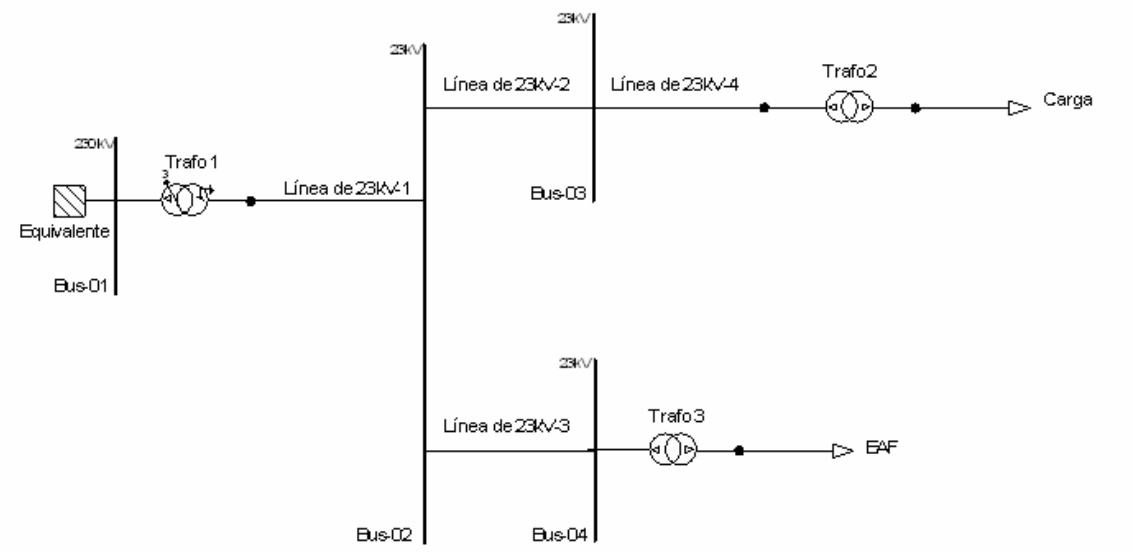

Figura 5.1. Red eléctrica de una planta acerera.

El modelo de carga del EAF es implementado en la red de la figura 5.1 e identificado con la leyenda “EAF”, en las siguientes secciones se analizara su comportamiento y su interacción con el resto de la red eléctrica; todas las simulaciones se hacen en el entorno de simulación Matlab/Simulink.

Tabla 5.1. Datos de líneas de distribución

Línea	R(+) (Ohms)	X(+) (Ohms)	R(0) (Ohms)	X(0) (Ohms)	Longitud (m)
Línea de 23kV-1	0.0013	0.003	0.0026	0.0069	50
Línea de 23kV-2	0.3852	0.2498	0.5368	1.293	910
Línea de 23kV-3	0.0834	0.2392	0.2768	1.7333	800
Línea de 23kV-4	0.00906	0.01542	0.01811	0.03084	100

Tabla 5.2. Datos de transformadores

Trafo	Potencia Nominal (MVA)	Tensión Nominal		Potencia de c.c (MVA)	Relación X/R
		HV (kV)	LV (kV)		
1	70	230	23	50	30
2	10	23	0.44	3.5	10
3	50	23	0.728	50	30

5.2.1 Simulación del modelo determinista de Cassie.

La tabla 5.3, muestra los valores de la THD tanto en tensión como en corriente en los diferentes buses de la red de la figura 5.1, también muestra los limites establecidos por la norma IEEE Std.-519, así como los valores del índice de corta duración del voltaje flicker (Pst); en esta simulación se ha representado el comportamiento del EAF, con el modelo de Cassie determinista.

Tabla 5.3. Valores de tensión, THD y flicker en cada bus; para el modelo Cassie.

	THD voltaje	THD voltaje	THD corriente	THD corriente	Flicker	Flicker
Tablero	calculado	recomendado	calculado	recomendado	claculado	Recomendado
	%	%	%	%	Pst	Pst
Acometida 230 kV Bus-01	0.96	1.50	0.10	2.75	0.0	1
Tablero General Bus-02	**3.20**	**5.00**	**0.89**	**8.00**	0.0	1
Tablero Carga General Bus-03	**3.24**	**5.00**	**1.12**	**8.00**	0.1	1
Tablero del EAF Bus-04	**6.64**	**5.00**	**1.45**	**8.00**	0.3	1

Las figuras 5.2 y 5.3, muestran gráficamente el contenido de la tabla 5.3. En esta sección se puede comprobar algunos conceptos respecto del modelo de Cassie, primero que no es capaz de capturar amónicas impares lo que hace variar considerablemente la THD tanto en tensión como en corriente, por lo tanto si se emplea este modelo sin hacer la consideración anterior, nunca se violarían los limites de distorsión armónica. Además, no considera el fenómeno flicker en el comportamiento del EAF, es decir, el modelo de Cassie supone que no existen

fluctuaciones de voltaje y/o corriente, por lo anterior se puede concluir que el modelo de Cassie determinista no representa de manera fiel la dinámica aleatoria del EAF.

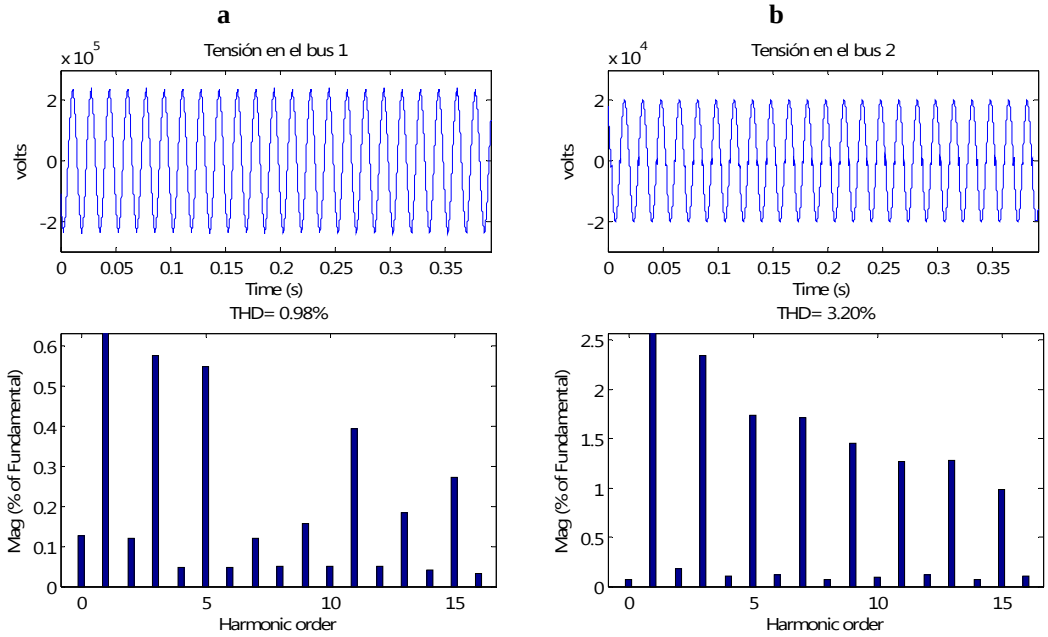

Figura 5.2. a) Onda de tensión en el bus 1 y su espectro armónico.

b) Onda de tensión en el bus 2 y su espectro armónico.

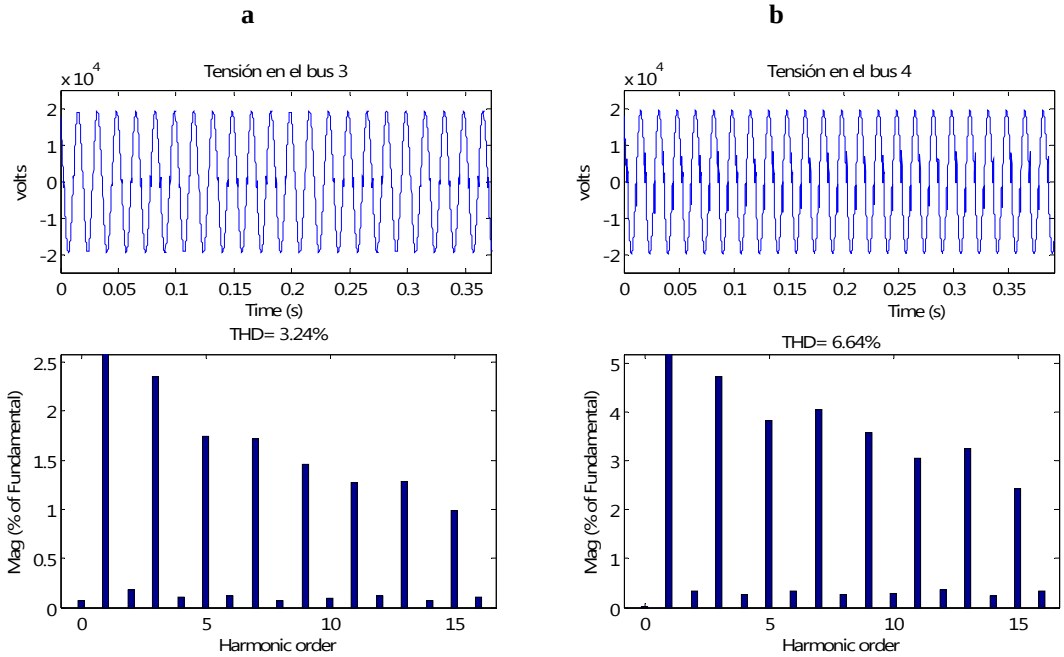

Figura 5.3. a) Onda de tensión en el bus 3 y su espectro armónico.

b) Onda de tensión en el bus 4 y su espectro armónico.

5.2.2 Simulación del modelo propuesto Cassie-Chua.

La tabla 5.4, muestra los valores de la THD tanto en tensión como en corriente en los diferentes buses de la red de la figura 5.1, cuando se representa el comportamiento del EAF por medio del modelo propuesto Cassie-Chua, también muestra los limites establecidos por la norma IEEE Std.-519, así como los valores del índice de corta duración del voltaje flicker (Pst).

Tabla 5.4. Valores de tensión, THD y flicker en cada bus; para el modelo Cassie.

	THD voltaje	THD voltaje	THD corriente	THD corriente	Flicker	Flicker
Tablero	**calculado**	**recomendado**	**calculado**	**recomendado**	**claculado**	**Recomendado**
	%	**%**	**%**	**%**	**Pst**	**Pst**
Acometida 230 kV Bus-01	0.51	1.50	0.20	2.75	0.21	1
Tablero General Bus-02	**7.11**	**5.00**	**2.17**	**8.00**	0.65	1
Tablero Carga General Bus-03	**8.37**	**5.00**	**4.14**	**8.00**	1.13	1
Tablero del EAF Bus-04	**11.29**	**5.00**	**5.16**	**8.00**	1.43	1

En la tabla 5.4 se observa que la que interacción del modelo Cassie-Chua con el resto de la red eléctrica es congruente; es obvio que en los buses cercanos a la carga no lineal del EAF existirá mayor THD y el indice de voltaje flicker de corta duración Pst también será mayor en los buses cercanos a la carga no lineal; en cuanto al voltaje ocurre lo mismo, existirá mayor caída de voltaje cuanto mas cerca se mida la tensión de la carga del EAF. Se puede observar que ocurre todo lo contrario, cuando la medición se realiza más cerca de la acometida debido a que la red es mucho más robusta en el punto común de acoplamiento.

Las figuras 5.4 y 5.5, muestran el espectro armónico de la tensión en cada bus empleando el modelo propuesto Cassie-Chua para representar el comportamiento aleatorio del EAF. Este modelo propuesto en el presente trabajo, si considera las fluctuaciones de voltaje y/o corriente, que se reflejan en la presencia de voltaje flciker, medido con el “flickermeter” implementado también en este trabajo y que se detalla en el apéndice B. Como se menciono anteriormente, el comportamiento de este disturbio en este trabajo solo fue posible compararlo con datos reportados en la literatura como se hizo en la sección 4.5.2.2, ya que en la mayoría de los casos no es objeto de mediciones reales en plantas industriales con presencia de un EAF.

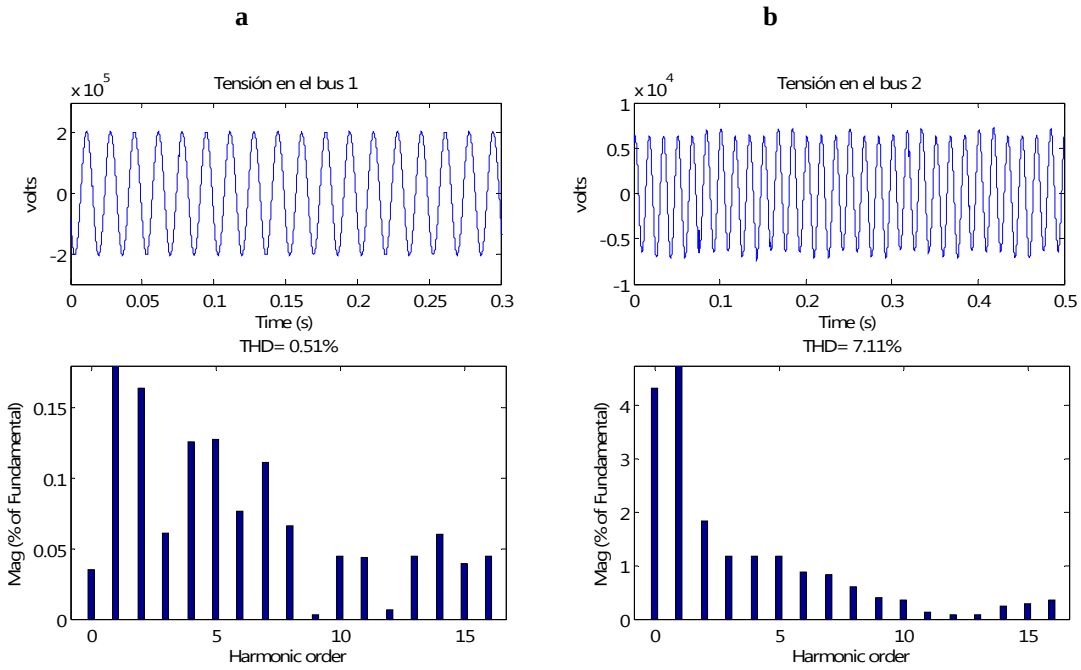

Figura 5.4. a) Onda de tensión en el bus 1 y su espectro armónico.

b) Onda de tensión en el bus 2 y su espectro armónico, empleando el modelo propuesto.

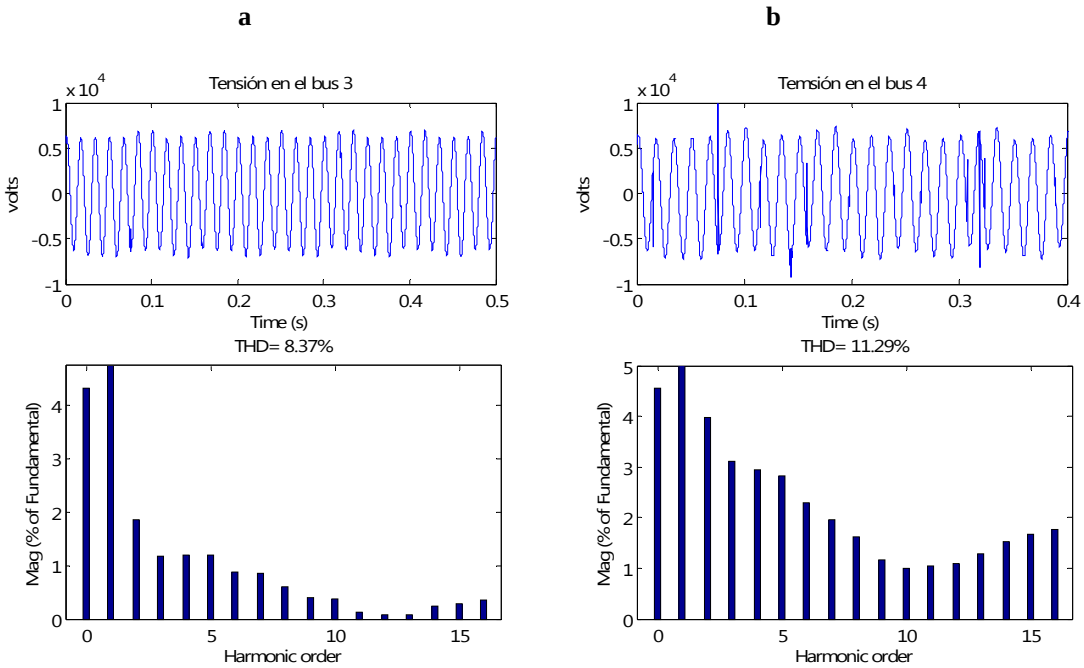

Figura 5.5. a) Onda de tensión en el bus 3 y su espectro armónico.

b) Onda de tensión en el bus 4 y su espectro armónico, empleando el modelo propuesto.

La figura 5.6 y 5.7, muestran el voltaje y la corriente del arco eléctrico respectivamente y estos son cualitativamente diferentes a los mostrados en la sección 4.5.2.1, obviamente esto es debido a la magnitud del voltaje de alimentación de los electrodos y debido ala interacción del modelo dinámico del arco eléctrico con la impedancia de la red eléctrica.

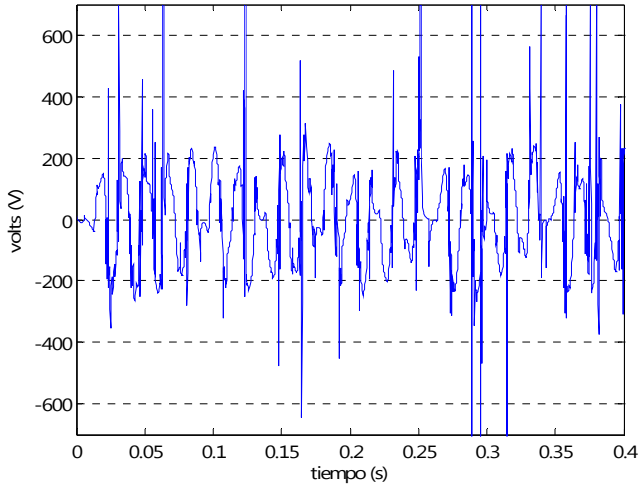

Figura 5.6. Onda de tensión del arco eléctrico desde el modelo Cassie-Chua.

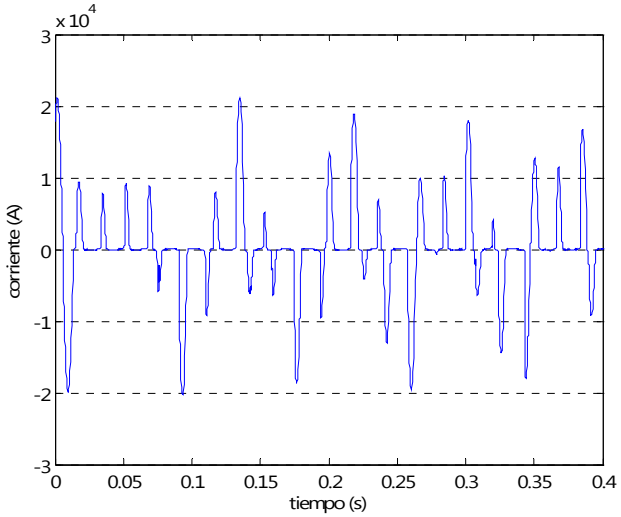

Figura 5.7. Onda de corriente del arco eléctrico desde el modelo Cassie-Chua.

5.2.3 Comparación de simulaciones contra mediciones.

La tabla 5.5 presenta la comparación entre el modelo propuesto Cassie-Chua, el modelo Cassie determinista y mediciones reales, en lo concerniente a la THD de la tensión en los diferentes buses de la red eléctrica de la figura 5.1. Se puede observar que las mediciones reales exceden el límite de THD establecido por la IEEE Std.-519 en casi todos los buses, lo que es una situación normal en una planta acerera. La THD de la tensión desde el modelo de Cassie determinista permanece lejos de las mediciones reales, como ya se menciono anteriormente, esto es debido a que este modelo solo captura armónicas impares ignorando la contribución debida alas armónicas pares, que es bastante significativa.

Tabla 5.5. Comparación de simulaciones del modelo Cassie-Chua, Cassie determinista y mediciones reales.

	THD voltaje	THD voltaje	THD voltaje	THD voltaje
Tablero	Cassie-Chua	Cassie	Mediciones	recomendado
	%	%	%	%
Acometida 230 kV Bus-01	0.51	0.96	1.08	1.50
Tablero General Bus-02	**7.11**	**3.20**	**10.01**	**5.00**
Tablero Carga General Bus-03	**8.37**	**3.24**	**10.44**	**5.00**
Tablero del EAF Bus-04	**11.29**	**6.64**	**11.71**	**5.00**

Mientras tanto, el modelo que se propone en este trabajo, el modelo de Cassie-Chua se aproxima considerablemente a las mediciones reales, ya que este modelo captura todas las armónicas presentes debido al comportamiento del EAF.

En la sección 4.5 se simula y analiza el comportamiento de los diferentes parámetros del arco eléctrico representado con el modelo propuesto Cassie-Chua, tales parámetros son resistencia, conductancia, corriente, voltaje, la característica v-i, potencia, espectros armónicos en tensión y corriente; y el comportamiento de estos parámetros coincidió en buena medida tanto en forma cuantitativa como cualitativa, con lo reportado en la literatura sobre el tema. Por otro lado, en la sección 4.5.2.2, el modelo Cassie-Chua se compara con valores de índices de corta

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

CAPÍTULO

6

6.1 CONCLUSIONES GENERALES

En el presente trabajo de tesis se propone un modelo para representar el comportamiento aleatorio del EAF. Se basa en combinar el modelo del arco eléctrico de Cassie y el oscilador caótico de Chua. Las conclusiones de este trabajo pueden resumirse como sigue:

- El modelo de balance de energía (descrito en 4.2.1) se basa en características físicas del arco eléctrico, básicamente en el radio del arco; mientras que el modelo de Cassie (descrito en 4.2.2) se basa en características eléctricas del arco, como lo es la conductancia eléctrica del arco; a pesar de estas diferencias ambos modelos del arco eléctrico presentan un comportamiento prácticamente idéntico, como se observo en 4.5.1, obviamente para el mismo caso de estudio en particular y escogiendo adecuadamente los parámetros de cada modelo.

- Las principales desventajas de los modelos deterministas (modelo de balance de energía y modelo de Cassie) al modelar el EAF son que: no representan el fenómeno del voltaje flicker y para estudios armónicos únicamente capturan armónicas impares. Cuando en realidad el fenómeno flicker es característico en la operación de los EAF; mientras que en el espectro armónico de voltaje y corriente de un EAF prácticamente están presentes todas las armónicas, y típicamente la 2ª armónica es la de mayor contribución.

- El oscilador caótico de Chua, es un circuito muy simple y fácil de implementar, sin embargo, es extremadamente sensible a las condiciones iniciales y escalarlo para un uso en particular, en magnitud y frecuencia representa un trabajo tedioso y complicado de lograr.

Se implementaron dos modelos de arco eléctrico con comportamiento caótico, los cuales fueron: modelo de Cassie-Chua (MCC) y modelo de balance de energía-Chua (MBEC); esto se logro resolviendo dos sistemas de ecuaciones diferenciales simultáneamente y modulando ambas señales. Ambos modelos presentan un comportamiento caótico, sin embargo, el modelo de MCC fue el que mejor comportamiento presento, debido a que:

- El fenómeno flicker se controla mejor desde el modelo MCC, ya que el modelo MBEC presenta oscilaciones muy pronunciadas.

- Como se comento anteriormente en un espectro de frecuencias de voltaje y corriente de un EAF, típicamente la 2ª armónica es la que mas contribuye. El modelo MCC cumple con la característica mencionada; mientras que en el modelo MBEC la 2ª armónica se reduce considerablemente en la onda de voltaje y en la corriente prácticamente desaparece.

- Se pude concluir que los modelos del arco eléctrico deterministas distan de representar los fenómenos dinámicos presentes en la operación del EAF. En cambio la combinación de un elemento determinista con otro caótico en el modelado del EAF se aproxima considerablemente al comportamiento totalmente aleatorio del EAF.

Finalmente se concluye que, se cumplió con el objetivo principal de este trabajo de tesis; proponiendo un nuevo modelo (Cassie-Chua), para representar el comportamiento totalmente aleatorio de las dinámicas del EAF.

6.2 LOGROS

De este trabajo de tesis se lograron publicar en foros de divulgación nacional, los siguientes trabajos específicos:

- ESTUDIO DE UNA METODOLOGÍA PARA MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS EN INSTALACIONES INDUSTRIALES CON HORNOS DE ARCO ELÉCTRICO, 4º Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánico y de sistemas (4CIIES), Noviembre del 2005. ESIME, DF.

- MODELADO DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN EL ATP/DRAW., 9º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, Noviembre del 2006, ESIME, D. F.

6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

El alcance y logros obtenidos con este trabajo, sugieren seguir trabajando en el modelado de hornos de arco eléctrico y cargas no lineales y variante en el tiempo, particularmente en los siguientes puntos:

- Modelar el EAF utilizando otro tipo de sistema caótico como por ejemplo, el atractor de Lorenz y estudiar su comportamiento.

- Utilizar el modelo Cassie-Chua propuesto para modelar otro tipo de cargas con un comportamiento aleatorio similar al EAF.

duración del voltaje flicker (Pst) reportados en la literatura, alo que el modelo que se propone se asemeja bastante a los valores reportados igualmente en la literatura sobre el tema.

Finalmente en este capitulo 5, se compara la THD en tensión debida a la representación de la carga del EAF por medio del modelo propuesto Cassie-Chua contra mediciones reales; en los diferentes buses de una red eléctrica real el modelo propuesto se aproxima considerablemente a las mediciones reales. Por todo lo anterior, el modelo que se propone en este trabajo, modelo Cassie-Chua, tiene un comportamiento que se asemeja de manera importante al comportamiento caótico de la carga del horno de arco eléctrico.

REFERENCIAS

[1] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovic. “A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1390-1397.

[2] G. T. Heydt, S. S. Venkata, A. Sundaram, “Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp.537-542.

[3] Benoit Boulet, Gino Lalli and Mark Ajersch. “Modeling and Control of an Electric Arc Furnace”, Centre for Intelligent Machines, McGill University
Montréal, Québec, Canada, October 2004.

[4] Omer Ozgun, Ali Abur, “Flicker study using a novel arc furnace model”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002, pp.1158-1163.

[5] Tongxin Zheng, Adly A. Girgis, “Effect different arc furnace models on voltage distortion”, IEEE/PES 8^{th} International conference on Harmonics and Quality Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998.

[6] J. Hernández, P. Gómez, “Simulación Del Efecto Del Arco Eléctrico En La Apertura Trifásica De Interruptores De Potencia En El ATP/EMTP”, 9^{0} Congreso Nacional De Ingeniería Electromecánica y De Sistemas, Noviembre 13-17, 2006.

[7] G. W. Chang, Y. J. Liu, H. M. Huang, “Harmonic analysis of the industrial power system with an AC electric arc fuenace”, IEEE Transactions Industry Applications, Vol. 30, No. 2, October1994, p.p. 462-468.

[8] Teshome A., “Harmonic source and type identification in a radial distribution system”, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol. 2, May 1991, pp.1605-1609.

[9] Wagner, V. E. Balda, D. C. McEachern, “Effects of Harmonics on Equipment”, IEEE Transactions on Power Delivery, report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 672-680.

[10] “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, IEEE Standard 519, 1992.

[11] Gonzalez Damian A., Mc Call John C., “Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems“, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 1A-23. No. 3, December 1998, pp. 504-537.

[12] S. R. Mendis, M.T. Bishop, J. F. Witte, “Investigations of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power Systems”, Vol. 3, October 1994, pp.2317-2325.

[13] H. M. Peterson, R.G. Hoch, “Modeling arc furnace flicker and investigation compensation techniques”, Rand Afrikaans University South Africa, June 2002.

[14] Published by the center for metals production, “Understanding electric arc furnace operations for steel production”, EPRI Sponsored R and D Applications Center, Vol. 3, No. 2, December 1993.

[15] Pedro E. Issouribehere, Fernando Issouribehere, “Power quality measurements and operating characteristic of electric arc furnaces”, Facultad de ingeniería Universidad de la Plata, Frebrero 2005.

[16] Montanari G. C., Loggini M., “Arc-Furnace model for the study of flicker compensation in electric networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1998, pp. 2026-2036.

[17] Hogg T., Huberman B. A., “Controlling Chaos in Distributed Systems”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 21, No. 6, Nov./Dec. 1991, pp. 1325-1332.

[18] Leonid P., “Chua’s Circuit: Rigorous results and future problems”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 4, No. 10, October 1993, pp. 784-786.

[19] Michel P. K., “Three steps to Chaos- Part I: Evolution”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 40, No. 10, October 1993, pp. 640-656.

[20] Michel P. K., “Three steps to Chaos- Part II: A Chua’s circuit primer”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 40, No. 10, October 1993, pp. 657-670.

[21] Leon O. Chua, Chai W. W, “A universal circuit for studying and generating chaos – Part I: Routes to Chaos”, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 40, No. 10, October 1993, pp. 732-744.

[22] V. V. Terzija, H. J. Koglin, “Long arc in free air: laboratory testing, modelling, simulation and model-parameters estimation”, IEE Proceedings Transmission and distribution, Vol. 149, No. 3, May 2002.

[23] Mediciones hechas por “Funken Ingenieros”, Titular: Ing. Guillermo Espinoza, www. funken.com.mx.

CONCEPTOS SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

APÉNDICE

A

A.1 INTRODUCCIÓN

Hace algunos años la calidad de la energía eléctrica no era preocupante pues no tenía efectos significativos en los equipos conectados a la red eléctrica. Sin embargo, la aparición de diversos elementos altamente sensibles en plantas industriales modernas ha obligado alas empresas y usuarios de energía a analizar detenidamente el problema y redefinir la calidad de la energía. Hoy en día la calidad de la energía eléctrica es mayor que hace años, pero es un hecho que la gama de disturbios comunes como sags o swells de voltaje, sobretensiones, distorsión armónica, voltaje flicker, transitorios electromagnéticos, etc., tienen una mayor injerencia en el desempeño de los equipos eléctricos conectados a la red.

Cualquier disturbio generado por la carga de los usuarios o por el suministro (red de la empresa eléctrica) que afecte negativamente el funcionamiento óptimo de los equipos (del usuario o de la empresa suministradora), se dice que reduce la calidad de la energía o potencia eléctrica. La calidad de la energía eléctrica, es el grado en que el uso y el suministro de la potencia eléctrica afectan el desempeño del los equipos conectados a la red eléctrica. Dos de los disturbios que afectan la calidad de la energía eléctrica, y que son generados por la operación del EAF, son las corrientes de carga armónicas y el voltaje flicker, a la descripción de estos dos disturbios se dedica este capítulo [7].

A.2 CORRIENTES DE CARGA ARMÓNICAS

La distorsión de las formas de onda de corriente y voltaje debida a las corrientes de carga armónicas es uno de los principales disturbios que afecta la confiabilidad del sistema y por lo tanto la calidad de la energía. Este problema en un sistema de potencia no es nuevo, esta presente desde los primeros tiempos en que se utilizó la energía

eléctrica. El reciente crecimiento de dicho problema viene dado por el aumento en el uso de dispositivos no lineales, así como por la cada vez mayor capacidad con la que dichos dispositivos son fabricados para trabajar.

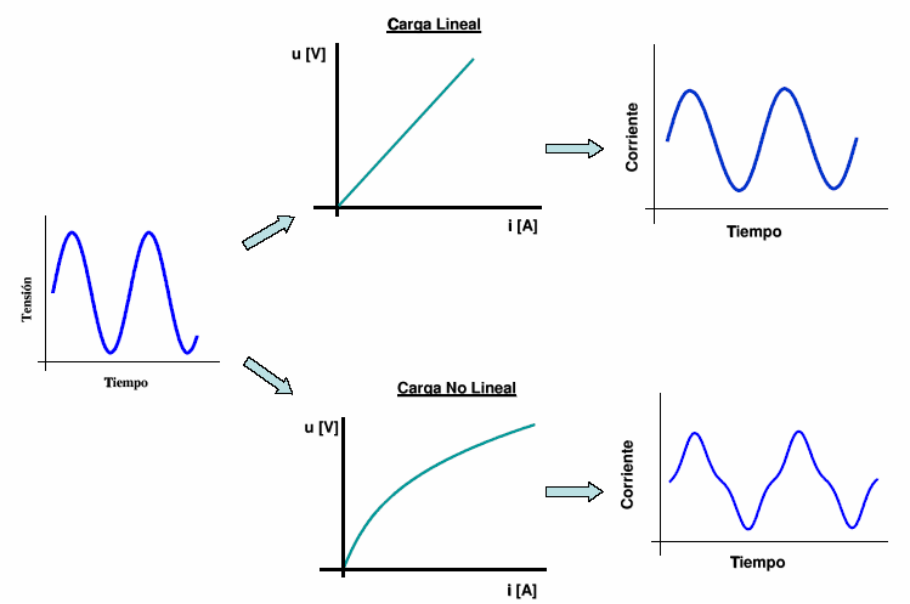

Figura A.1. Tensión y corriente en cargas lineales y no lineales.

Las cargas eléctricas se pueden clasificar en lineales y no lineales. Una carga lineal toma una corriente proporcional a la tensión de alimentación por lo que no da origen a perturbaciones de la forma de onda. Mientras que las cargas no lineales distorsionan la corriente consumida, causa caídas de tensión armónica y, por tanto, tensiones distorsionadas en los nodos como lo muestra la figura A.1.Esto es porque las cargas son directamente proporcionales a la tensión y ellas no dependen de la tensión para determinar su impedancia y su repuesta a una frecuencia dada será totalmente lineal. Por lo contrario las cargas no lineales, no responden de esta misma manera. Cuando a este tipo cargas se les aplica una tensión senoidal, la corriente no es directamente proporcional a la tensión y la forma de onda no es senoidal, es decir la corriente no senoidal consumida con este tipo de cargas no lineales, es debida a la impedancia de los dispositivos que cambian sobre un ciclo completo de la tensión [7].

A.2.1 Distorsión armónica total

A manera de ejemplo de una corriente con armónicos generada por una carga no lineal se muestra en la figura A.2. Una representación en el dominio del tiempo nos proporciona una información útil muy pequeña en términos para determinar los

impactos en la red. La forma de onda mostrada en la figura A.2 puede ser representada matemáticamente como la suma del número de formas de ondas senoidales de diferentes magnitudes y ángulos de fase, en un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de 60Hz, este proceso matemático es conocido como el análisis de Fourier.

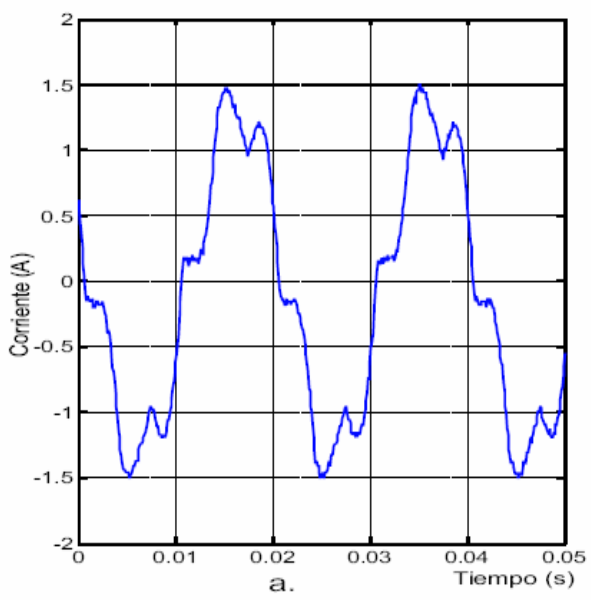

Figura A.2 Forma de onda típica no senoidal de corriente.

Los armónicos se pueden representar y cuantificar mediante un análisis de Fourier, el cual establece que una señal no senoidal, periódica y de energía finita, se puede representar como una sumatoria de señales sinusoidales de frecuencias múltiplos de una frecuencia conocida como fundamental. En ese sentido, se presenta la Distorsión Armónica Total (THD), como una medida de la desviación de la forma de onda no senoidal con respecto a la sinusoide pura de frecuencia fundamental.

$$THD = 100\sqrt{\sum_{h\neq 1}\left(\frac{U_h}{U_1}\right)^2} \qquad \text{(A.1)}$$

Por la calidad de la información que este factor involucra, este es el adoptado por muchas normativas para indicar los limites de las perturbaciones armónicas. Matemáticamente la ecuación (A.1) define la THD para una señal de tensión. Donde U_h representa el valor eficaz de la tensión armónica y U1 es el valor eficaz de la tensión fundamental [7].

A.2.2 Fuentes armónicas

Cualquier tipo de carga no lineal conectada al sistema eléctrico causa distorsión armónica. En seguida se presentan algunos equipos utilizados en baja tensión y en aplicaciones industriales, los cuales son fuentes de corrientes armónicas [8]:

- Aplicaciones en Baja Tensión
  - ✓ Alumbrado Con Lámparas Fluorescentes De Alta Frecuencia
  - ✓ Calefacción y Aire Acondicionado
  - ✓ Cargadores de Batería

- Aplicaciones Industriales
  - ✓ Hornos De Arco Eléctrico
  - ✓ Hornos de Inducción
  - ✓ Soldadoras Eléctricas
  - ✓ Controladores de motores de inducción
  - ✓ Los Convertidores Estáticos De Potencia
  - ✓ Rectificadores Monofásicos y Trifásicos
  - ✓ Arranque Con Voltaje Reducido ("Arranque Suave") De Motores De Inducción
  - ✓ Compensadores Estáticos de VARS (CEV´S O SVC´S)
  - ✓ Saturación del Transformador

A.2.3 Efectos de las armónicas

Los efectos producidos por la presencia de corrientes de carga armónicas son cada día más significativos en los sistemas eléctricos de potencia. Dichos efectos dependen de la intensidad relativa de las fuentes emisoras y pueden resumirse de manera muy general, de la siguiente forma:

- ✓ Mal funcionamiento en dispositivos electrónicos de control, protección y medición.
- ✓ Interferencia en sistemas de telecomunicación y telemando.
- ✓ Sobrecalentamiento de los equipos eléctricos (motores, transformadores, generadores, etc...) y cableado de potencia, con la disminución consecuente de

vida útil de los mismos e incremento considerable de pérdidas de energía en forma de calor.

- ✓ Fallo de capacitores de potencia.
- ✓ Reducción de la eficiencia en la generación, transmisión y consumo de energía.
- ✓ Ruido Eléctrico.
- ✓ Esfuerzos térmicos debidos a la presencia de armónicas.
- ✓ Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia.

Sin embargo, los efectos de las armónicas se pueden dividir en tres categorías, de la siguiente forma: efectos en el propio sistema de potencia, efectos en las cargas de los usuarios y efectos en los circuitos de comunicaciones.

Los sistemas de potencia son generalmente capaces de soportar considerables corrientes armónicas sin que ocurran problemas importantes, ya que el sistema de potencia es robusto en relación a la carga, por lo tanto la impedancia del sistema es pequeña comparada con la impedancia de la carga. Con una impedancia pequeña del sistema, el flujo de la corriente distorsionada a la carga causará una distorsión de voltaje mínima en los buses, y con una distorsión de voltaje pequeña, no se verá afectada la operación de otras cargas y equipos [9].

A.2.4 Aspectos normativos

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la norma IEEE Std. 519: IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de Armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia. El propósito de la IEEE Std. 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

- ✓ Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica. Los usuarios deberán responsabilizarse en limitar la cantidad de generación de las corrientes armónicas sobre la red eléctrica de la compañía suministradora.

- ✓ Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor. Las compañías suministradoras, deben evitar condiciones de resonancia armónica entre los componentes del sistema de potencia, que incrementen los niveles de distorsión de voltaje inaceptables para la operación de las cargas sensibles. Básicamente, la compañía debe suministrar un voltaje de buena calidad.

A.2.4.1 Respecto de los Consumidores

El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños. El tamaño relativo de la carga con respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR), al punto de acoplamiento común (PCC), que es donde la carga del consumidor conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga, IL, que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, ISC, al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR.

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es mas baja. Esto se observa en la tabla A.1, donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica. La tabla también identifica niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

La tabla A.1 muestra límites de corriente para componentes de armónicas individuales así como también distorsión armónica total. Por ejemplo un consumidor con un SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12.0% para TDD, mientras que para componentes armónicas impares individuales de ordenes menores a 11, el límite es del 10%.

Tabla A.1 Límites en la distorsión de la corriente según IEEE Std. 519.

Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 120 - 69,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	**<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h**	**TDD**
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes entre 69,000 - 161,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	**<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h**	**TDD**
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para voltajes > 161,000 volts.						
Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental						
ISC/IL	**<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h**	**TDD**
<50	2.0	1.0	0.75	0.30	0.15	2.5
50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente						
* Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de Isc/Il que presente						

Donde:

- ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.
- IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.
- TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.

Es importante notar que la Tabla A.1, se especifica para condiciones con duración superior a una hora; para períodos más cortos el límite aumenta un 50%. También muestra únicamente los límites para armónicos impares. La norma da lineamientos para los armónicos pares limitándolos al 25% de los impares, dentro de la misma gama [10].

A.2.4.2 Respecto de la Compañía Suministradora.

El segundo conjunto de criterios establecido por la IEEE Std. 519 se refiere a los límites de distorsión del voltaje. Estos rigen la cantidad de distorsión aceptable en el voltaje que entrega la compañía de electricidad en el PCC de un consumidor. Los límites armónicos de voltaje recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La Tabla A.2 enumera los límites de distorsión armónica de voltaje según la norma IEEE Std. 519. La tabla A.2 se especifica para condiciones con más de una hora de duración; para períodos más cortos aumentan su límite en un 50%. Como es común, los límites se

imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todos los voltajes armónicos (THD). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres clases de voltaje; hasta 69 KV, de 69 a 161 KV, y por encima de 161 KV. Observe que los límites disminuyen cuando el voltaje aumenta, al igual que para los límites de corrientes. Nuevamente los límites armónicos impares son los únicos que se muestran en la tabla. La generación de armónicos pares se restringe más debido a que la resultante DC puede ocasionar saturación en motores y transformadores.

Tabla A.2 Límites de distorsión de voltaje según IEEE Std. 519

Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común	**Distorsión individual deVoltaje (%)**	**Distorsión total del voltaje THD (%)**
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y mas	1.0	1.5
Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado.		

La corriente de secuencia negativa puede ocasionar calentamiento en generadores. Los armónicos pares individuales se limitan a un 25% de los límites armónicas impares, al igual que sucede con las corrientes. Los límites de distorsión especificados por IEEE Std. 519 son para condiciones “normales" que duran períodos mayores de una hora. Para períodos más cortos, durante arranques o condiciones inusitadas, los límites pueden ser excedidos hasta un 50%. Algún equipo, tal como una fuente de alimentación estática puede ser sensible a la distorsión armónica de corta duración, pero la mayoría de los efectos armónicos tales como interferencias telefónicas, en transformadores y el calentamiento de motores, son exclusivos de los armónicos de larga duración o repetitivos [10].

A.3 VOLTAJE FLICKER

El diagrama de carga de un EAF puede ser visto en la fig. A.3. Es evidente que la variación de la potencia reactiva alrededor de un punto de operación, ΔQ, es mucho mayor que la variación de la potencia activa, ΔP. Este fuerte y variante consumo de potencia reactiva, da como resultado el aumento en la correspondiente depresión así

como fluctuación del voltaje. Estas fluctuaciones en el voltaje inciden en una banda de frecuencias, las cuales son particularmente sensibles al ojo humano, típicamente 0.5 a 25Hz. Esas fluctuaciones rápidas de tensión pueden producir cambios en la luminosidad de las lámparas originando el fenómeno visual llamado parpadeo o flicker.

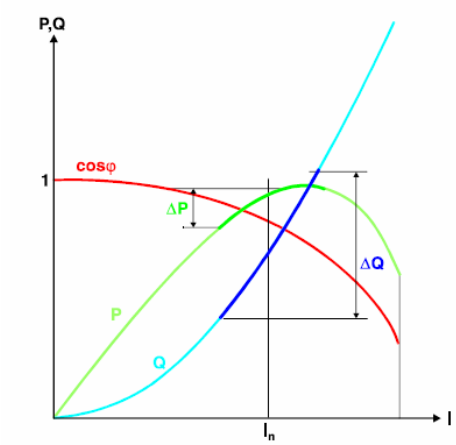

Fig. A.3 Consumo de potencia activa y reactiva del un EAF.

Las fluctuaciones rápidas de voltaje son comúnmente llamadas voltaje flicker, debido a la asociación con el efecto en la iluminación, y se caracterizan por pequeños cambios en la magnitud del voltaje. El fenómeno flicker puede ser dividido en dos categorías generales, flicker cíclico y flicker no cíclico. El flicker cíclico resulta de fluctuaciones de voltaje periódicas; el flicker no cíclico corresponde a las fluctuaciones de voltaje ocasionales tal como podría ser causado por el arranque de un gran motor. La operación de una carga variante en el tiempo, tal como un EAF, podría causar voltaje flicker que puede ser clasificado como una mezcla de flicker cíclico y no cíclico [4].

Mientras que las corrientes de cargas lineales son prácticamente constantes, la carga del EAF cambia rápidamente y genera caídas de tensión variables y momentáneas a lo largo del alimentador de distribución. La tensión del alimentador primario llega a ser variable, y los disturbios pueden ser observados por algunas de las cargas vecinas a la instalación del EAF, la figura A.4 muestra un ejemplo de estas fluctuaciones de tensión o flicker.

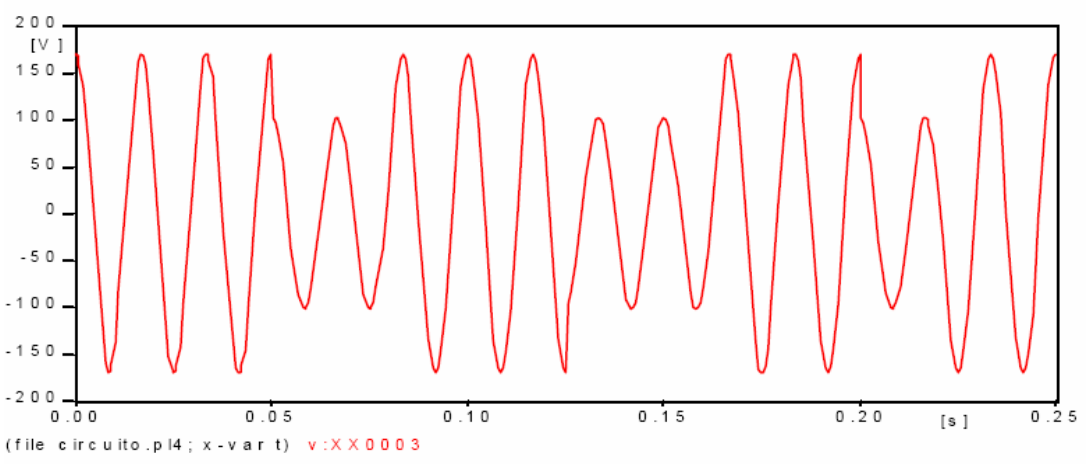

Fig. A.4 Fluctuaciones en la tensión

2.3.1 Flicker: Fuentes y Efectos

La principal fuente del Flicker es generalmente debido a las variaciones de la carga. Cuando la carga dibuja formas de onda de corriente que tienen variaciones significativas, estas obviamente causan caídas de voltaje adicional en el sistema de potencia. Las cargas que pueden producir Flicker son:

- Hornos de arco eléctrico.
- Soldadoras por resistencia y arco eléctrico.
- Motores en bombas de calor o en sistemas de aire acondicionado.
- Refrigeradores, taladros, lavadoras, batidoras.
- Laminadoras.
- Maquinas copiadoras de gran capacidad.

Como puede ser visto, una gran variedad de cargas puede generar problemas de voltaje flicker. El principal efecto de voltaje flicker esta relacionado con la molestia ocasionada en el ojo humano. Esto es debido a la alta sensibilidad del ojo humano a cambios en la intensidad de la iluminación. Como la luz emitida para el caso de lámparas incandescentes depende del voltaje, entonces pequeñas variaciones en el voltaje causan cambios en la iluminación que resultan molestos para el ojo humano. El nivel de irritación es diferente para cada individuo, pero pruebas han mostrado que generalmente el ojo humano es más sensible a formas de onda de voltaje con modulación en un rango de entre 5-10Hz. Otros efectos del voltaje flicker incluyen: operación incorrecta de dispositivos de protección, reducción en la vida útil de lámparas electrónicas, fluorescentes e incandescentes [12].

2.3.2 Normatividad

El estándar básico usado para medir el voltaje flicker es IEC 1000-4-15. El dispositivo de medición es conocido como "Flickermeter", y da resultados en intervalos sucesivos de 10 minutos (valores P_{st}), así como en intervalos de dos horas (P_{lt}). Por lo tanto, para cuantificar el nivel de molestia se utiliza un parámetro de severidad de corta duración, Pst, evaluado cada 10 minutos, y un parámetro de severidad de larga duración, Plt, evaluado cada 2 horas. En condiciones normales, los valores permitidos para el parámetro Plt no deben exceder la unidad, evaluado durante una semana. Los valores representativos del Pst son los correspondientes al percentil 99. En la tabla A.3 se muestran los niveles de los indices para medir el efecto fliker, estos deben ser inferiores al nivel de compatibilidad establecido por el estándar IEC 1000-4-15 [13].

Tabla A.3. Limites del Pst y Plt según las normas IEC 1000-4-15 y CEI-61000-3-7.

Nivel de Tensión	**Nivel de Compatibilidad IEC 1000-4-15**		**Niveles de Emisión CEI-61000-3-7**	
	Pst	**Plt**	**Pst**	**Plt**
BT	1	0.8	-	-
MT	1	0.8	0.9	0.7
AT	-	-	0.8	0.6

Muchos métodos para medición del flicker han sido desarrollados a lo largo de los años. La mayoría de los métodos para cuantificar el flicker se basa en el uso de medidores de flicker o "flickermeter". Generalmente un flickermeter es un dispositivo que demodula la señal flicker, y desarrolla un complicado análisis estadístico con los datos procesados. En el presente trabajo se implemente un medidor de flicker en el entorno de simulación Matlab/Simulink, basada en el estándar IEC 1000-4-15. Y puede ser dividido en dos principales partes. En el apéndice B, se detalla la implementación del medidor de voltaje flicker.

IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR DE PARPADEO DE TENSIÓN

APÉNDICE

B

La arquitectura de un flickermeter (medidor de flicker) de acuerdo con el estándar de la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC) 6100-4-15 es descrito en la figura B.1. El modelo descrito como la cadena lámpara-ojo-cerebro reacciona a las fluctuaciones de voltaje, reportando el nivel de severidad de corta duración (P_{st}) y de larga duración P_{lt}.

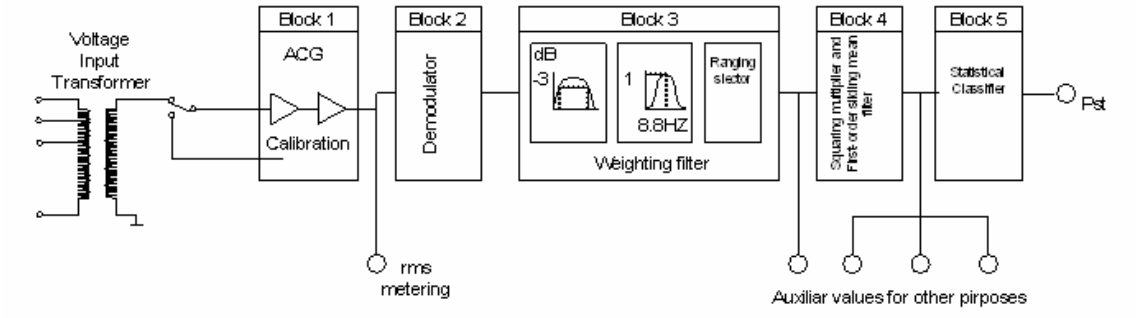

Figura B.1. Arquitectura de un medidor flicker.

Bloque 1. Selector de la señal de entrada y calibración del generador de señales.

En este bloque uno de los tres voltajes de línea es seleccionado y su función primaria es proveer un voltaje rms normalizado para el siguiente bloque. La calibración de la señal es una onda seno en un rango de frecuencias la cual es modulada en amplitud, como se muestra en la figura B.2. La señal modulada es una onda cuadrada de 150/17Hz. con una amplitud igual al 1 % de la señal senoidal portadora.

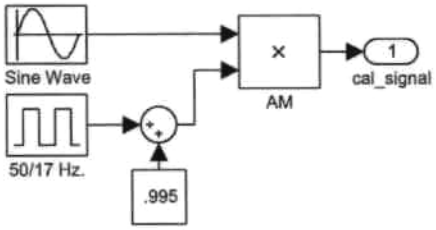

Figura B.2. Calibración del generador de señales.

Bloque 2. Demodulador

Este bloque incluye un multiplicador cuadrado usado como demodulador. El objetivo de este elemento es recuperar las señales moduladas en el bloque 1, mientras que simultáneamente suprime la principal frecuencia de la señal portadora. La salida del bloque 2, es aplicada a la entrada del bloque 3, y la salida del bloque 2 tiene solo componentes de frecuencia entre 0.5 y 30Hz; además que las frecuencias no deseadas son eliminadas por filtros en el bloque 3.

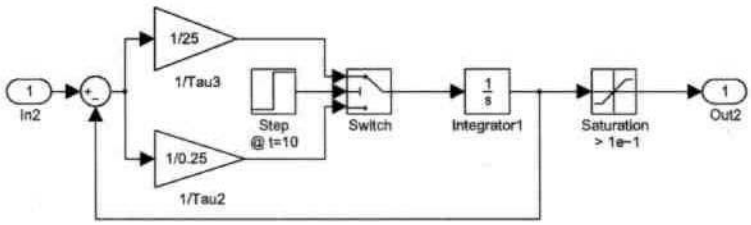

Figura B.3. Implantación del bloque 2 en Simulink.

Bloque 3. Ponderación de filtros.

El bloque 3 es diseñado para filtrar fuera del rango de frecuencias mencionado en el bloque 2, el bloque incluye tres filtros conectados en serie. El primero de ellos, es un filtro pasa altas de primer orden teniendo que cortar frecuencias empezando en 0.05Hz. El segundo filtro es un filtro pasa bajas con un corte de frecuencia igual a 35HZ. Los filtros tienen el objetivo de filtrar las componentes de frecuencia entre 0.05 y 35HZ.

El tercer filtro, mientras tanto provee una respuesta centrada en 8.8 Hz. Este filtro carga las componentes espectrales de la señal de salida dentro de la banda de frecuencias de

interés entre 0.05 y 30Hz. Este bloque modela la parte del conjunto ojo-cerebro para un observador humano promedio.

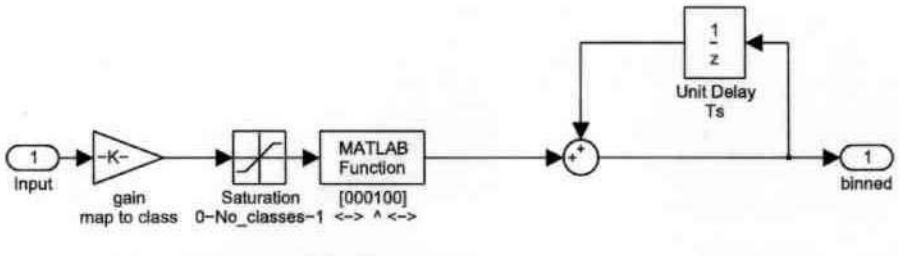

Figura B-4. Implementación del Bloque 3 en Simulink.

Bloque 4. Multiplicador cuadrado.

Este bloque modela el resto del conjunto ojo-cerebro para la percepción del flicker. El operador cuadrado simula la respuesta no lineal ojo-cerebro característica, mientras que un filtro de primer orden simula el efecto porcentual almacenado en el cerebro, este puede ser implementado como un filtro pasa bajas de primer orden con un corte de frecuencia en 0.53Hz.

El conjunto del bloque 1 al bloque 4 debe producir un valor de flicker instantáneo de uno para una lista de modulaciones senoidal y cuadrada definida en el estandar (IEC) 6100-4-15.

Bloque 5. Clasificación estadística.

Este bloque desarrolla una evaluación estadística de la percepción del flicker instantáneo. Puede también ser considerado como un modelo de irritabilidad humana en presencia de flicker. Desde un punto de vista psicológico, el flicker puede ser considerado más soportable si este ocurre frecuentemente en intervalos cortos

Finalmente, la severidad del flicker en un término corto es calculada usando valores percentil obtenidos de una clasificación estadística. La clasificación estadística

implementa una ecuación simple para calcular los valores percentil para sensación de flicker instantánea en un nivel de tiempo base. Y la implementación del Flickermeter completa se muestra en la figura B-5.

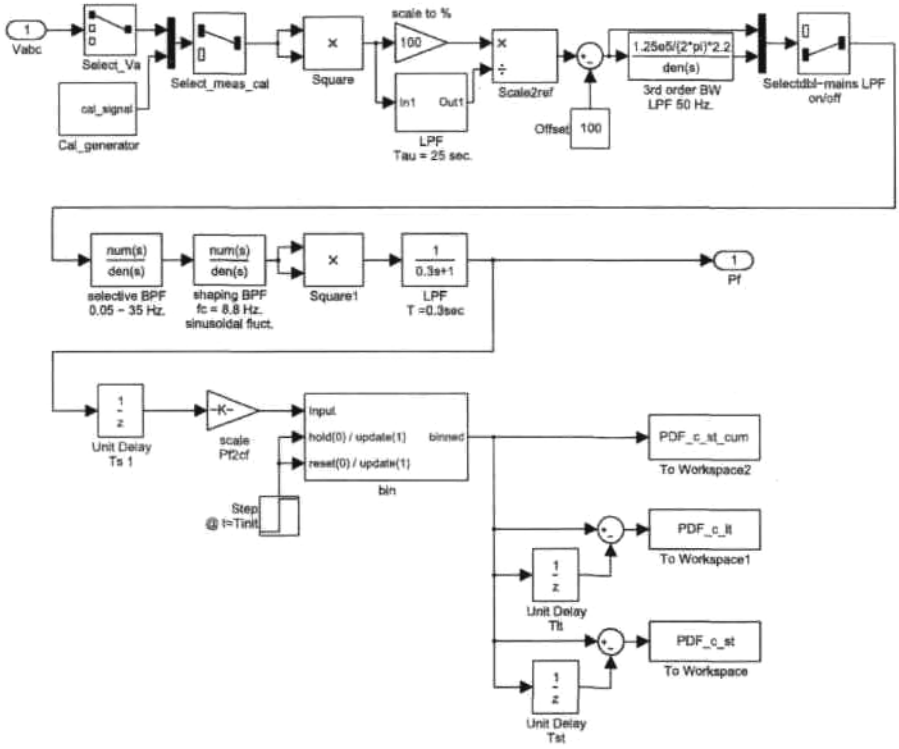

Figura B.5. Implementación del Flickermeter en Simulink.