



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MODELACIÓN DEL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO Y ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO TÉCNICO EN EL SISTEMA DE MEDIA Y ALTA TENSIÓN DE LA PLANTA ADELCA CON SEDE EN ALÓAG

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

NELSON ROMEO NARVÁEZ PRADO

nelson.narvaez.prado@gmail.com

DIRECTOR: Prof. CARLOS FABIÁN GALLARDO QUINGATUÑA (Ph.D)

carlos.gallardo@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2018

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Nelson Romeo Narváez Prado, bajo mi supervisión.

Prof. Carlos Gallardo (Ph.D)
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Nelson Romeo Narváez Prado, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politecnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Nelson Narváez Prado

DEDICATORIA

A mi familia.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto es el resultado del esfuerzo y el apoyo de varias personas que han hecho posible la conclusión de este objetivo y sin los cuales hubiera sido imposible la realización del mismo.

Es por esto que agradezco en primer lugar a mi familia, por el apoyo en el transcurso de toda mi vida.

A mi director de tesis, Prof. Carlos Gallardo (Ph.D), por su apoyo y por compartir sus conocimientos para la culminación de cada etapa de este proyecto.

A Ricardo Valencia, por su amistad y ayuda en el desarrollo de este proyecto.

A Adelca Acería del Ecuador, que a través de sus funcionarios Dng. Gustavo Betancourt e Dng. Miguel Bastidas prestaron ayuda incondicional y desinteresada, por lo cual fueron de vital importancia.

Finalmente, agradezco a los profesores; a quienes les debo gran parte de mis conocimientos y un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad la cual me ha infundido el valor del esfuerzo y la dedicación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivo general	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Alcance.....	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Hornos de arco eléctrico	3
2.1.1. Proceso de fabricación del acero.....	3
2.1.1. Etapa de fundición, refinado y colada continua	4
2.1.2. Descripción de la operación del horno de arco eléctrico (EAF)	6
2.1.3. Descripción de la operación del horno de arco cuchara (LF)	6
2.2. Armónicos	6
2.2.1. Cargas no lineales	6
2.2.2. Definiciones sobre armónicos.....	7
2.2.3. Mecanismo de generación de los armónicos.....	7
2.2.4. Fuentes de armónicos	7
2.2.5. Estándares existentes sobre armónicos	8
2.2.6. Índices e indicadores	9
2.2.6.1. THD (Distorsión armónica total).....	9

2.2.6.2.	TDD (Distorsión de demanda total).....	10
2.2.7.	Análisis de armónicos.....	11
2.2.7.1.	Series de Fourier.....	11
2.2.7.2.	Transformada Discreta de Fourier (DFT).....	12
2.2.7.3.	Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	14
2.2.8.	Interarmónicos.....	14
2.3.	Fluctuaciones de voltaje.....	15
2.3.1.	Definiciones sobre fluctuaciones de voltaje.....	15
2.3.2.	Mecanismo de generación de las fluctuaciones de voltaje.....	15
2.3.3.	Efecto de las fluctuaciones de voltaje.....	15
2.3.4.	Fuentes de parpadeo eléctrico.....	16
2.3.5.	Estándares existentes sobre parpadeo de voltaje.....	16
2.3.6.	Índices e indicadores.....	16
2.3.6.1.	Pst (Índice de severidad de parpadeo de corto plazo).....	16
2.3.6.2.	Plt (Índice de severidad de parpadeo de largo plazo).....	17
2.3.7.	Flickermetro.....	17
3.	METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN DE LOS HORNOS DE ARCO Y EL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA PLANTA ADELCA CON SEDE EN ALÓAG.....	18
3.1.	Adquisición de datos de señales de voltaje y corriente para los hornos de arco.....	18
3.1.1.	Equipo utilizado.....	18
3.1.2.	Conexión del equipo de medición.....	20
3.1.3.	Configuración del equipo para medición de armónicos.....	20
3.1.4.	Medición de armónicos y obtención de formas de onda de corriente y voltaje.....	24
3.2.	Procesado de señales eléctricas obtenidas con Matlab.....	27
3.2.1.	Importar señales eléctricas en el dominio del tiempo.....	27
3.2.1.1.	Señales eléctricas tomadas del horno de arco EAF (Electric Arc Furnace).....	27

3.2.1.2.	Señales eléctricas tomadas del horno de arco LF (Ladle Furnace).....	29
3.2.2.	Filtrado de señales eléctricas	30
3.2.2.1.	Señales eléctricas tomadas del horno de arco EAF (Electric Arc Furnace).....	30
3.2.2.2.	Señales eléctricas tomadas del horno de arco LF (Ladle Furnace).....	32
3.3.	Contenido armónico de corriente de los hornos de arco eléctrico.....	33
3.4.	Modelación del sistema eléctrico de la planta de Adelca con sede en Alóag.....	35
3.5.	Modelación de los hornos de arco eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag.....	39
3.5.1.	Modelos de horno de arco eléctrico.....	39
3.5.1.1.	Modelo Exponencial.....	40
3.5.1.2.	Modelo Hiperbólico	43
3.5.1.3.	Modelo Exponencial-Hiperbólico.....	44
3.5.2.	Estimación de parámetros de los modelos de horno de arco eléctrico a partir de mediciones reales.....	46
3.5.2.1.	Crear un experimento para la estimación de parámetros	49
3.5.2.2.	Importar datos de mediciones y seleccionar la información.....	50
3.5.2.3.	Especificación de los parámetros para la estimación.....	52
3.5.2.4.	Iniciación de la estimación de parámetros en el experimento creado.....	53
3.5.3.	Resultados de la estimación de parámetros de los hornos de arco eléctrico.....	56
3.5.3.1.	Parámetros estimados para el horno de arco eléctrico (EAF)....	56
3.5.3.2.	Parámetros estimados para el horno cuchara (LF)	57
3.5.4.	Simulación de los modelos de horno de arco eléctrico con parámetros estimados	57
3.5.4.1.	Modelo Exponencial.....	57
3.5.4.2.	Modelo Hiperbólico	60
3.5.4.3.	Modelo Exponencial-Hiperbólico.....	63
3.6.	Diseño de filtros pasivos (R-L-C)	66

3.6.1.	Determinación de la potencia reactiva de compensación.....	67
3.6.1.1.	Determinación de la potencia reactiva de compensación (Máxima carga).....	67
3.6.1.2.	Determinación de la potencia reactiva de compensación (Mínima carga).....	68
3.6.2.	Diseño de filtros pasivos simples sintonizados.....	69
3.6.2.1.	Ecuaciones para el diseño de filtros pasivos paralelo en configuración estrella.....	69
3.6.2.2.	Proceso de diseño de filtros pasivos simples en configuración estrella.....	73
3.6.3.	Cálculo de los parámetros de los filtros pasivos.....	74
3.6.3.1.	Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (2do armónico).....	75
3.6.3.2.	Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (3er armónico).....	77
3.6.3.3.	Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (5to armónico).....	79
3.6.4.	Modelación de los filtros diseñados en Matlab/Simulink.....	82
4.	Análisis en régimen permanente del sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag.....	84
4.1.	Flujos de carga del sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag.....	84
4.1.1.	Flujos de carga SIN FILTROS PASIVOS.....	85
4.1.2.	Flujos de carga con FILTROS PASIVOS EXISTENTES.....	88
4.1.3.	Flujos de carga con Filtros Pasivos Diseñados.....	91
4.2.	Cálculo de cortocircuitos en el sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag.....	95
4.2.1.	Cortocircuito trifásico para máximas corrientes.....	95
4.2.2.	Cortocircuito monofásico para máximas corrientes.....	96
4.3.	Análisis de armónicos.....	97
4.3.1.	Determinación del punto de acoplamiento común (Pcc).....	97
4.3.2.	Límites establecidos en la norma IEEE 519 - 1992.....	97
4.3.3.	Límites de distorsión de corriente en el Pcc para el caso de estudio.....	99

4.3.4.	Índices de distorsión armónica de corriente en el Pcc.....	99
4.3.4.1.	Determinación de los índices de distorsión armónica SIN FILTROS PASIVOS.....	100
4.3.4.2.	Determinación de los índices de distorsión armónica con FILTROS PASIVOS ACTUALES.....	101
4.3.4.3.	Determinación de los índices de distorsión armónica con FILTROS PASIVOS DISEÑADOS.....	104
4.3.5.	Interarmónicos de corriente de los hornos de arco eléctrico	106
4.4.	Comparación del Índice de severidad de parpadeo de corto plazo (Pst) con los límites establecidos en el estándar IEC.....	108
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	113
5.1.	Resultados de la simulación en Matlab/Simulink de los modelos de horno de arco implementados.....	113
5.1.1.	Modelación del horno de arco (EAF - Electric Arc Furnace).....	115
5.1.2.	Modelación del horno de arco cuchara (LF - Ladle Furnace).....	115
5.2.	Resultados del diseño de filtros pasivos y compensación reactiva para la corrección del factor de potencia	116
5.3.	Resultados de la comparación de los índices obtenidos mediante simulación con la normativa IEEE 519 -1992.....	117
5.3.1.	Comparación de los valores de TDD obtenidos en el punto de acoplamiento común (Pcc)	117
5.3.2.	Comparación de los límites SIN FILTROS	118
5.3.3.	Comparación de los límites CON FILTROS ACTUALES.....	118
5.3.4.	Comparación de los límites CON FILTROS DISEÑADOS	118
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
6.1.	Conclusiones.....	119
6.2.	Recomendaciones.....	120
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
8.	ANEXOS.....	124
	ANEXO I.....	124

ANEXO II.....	125
ANEXO III.....	126
ANEXO IV	127
ANEXO V	128
ANEXO VI	129
ANEXO VII	130
ANEXO VIII	131
ANEXO IX	132
ANEXO X	133
ANEXO XI	134
ANEXO XII	135
ANEXO XIII	136
ANEXO XIV	137
ANEXO XV	138
ORDEN DE EMPASTADO.....	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

La industria ecuatoriana utiliza energía eléctrica para producir diversos productos y servicios, los cuales son necesarios para abastecer el mercado nacional. Adelca fabrica acero utilizando chatarra con base de acero en un proceso de fundición mediante el uso de hornos de arco eléctrico. Los hornos de arco mantienen una respuesta no lineal, lo cual provoca circulación de corrientes deformadas hacia la red.

En este contexto, se han realizado mediciones utilizando un analizador de calidad de energía en las instalaciones de la planta de Adelca con sede en Alóag, para obtener el espectro armónico, formas de onda de voltaje y corriente, además de determinar los armónicos característicos producidos por la operación del horno de arco eléctrico.

Tras realizar la modelación de los hornos de arco, se ha modelado la planta industrial y sus respectivos componentes eléctricos, así como el equivalente de la red externa, para determinar los niveles de distorsión armónica de corriente en el punto de acoplamiento común (Pcc) y comparar estos valores con los límites establecidos en la norma IEEE-519.

Una vez estos límites han sido determinados, se ha realizado un diseño de filtros pasivos para mitigar el efecto de las corrientes armónicas inyectadas hacia la red y realizar una compensación reactiva para la corrección del factor de potencia.

Adicionalmente se establece un análisis de otros fenómenos perturbadores producidos por los hornos de arco eléctrico los cuales son fluctuaciones de voltaje e interarmónicos.

PALABRAS CLAVE: Carga no lineal, Horno de arco eléctrico, Series de Fourier, Calidad de la energía, Filtros pasivos, Matlab/Simulink.

ABSTRACT

Ecuadorian industry uses electrical energy to produce various products and services, which are needed to supply the market, contributing to the economy of the country. Adelca produces steel from scrap-based steel in a melting process by using electric arc furnaces. Electric arc furnaces maintain a nonlinear response, which causes circulation of deformed currents into the network.

In this context, measurements have been made using a power quality analyzer at Adelca plant located in Alóag to obtain the harmonic spectrum, voltage and current waveforms, in addition to determining the characteristic harmonics produced by electric arc furnace operations.

After modeling arc furnaces, it has been modeled the industrial plant and its respective electrical components as well as the external network equivalent, to determine the levels of harmonic current distortion at the point of common coupling (PCC) and compare these values with the limits included on the IEEE-519 standard.

Once these limits have been determined, it has made a design of passive filters to mitigate the effect of harmonic currents injected into the network and perform a reactive compensation for power factor correction.

Besides, voltage fluctuations and interharmonics have been analyzed.

KEYWORDS: Nonlinear load, Electric arc furnace, Fourier series, Power Quality, Passive filters, Matlab/Simulink.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los hornos de arco constituyen una importante carga eléctrica para los sistemas de potencia debido a la elevada potencia que estos constituyen. Los hornos de arco eléctrico para la obtención de acero provocan distintos fenómenos perturbadores entre los que se puede mencionar las distorsiones en las señales eléctricas de voltaje y corriente mejor conocidos como armónicos.

El resultado de la incorporación de este tipo de cargas no lineales en la red es la inyección de dichas corrientes armónicas que contaminan el suministro eléctrico produciendo distorsión de las ondas sinusoidales de voltaje y corriente.

Existen otras perturbaciones originadas en la operación del horno de arco eléctrico, tales como fluctuaciones de voltaje, interarmónicos y desbalance de carga.

Para mejorar la calidad del producto técnico es necesario conservar un bajo nivel de perturbaciones en la red. Es decir, es prudente conocer los fenómenos perturbadores que se presentan en las cargas no lineales en estudio, para conocer la magnitud del impacto de su operación. Así mismo, un adecuado tratamiento y mitigación los fenómenos perturbadores ayudan a un mejoramiento considerable en la operación de los hornos de arco, la planta industrial y el sistema de potencia en general.

1.1. Objetivo general

Implementar modelos de los hornos de arco eléctrico de la planta de Adelca con sede en Alóag a través de la determinación individual del espectro armónico obtenido mediante mediciones reales.

1.2. Objetivos específicos

- Modelar el horno de arco eléctrico (EAF-ELECTRIC ARC FURNACE) y adicionalmente el horno de arco cuchara (LF-LADLE FURNACE) que ajuste su comportamiento para el caso Adelca con sede en Alóag.
- Determinar los índices de distorsión armónica de corriente para compararlos con los límites establecidos en la normativa IEEE 519 para sugerir medidas correctivas que ayuden a mitigar las señales armónicas.

- Diseñar filtros pasivos según normativa IEEE 1531, para mitigar el efecto distorsionante de las cargas no lineales (EAF y LF), lograr una corrección del factor de potencia y verificar la calidad del producto técnico luego de la implementación mediante simulación de los filtros.
- Analizar otros fenómenos perturbadores como interarmónicos y fluctuaciones de voltaje para comparar con los límites establecidos en el standard IEC 61000-3-3 con ayuda de los estándares inherentes IEC 61000-4-7 y IEC 61000-4-15.

1.3. Alcance

Se determinará el índice de distorsión armónica total (THD) de corriente en el punto de conexión con la red externa.

Utilizando la herramienta computacional Matlab/Simulink se determinaran los índices de THD de corriente para posteriormente comparar estos valores con los límites de distorsión de corriente establecidos según normativa IEEE 519. Adicionalmente se realizará un análisis de interarmónicos y fluctuaciones de voltaje.

Se diseñarán filtros pasivos que contribuirán a la reducción del THD de corriente, finalmente se logrará comprobar la calidad del producto técnico.

2. MARCO TEÓRICO

Ciertas cargas no lineales y en particular la operación los hornos de arco eléctrico contribuyen a la generación de fenómenos perturbadores como armónicos, interarmónicos, variaciones de voltaje y desbalance de carga. Los mismos que deben estudiarse apropiadamente para controlarse, mitigarse y evitar que estos excedan niveles apropiados fijados según estándares inherentes.

2.1. Hornos de arco eléctrico

Un horno de arco es una carga desequilibrada, no lineal y variable en el tiempo, que puede causar muchos problemas en el sistema de potencia.

Los hornos de arco eléctrico producen armónicos a lo largo de los procesos de fundición que son necesarios para la obtención del acero.

A medida que el arco se vuelve más estable se producen corrientes mucho más uniformes con mucho menos distorsión y menos actividad armónica. [1]

Los armónicos son producidos debido a la variación ciclo a ciclo del arco. La corriente del arco no es periódica y muestra un espectro de frecuencias armónicas enteras y no enteras. Las frecuencias armónicas de orden entero se caracterizan particularmente por ser componentes armónicos de bajo orden que comienzan en el segundo y terminan con el séptimo. La amplitud de las componentes armónicas decrece con el orden y las componentes enteras predominan por sobre las no enteras. [1]

2.1.1. Proceso de fabricación del acero

El proceso de fabricación del acero empieza con la recolección de la chatarra y selección de materias primas, a través del reciclaje de desechos metálicos que se convertirá en la materia prima para la fabricación del acero. [2]

La chatarra son los desperdicios de hierro acumulados, esta chatarra adquirida es la materia prima principal que se obtiene a partir de desperdicios reciclados como se aprecia en la Figura 2.1.

Luego de que la chatarra es clasificada, triturada y compactada, se añade el material a la cesta de carga que alimentará el horno de arco eléctrico, con lo cual se puede iniciar la fundición del material. [2]



Figura 2.1 Desperdicios de hierro acumulado (chatarra). [2]

2.1.1. Etapa de fundición, refinado y colada continua

El acero es una aleación de hierro (Fe) y carbono (C). El hierro en estado puro no posee la resistencia y dureza necesarias para las aplicaciones de uso común. Sin embargo, cuando se combina con pequeñas cantidades de carbono se obtiene un metal denominado acero, cuyas propiedades varían en función de su contenido en carbono y de otros elementos en la aleación.



Figura 2.2 Primera carga de una colada en el horno de arco (EAF).

La colada se obtiene después de un proceso de fundición el cual dura aproximadamente 40 minutos. Este proceso incluye realizar dos o tres cargas de chatarra en la cuba del horno y adicionalmente una fase de refinamiento.



Figura 2.3 Proceso de refinamiento en el horno cuchara (LF).

Después de que el proceso en el horno de arco eléctrico (EAF-Electric Arc Furnace) ha concluido, la colada pasa a un horno de menor tamaño y menor potencia conocido como horno cuchara (LF-Ladle Furnace). Este horno tiene la función de ajustar la temperatura del acero y a su vez realizar una nueva evaluación del contenido de la aleación para adaptar la composición química del material. [2]



Figura 2.4 Palanquillas obtenidas a partir de la colada continua.

Posteriormente se transporta el acero líquido a la colada continua. La colada continua es un proceso metalúrgico que transforma el metal líquido a alta temperatura en metal sólido. Es decir; el acero líquido se vierte en diversas líneas, pasando por moldes con refrigeración para solidificarse en forma de palanquillas o barras de acero. [2]

Una vez finiquitado el proceso de fundición se obtienen palanquillas las cuales pueden ser aprovechadas para obtener distintos materiales derivados del acero como varillas, ángulos estructurales, platinas, alambre galvanizado, etc.

2.1.2. Descripción de la operación del horno de arco eléctrico (EAF)

El horno de arco eléctrico (EAF - Electric Arc Furnace) es un tipo de horno de arco en el cual se deposita la chatarra sólida en una cuba, para realizar operaciones de fundición del material a través de la implementación de un proceso de fundición. [3] Dentro del ciclo de operación del horno de arco eléctrico se distinguen dos etapas distintas que son la etapa de fundición y la etapa de refinado.

En la etapa de fundición se genera un cortocircuito controlado entre los electrodos y la chatarra. En esta etapa el horno de arco puede ser recargado con chatarra de una a tres veces, además; el arco eléctrico es muy inestable y se genera una variación de la longitud del arco eléctrico debido al movimiento de la chatarra. [3]

La etapa de refinado es una fase mucho más estable, en la que las fluctuaciones de potencia activa y reactiva son menores. [3]

2.1.3. Descripción de la operación del horno de arco cuchara (LF)

El horno de arco cuchara o cucharón (LF - Ladle Furnace), es un tipo de horno de arco en el que una vez obtenida la colada a partir de la fundición en el horno de arco eléctrico principal, se realiza un proceso adicional de refinación secundaria.

Los propósitos de esta refinación secundaria son diversos, entre los que se pueden mencionar la homogeneización de la temperatura o realizar un ajuste químico que otorgará las propiedades típicas del acero. [3]

2.2. Armónicos

2.2.1. Cargas no lineales

Una carga no lineal es aquella carga eléctrica que extrae corriente de forma discontinua. Estas corrientes además de contener la componente fundamental, contienen otras

componentes cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental y que reciben el nombre de armónicos.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que a diferencia de una carga lineal, su impedancia no es constante; por lo cual su impedancia varía a lo largo del ciclo del voltaje de entrada. [4]

2.2.2. Definiciones sobre armónicos

Los armónicos son señales de voltaje y corriente sinusoidal a frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Esta frecuencia fundamental puede ser 50 ó 60 Hz, por lo tanto; para el caso de una frecuencia fundamental de 60 Hz, las frecuencias múltiplos de la fundamental pueden ser frecuencias de 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, etc. Las señales de voltaje o corriente con contenido armónico pueden ser descompuestas como la suma de su componente fundamental más los componentes armónicos. [3]

Existen dispositivos y cargas en los sistemas de potencia que cuentan con características no lineales, estos dispositivos originan distorsión armónica. Para describir los niveles de distorsión armónica se utiliza el espectro armónico completo utilizando las magnitudes y ángulos de los componentes.

Resulta muy común, utilizar el índice THD (Distorsión Armónica Total), como una medida del valor efectivo de distorsión armónica. [3]

2.2.3. Mecanismo de generación de los armónicos

La generación eléctrica es producida normalmente a frecuencias constantes de 50 Hz o 60 Hz y esta generación eléctrica de voltajes y corrientes puede ser considerada prácticamente sinusoidal. Sin embargo, cuando una fuente de voltaje sinusoidal es aplicada a un dispositivo o carga no lineal, la corriente resultante no es perfectamente sinusoidal [3].

2.2.4. Fuentes de armónicos

Antes de la aparición de los semiconductores de potencia, las principales fuentes de distorsión armónica eran los hornos de arco eléctrico, el efecto acumulado de las lámparas fluorescentes y minoritariamente las máquinas eléctricas y los transformadores. El uso cada vez mayor de dispositivos electrónicos de potencia ha sido la razón de la mayor preocupación sobre la distorsión de la forma de onda en los últimos tiempos. [3]

Entre las principales fuentes de armónicos de cargas comerciales se pueden mencionar fuentes de alimentación monofásica, iluminación fluorescente y variadores de velocidad

para ascensores. Las instalaciones industriales modernas se caracterizan por la aplicación generalizada de cargas no lineales.

En cuanto a las principales fuentes de armónicos de cargas industriales están los convertidores trifásicos de potencia, dispositivos de arco como lámparas de descarga, hornos de arco y soldadura por arco.

Además; dispositivos saturables como transformadores y otros dispositivos electromagnéticos con núcleo de acero, incluidos los motores. [4]

2.2.5. Estándares existentes sobre armónicos

La mayoría de países han realizado sus propios estándares en cuanto a armónicos, además; de recomendaciones que se ajustan según los criterios, condiciones y necesidades locales.

Existen varias organizaciones reconocidas en el área eléctrica que generan estándares y criterios en cuanto a distorsión armónica se refiere, entre las cuales podemos mencionar:

La IEC (International Electrotechnical Commission) que ha definido una serie de estándares llamado Electromagnetic Compatibility (EMC), para lidiar con los problemas de calidad de energía.

La normativa IEC 61000, específicamente el estándar IEC 61000-3-2 y el estándar IEC 61000-3-6, proveen una detallada descripción de información detallada para el control de armónicos de voltaje y corriente en sistemas de potencia. [4]

Otra entidad que goza de mucha relevancia y que puede ser considerada como una alternativa a la IEC es la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) con la normativa IEEE 519-1992 [1], que dispone de conceptos y lineamientos válidos, así como; la normativa IEEE 519-2014 [5] la cual es una revisión de la normativa IEEE 519-1992 que ha sido tomada como referencia importante en el presente proyecto.

Ha de mencionarse que existen regulaciones eléctricas internas elaboradas por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) [6], además de otras realizadas por el antiguo organismo CONELEC como la REGULACIÓN No. CONELEC - 003/08 [7], la cual está realizadas de acuerdo a procedimientos específicos y prácticas recomendadas en la normativa IEEE 519.

2.2.6. Índices e indicadores

Los índices comúnmente utilizados para medir el contenido armónico de una forma de onda son la distorsión armónica total (THD) y la distorsión de demanda total (TDD).

2.2.6.1. THD (Distorsión armónica total)

El índice más común para analizar la distorsión armónica es el THD, el cual está definido como la raíz media cuadrática de los armónicos expresado como un porcentaje de la componente fundamental. [3]

En la Ecuación 2.1 se aprecia la fórmula establecida para el THD de voltaje, pero este índice puede ser calculado para la distorsión de voltaje o corriente.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1}$$

Ecuación 2.1 Índice de distorsión armónica total. [3]

Donde:

n: Orden de armónico (2 , 3, ... , N).

N: Máximo orden a ser considerado.

V_n : Voltaje R.M.S para un armónico n.

V_1 : Componente fundamental R.M.S de voltaje.

La Ecuación 2.2 muestra el THD de corriente con la sumatoria de sus componentes armónicos desglosados en el numerador.

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}$$

Ecuación 2.2 Distorsión armónica total de corriente (THD_i). [3]

Donde:

n: Orden del armónico (2 , 3, ... , N).

N: Máximo orden a ser considerado.

I_n : Corriente R.M.S para un armónico n.

I_1 : Componente fundamental R.M.S de corriente.

Los niveles de distorsión de corriente pueden ser también caracterizados por el índice de THD, pero en ocasiones este índice puede resultar engañoso cuando la corriente fundamental de la carga es baja. Por lo tanto, es necesario la introducción de otro factor que ayude a solucionar tal ambigüedad.

2.2.6.2. TDD (Distorsión de demanda total)

Las definiciones matemáticas del THD y TDD resultan similares. La ecuación que se expone a continuación muestra una única diferencia en el denominador con respecto a la Ecuación 2.2. Mientras que el THD se expresa en función de la corriente fundamental, el TDD se expresa en función de la máxima corriente de carga demanda. Un alto valor del índice de THD de corriente puede no ser significativo cuando la carga en análisis es ligera debido a que la magnitud de la corriente armónica es baja, incluso si la distorsión de corriente relativa a la componente fundamental es alta. [3]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_L}$$

Ecuación 2.3 Índice de distorsión de demanda total (TDD).

Donde:

n: Orden del armónico (2 , 3 , ... , N).

N: Máximo orden a ser considerado.

I_n: Corriente R.M.S para un armónico n.

I_L: Máxima corriente de carga demanda.

Este factor es similar al THD excepto que la distorsión se expresa como un porcentaje de alguna magnitud de corriente de carga nominal o máxima, en lugar de como un porcentaje de la corriente fundamental.

Dado que los sistemas de suministro de energía eléctrica están diseñados para soportar la corriente de carga nominal o máxima, el impacto de la distorsión de corriente en el sistema será más realista si la evaluación se basa en los valores diseñados, en lugar de en una referencia que fluctúa con los niveles de carga. [3]

El valor de TDD viene dado por la Ecuación 2.4, donde se muestra el cálculo de la distorsión de demanda total (TDD) a partir de la distorsión armónica total de corriente (THD) conocida.

$$TDD = THD_i \cdot \frac{CMD}{CNC}$$

Ecuación 2.4 Cálculo de TDD a partir de valores conocidos de THD. [7]

Donde:

THD_i: Distorsión armónica total de corriente.

CMD: Corriente promedio de las máximas demandas registradas en el mes.

CNC: Corriente nominal del circuito en el punto de acoplamiento común.

Pcc: Punto de acoplamiento común.

2.2.7. Análisis de armónicos

Las señales armónicas de corriente y voltaje, en un punto de conexión de dispositivos no lineales, pueden ser obtenidas a través de aparatos de medición o puede ser calculado a través de procedimientos matemáticos.

2.2.7.1. Series de Fourier

Las series de fourier establecen que cualquier función continua y periódica en un intervalo, puede ser representado como la suma de una componente sinusoidal a frecuencia fundamental y una serie de compontes sinusoidales a frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental.

La serie de fourier de una función periódica puede ser definido como:

$$x(t) = a_o + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sen\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right)$$

Ecuación 2.5 Serie de Fourier. [3]

Donde:

n: Orden del armónico (2 , 3 , ... , N).

N: Máximo orden a ser considerado.

a_o, a_n, b_n: Coeficientes de las series de fourier.

La Ecuación 2.5 es una representación en el dominio de la frecuencia de una función periódica. La magnitud y fase del enésimo armónico dentro de las series de fourier está dado por las siguientes expresiones:

$$A_n \angle \varphi_n = a_n + jb_n$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right)$$

Ecuación 2.6 Módulo y fase del enésimo armónico. [3]

Donde:

A_n : Módulo del enésimo armónico.

φ_n : Fase del enésimo armónico.

n : Orden del armónico (2 , 3, ... , N).

N : Máximo orden a ser considerado.

a_n, b_n : Coeficientes de las series de fourier.

El cálculo de los coeficientes expuestos en la Ecuación 2.5 puede ser obtenido a partir de las fórmulas matemáticas que se describen a continuación:

$$a_n = \frac{2}{T} + \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} + \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) \cdot dt$$

$$a_o = \frac{1}{T} + \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

Ecuación 2.7 Coeficientes de la serie de fourier. [3]

Donde:

$f(t)$: Función matemática.

a_o, a_n, b_n : Coeficientes de las series de fourier.

n : Orden del armónico (2 , 3, ... , N).

N : Máximo orden a ser considerado.

T : Periodo de la función.

2.2.7.2. Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Transforma una función matemática en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia a partir de una función en el dominio del tiempo. [3] La Ecuación 2.8 y la Ecuación 2.9 exponen dichas representaciones matemáticas en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) e^{j2\pi kn/N} ; k = 0, \dots, N - 1$$

Ecuación 2.8 Función en el dominio del tiempo. [3]

Donde:

$x(t_n)$: Componentes de la función en el dominio del tiempo.

$X(f_k)$: Componentes de la función en el dominio de la frecuencia.

n, k: Orden de los componentes $x(t_n)$ y $X(f_k)$.

N: Número de muestras por periodo.

Ambas funciones en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia se asumen periódicas, con un total de N muestras por periodo. [3] La siguiente expresión matemática puede ser reescrita como se muestra en la Ecuación 2.9, realizando una sustitución como sigue:

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} ; n = 0, \dots, N - 1$$

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn}$$

$$W = e^{-j2\pi/N}$$

Ecuación 2.9 Función en el dominio de la frecuencia. [3]

Donde:

$X(f_k)$: Componentes de la función en el dominio de la frecuencia.

$x(t_n)$: Componentes de la función en el dominio del tiempo.

n, k: Orden de los componentes $x(t_n)$ y $X(f_k)$.

N: Número de muestras por periodo.

La Ecuación 2.9 puede ser representada a partir de una ecuación matricial, la cual muestra los componentes en frecuencia y en el tiempo como se ejemplifica a continuación:

$$\begin{bmatrix} X(f_0) \\ X(f_1) \\ \vdots \\ X(f_k) \\ \vdots \\ X(f_{N-1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & \dots & W^k & \dots & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & W^k & \dots & W^{k^2} & \dots & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & W^{(N-1)k} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_k) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{bmatrix}$$

$$[X(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)]$$

Ecuación 2.10 Representación matricial. [3]

Donde:

$[X(f_k)]$: Vector de componentes de la función en el dominio de la frecuencia.

$[W^{kn}]$: Vector unidad con rotación horaria de $2n\pi/N$.

$[x(t_n)]$: Vector de componentes de la función en el dominio del tiempo.

n, k: Orden de los componentes $x(t_n)$ y $X(f_k)$.

N: Número de muestras por periodo.

Por lo tanto, según se observa en la **Ecuación 2.10** se requieren un total de N^2 multiplicaciones complejas para obtener N componentes de frecuencia a partir de las N muestras de tiempo.

2.2.7.3. Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo eficiente que permite calcular la transformada discreta de Fourier. Cuando se dispone de numerosas muestras por periodo (N), la transformada discreta de Fourier puede presentar impedimentos a nivel de tiempo computacional, dado que requiere ejecutar N^2 multiplicaciones complejas, aumentando el tiempo computacional de ejecución. [3]

Por otro lado la FFT requiere realizar tan solo $(N/2) \cdot \log_2 N$ operaciones para obtener los mismos componentes en frecuencia. [3]

2.2.8. Interarmónicos

Los interarmónicos se definen como voltajes o corrientes que tienen componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia a la que el sistema de suministro

está diseñado para operar, normalmente 50 ó 60 Hz. Estas componentes interarmónicos pueden aparecer como frecuencias discretas o como un espectro de frecuencias. [4]

Los interarmónicos se pueden encontrar en redes de toda clase de voltajes. Entre las principales fuentes de distorsión de forma de onda interarmónica se puede mencionar convertidores, cicloconvertidores, hornos de arco eléctrico y dispositivos de arco. [4]

Las corrientes interarmónicas pueden fomentar resonancias bastante severas en las redes donde estas están disponibles por acción de las fuentes generadoras de armónicos e interarmónicos ya que la frecuencia interarmónica variable puede resultar coincidente con las frecuencias naturales del sistema. [4]

2.3. Fluctuaciones de voltaje

2.3.1. Definiciones sobre fluctuaciones de voltaje

Las fluctuaciones de voltaje son variaciones sistemáticas del envolvente de voltaje o una serie de cambios aleatorios de voltaje. La magnitud de las fluctuaciones de voltaje normalmente no debe exceder los rangos de voltaje entre 0,9 a 1,1 pu especificados por el estándar ANSI C84.1. [4]

Las fluctuaciones de voltaje son fenómenos perturbadores que se generan ante la acción de cargas variables tales como los hornos de arco. Las cargas pueden presentar variaciones rápidas en la magnitud de la corriente de la carga, lo cual puede causar dichas variaciones de voltaje. Las variaciones de voltaje se pueden definir de una manera técnicamente correcta como un fenómeno electromagnético, mientras que el parpadeo (flicker), es un efecto indeseable de las variaciones de voltaje en algunas cargas. [4]

2.3.2. Mecanismo de generación de las fluctuaciones de voltaje

Los hornos de arco eléctrico son cargas no lineales y variables en el tiempo que generan perturbaciones aleatorias en el punto de acoplamiento común con la compañía eléctrica. Estas perturbaciones son variaciones aleatorias en los voltajes de suministro. Un cambio muy rápido en el voltaje de alimentación se llama parpadeo de voltaje, esto se debe a las rápidas variaciones en la magnitud de la corriente de la carga, como en los hornos de arco.

Esto provoca una caída en el voltaje donde está conectado el horno. Por lo tanto, otros clientes que son alimentados por el mismo alimentador enfrentan caídas severas de voltaje a menos que la red de suministro sea muy robusta. [8]

2.3.3. Efecto de las fluctuaciones de voltaje

El efecto más notable de las fluctuaciones de voltaje es el parpadeo eléctrico o “flicker”. Se entiende por parpadeo eléctrico o “flicker” a la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por las fluctuaciones de tensión en la red. Esta sensación visual experimentada por un observador origina en quien lo percibe, una sensación desagradable, es decir; se manifiestan como una molestia visual percibida por el ojo humano. [4]

2.3.4. Fuentes de parpadeo eléctrico

La principal causa del parpadeo de voltaje son los dispositivos de arco, como soldadoras de arco, las lámparas de arco y en especial los hornos de arco eléctrico. [8]

2.3.5. Estándares existentes sobre parpadeo de voltaje

La IEC (International Electrotechnical Commission), a través; de los estándares de Electromagnetic Compatibility (EMC), han conferido varias subsecciones destinadas al análisis y tratamiento del parpadeo de voltaje y cargas fluctuantes.

Es de esta manera, que se puede mencionar los siguientes estándares:

El estándar IEC 61000-4-15 define la metodología y las especificaciones de los instrumentos para la medición del parpadeo de voltaje. [9]

El estándar IEC 61000-3-3 establece límites y procedimientos de evaluación para equipos de bajo voltaje con corrientes nominales menores a 16 A. La norma establece que los límites serán aplicables al parpadeo de voltaje en los terminales de suministro de los equipos bajo prueba. [10]

El estándar IEC 61000-3-5 establece límites y procedimientos de evaluación para equipos de bajo voltaje con corrientes nominales mayores a 16 A, estableciendo los mismos límites que en el estándar anterior, sin embargo; se reconoce que una impedancia más pequeña de la red es necesaria para equipos más grandes. [11]

El estándar IEC 61000-3-7 establece límites y procedimientos de evaluación para cargas fluctuantes en medio voltaje y alto voltaje. [12]

2.3.6. Índices e indicadores

2.3.6.1. Pst (Índice de severidad de parpadeo de corto plazo)

El Pst (Short Term Flicker Perceptibility) ó índice de severidad de parpadeo de corto plazo está basado en un periodo de observación de 10 minutos, según ha sido definido en la

norma IEC 61000-4-15. [9]

Cuando el valor del índice corresponde a un valor mayor que 1, esto se puede entender como el nivel suficiente de parpadeo para causar irritabilidad en el 50% de personas en un grupo de observación. [4]

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}}$$

Ecuación 2.11 Índice de severidad de parpadeo de corto plazo. [4]

Donde:

N_{Pst} : Número de periodos cortos tomados en cuenta.

$P_{0,1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$: Percentiles del 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% respectivamente.

2.3.6.2. Plt (Índice de severidad de parpadeo de largo plazo)

El Plt (Long Term Flicker Perceptibility) ó índice de severidad de parpadeo de largo plazo está basado en un periodo de observación de 2 horas, según ha sido definido en la norma IEC 61000-4-15. [4]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{N_{Pst}} \frac{P_{st_i}^3}{N_{Pst}}}$$

Ecuación 2.12 Índice de severidad de parpadeo de largo plazo. [4]

Donde:

N_{Pst} : Número de periodos cortos tomados en cuenta.

P_{st_i} : Valores de severidad de corto plazo para cada uno de los N_{Pst} tomados en cuenta.

2.3.7. Flickermetro

La medición y monitoreo del parpadeo de voltaje se realiza a través del Flickermetro establecido en el estándar IEC 61000-4-15. [9] De esta manera se logra medir el parpadeo de voltaje instantáneo, esto es conocido como nivel instantáneo de parpadeo de voltaje (IFL), los niveles de IFL almacenados son utilizados para realizar operaciones estadísticas de la información para determinar los índices de severidad de parpadeo de corto y largo plazo.

3. METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN DE LOS HORNOS DE ARCO Y EL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA PLANTA ADELCA CON SEDE EN ALÓAG

3.1. Adquisición de datos de señales de voltaje y corriente para los hornos de arco

La adquisición de datos resulta ser el paso inicial mediante el cual podremos conocer la característica de las señales de voltaje y corriente de los hornos de arco eléctrico. Estas mediciones se han realizado con la ayuda de un analizador de calidad de energía en los puntos de medición ubicados en el lado secundario de los transformadores de ambos hornos de arco EAF (Electric Arc Furnace) y LF (Ladle Furnace), a través de transformadores de potencial (TPs) y transformadores de corriente (TCs), destinados para dicho propósito. Posteriormente estas señales serán recopiladas y analizadas para un posterior uso dentro de la modelación de los hornos de arco eléctrico.

3.1.1. Equipo utilizado

La adquisición de datos se realizó con la ayuda de un analizador de calidad de energía Fluke 435. El equipo dispone de distintos módulos de medición, además; dispone de diversos componentes con los cuales se puede realizar la conexión del equipo a los puntos de medición reservados. La Figura 3.1 muestra el equipo utilizado para realizar las mediciones para la adquisición de datos.



Figura 3.1 Analizador de calidad de energía Fluke 435. [13]

La Figura 3.2 muestra los componentes del kit del analizador de calidad de energía utilizado, entre los que se encuentran: pinzas lagarto para medición de voltaje, sondas para la medición de corriente y un cable óptico para la comunicación del dispositivo de medición con un PC.



Figura 3.2 Componentes del kit Fluke 435. [14]

Donde:

1. Analizador de calidad de la energía eléctrica.
2. Juego de etiquetas para tomas de entrada.
3. Correa.
4. Pinzas lagarto.
5. Cables de prueba.
6. Adaptador de red.
7. Juego adaptadores de enchufe de red.
8. Manual de instrucciones de seguridad.
9. Cable de interfaz USB para conexión al PC.
10. CD-ROM con manuales, software y controladores USB.
11. Sonda de corriente de CA.
12. Maletín rígido con ruedas.

3.1.2. Conexión del equipo de medición

La conexión del equipo de medición se ha realizado acorde a las conexiones establecidas en el manual de usuario del analizador de calidad utilizado [14], para un adecuado uso del analizador de calidad de energía es necesario efectuar las conexiones como muestra la Figura 3.3, la cual expone la correcta conexión del dispositivo de medición.

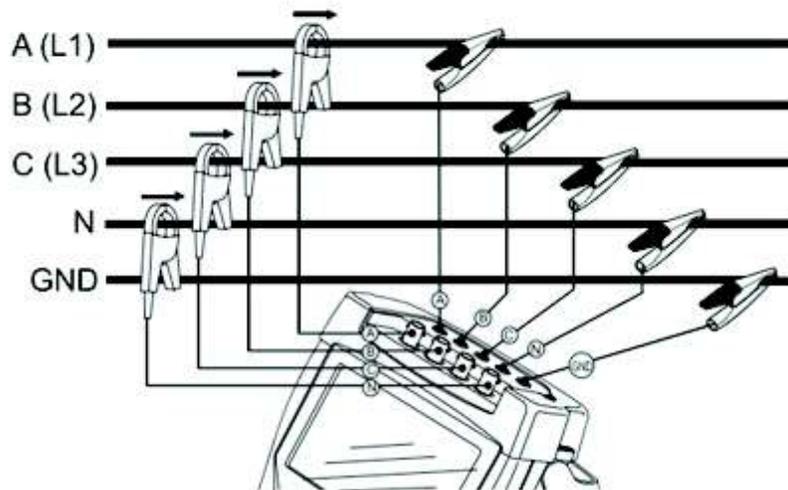


Figura 3.3 Conexión trifásica del analizador de calidad de energía. [14]

Las conexión del analizador de calidad de energía se ha realizado en lo puntos de medición a través de transformadores de medición, cuya función es adaptar los niveles de corriente y de tensión a valores que sean manejables por las entradas del equipo de medición.

3.1.3. Configuración del equipo para medición de armónicos

Dentro de las configuraciones del analizador de calidad de energía, se pueden definir configuraciones triviales como fecha y hora o configuraciones importantes como la configuración del sistema en análisis, frecuencia o voltaje nominal.

Estas configuraciones se realizan al inicio antes de proseguir con las mediciones de interés ya sean de voltaje, corriente o mediciones de armónicos.

La Figura 3.4 muestra una captura de la pantalla principal que se puede apreciar al encender el analizador de calidad de energía.

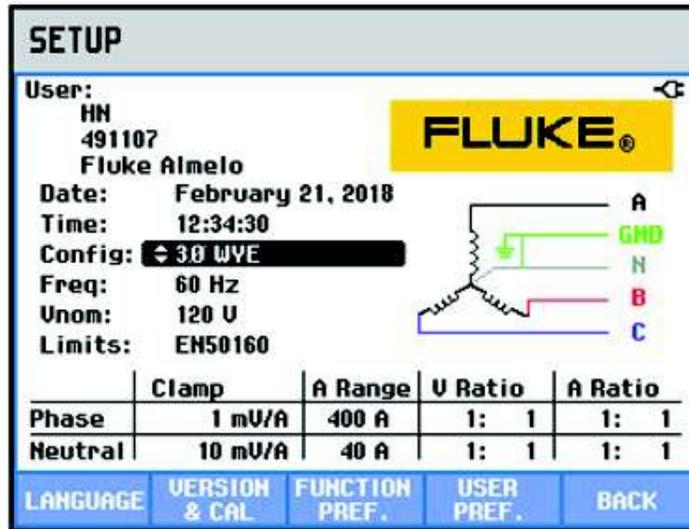


Figura 3.4 Pantalla principal del analizador de calidad de energía Fluke 435. [14]

La Figura 3.5 muestra las posibles configuraciones que se pueden escoger según la configuración del sistema a ser analizado. Es necesario establecer el tipo de configuración antes de proceder con la adquisición de datos.

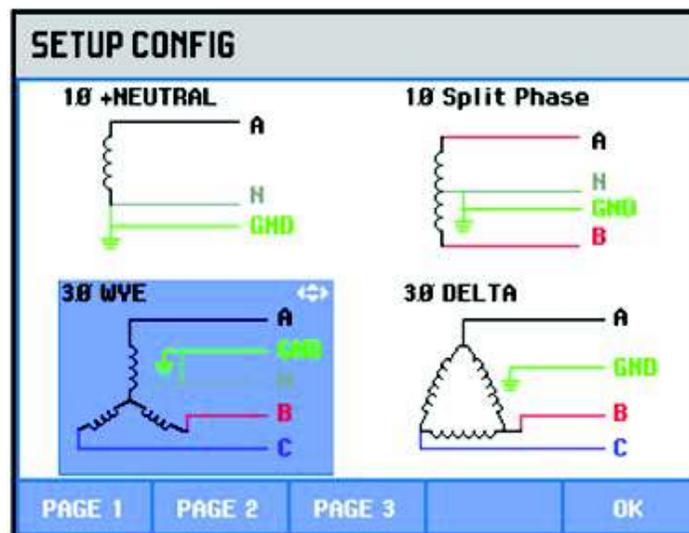


Figura 3.5 Pantalla de selección de la configuración del sistema. [14]

El analizador de calidad de energía dispone de varios módulos de medición mediante los cuales es posible realizar mediciones a través de la conexión del dispositivo de medición a un PC o simplemente con el analizador conectado al punto de interés de medición. Una vez definida la configuración es posible realizar las mediciones de armónicos mediante la

opción "Harmonics". La Figura 3.6 muestra los distintos módulos de selección en la pantalla principal del analizador Fluke.

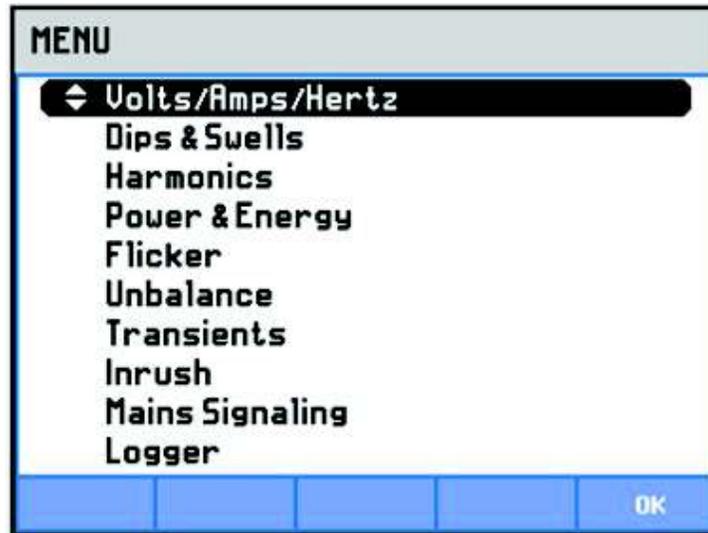


Figura 3.6 Opciones de medición dentro del menú del analizador Fluke 435. [14]

Para proceder a guardar la información de las mediciones es posible realizar la adquisición de datos por medio de la conexión del analizador a un computador mediante un cable óptico. Para esto se ha hecho uso de una máquina virtual en la cual se ha instalado previamente el sistema operativo "Windows XP", dada la incompatibilidad del software "FlukeView" con versiones posteriores del sistema operativo.



Figura 3.7 Software de adquisición de datos del analizador de calidad de energía Fluke 435.

Para establecer la comunicación entre el PC y el analizador de calidad de energía, se debe conectar ambos equipos, a través de un cable incluido en el kit del equipo. Para realizar la comunicación se escoge un puerto pre configurado en la PC.

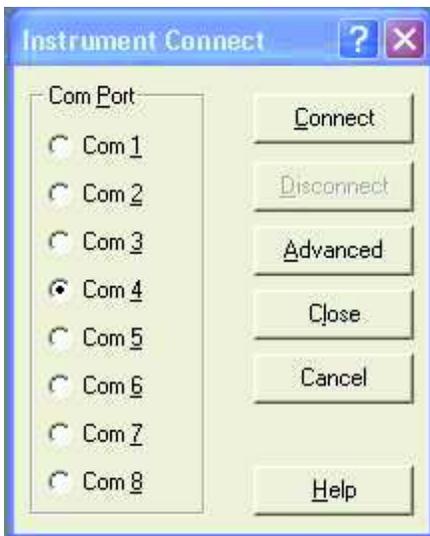


Figura 3.8 Selección de un puerto Com que conecta el instrumento al PC. [14]

Una vez se escoge un puerto y se establece la comunicación entre el PC y el analizador de calidad de energía, es posible utilizar las diferentes herramientas dentro del software FlukeView.

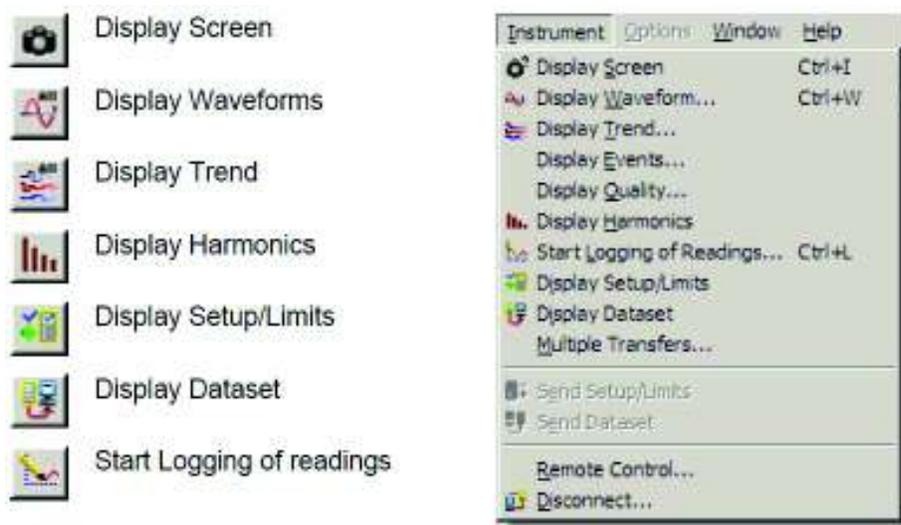


Figura 3.9 Botones y opciones del menú "Instrument" de FlukeView. [14]

3.1.4. Medición de armónicos y obtención de formas de onda de corriente y voltaje

La identificación de los armónicos, para voltaje y corriente debe hacerse preferentemente en un mismo punto. De esta manera la medición de armónicos de corriente permite caracterizar el comportamiento de una carga, mientras que las mediciones de tensión ayudan a caracterizar la respuesta que tiene el sistema ante la generación de corrientes armónicas. [15]

Para caracterizar el comportamiento de las cargas no lineales se ha tomado en cuenta mediciones de corriente y voltaje en el lado secundario de los transformadores de los hornos de arco EAF (Electric Arc Furnace) y LF (Ladle Furnace).

La adquisición de datos se ha elaborado para una primera carga (arco activo) y la etapa de afino (arco estable) para el horno de arco EAF. Dado que el horno de arco LF realiza una sola carga se ha tomado en cuenta las mediciones realizadas al inicio y final de la carga única de dicho horno.

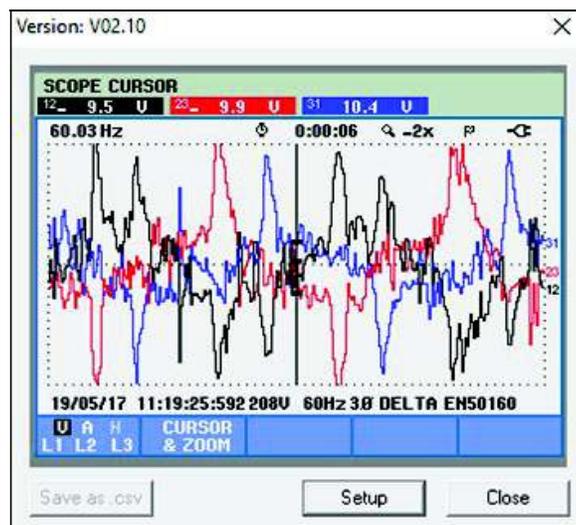


Figura 3.10 Señales de voltaje en el lado secundario del transformador del horno EAF para la fase de fundición inicial.

La Figura 3.10 muestra las formas de onda de voltaje en el secundario del transformador para la fase de fundición inicial. Por otro lado la Figura 3.11 muestra las formas de onda de corriente adquiridas mediante el analizador de calidad de energía para la misma fase de fundición inicial (arco activo).

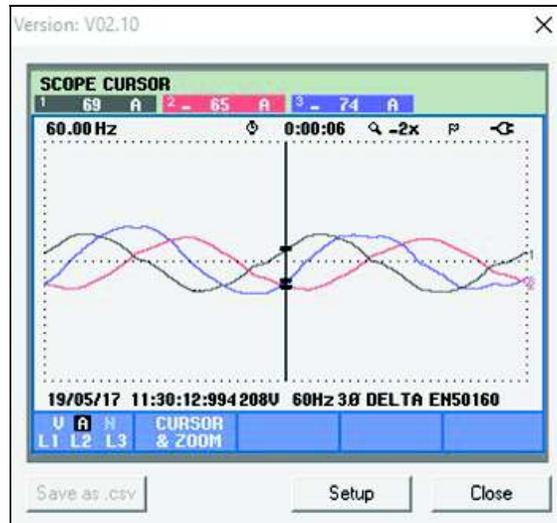


Figura 3.11 Señales de corriente en el lado secundario del transformador del horno EAF para la fase de fundición inicial.

El analizador de calidad de energía permite adquirir las formas de onda de voltaje y corriente de las señales muestreadas. Existe la posibilidad de transmitir las formas de onda muestreadas al software computacional (FlukeView), disponible con el analizador de calidad de energía, para posteriormente trasladar esta información a hojas de cálculo o directamente al software computacional Matlab/Simulink. Este traslado de información nos servirá realizar un análisis del espectro de frecuencias contenido en dichas señales de corriente y voltaje. Para esto se puede recurrir a el módulo FFT (Fast Fourier Transform) disponible en Simulink.

El analizador de calidad de energía también permite obtener directamente mediciones de armónicos e interarmónicos hasta componentes de orden 50. Adicionalmente permite obtener informaciones relacionadas como la componente DC y el valor de THD (Total Harmonic Distortion) de las señales analizadas. [14]

Las mediciones obtenidas se muestran como un porcentaje de la señal fundamental y estos resultados pueden ser mostrados a manera de gráficas de barras con respecto a su componente fundamental.

La opción “Display Harmonics” del menú “Instruments” de FlukeView permite mostrar el contenido armónico capturado donde el eje horizontal representa la frecuencia o el orden del armónico del espectro y el eje vertical representa la magnitud de la distorsión que presenta cada componente armónica con respecto a la fundamental. [14]

Es posible exportar la información del contenido armónico obtenido hacia un archivo en formato de Excel o directamente al software Matlab para su posterior procesamiento y análisis.

En la Figura 3.12 y Figura 3.13 se puede apreciar el espectro en frecuencia de armónicos e interarmónicos de corriente medido para la fase C en los hornos de arco (EAF-Electric Arc Furnace) y el horno cuchara (LF-Ladle Furnace).

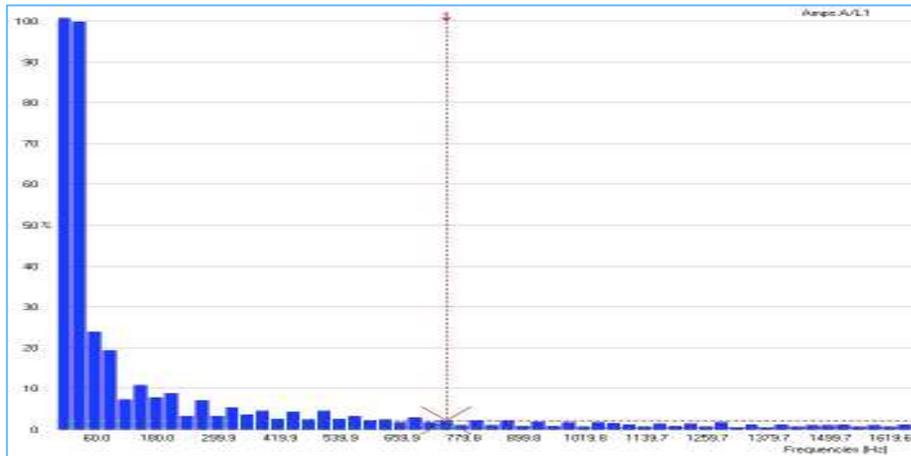


Figura 3.12 Espectro de frecuencias de corriente del horno de arco EAF en porcentaje con respecto a la componente fundamental.

Dentro del espectro en frecuencias, los datos adquiridos de los gráficos de barras poseen información de interarmónicos, los cuales son componentes cuya frecuencia es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental de suministro.

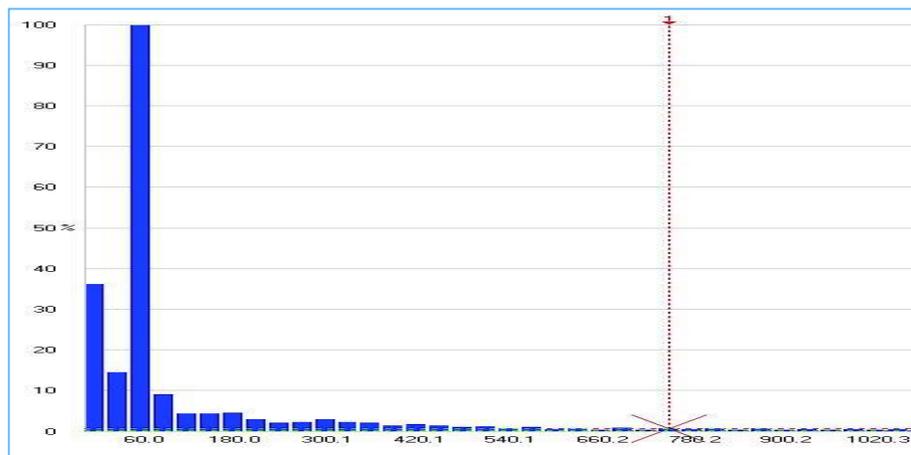


Figura 3.13 Espectro de frecuencias de corriente del horno de arco LF en porcentaje con respecto a la componente fundamental.

Los diagramas de barras de los espectros de frecuencias de corriente y voltaje para todas las fases se encuentran detalladas en el ANEXO I, ANEXO II, ANEXO III, y ANEXO IV.

3.2. Procesado de señales eléctricas obtenidas con Matlab

Las señales eléctricas obtenidas en el proceso de medición y adquisición de datos, se pueden importar a hojas de cálculo de Excel o directamente al Matlab a modo de vectores. Es recomendable una vez se disponga de dicha información en el software computacional Matlab realizar un proceso de filtrado de señales eléctricas y utilizar una herramienta de interpolación para aumentar el número de muestras obtenidas en la medida que nos sea necesario.

3.2.1. Importar señales eléctricas en el dominio del tiempo

A partir de las señales medidas, como ya se ha mencionado, es posible importar los valores instantáneos de las formas de onda hacia el software Matlab desde el software del analizador de calidad de energía FlukeView. De manera que dichos valores pueden ser guardados en variables a manera de vectores columna para su uso y representación.

3.2.1.1. Señales eléctricas tomadas del horno de arco EAF (Electric Arc Furnace)

- *Fundición Inicial (Arco Activo).*

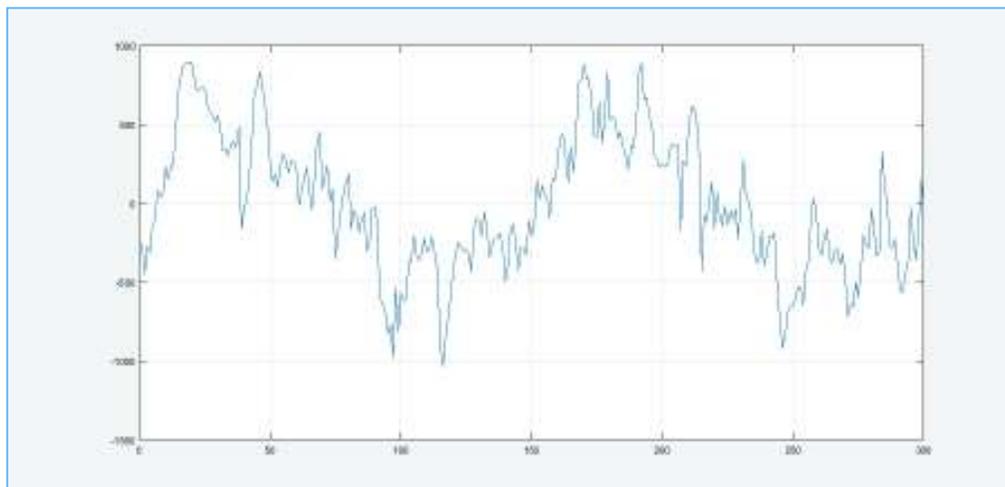


Figura 3.14 Forma de onda de voltaje entre fases. (2 ciclos a 60 Hz).

En el caso de la Figura 3.14 se observa la forma de onda de voltaje en el lado secundario de transformador del horno de arco (EAF) para una característica de arco activo en la fase inicial de la fundición, en este caso la variación de la longitud de arco es aleatorio lo cual

produce fluctuaciones de voltaje, además de presentar un alto contenido armónico e interarmónico de voltaje. La Figura 3.15 ejemplifica la forma de onda de corriente obtenida en el secundario de transformador del horno de arco (EAF) para una característica dinámica de arco activo en la fase inicial de la fundición, en este caso la variación de la longitud de arco es aleatorio, además de presentar un alto contenido armónico e interarmónico de corriente.

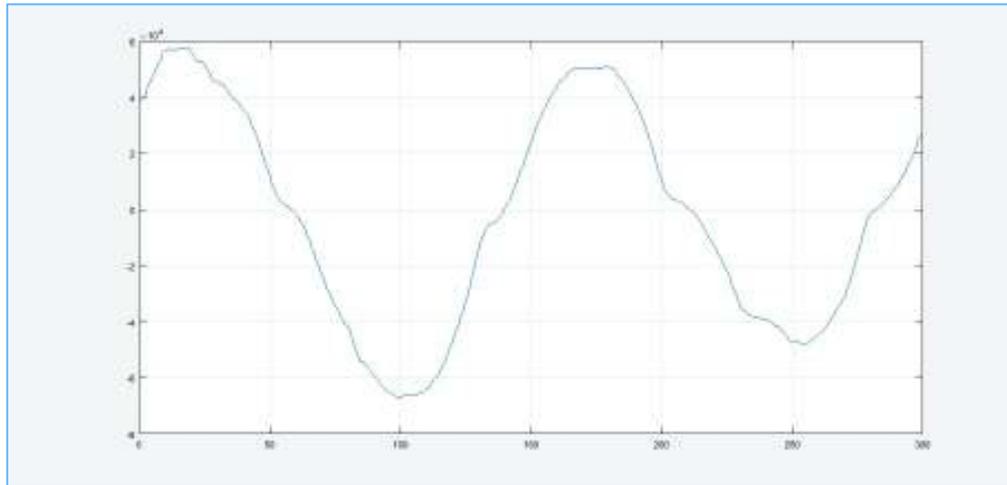


Figura 3.15 Forma de onda de corriente para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

- **Refinamiento (Arco Estable).**

La etapa de refinamiento es una etapa en la que la longitud de arco tiende a estabilizarse, es por esto que las formas de onda de voltaje y corriente obtenidas en esta etapa se visualizan más estables que en la etapa inicial de la fundación.

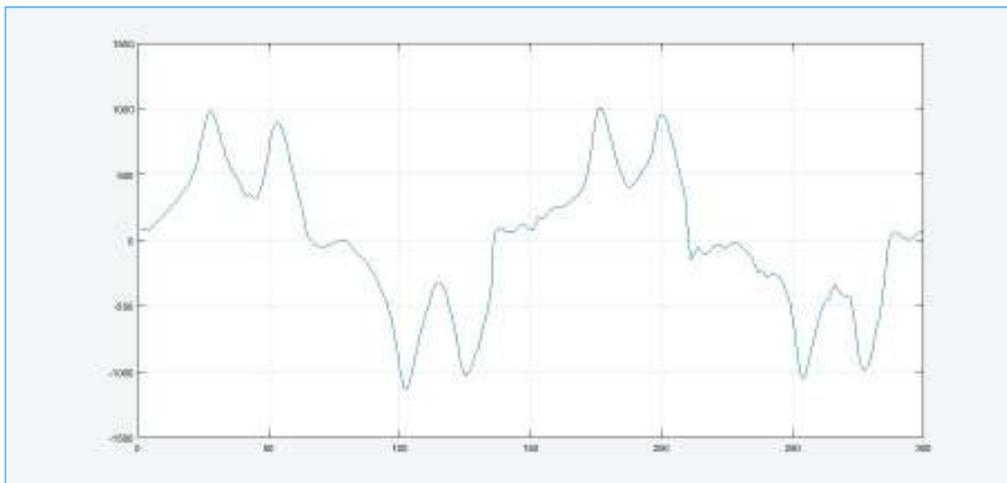


Figura 3.16 Forma de onda de voltaje entre fases. (2 ciclos a 60 Hz).

La Figura 3.17 muestra la forma de onda de corriente medida en el lado secundario del transformador del horno de arco (EAF), se aprecia una característica deformada con respecto a una onda sinusoidal pura.

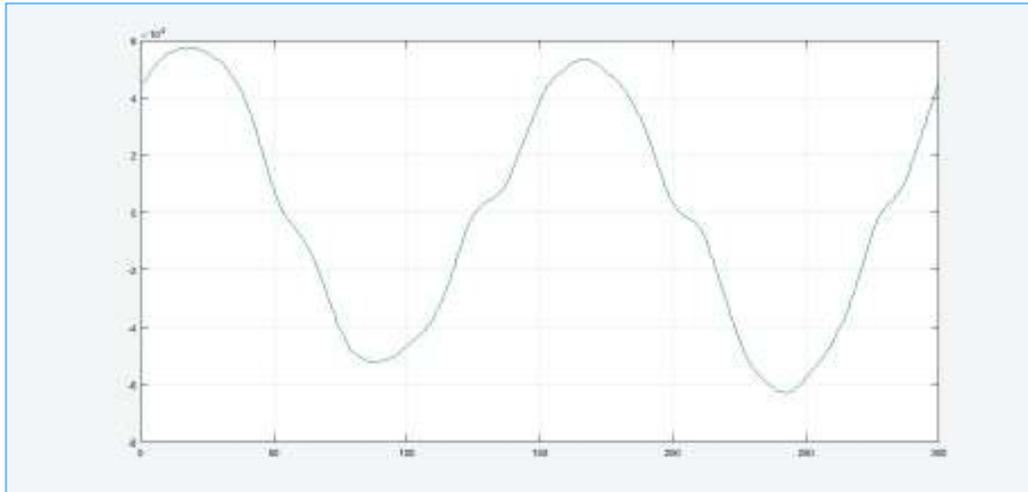


Figura 3.17 Forma de onda de corriente para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

3.2.1.2. Señales eléctricas tomadas del horno de arco LF (Ladle Furnace)

- **Refinamiento (Arco Estable).**

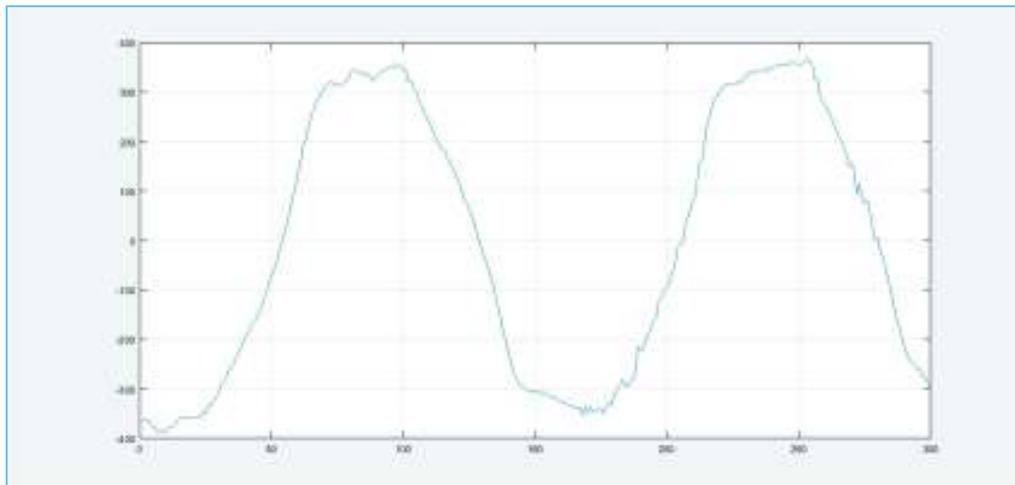


Figura 3.18 Forma de onda de voltaje entre fases. (2 ciclos a 60 Hz).

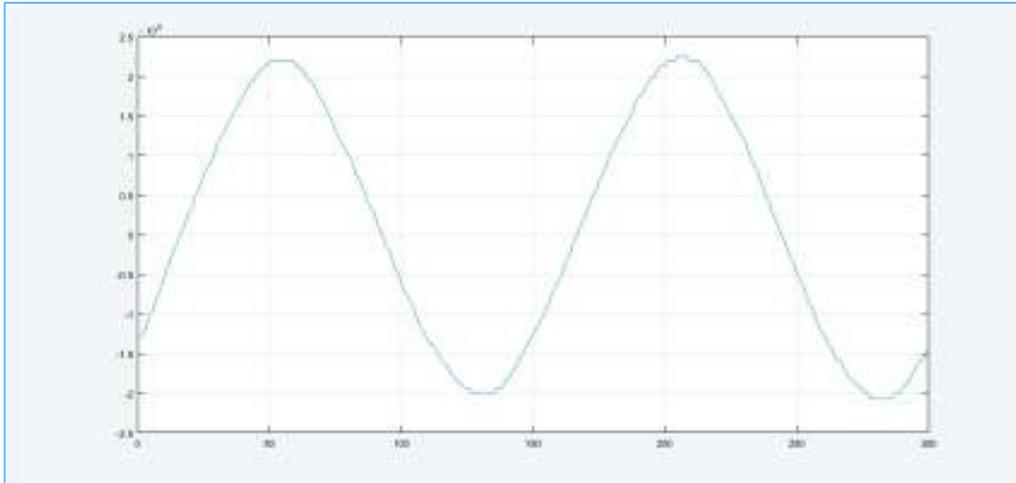


Figura 3.19 Forma de onda de corriente para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

3.2.2. Filtrado de señales eléctricas

El software Matlab dispone de un comando basado en el filtro Savitzky-Golay. Este método otorga una característica similar a los datos de entrada, pero suavizada; lo cual resulta de mucha utilidad debido a que las señales de voltaje y corriente medidas tienen una cierta cantidad de ruido que distorsiona aún más las señales y dificulta su análisis.

La principal ventaja de esta aproximación es que tiende a preservar características de la distribución inicial otorgando una señal de similares características.

De esta manera, empleando el comando "sgolayfilt" de Matlab es posible realizar este filtrado de manera simple y rápida.

A continuación se puede observar las señales obtenidas, después de emplear el método de filtrado.

3.2.2.1. Señales eléctricas tomadas del horno de arco EAF (Electric Arc Furnace)

Utilizando la herramienta de filtrado mencionada anteriormente se obtienen las siguientes señales de voltaje y corriente para el horno de arco eléctrico en la condición de arco activo y arco estable.

- **Fundición Inicial (Arco Activo).**

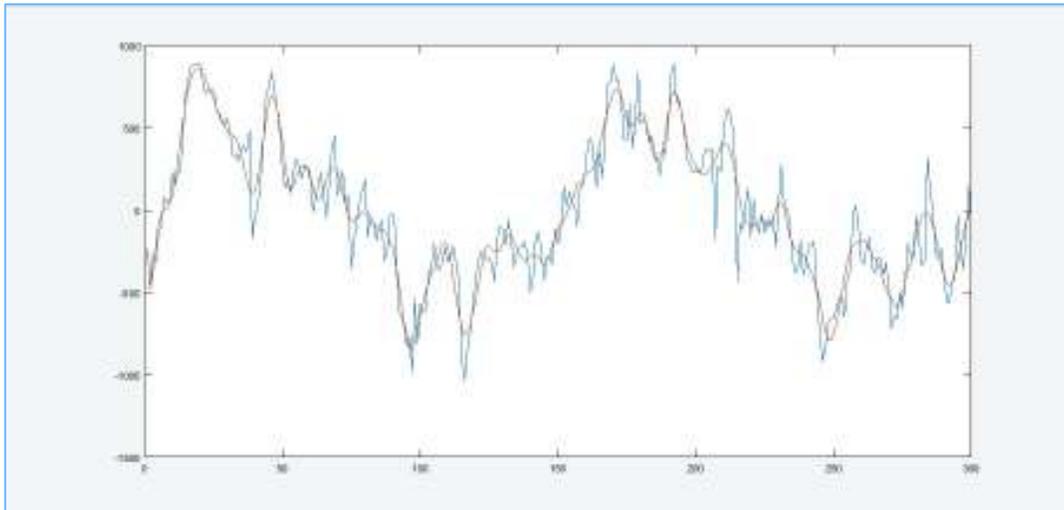


Figura 3.20 Forma de onda de voltaje filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

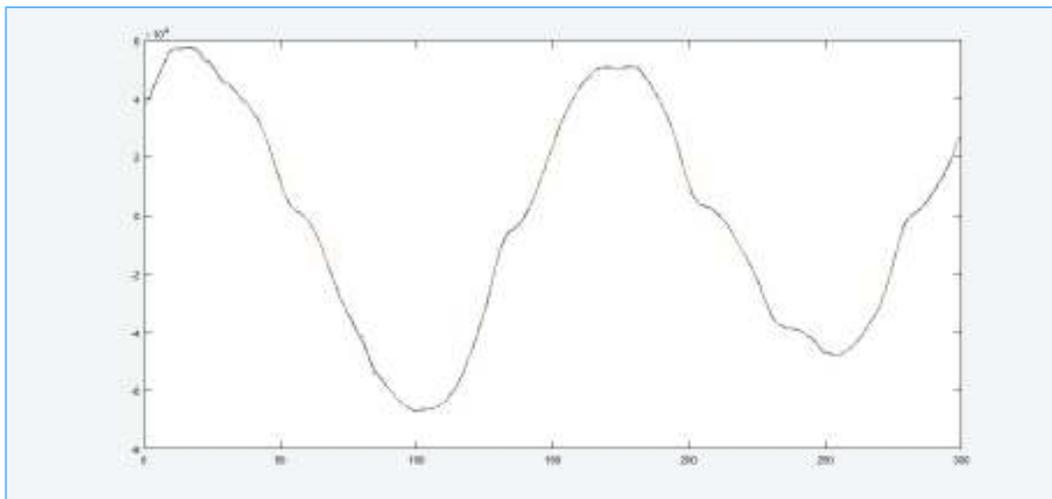


Figura 3.21 Forma de onda de corriente filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

Se puede observar en rojo las señales filtradas superpuestas a las señales originales, con una forma de onda suavizada que conserva las mismas características que la señal original.

- **Refinamiento (Arco Estable).**

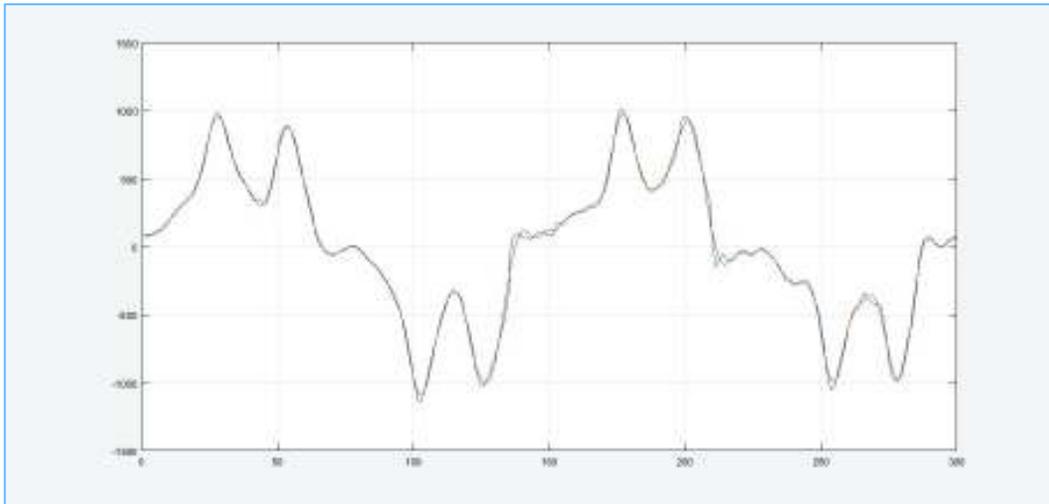


Figura 3.22 Forma de onda de voltaje filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

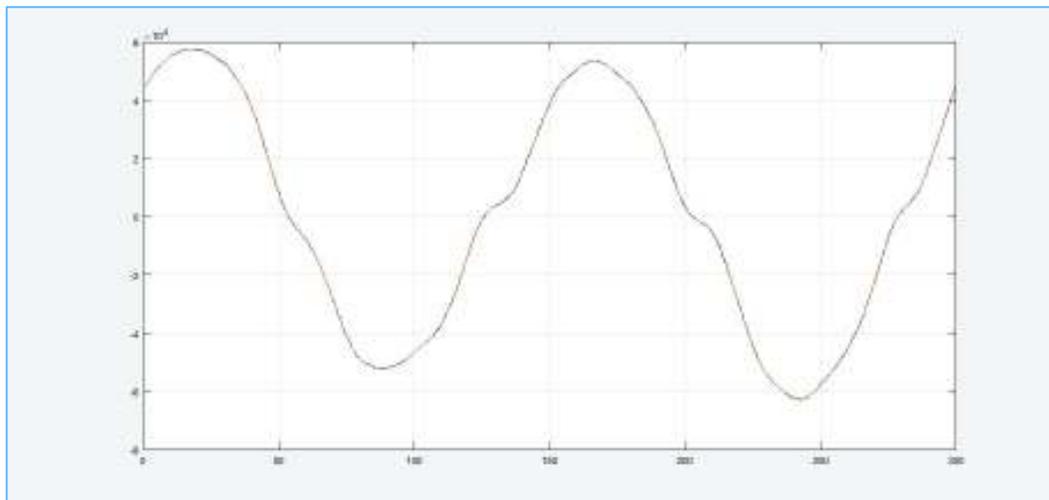


Figura 3.23 Forma de onda de corriente filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

3.2.2.2. Señales eléctricas tomadas del horno de arco LF (Ladle Furnace)

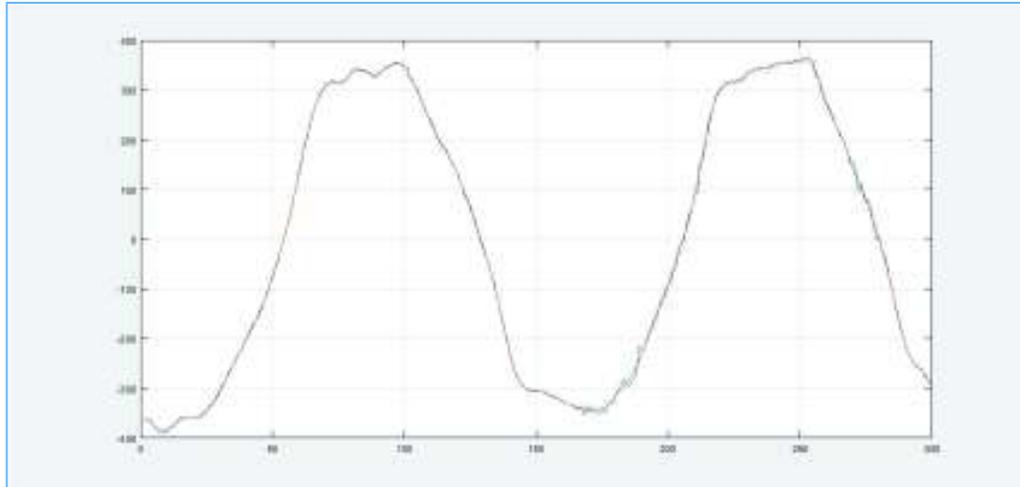


Figura 3.24 Forma de onda de voltaje filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

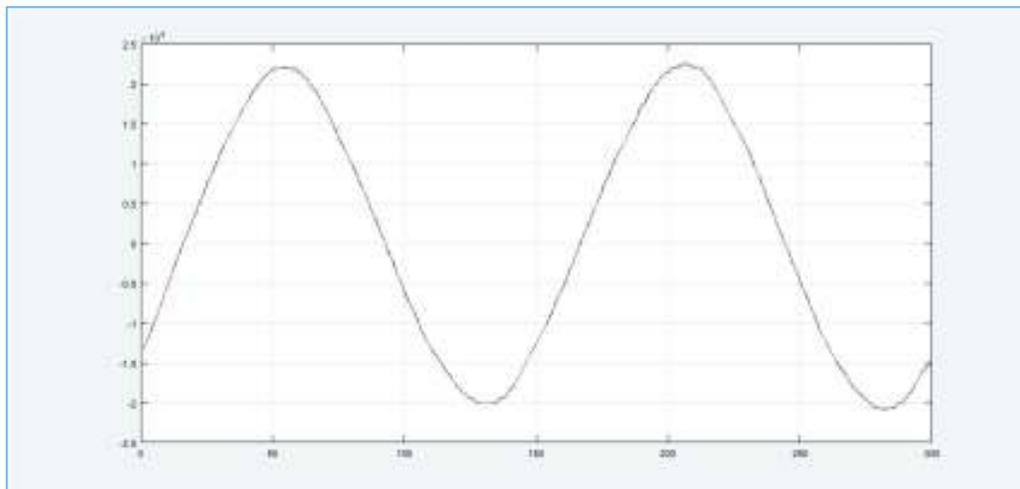


Figura 3.25 Forma de onda de corriente filtrada para una fase. (2 ciclos a 60 Hz).

3.3. Contenido armónico de corriente de los hornos de arco eléctrico

Dentro de la norma IEEE 519 – 1992 se establece que en un horno de arco eléctrico las mediciones de armónicos, para componentes de orden entero, en específico los componentes de bajo orden, tienen preponderancia por sobre los componentes de orden no entero. [1]

En la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 se analiza el contenido armónicos de los hornos EAF (Electric Arc Furnace) y LF (Ladle Furnace), obtenido a partir de la descomposición de las señales de corriente en su componente fundamental más sus componentes armónicas. Esto se ha

logrado con ayuda de la herramienta FFT (Fast Fourier Transform), disponible en Matlab/Simulink.

Tabla 3.1 Contenido armónico de corriente en el horno de arco (EAF) en dos fases de un ciclo de fundición.

	Orden de Armónico					
Condición del Horno	2	3	4	5	6	7
Fundición Inicial (Arco Activo)	6,7	7,8	2,5	6,2	1,2	3,1
Refinamiento (Arco Estable)	4,33	6,78	1,78	5,44	1,07	2,96

El contenido armónico especificado se encuentra detallado únicamente para los armónicos predominantes, los cuales se encuentran entre los componentes de orden 2 y 7. Los valores especificados en la Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 están dados en porcentaje con respecto a la componente fundamental de corriente.

Para el horno EAF, se puede apreciar que para la condición de fundición inicial (arco estable) existe una mayor incidencia de los componentes armónicos que con respecto a los armónicos generados para la condición de refinamiento (arco estable).

Por otro lado, dado que el horno de arco LF se utiliza para realizar un proceso de refinamiento secundario donde se gradúa el proceso químico del acero, este horno de menor capacidad y potencia mantiene una respuesta de arco estable a lo largo de su proceso el cual dura aproximadamente entre 10 a 15 minutos, las mediciones reflejan un contenido armónico más estable.

Tabla 3.2 Contenido armónico de corriente en el horno de arco (LF) en ciclo de fundición.

	Orden de Armónico					
Condición del Horno	2	3	4	5	6	7
Refinamiento (Arco Estable)	1,19	3,27	1,25	1,53	1,1	0,78

3.4. Modelación del sistema eléctrico de la planta de Adelca con sede en Alóag

El sistema eléctrico de Adelca es alimentado desde la subestación Santa Rosa con una línea de 138 kV de 14,5 km de longitud con conductor 350 MCM ACAR. Este sistema tiene tres niveles en alto (138 kV), medio (23 kV) y bajo voltaje (0,44 kV) y barras con voltaje variable que alimentan a los Hornos EAF (0,633 - 1 kV) y LF (0,115 – 0.38 kV). [16]

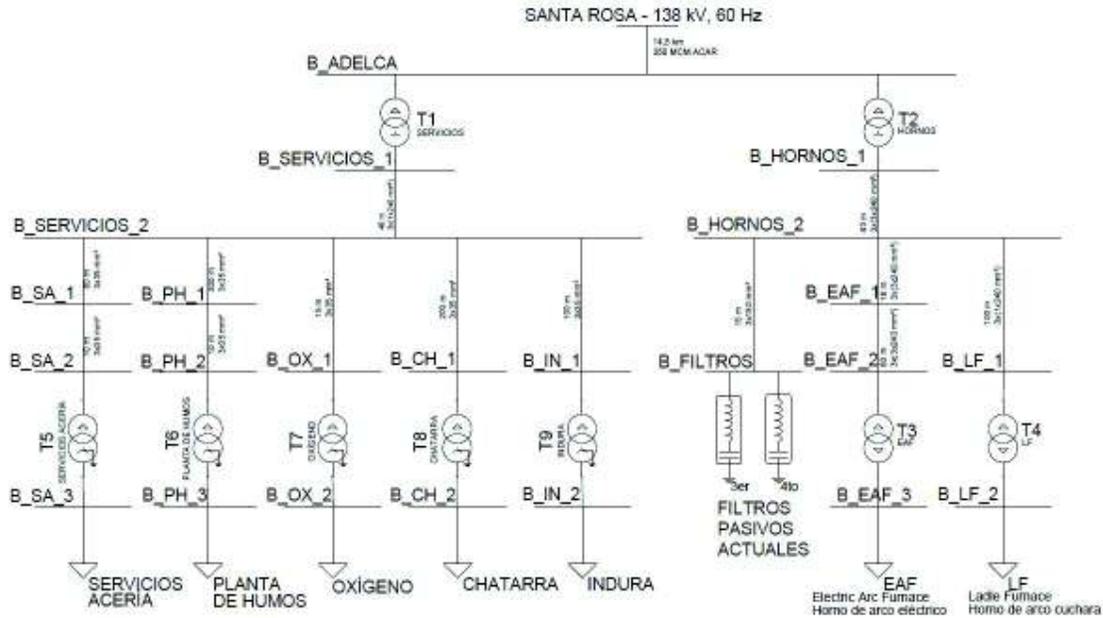


Figura 3.26 Diagrama unifilar de la planta Adelca con sede en Alóag.

El diagrama unifilar mostrado en la Figura 3.26 se encuentra disponible a mayor escala en el ANEXO X.

Para la modelación del sistema eléctrico de Adelca es necesario definir los principales parámetros de los elementos que constituyen su red, esto permitirá visualizar una respuesta total con los modelos de los hornos de arco definidos en secciones venideras.

En la Tabla 3.3 se puede visualizar los parámetros utilizados para la modelación del equivalente de la red externa en el punto de conexión, es decir; en la barra de 138 kV.

Esta información está disponible en los cálculos de cortocircuitos corridos para la barra de la S/E Santa Rosa de 138 kV, cuya información se encuentra disponible en el ANEXO VI, ANEXO VII, ANEXO VIII y ANEXO IX.

Tabla 3.3 Equivalente de la red externa. [16]

Equivalente de la red externa.					
Máximas corrientes			Mínimas Corrientes.		
Sk" max	3586,1	MVA	Sk" max	3148,9	MVA
Ik" max	15,003	kA	Ik" max	13,174	kA
R/X	0,51/5,84	0,08732877	R/X	0,63/6,01	0,10482529
Impedancia	Relación	Valor	Impedancia	Relación	Valor
Z2/Z1 max	5,84/5,84	1	Z2/Z1 max	6,05/6,05	1
X0/X1 max	3,12/5,82	0,53608247	X0/X1 max	3,18/6,01	0,52911814
R0/X0 max	0,21/3,12	0,06730769	R0/X0 max	0,27/3,18	0,08490566

La información para la modelación de los transformadores se puede apreciar en la Tabla 3.4, para lo cual se ha resumido los valores de voltaje en su lado primario y secundario, potencia aparente, impedancia de cortocircuito y la conexión de cada uno de los transformadores trifásicos utilizados en los distintos ramales del sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag.

Todos los transformadores tienen taps fijos con pasos de $\pm 2 \times 2,5$, con excepción de los transformadores de los hornos de arco eléctrico (EAF y LF), los cuales disponen de taps bajo carga.

Tabla 3.4 Parámetros de transformadores. [16]

NOMBRE	REFERENCIA	A. V. [kV]	B. V. [kV]	Sn [MVA]	Zcc [%]	CONEXIÓN
T1	Servicios	138	23	45	11,8	Dy1
T2	Hornos	138	23	50	10,43	Dy1
T3	Horno EAF	23	0,633- 1	50	8,38	Dd0
T4	Horno LF	23	0,115- 0,380	10,5	8,92	Dd0
T5	Servicios acería	23	0,44	3,2	6	Dyn11
T6	Planta de humos	23	0,44	2,5	5,78	Dyn11
T7	Oxígeno	23	0,44	2,5	5,78	Dyn11
T8	Chatarra	23	0,44	2,5	5,78	Dyn11
T9	Indura	23	2,4	2	5,7	Dyn11

Para modelar las secciones de conductores del sistema de media tensión de Adelca se hace uso de las de las tablas Tabla 3.5 y Tabla 3.6. La primera tabla muestra los tramos y longitudes del conductor subterráneo.

Tabla 3.5 Calibre y longitud de cable subterráneo por tramos. [16]

TRAMO	CALIBRE	LONGITUD [m]
B_SERV_1 / B_SERV_2	3x(1x240 mm ²)	46
B_SERV_2 / B_SA_1	3x35 mm ²	80
B_SA_1 / B_SA_2	3x35 mm ²	10
B_SERV_2 / B_PH_1	3x35 mm ²	300
B_PH_1 / B_PH_2	3x35 mm ²	10
B_SERV_2 / B_OX_1	3x35 mm ²	15
B_SERV_2 / B_CH_1	3x35 mm ²	200
B_SERV_2 / B_IN_1	3x35 mm ²	100
B_HORNOS_1 / B_HORNOS_2	3x(3x240 mm ²)	40
B_HORNOS_2 / B_FILTROS	3x150 mm ²	15
B_EAF_1 / B_EAF_2	3x(3x240 mm ²)	18
B_EAF_2 / B_EAF_3	3x(3x240 mm ²)	80
B_HORNOS_2 / B_LF_1	3x(1x240 mm ²)	100

La Tabla 3.6 muestra los parámetros de las impedancias de los cables que están dispuestos en los diferentes tramos de la planta industrial.

Tabla 3.6 Parámetros de los cables subterráneos. [16]

CALIBRE	IMPEDANCIA sec (+)		IMPEDANCIA sec (0)	
	R1 [Ω/km]	X1 [Ω/km]	R0 [Ω/km]	X0 [Ω/km]
3x(1x240 mm ²)	0,09095	0,15718	0,2687	2,95321
3x(3x240 mm ²)	0,03032	0,05494	0,20807	2,15883

3x35 mm ²	0,62099	0,16078	0,79467	3,43138
3x70 mm ²	0,32104	0,76398	0,49374	3,33936
3x150 mm ²	0,15454	0,69602	0,32526	3,21402

La Tabla 3.7 dispone de la información necesaria para modelar las distintas cargas que se encuentran en la planta industrial de Adelca con sede en Alóag, de las cuales las más representativas son los hornos de arco eléctrico, EAF (Electric Arc Furnace) y LF (Ladle Furnace).

Tabla 3.7 Demanda P y Q de las cargas. [16]

NOMBRE	VOLTAJE [V]	TRANSFORMADOR ASOCIADO	P. ACTIVA P [MW]	P. REACTIVA Q [MVAR]
HORNO EAF	633 - 1000	T3	26,4	19,8
HORNO LF	115-380	T4	5,3	2,8
SERVICIOS ACERIA	440	T5	2	1,5
PLANTA DE HUMOS	440	T6	1,2	0,9
OXÍGENO	440	T7	2,2	1,65
CHATARRA	440	T8	1,5	1,125
INDURA	2400	T9	1,05	0,78

La modelación de los componentes de la red interna de Adelca ha sido realizada introduciendo los parámetros establecidos en las tablas anteriores a fin de poder modelar: transformadores, cargas existentes, tramos de cable, la red equivalente externa en el punto de conexión, etc.

La Figura 3.27 muestra la modelación de la planta de Adelca con sede en Alóag en el software computacional Matlab/Simulink, acorde a las tablas de parámetros eléctricos establecidos anteriormente.

La Figura 3.27 incluye los modelos de los hornos de arco en dos subsistemas y también un modelo de los filtros pasivos diseñados. Tanto la modelación de los hornos de arco como el diseño de los filtros pasivos son temas que serán abordados con más detalle en secciones venideras.

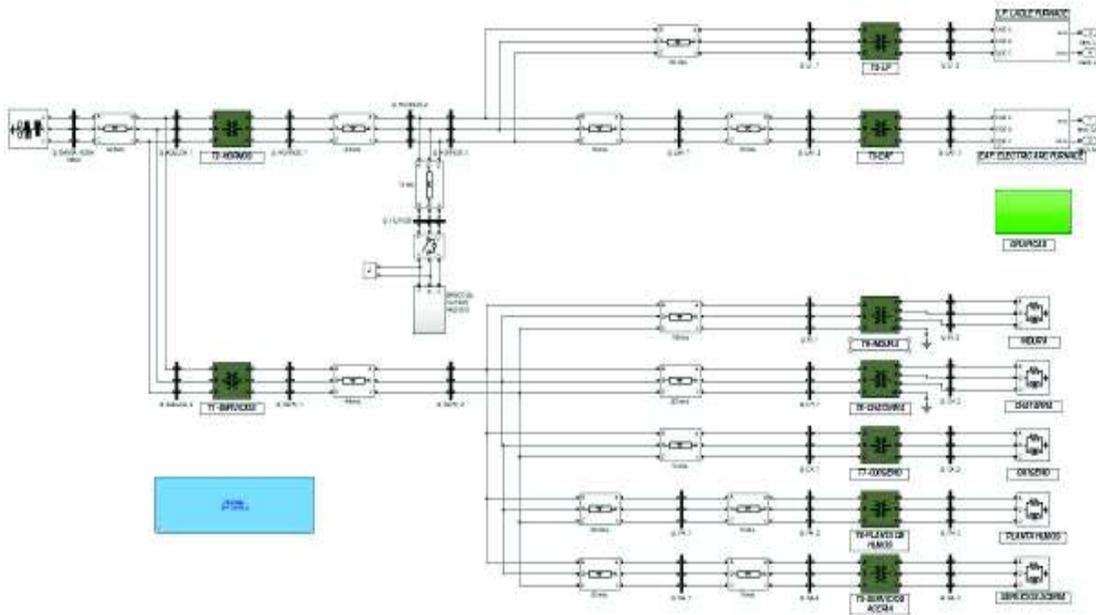


Figura 3.27 Planta de Adelca con sede en Alóag modelado en Matlab/Simulink.

El ANEXO XI contiene una vista ampliada a mayor escala del modelo desarrollado en Matlab/Simulink en la Figura 3.27.

3.5. Modelación de los hornos de arco eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag

En esta sección se usan distintos modelos para simular el comportamiento de las cargas no lineales, es decir; el horno de arco eléctrico (EAF) y el horno de arco cuchara (LF). El método de modelación es el uso de modelos convencionales establecidos en base a expresiones matemáticas para cada modelo.

Dentro de esta metodología se analizarán tres modelos convencionales los cuales serán abordados a continuación.

3.5.1. Modelos de horno de arco eléctrico

La modelación del horno de arco eléctrico no resulta sencillo de realizar debido al comportamiento estocástico y no lineal que mantiene en el tiempo. Existen varios modelos

los cuales pueden ser usados para modelar el horno de arco eléctrico de manera aproximada. Usar estos modelos permite analizar la característica estática y dinámica del horno de arco eléctrico.

En la característica estática se considera una longitud de arco constante, por lo que no ocurren variaciones de voltaje que produzcan un efecto de flicker (parpadeo eléctrico). Ésta característica estática se considera en la fase que se produce un arco más estable, es decir; en la fase de refinamiento.

Sin embargo, en la condición de característica dinámica; se consideran los cambios en la longitud de arco que suceden durante el proceso de fundición debido a la característica no lineal del horno de arco eléctrico. Es por esto que la corriente de arco cambia constantemente causando variación de voltaje y por tanto un problema de efecto de parpadeo eléctrico. Estas variaciones de voltaje varían en el rango de 4 Hz hacia los 10 Hz y estos cambios pueden causar molestias visuales dado que puede ser percibido por el ojo humano.

Seguidamente, se muestran los modelos incorporados en el software Matlab/Simulink, por lo cual; varios de los bloques y funciones utilizados pueden ser encontrados en el ANEXO XV.

3.5.1.1. Modelo Exponencial

En este modelo la característica de voltaje-corriente se aproxima a una función exponencial y puede ser descrito como se detalla en la ecuación siguiente:

$$V(i) = Vat. \left(1 - e^{-\frac{i}{I_0}}\right). \text{sign}(i)$$

Ecuación 3.1 Ecuación para el modelo exponencial. [17]

Donde:

V(i): Voltaje de arco en función de la corriente de arco.

i: Corriente de arco.

I₀: Constante empleada para modelar la inclinación de las corrientes positiva y negativa.

Vat: Es el voltaje de referencia que depende de la longitud del arco.

La Figura 3.28 muestra el modelo exponencial en base a la Ecuación 3.1 que ha sido implementado con ayuda de varios bloques matemáticos dentro de la biblioteca de

Simulink.

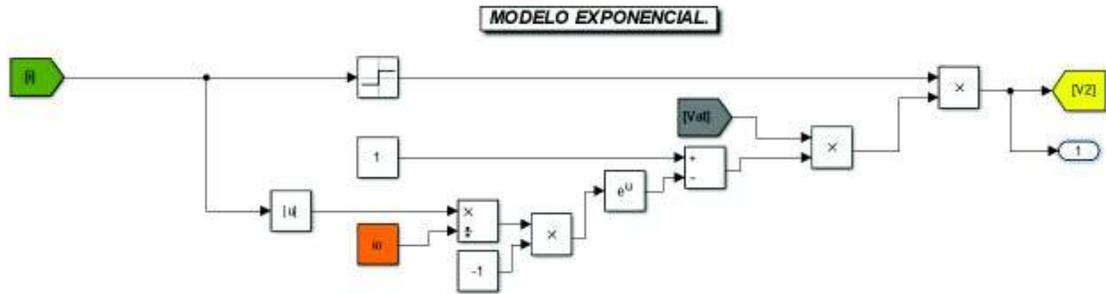


Figura 3.28 Modelo exponencial implementado en Matlab/Simulink.

La relación entre la longitud de arco y el voltaje de referencia está definido por la ecuación:

$$Vat0 = A + B.l$$

Ecuación 3.2 Voltaje de referencia. [17]

Donde:

Vat0: Es el voltaje de referencia que depende de la longitud del arco.

A: Constante evaluada como la suma de la caída de tensión para ánodo y cátodo.

B: Constante definida como la caída de tensión que depende de la longitud de arco.

l: Longitud de arco.

La Figura 3.29 muestra un bloque implementado a partir de la Ecuación 3.2 que evalúa el voltaje de referencia para la característica estática del modelo de horno de arco.

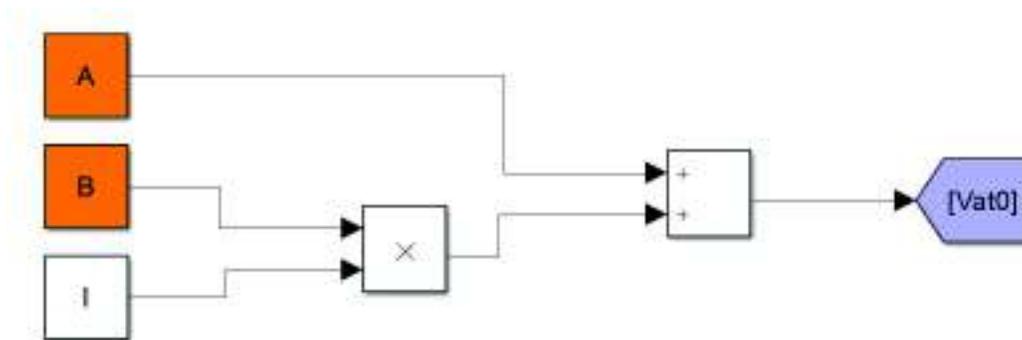


Figura 3.29 Bloque implementado para Vat0 en Matlab/Simulink.

Se ha considerado una longitud de arco de 23,1 cm para el horno de arco eléctrico (EAF) y una longitud de arco de 18,3 cm para el horno de arco cuchara (LF).

Para lograr la simulación de la característica dinámica del modelo de horno de arco, se utilizarán las ecuaciones expuestas a continuación. En este caso, se puede ver un valor de voltaje de referencia $Vat(t)$ variable en el tiempo debido a las variaciones de voltaje provocadas en el ciclo inicial de fundición. Este efecto es de carácter estocástico y variable en el tiempo. Las variaciones del voltaje se pueden simular mediante una variación de voltaje sinusoidal o mediante una variación de voltaje aleatorio.

En la Ecuación 3.3 se muestra la variación de voltaje sinusoidal, la cual tiene que ser graduado para una frecuencia de flicker (ω_f) tomando en cuenta la ecuación siguiente:

$$Vat(t) = Vat0.(1 + m.sen(\omega_f.t))$$

Ecuación 3.3 Ecuación para simulación de variación de voltaje sinusoidal. [17]

Para el caso de la simulación de la variación de voltaje sinusoidal se utiliza una frecuencia de parpadeo eléctrico de entre 0 y 15 Hz.

En la Ecuación 3.4 se puede apreciar la expresión $N(t)$, la cual genera una señal aleatoria a través de un generador de ruido blanco.

$$Vat(t) = Vat0.(1 + m.N(t))$$

Ecuación 3.4 Ecuación para simulación de variación de voltaje aleatorio. [17]

Donde:

$Vat(t)$: Voltaje de referencia variable en el tiempo

$Vat0$: Voltaje de referencia.

m : Índice de modulación.

ω_f : Frecuencia de parpadeo.

$N(t)$: Fuente de ruido blanco.

En la Ecuación 3.4 se muestra el caso de la variación de voltaje aleatorio. Para esto se utiliza una fuente de ruido blanco $N(t)$ definida para una frecuencia de 4 a 10 Hz, para que simule el efecto de las variaciones de voltaje.

La Figura 3.30 muestra el diagrama de bloques realizado en Matlab/Simulink acorde a la Ecuación 3.3 y la Ecuación 3.4. En este bloque podemos apreciar que la salida Vat depende del voltaje de referencia ($Vat0$), el índice de modulación (m) y las fuentes sinusoidal ó aleatoria independientemente. Se ha considera un factor de modulación de $m = 0,5$.

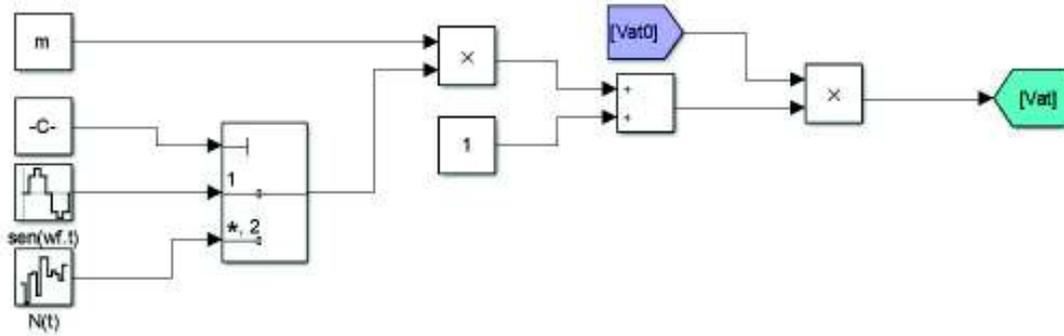


Figura 3.30 Bloque para simulación de variaciones de voltaje sinusoidal $sen(\omega_f.t)$ y aleatorio $N(t)$ implementado en Matlab/Simulink.

3.5.1.2. Modelo Hiperbólico

La característica voltaje-corriente del modelo hiperbólico del horno de arco eléctrico puede ser descrito como:

$$V(i) = Vat + \left(\frac{Ci,d}{Di,d + |i|} \right) \cdot sign(i)$$

Ecuación 3.5 Ecuación para el modelo hiperbólico. [17]

Donde:

$V(i)$: Voltaje de arco en función de la corriente de arco.

i : Corriente de arco.

Vat : Es el voltaje de referencia que depende de la longitud del arco.

Ci,d : Son constantes que determinan la corriente de arco.

Di,d : Son constantes que determinan la potencia del arco.

El subíndice (i) representa el incremento en la corriente y el subíndice (d) representa la disminución en la corriente. De esta manera es necesario determinar el valor que la constante tomará de acuerdo al incremento o decremento de la corriente de arco en cada semiciclo.

La Figura 3.31 muestra el modelo hiperbólico en base a la Ecuación 3.5 que ha sido implementado. Para este modelo se toma en cuenta que la constante Di,d un mismo valor para el incremento o decremento de la corriente, mientras la constante Ci,d asume un valor distinto para cada caso.

$$V(i) = \begin{cases} V_{at} + \left(\frac{C_{i,d}}{D_{i,d} + |i|} \right) \cdot \text{sign}(i); & \frac{di}{dt} \geq 0 \\ V_{at} \cdot \left(1 - e^{-\frac{i}{I_0}} \right) \cdot \text{sign}(i); & \frac{di}{dt} < 0 \end{cases}$$

Ecuación 3.6 Ecuación para el modelo exponencial-hiperbólico. [17]

Donde:

V(i): Voltaje de arco en función de la corriente de arco.

i: Corriente de arco.

I₀: Constante empleada para modelar la inclinación de las corrientes positiva y negativa.

V_{at}: Es el voltaje de referencia que depende de la longitud del arco eléctrico.

C_{i,d}: Son constantes que determinan la corriente de arco.

D_{i,d}: Son constantes que determinan la potencia del arco.

El subíndice (i) representa el incremento en la corriente y el subíndice (d) representa la disminución en la corriente.

Al ser este modelo una combinación de los modelos citados anteriormente, se evalúa su respuesta individual para obtener una única salida del bloque a partir de los modelos exponencial e hiperbólico como se aprecia en la Figura 3.32.

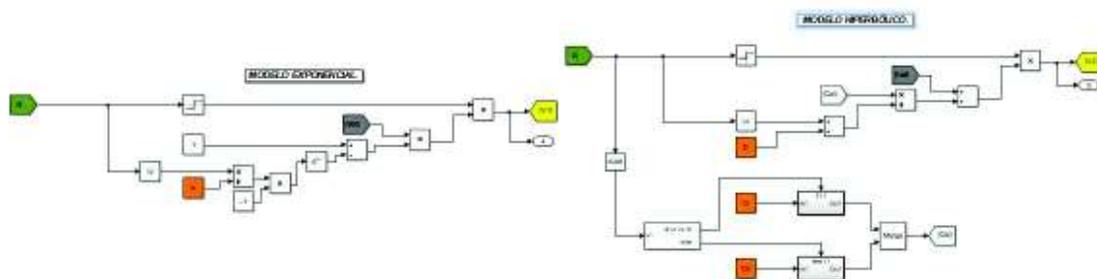


Figura 3.32 Modelos implementados en Matlab/Simulink. Exponencial e Hiperbólico.

En el modelo exponencial-hiperbólico, el incremento de corriente está definido como una función hiperbólica y el decrecimiento de corriente está definido como una función exponencial.

Dada esta condición, la salida del bloque de este modelo exponencial-hiperbólico será el resultado de conmutar entre un modelo y otro en base al aumento $\left(\frac{di}{dt} \geq 0 \right)$ o la

disminución $\left(\frac{di}{dt} < 0\right)$ de la corriente de arco. Esta acción se puede apreciar en el bloque implementado en la Figura 3.33, donde el bloque “if”, evalúa la salida del bloque de derivada (du/dt) proveniente del terminal de la señal de corriente de arco (i). El bloque “Merge” une las salidas del bloque “if” para obtener una sola salida.

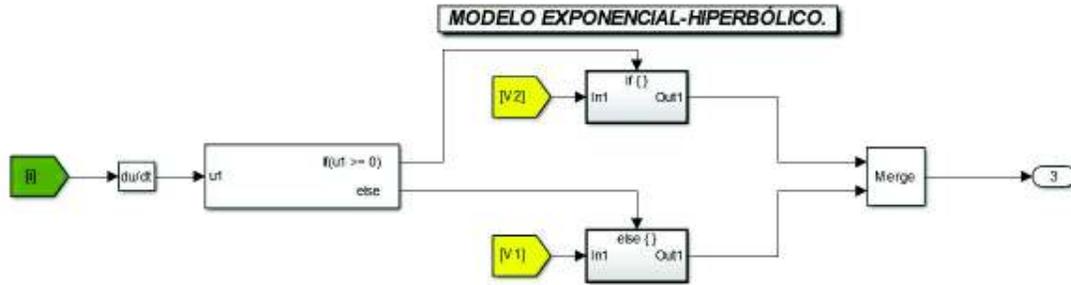


Figura 3.33 Salida del bloque del modelo exponencial-hiperbólico.

Para la simulación del comportamiento dinámico del horno se utilizan las mismas ecuaciones expuestas en el modelo exponencial e hiperbólico.

$$Vat(t) = Vat. (1 + m. sen(w. t))$$

$$Vat(t) = Vat. (1 + m. N(t))$$

Donde:

Vat(t): Voltaje de referencia variable en el tiempo

Vat0: Voltaje de referencia.

m: Índice de modulación.

ω : Frecuencia de parpadeo.

N(t): Fuente de ruido blanco.

3.5.2. Estimación de parámetros de los modelos de horno de arco eléctrico a partir de mediciones reales

Los modelos incorporan varios parámetros que han sido considerados para adquirir una respuesta en corriente aproximada a la real.

Para la estimación de parámetros del horno de arco eléctrico (EAF), se utilizará la información de las mediciones reales realizadas en la etapa de afino del proceso de fundición para la elaboración de una colada de acero del horno de arco eléctrico (EAF).

En cuanto a la estimación de parámetros del horno cuchara (LF), se utiliza la información de las mediciones realizadas durante el periodo de operación de dicho horno que son aproximadamente entre 10 a 15 minutos.

La estimación de parámetros para los hornos de arco se ha realizado para obtener una respuesta aproximada a la información de la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 que muestran el contenido armónico de corriente en el horno de arco (EAF) y el horno cuchara (LF) en dos fases de un ciclo de fundición.

Tras recurrir al uso del módulo denominado "Parameter Estimation" de Simulink se logrará estimar los principales parámetros involucrados en los modelos, partiendo de valores típicos para inicializar dichas variables hasta llegar a una solución que satisfaga de forma aproximada las mediciones reales para el horno de arco eléctrico (EAF) y el horno de arco de cuchara (LF).

Los valores típicos normalmente utilizados se tabulan y se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Valores típicos de parámetros para los modelos exponencial, hiperbólico y exponencial-hiperbólico.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>VALOR</i>	<i>UNIDAD</i>
A	40	V
B	10	V/cm
Ci	190	kW
Cd	39	kW
Di,d	5	kA
Io	20	kA

Para inicializar los parámetros de los modelos de horno de arco eléctrico se accede a "Model Workspace" a través de la pestaña "Model Explorer" pulsando la pestaña del ícono como se aprecia en la Figura 3.34.

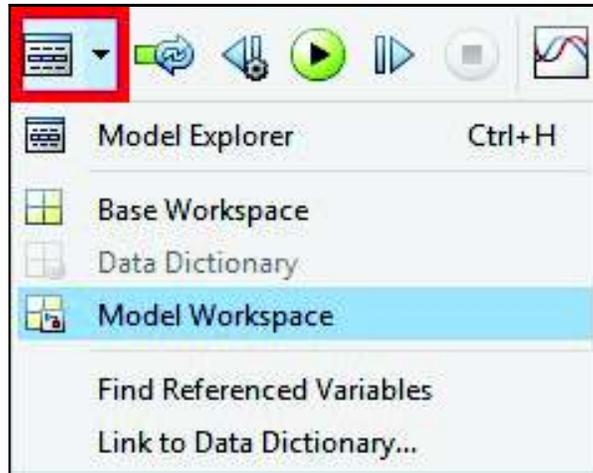


Figura 3.34 Acceso a Model Workspace.

Los parámetros de los modelos planteados en la sección 3.5.1. se inicializan acorde a los valores típicos de los parámetros establecidos en la Tabla 3.8. Para esto se escriben los valores de las variables tratadas en los modelos mencionados, de tal manera que sea posible definir un experimento para comenzar la estimación de parámetros. La Figura 3.35 muestra el código escrito para declarar las variables en el "Model Workspace" para inicializar los parámetros de los modelos.

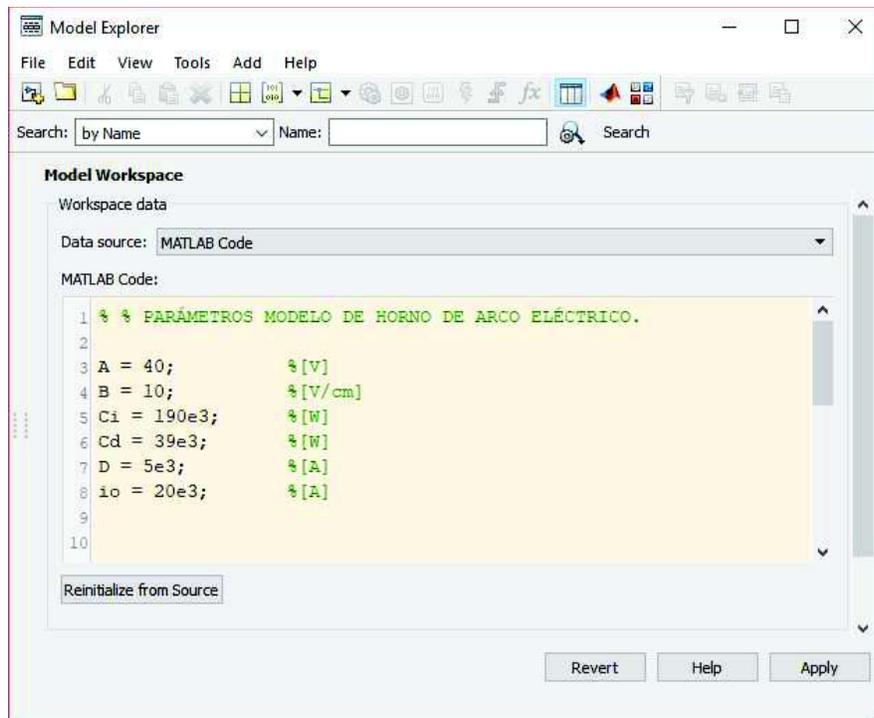


Figura 3.35 Parámetros inicializados en el "Model Workspace".

3.5.2.1. Crear un experimento para la estimación de parámetros

Durante la estimación, los datos de entrada del experimento se utilizan para simular el modelo y se compara el resultado del modelo con los datos de salida del experimento medido. Simulink usa técnicas de optimización para estimar los parámetros del modelo. En cada iteración de optimización, simula el modelo con los valores actuales de los parámetros. De esta manera Simulink calcula y minimiza el error entre la salida simulada y medida. La estimación estará completa cuando el método de optimización encuentra un mínimo.

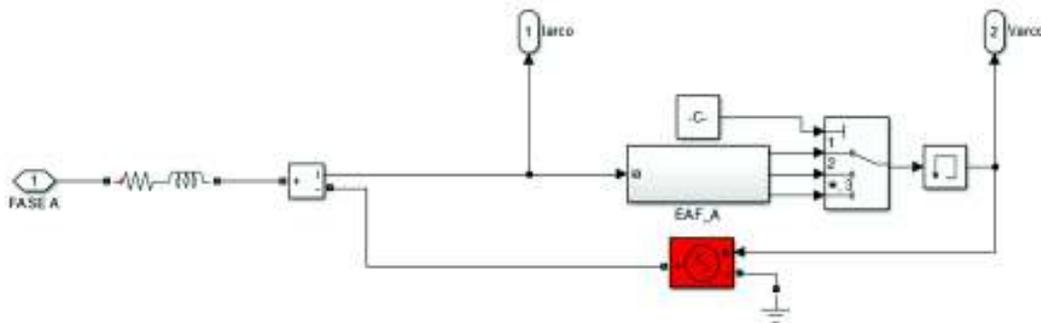


Figura 3.36 Modelo de horno de arco a ser estimado para una fase.

El bloque EAF de la Figura 3.36 contiene los modelos exponencial, hiperbólico y exponencial-hiperbólico descritos anteriormente. La salida del bloque EAF está conectado a un interruptor multipuerto, el cual entrega la señal de voltaje simulada de un solo modelo en función del valor que se especifique en su puerto de control.

El bloque en color rojo es una fuente de voltaje controlada la cual transforma la salida del interruptor multipuerto en una fuente de voltaje equivalente de corriente alterna, la cual se conecta directamente a la red de estudio. El acceso al módulo de estimación de parámetros de Simulink, se realiza a través de la opción "Analysis" del menú principal de Simulink.

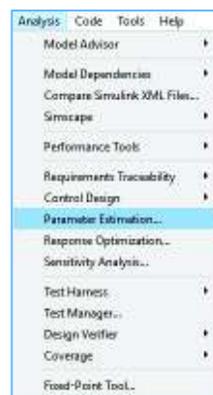


Figura 3.37 Acceso al módulo de estimación de parámetros.

Una vez que se accede al módulo de estimación de parámetros se debe crear y definir un nuevo experimento donde se precisa el tipo de modelo, los parámetros involucrados en el modelo y asignar las señales de entrada y salida para la estimación de parámetros.

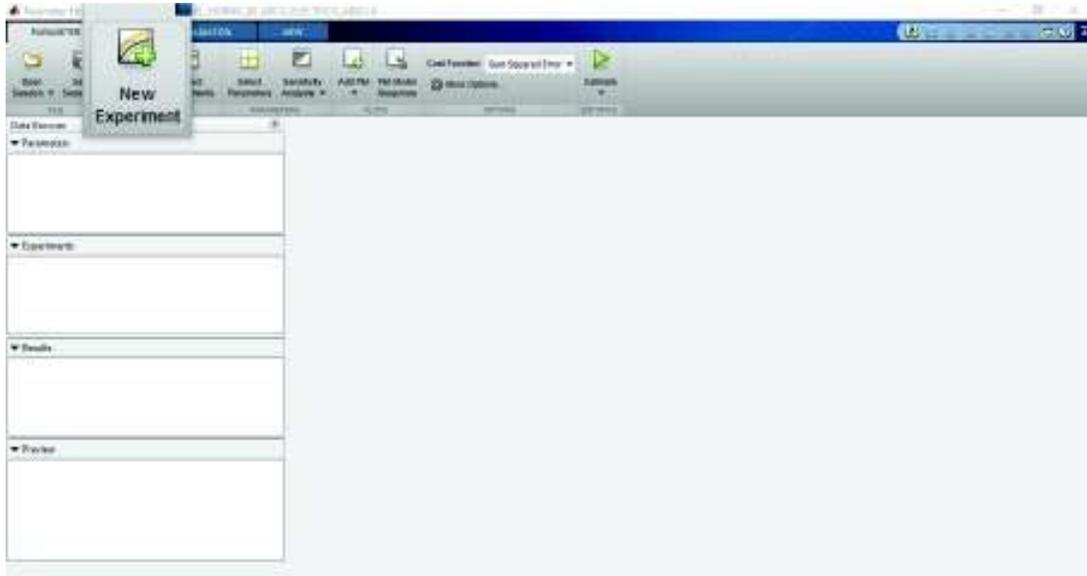


Figura 3.38 Módulo de estimación de parámetros.

3.5.2.2. Importar datos de mediciones y seleccionar la información

Para realizar la estimación de parámetros es necesario definir la señal medida para salida en base a la cual se hará la estimación de parámetros.

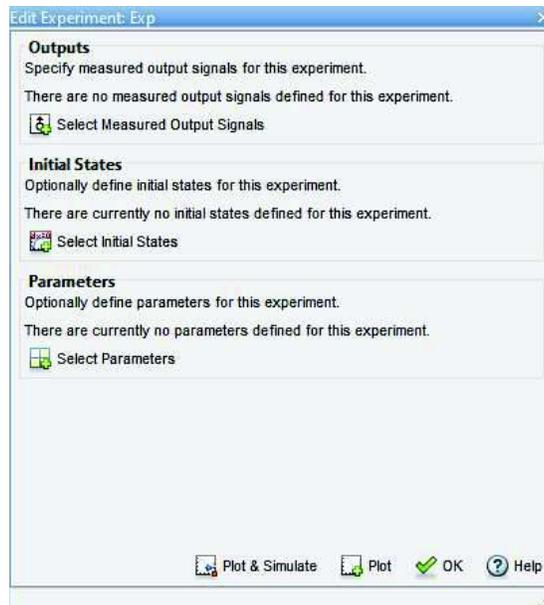


Figura 3.39 Módulo para editar el experimento creado.

En la opción "Outputs" se establece la salida simulada para la cual vamos a comparar la salida medida con la salida simulada a partir del ajuste de curvas. En este caso se establece como "salida" para el experimento de estimación de parámetros creado a la corriente de arco de los modelos. Esto debido a que el interés de la estimación de parámetros para el caso del presente estudio está en ajustar los valores de los parámetros para obtener una señal de corriente aproximada a las mediciones realizadas.

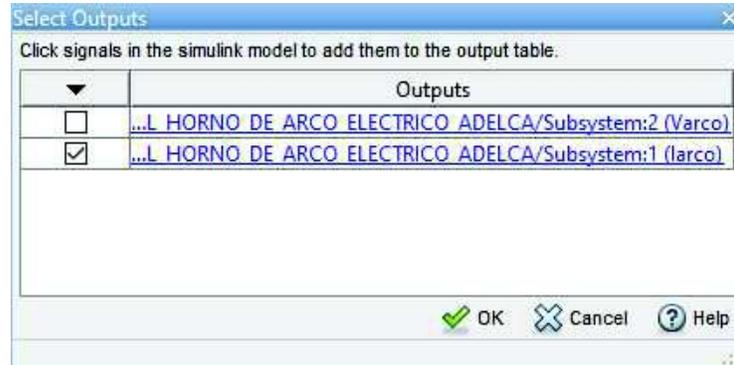


Figura 3.40 Módulo para seleccionar la salida a ser estimada en el experimento.

Entonces, se introduce la señal de corriente obtenida a través de mediciones y también se debe especificar un tiempo de muestreo para dicha señal. La señal medida debe ser grabada previamente a modo de vector como variable en el "Workspace".

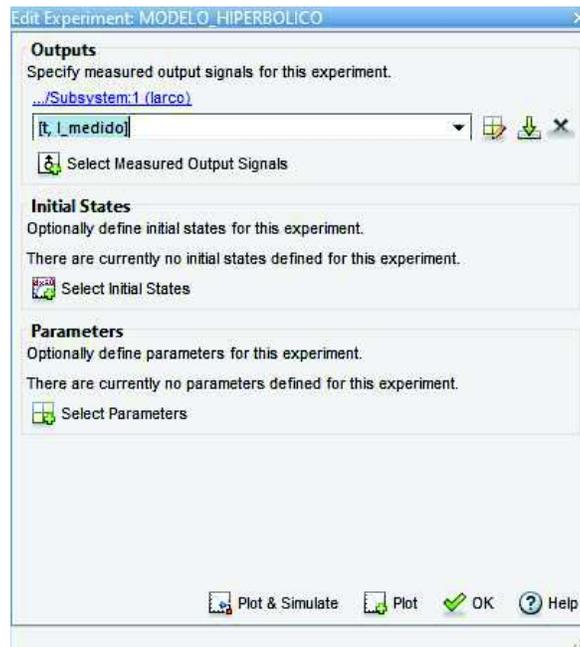


Figura 3.41 Módulo para seleccionar la salida a ser estimada en el experimento.

3.5.2.3. Especificación de los parámetros para la estimación

Para estimar los parámetros de un modelo, se especifica los parámetros para cada experimento. Es posible especificar los valores iniciales y los límites para cada parámetro. Alternativamente, se puede especificar un valor de parámetro como una cantidad conocida, que no debe ser estimada. [18]



Figura 3.42 Botón para seleccionar los parámetros del experimento.

Dado que se han establecido con anterioridad los parámetros de los hornos de arco, solo se debe escoger los parámetros para cada modelo de horno para el cual se necesite realizar la estimación.

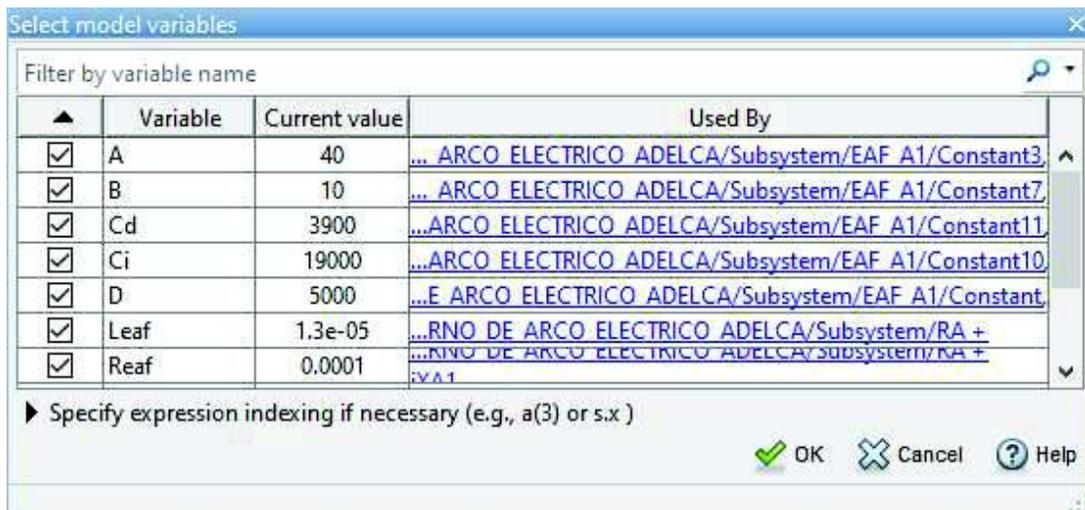


Figura 3.43 Selección de los parámetros del experimento para el modelo hiperbólico.

Los parámetros se han definido acorde a los valores típicos establecidos en la Tabla 3.8. A partir de estos valores la herramienta de optimización intentará variar los parámetros hasta llegar a una solución que satisfaga el experimento. [18]



Figura 3.44 Configuración de los parámetros del experimento para el modelo hiperbólico.

3.5.2.4. Iniciación de la estimación de parámetros en el experimento creado

El botón "Add Plot" agrega gráficas para visualizar el progreso de la estimación. De tal manera se puede visualizar la trayectoria de los parámetros en la estimación, así como el ajuste de la señal de corriente simulada con la señal de corriente real medida.



Figura 3.45 Botón para agregar una o varias graficas al experimento.

Una vez realizadas las configuraciones del experimento se inicia la estimación, mediante el botón "Estimate", como se muestra en la Figura 3.46.

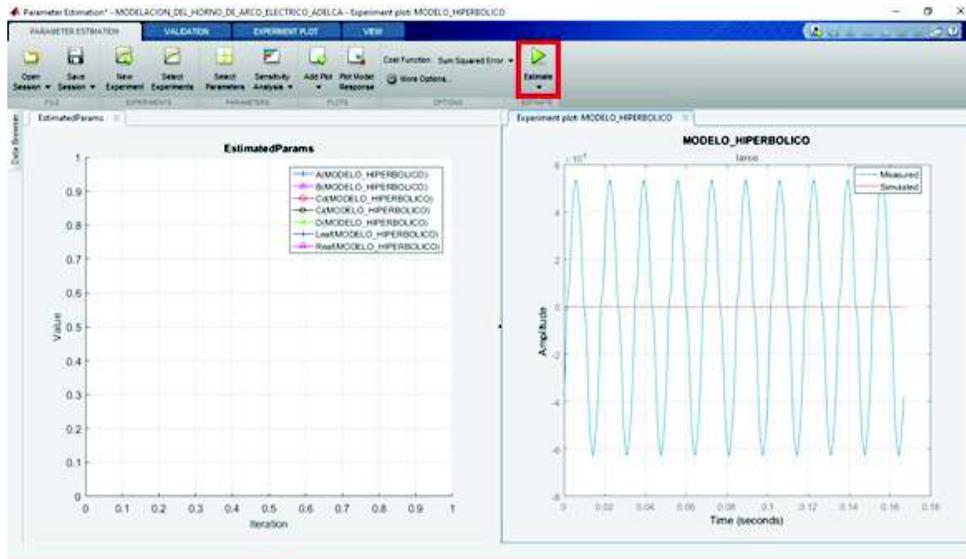


Figura 3.46 Iniciación de la estimación de parámetros.

Cuando se ha iniciado la estimación de parámetros el módulo de estimación realiza iteraciones continuas en las cuales varía el valor de los parámetros definidos, realizando simulaciones sucesivas de los modelos para ajustar la respuesta de la "salida" definida con las formas de onda de las mediciones realizadas.

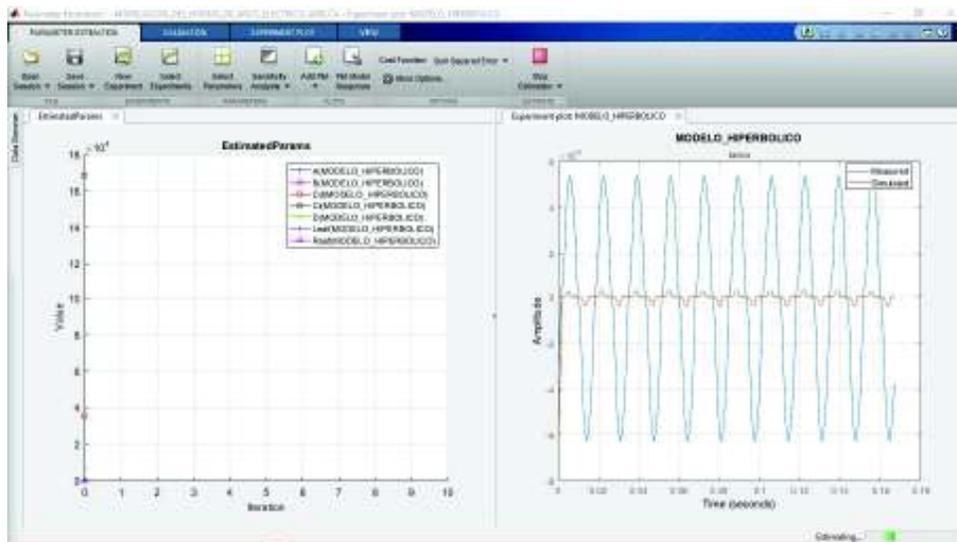


Figura 3.47 Progreso de la estimación de parámetros.

Las iteraciones progresivas muestran una variación en el valor de los parámetros, que se muestran en la simulación como una variación de la trayectoria de los parámetros cerca del valor original al cual fue preestablecido.

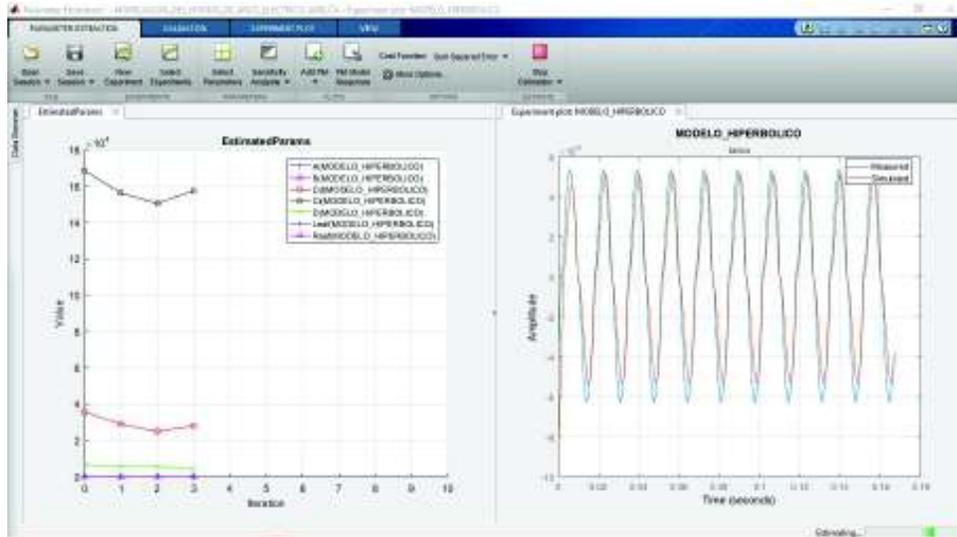


Figura 3.48 Progreso de la trayectoria de los parámetros.

Finalmente la solución de los parámetros del modelo converge en un punto en el que el error entre la simulación generada y la señal de corriente medida es mínima. Cuando esto sucede el módulo de estimación de parámetros nos permite guardar directamente los parámetros estimados, para realizar simulaciones con los nuevos parámetros.

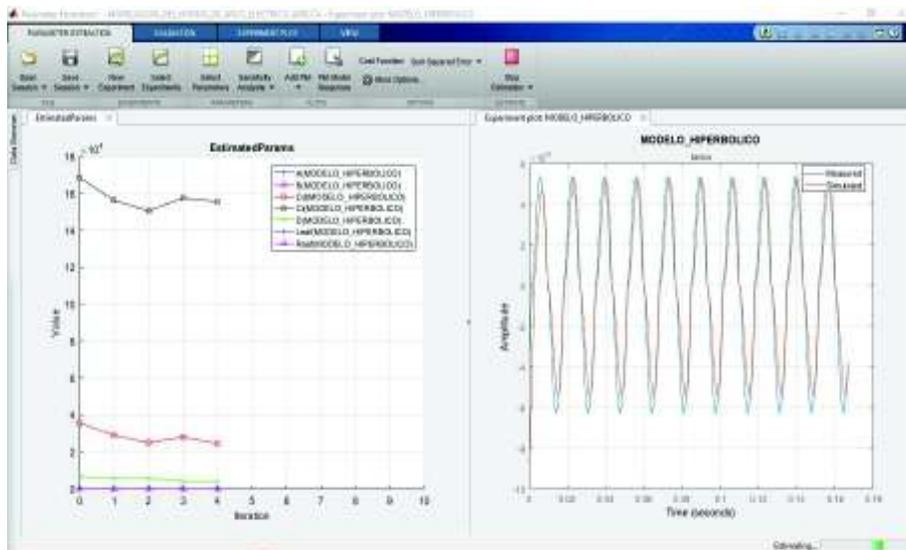


Figura 3.49 Progreso de la trayectoria de los parámetros.

La estimación de parámetros termina una vez que el módulo de estimación de parámetros encuentre los valores para los cuales los modelos minimizan el error de su respuesta con respecto a la señal real de las mediciones realizadas.

3.5.3. Resultados de la estimación de parámetros de los hornos de arco eléctrico

La estimación de parámetros especificada en los numerales 3.5.2.3 y 3.5.2.4 se ha realizado para el modelo hiperbólico. Pero la identificación de parámetros se realiza de manera similar en todos los casos, con la diferencia de que la selección de parámetros para cada experimento se hace de acuerdo al modelo a ser estimado. Los parámetros que intervienen en cada modelo de horno de arco han sido definidos previamente en la sección 3.5.1.

Para el modelo de horno de arco eléctrico EAF (Electric Arc Furnace) se ha realizado la estimación de parámetros para dos modelos de horno de arco, es decir; los modelos hiperbólico y exponencial-hiperbólico. Sin embargo, para el modelo de horno de arco LF (Ladle Furnace) únicamente se ha realizado la estimación de parámetros para el modelo exponencial, dado que se ha obtenido un resultado aproximado con dicho modelo.

A continuación se resume a través de tablas los parámetros que se han obtenido con el módulo "Parameter Estimation".

3.5.3.1. Parámetros estimados para el horno de arco eléctrico (EAF)

Una vez realizado las estimaciones para los modelos hiperbólico y exponencial-hiperbólico para el horno de arco EAF, la Tabla 3.9 y la Tabla 3.10 muestran los resultados de los parámetros obtenidos para el horno de arco EAF (Electric Arc Furnace).

Tabla 3.9 Valores de parámetros estimados para el modelo hiperbólico.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
<i>A</i>	41.8	V
<i>B</i>	12.5	V/cm
<i>C_i</i>	200.1	kW
<i>C_d</i>	52.4	kW
<i>D_{i,d}</i>	2	kA

Tabla 3.10 Valores de parámetros estimados para el modelo exponencial-hiperbólico.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
<i>A</i>	35.2	V
<i>B</i>	14.9	V/cm
<i>C_i</i>	204.5	kW

Cd	50.6	kW
Di,d	1.4	kA
Io	18.3	kA

3.5.3.2. Parámetros estimados para el horno cuchara (LF)

Este modelo de horno ha sido utilizado para simular el comportamiento del horno cuchara (LF), debido a la cercanía de los valores obtenidos del modelo con respecto a la información de las mediciones armónicas para el horno cuchara. El menor número de parámetros hace que la identificación de parámetros sea relativamente más ágil que para los otros casos.

Tabla 3.11 Valores de parámetros estimados para el modelo exponencial.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
A	45.8	V
B	8.2	V/cm
Io	18.3	kA

3.5.4. Simulación de los modelos de horno de arco eléctrico con parámetros estimados

3.5.4.1. Modelo Exponencial

- **Característica V-I. Comportamiento estático.**

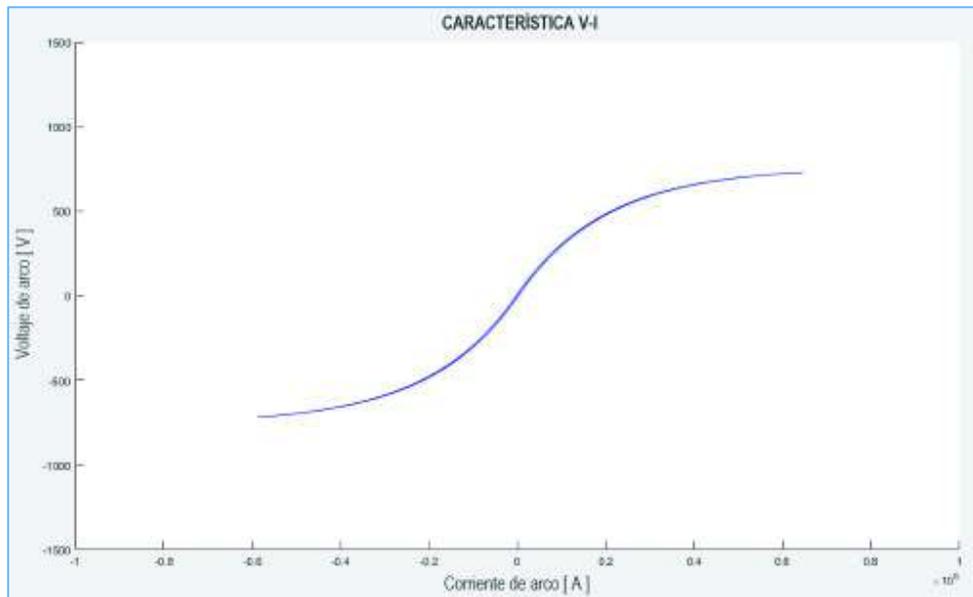


Figura 3.50 Característica estática Voltaje-Corriente. Modelo Exponencial.

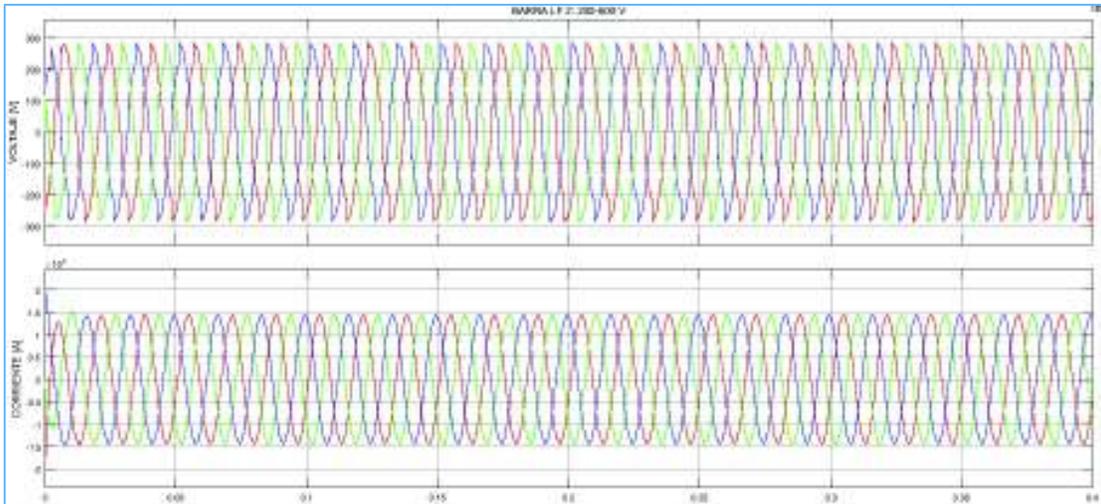


Figura 3.51 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Característica estática. Modelo Exponencial.

- **Característica V-I. Comportamiento dinámico.**

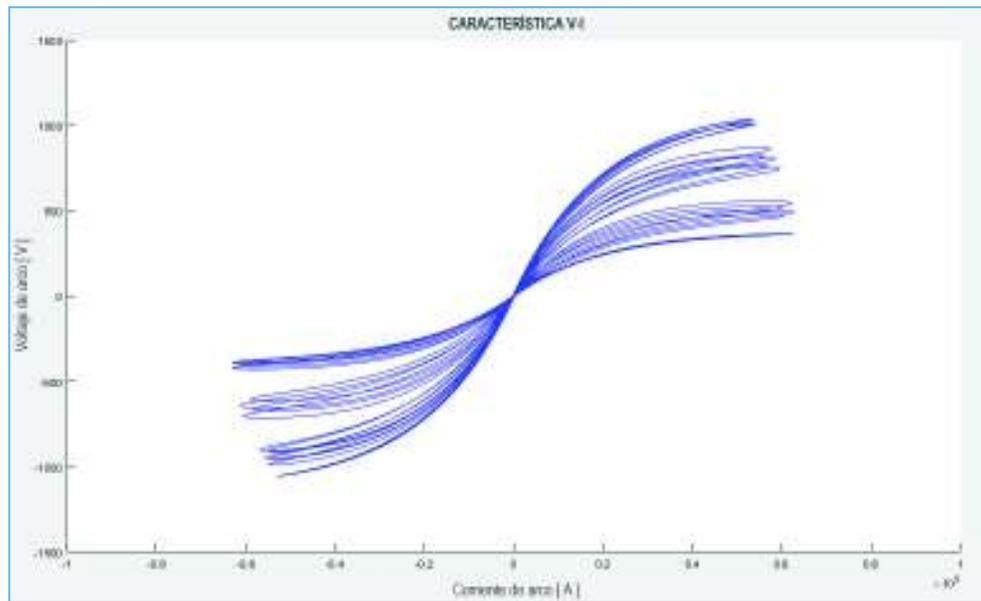


Figura 3.52 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje sinusoidal. Modelo Exponencial.

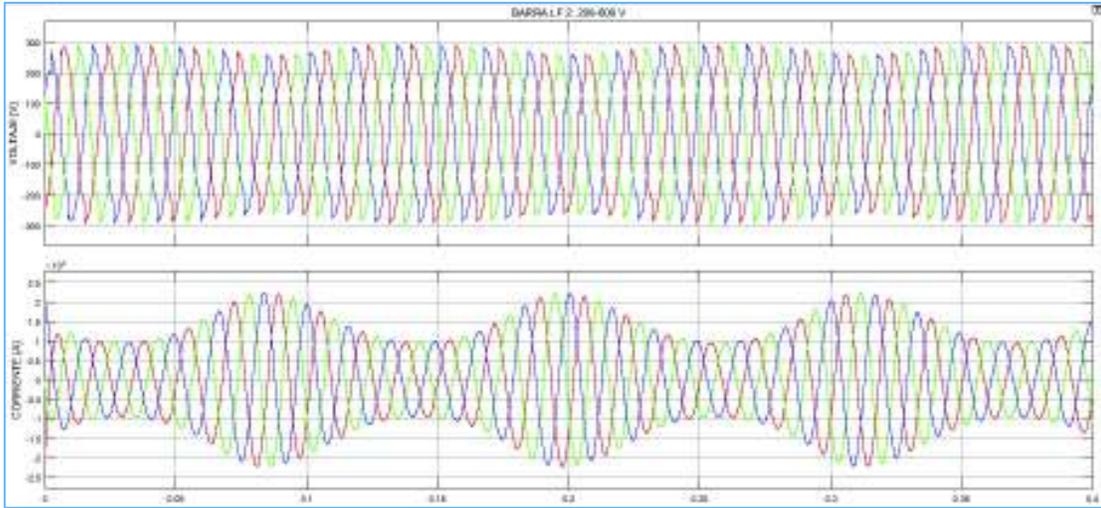


Figura 3.53 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje sinusoidal.
Modelo Exponencial.

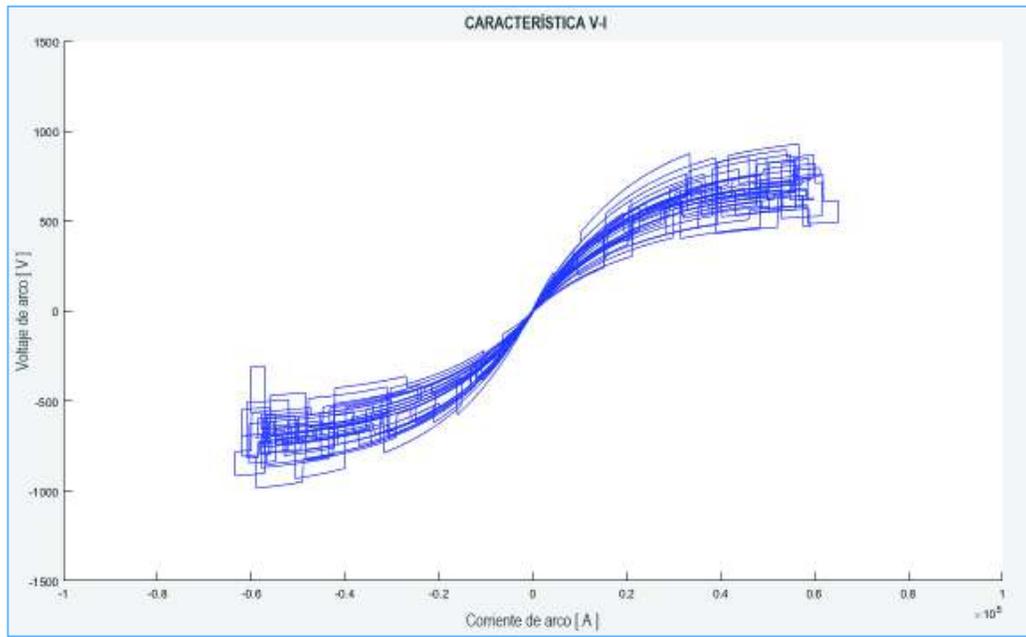


Figura 3.54 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje aleatorio.
Modelo Exponencial.

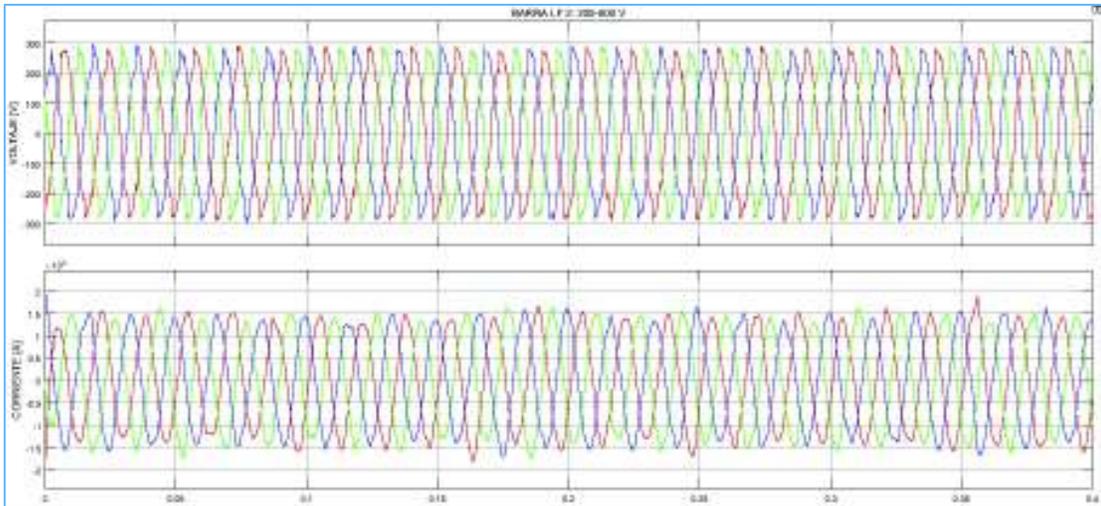


Figura 3.55 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje aleatorio. Modelo Exponencial.

3.5.4.2. Modelo Hiperbólico

- **Característica V-I. Comportamiento estático.**

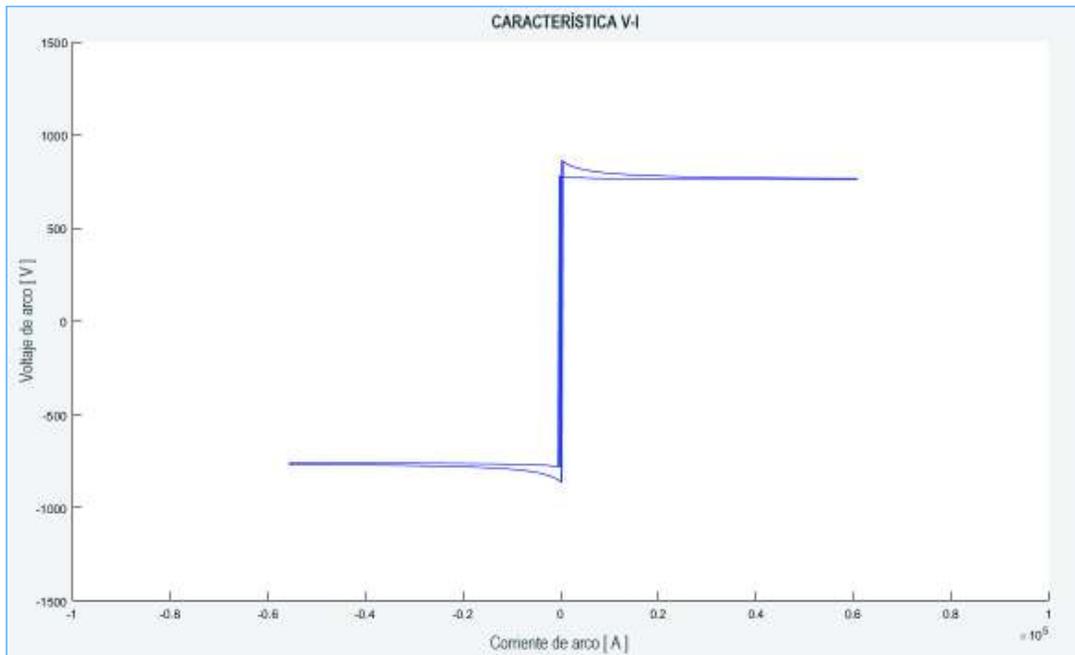


Figura 3.56 Característica estática Voltaje-Corriente. Modelo Hiperbólico.

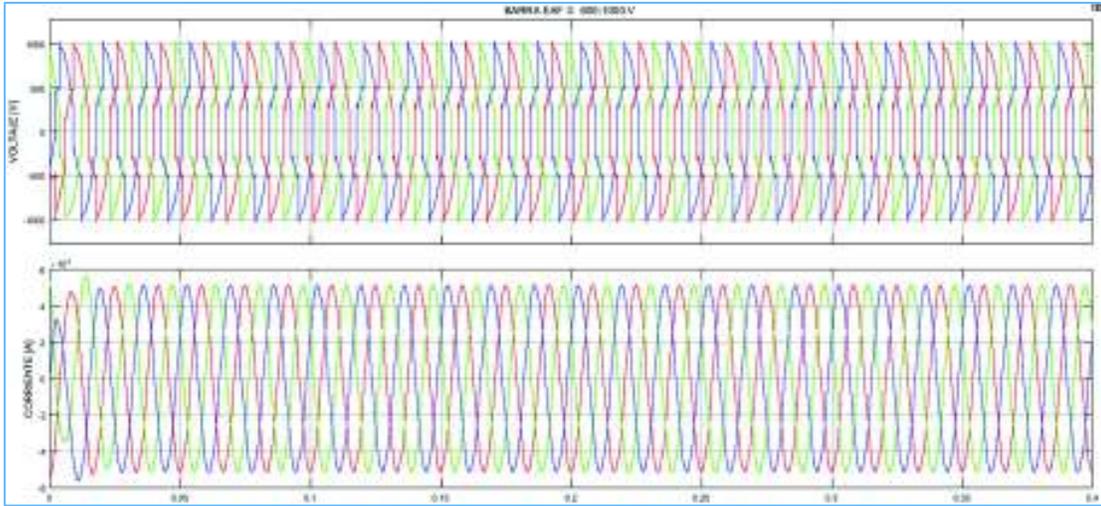


Figura 3.57 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Característica estática. Modelo Hiperbólico.

- **Característica V-I. Comportamiento dinámico.**

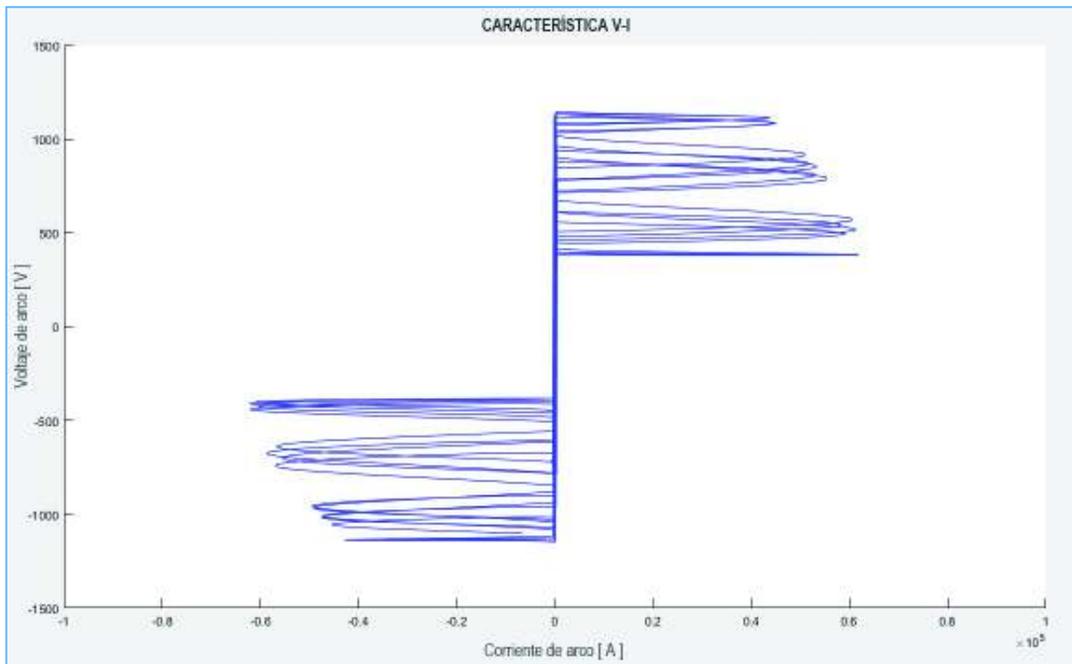


Figura 3.58 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje sinusoidal. Modelo Hiperbólico.

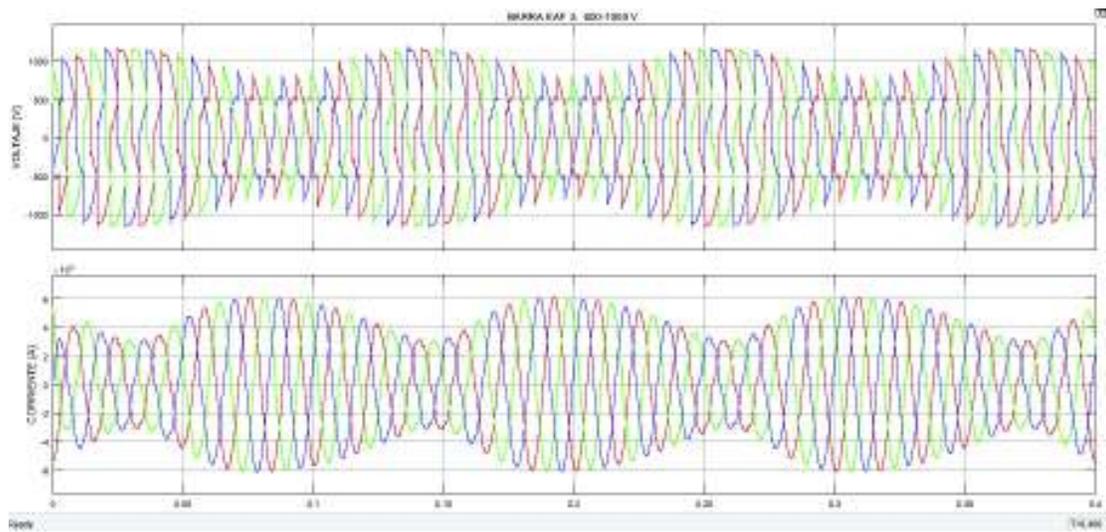


Figura 3.59 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje sinusoidal.
Modelo Hiperbólico.

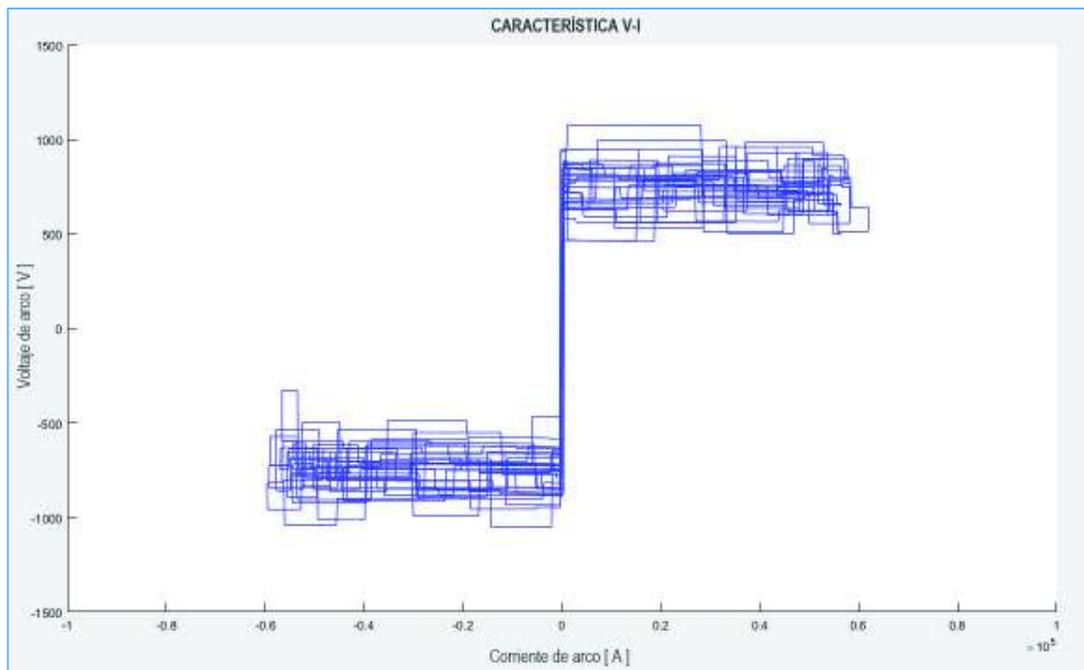


Figura 3.60 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje aleatorio.
Modelo Hiperbólico.

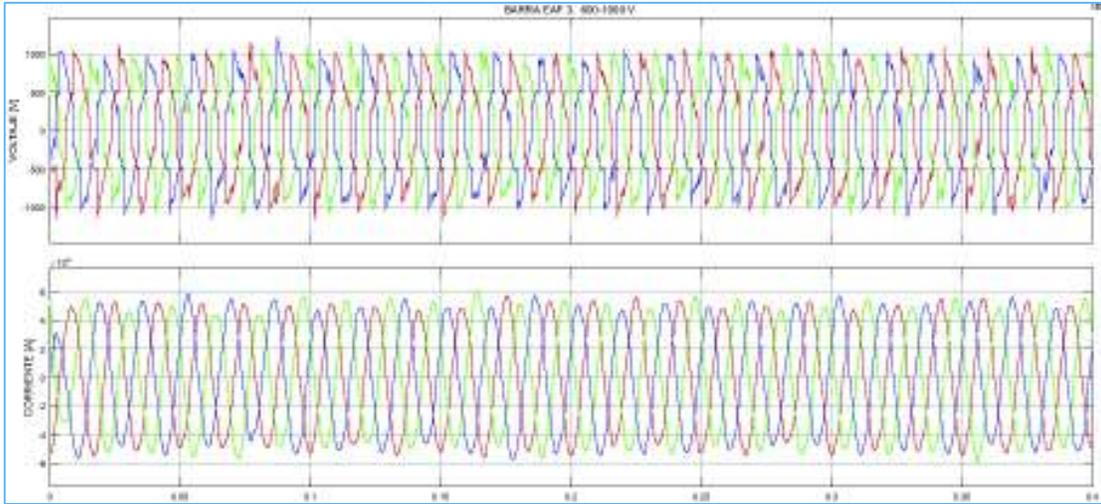


Figura 3.61 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje aleatorio. Modelo Hiperbólico.

3.5.4.3. Modelo Exponencial-Hiperbólico

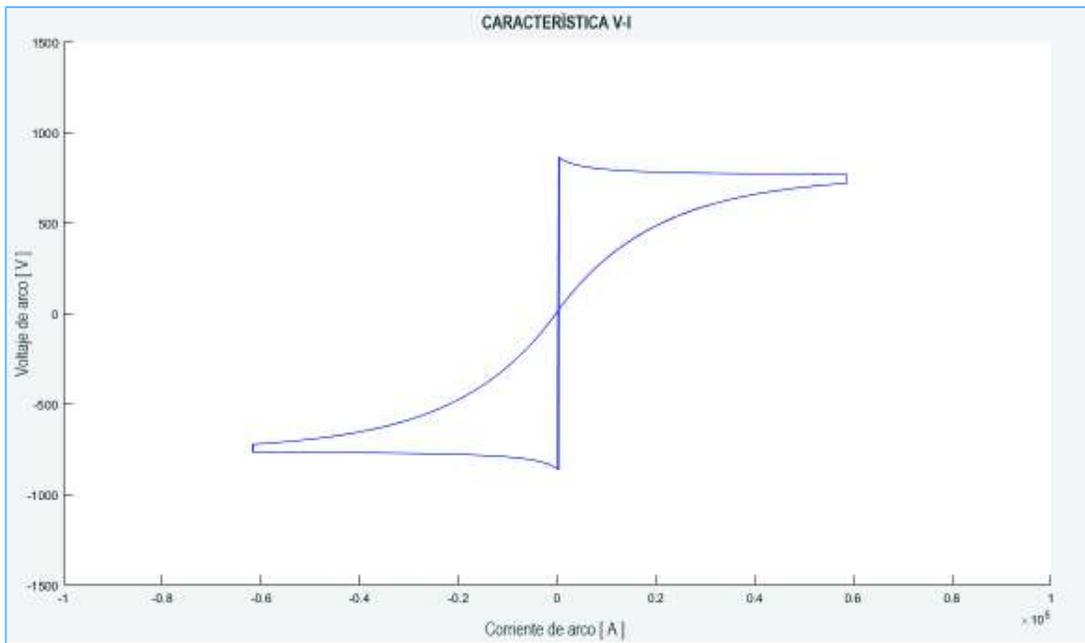


Figura 3.62 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje sinusoidal. Modelo Exponencial-Hiperbólico.

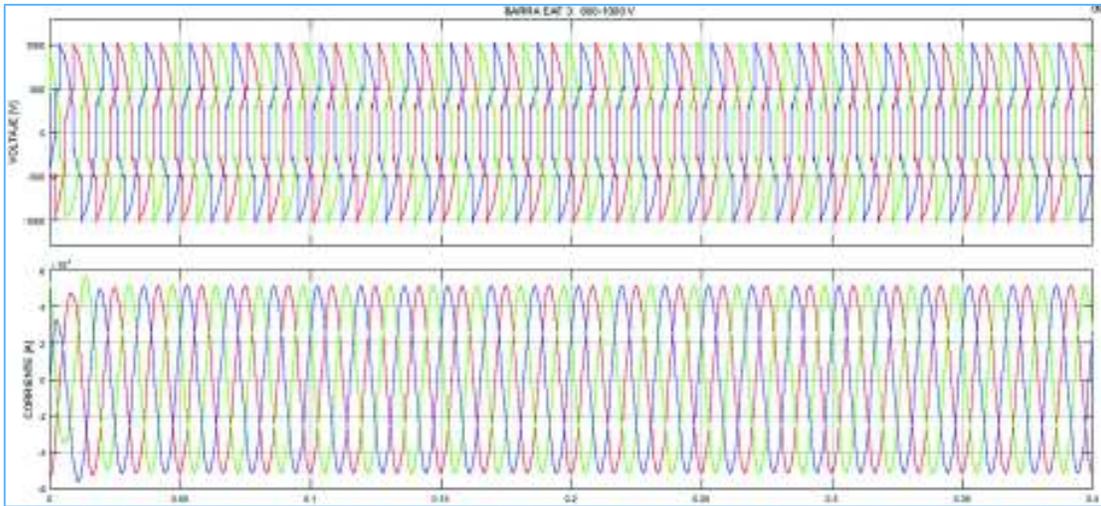


Figura 3.63 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Característica estática. Modelo Exponencial-Hiperbólico.

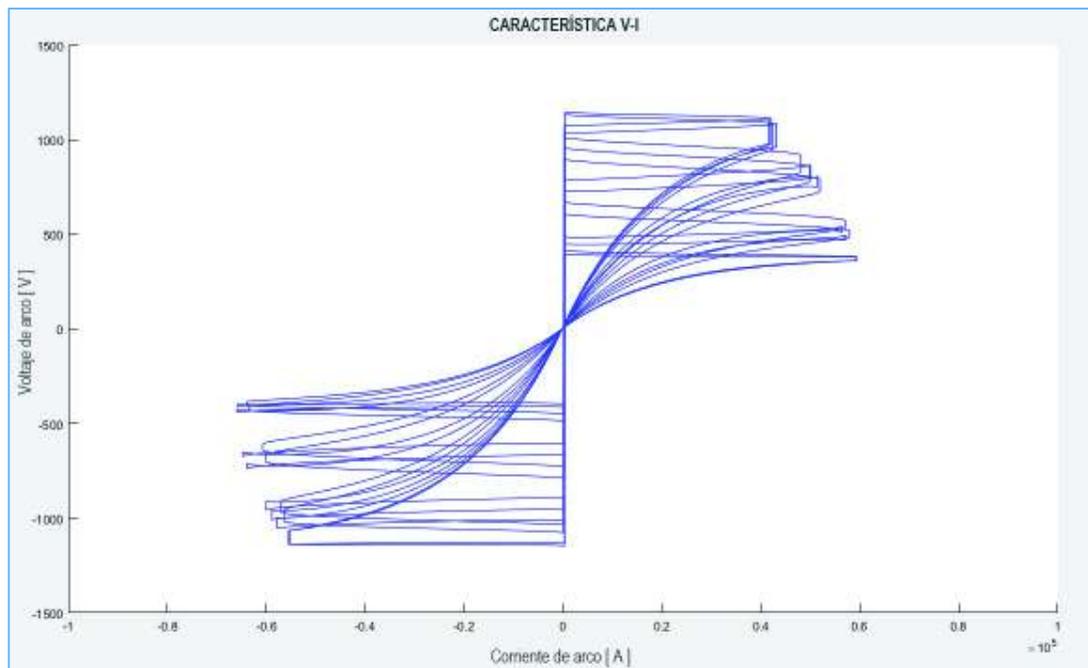


Figura 3.64 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje sinusoidal. Modelo Exponencial-Hiperbólico.

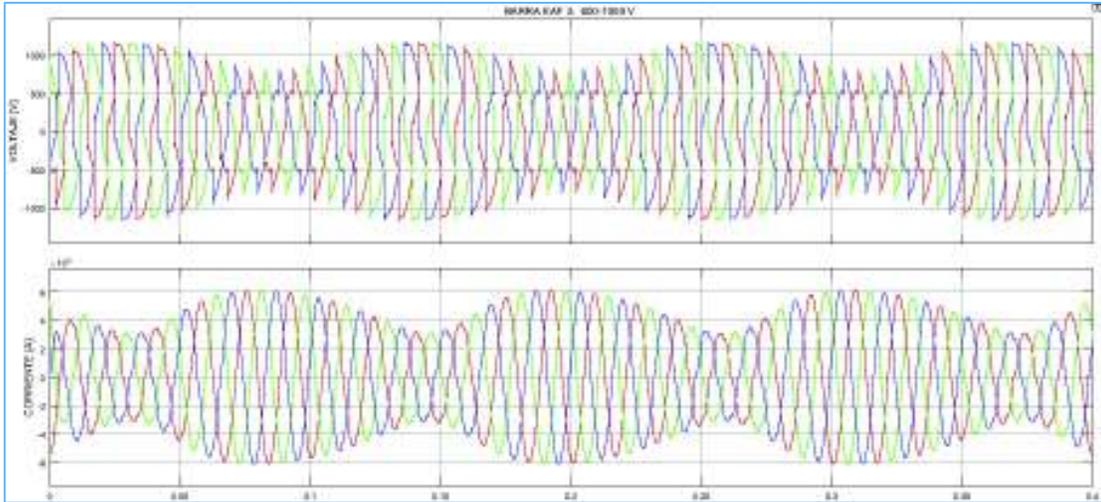


Figura 3.65 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje sinusoidal.
Modelo Exponencial-Hiperbólico.

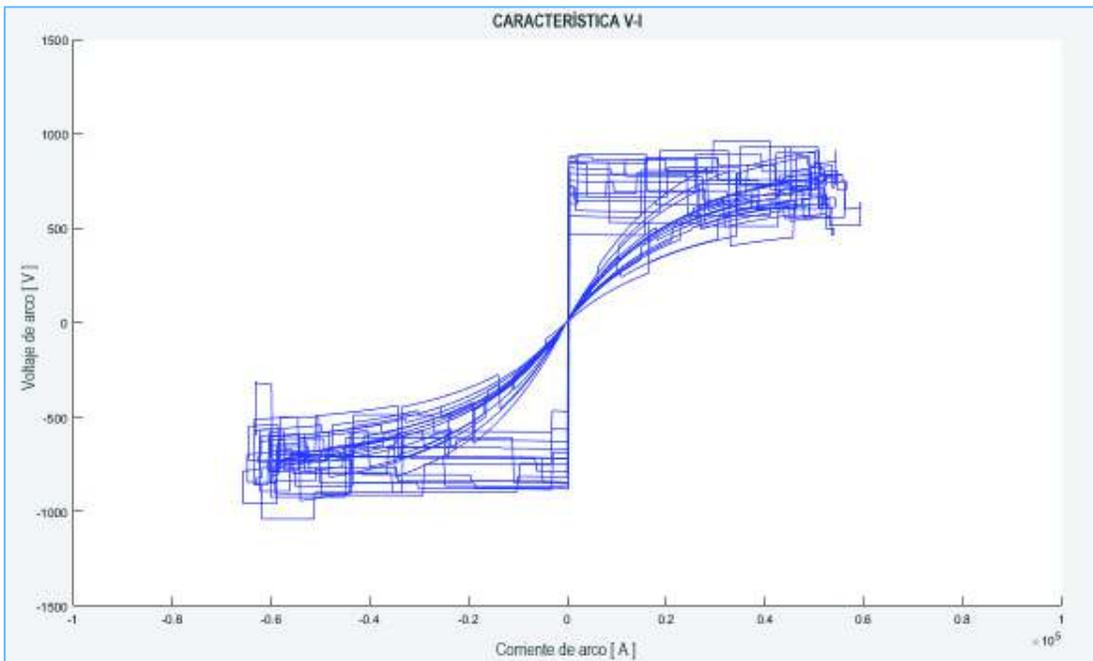


Figura 3.66 Característica dinámica Voltaje-Corriente. Variación de voltaje aleatorio.
Modelo Exponencial-Hiperbólico.

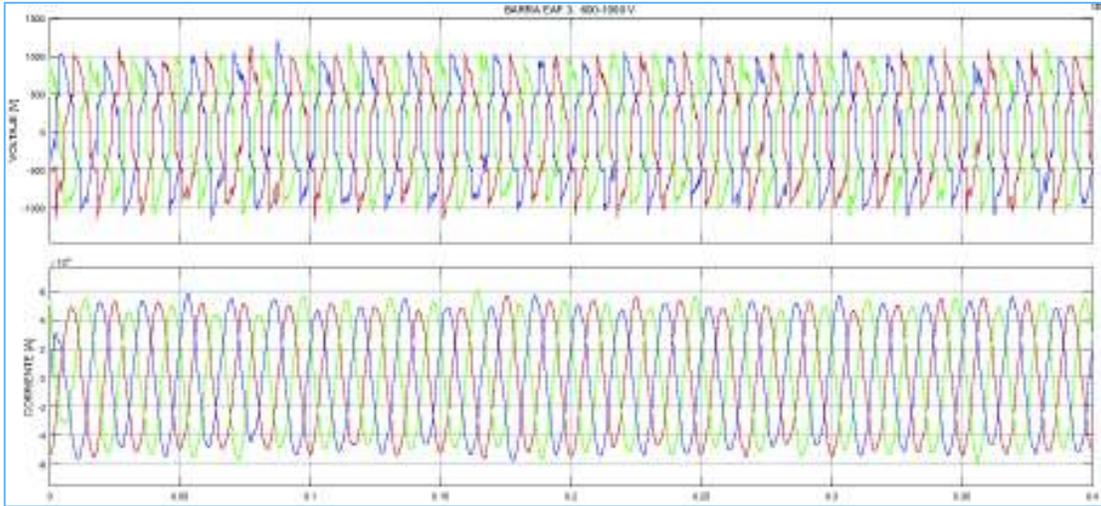


Figura 3.67 Formas de onda de Voltaje y Corriente. Variación de voltaje aleatorio. Modelo Exponencial-Hiperbólico.

3.6. Diseño de filtros pasivos (R-L-C)

Los filtros pasivos están compuestos de componentes R-L-C. El propósito al diseñar dichos filtros es determinar los valores de los parámetros R, L y C de los filtros, de tal manera que ayuden a la reducción del contenido armónico de las componentes no deseadas de manera satisfactoria.

Para la mitigación del contenido armónico se plantea el diseño de filtros pasivos simples sintonizados, considerando los efectos de la simulación de las cargas no lineales causantes de armónicos. Para ello se recurrirá al uso de distintos ramales de filtros pasivos conectados en paralelo con las cargas no lineales, los cuales se han diseñado en base a la selección de los armónicos más significativos. [5]

En base a un criterio de selección analizando el espectro de frecuencias se han escogido los armónicos de orden 2, 3 y 5, dado que en magnitud son los componentes que principalmente contribuyen a la distorsión armónica total de corriente (THDi).

Para dichos armónicos se realizará el diseño de los ramales de filtros pasivos, lo cual ayudará a visualizar el efecto de la disminución de THD de corriente y las formas de onda conseguida tras la reducción de la magnitud de las componentes armónicas.

3.6.1. Determinación de la potencia reactiva de compensación

Antes de realizar el diseño de los filtros pasivos simples sintonizados se requiere determinar la cantidad de potencia reactiva que los filtros deben suministrar a frecuencia fundamental. Para esto hacemos uso de la siguiente ecuación con la cual podemos determinar la potencia reactiva necesaria para realizar una corrección del factor de potencia en la planta hasta un factor de potencia de 0,96.

$$Q_{reac} = P. (\tan(\cos^{-1}(fp1)) - \tan(\cos^{-1}(fp2)))$$

Ecuación 3.7 Potencia reactiva de compensación. [5]

Donde:

Q_{reac} : Potencia reactiva de compensación total.

P : Potencia activa en el Pcc.

$fp1$: Factor de potencia antes de que el los filtros pasivos sean incorporados.

$fp2$: Factor de potencia después de que el los filtros pasivos sean incorporados.

3.6.1.1. Determinación de la potencia reactiva de compensación (Máxima carga)

En este caso, se analiza un escenario de máxima demanda, el cual se cumple para cuando ambos hornos de arco eléctrico operan simultáneamente en conjunto con el resto de cargas existentes en la planta industrial. Para dicho escenario se analiza una potencia activa y reactiva de 39,7 MW y 31,7 MVAR respectivamente, obtenido a partir de realizar un flujo de carga con ayuda del software computacional DigSILENT en el ANEXO XII.

Se empieza determinando el valor de potencia activa y reactiva en el punto de conexión con la red externa para cuando los hornos de arco están operando.

$$P = 39,7 \text{ MW}$$

$$Q = 31,7 \text{ MVAR}$$

De lo cual obtenemos el valor de la potencia aparente y del factor de potencia actual de la planta en el punto de conexión (Pcc).

$$S = \sqrt{39,7^2 + 31,7^2}$$

$$S = 50,8 \text{ MVA}$$

$$Fp1 = P/S$$

$$Fp1 = 39,7/50,8$$

$$Fp1 = 0,7814$$

Empleando la Ecuación 3.7 podemos calcular la potencia reactiva que los filtros deben suministrar para las condiciones modeladas de la planta.

$$Q_{reac} = 39,7x(\tan(\cos^{-1}(0,7814)) - \tan(\cos^{-1}(0,96)))$$

$$Q_{reac} = 20,12 \text{ MVAR}$$

Realizando los cálculos pertinentes se ha podido determinar una potencia reactiva de compensación igual a 20,12 MVAR para mejorar el factor de potencia a un valor de 0,96.

3.6.1.2. Determinación de la potencia reactiva de compensación (Mínima carga)

En este caso, se analiza un escenario de mínima demanda, el cual se cumple cuando ambos hornos de arco eléctrico se encuentran suspendidos debido principalmente a cuestiones periódicas de mantenimiento. El resto de cargas existentes en la planta industrial se consideran Habilitadas. Para dicho escenario se analiza una potencia activa y reactiva de 8 MW y 6,5 MVAR respectivamente.

Estos valores se han obtenido a partir de realizar un flujo de carga con ayuda del software computacional DigSILENT en el ANEXO XIII.

Se empieza determinando el valor de potencia activa y reactiva en el punto de conexión con la red externa para cuando los hornos de arco no están operando.

$$P = 8 \text{ MW}$$

$$Q = 6,5 \text{ MVAR}$$

De lo cual obtenemos el valor de la potencia aparente y del factor de potencia actual de la planta en el punto de conexión (Pcc).

$$S = \sqrt{8^2 + 6,5^2}$$

$$S = 10,3 \text{ MVA}$$

$$Fp1 = P/S$$

$$Fp1 = 8/10,3$$

$$Fp1 = 0,776$$

Empleando la Ecuación 3.7 podemos calcular la potencia reactiva que los filtros deben suministrar para las condiciones modeladas de la planta.

$$Q_{reac} = 8x(\tan(\cos^{-1}(0,776)) - \tan(\cos^{-1}(0,96)))$$

$$Q_{reac} = 4,2 \text{ MVAR}$$

Realizando los cálculos correspondientes se ha podido determinar una potencia reactiva de compensación similar a 5 MVAR para mejorar el factor de potencia a un valor igual o superior a 0,96.

3.6.2. Diseño de filtros pasivos simples sintonizados

Para el diseño de los filtros pasivos trifásicos usando componentes R-L-C se hace uso de un proceso específico, pero es necesario definir las ecuaciones que servirán para la determinación de los parámetros de los filtros pasivos simples sintonizados.

3.6.2.1. Ecuaciones para el diseño de filtros pasivos paralelo en configuración estrella

Las relaciones entre la susceptancia B_{cap} y la capacitancia C_{cap} del filtro están dadas por la igualdad siguiente:

$$C_{cap} = \frac{B_{cap}}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Ecuación 3.8 Capacitancia del filtro. [19]

Donde:

C_{cap} : Capacitancia en μF .

B_{cap} : Susceptancia en μS .

f: Frecuencia nominal en Hz.

La relación entre la reactancia inductiva y la inductancia del filtro está dada por la siguiente ecuación:

$$L_{rea} = \frac{X_{rea}}{2 \cdot \pi \cdot f} \times 1000$$

Ecuación 3.9 Inductancia del filtro. [19]

Donde:

L: Inductancia en mH.

X_{rea} : Reactancia inductiva en Ohm.

f: Frecuencia nominal en Hz.

El orden de sintonización del filtro pasivo se expresa de la siguiente manera:

$$n_{res} = \frac{f_{res}}{f}$$

Ecuación 3.10 Orden de sintonización. [19]

Donde:

n_{res} : Orden de sintonización.

f_{res} : Frecuencia de resonancia en Hz.

f: Frecuencia nominal en Hz.

La relación entre el factor de calidad a frecuencia nominal y el factor de calidad a la frecuencia de resonancia es:

$$q_{rea f_0} = q_{rea} \cdot n_{res} = q_{rea} \cdot \frac{f_{res}}{f}$$

Ecuación 3.11 Factor de calidad a la frecuencia de resonancia. [19]

Donde:

q_{rea} : Factor de calidad a frecuencia nominal.

$q_{rea f_0}$: Factor de calidad a la frecuencia de resonancia.

n: Orden de sintonización.

La potencia reactiva capacitiva puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{cap} = Q_{tot} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

Ecuación 3.12 Potencia reactiva capacitiva del filtro en MVAR. [19]

Donde:

Q_{cap} : Potencia reactiva capacitiva del filtro en MVAR.

Q_{tot} : Potencia reactiva total del filtro en MVAR.

n : Orden de sintonización.

La potencia reactiva inductiva puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{rea} = Q_{tot} \cdot (n^2 - 1)$$

Ecuación 3.13 Potencia reactiva inductiva del filtro en MVAR. [19]

Donde:

Q_{rea} : Potencia reactiva inductiva del filtro en MVAR.

Q_{tot} : Potencia reactiva total del filtro en MVAR.

n : Orden de sintonización.

Para un filtro pasivo sintonizado simple la frecuencia de resonancia está descrita a través de la expresión matemática siguiente:

$$f_{res} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L_{rea} \cdot 10^{-3} \times C_{cap} \cdot 10^{-6}}}$$

Ecuación 3.14 Frecuencia de resonancia. [19]

La inductancia del filtro puede ser calculada de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$L_{rea} = \frac{10^3}{(2 \times \pi \times f_{res})^2 \cdot C_{cap} \cdot 10^{-6}}$$

Ecuación 3.15 Inductancia del filtro en mH. [19]

Donde:

L_{rea} : Inductancia en mH.

C_{cap} : Capacitancia en μF .

f_{res} : Frecuencia de resonancia.

Las fórmulas especificadas en este apartado serán de mucha utilidad para el cálculo de los parámetros de los filtros pasivos.

Todas estas fórmulas se utilizan a fin de otorgar a los filtros un camino de baja impedancia cuando los elementos pasivos, produzcan un efecto de resonancia serie para la frecuencia a la cual fueron diseñados.

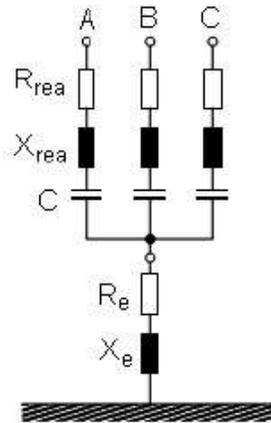


Figura 3.68 Diagrama trifásico de un filtro pasivo paralelo. [19]

La Figura 3.68 muestra el modelo trifásico de un filtro pasivo paralelo donde se muestra la distribución de los parámetros a ser calculados. Donde se puede considerar una reactancia (X_e) y una resistencia (R_e) a tierra en ohmios.

Para una configuración estrella de los filtros pasivos la relación entre la susceptancia y la potencia reactiva capacitiva está expresada por la siguiente ecuación:

$$B_{cap} = \frac{Q_{cap}}{V^2} \cdot 10^6$$

Ecuación 3.16 Susceptancia del filtro en μS . [19]

Donde:

V: Voltaje nominal línea-línea en kV.

Q_{cap} : Potencia reactiva capacitiva trifásica del filtro en MVAR.

B_{cap} : Susceptancia en μS .

La relación entre la potencia reactiva inductiva del filtro pasivo en configuración estrella y la reactancia inductiva es la siguiente:

$$X_{rea} = \frac{V^2}{Q_{rea}}$$

Ecuación 3.17 Susceptancia del filtro en μS . [19]

La resistencia de la inductancia del filtro pasivo se calcula de acuerdo

$$R_{rea} = \frac{X_{rea}}{q_{rea}}$$

Ecuación 3.18 Resistencia del filtro en ohmios. [19]

Donde:

X_{rea} : Reactancia inductiva del filtro en ohmios.

R_{rea} : Resistencia de la inductancia del filtro en ohmios.

V : Voltaje nominal línea-línea en kV.

Q_{rea} : Potencia reactiva inductiva del filtro en MVAR.

q_{rea} : Factor de calidad a frecuencia nominal.

3.6.2.2. Proceso de diseño de filtros pasivos simples en configuración estrella

Para comenzar con el cálculo de los parámetros de los filtros se realizará el proceso definido en la Figura 3.69, donde se muestra un diagrama de flujo para el diseño de filtros pasivos con el procedimiento de diseño a partir de la determinación de la potencia reactiva que debe suministrar el filtro y los criterios a cumplir por parte del diseño obtenido hasta obtener un esquema que satisfaga nuestros requerimientos.

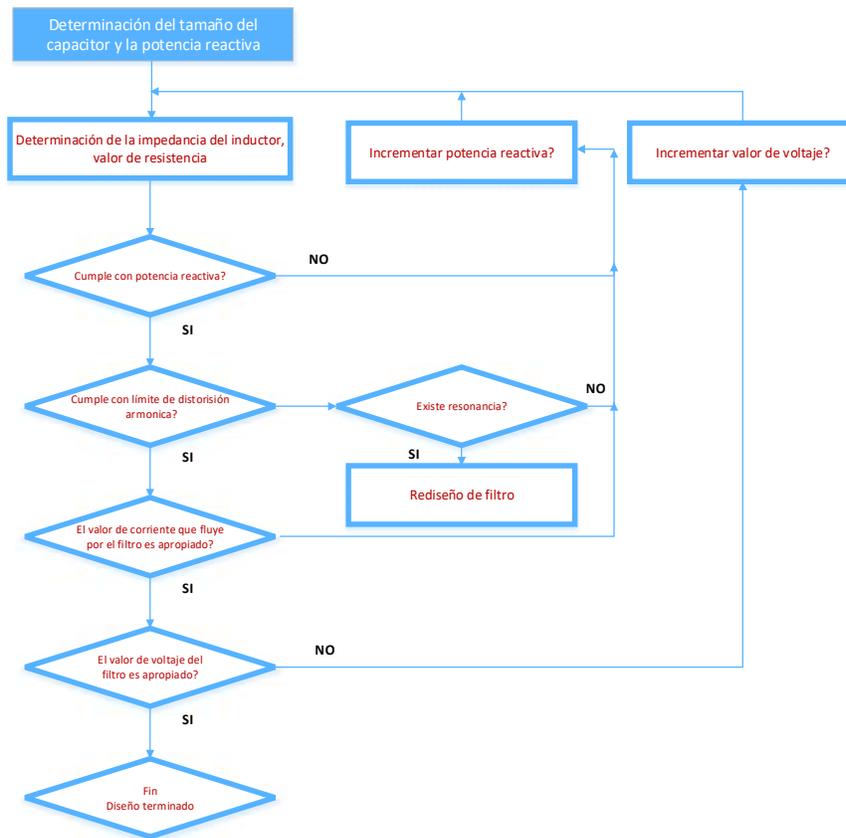


Figura 3.69 Proceso de diseño de filtros pasivos.

A través de la siguiente ecuación es posible conocer el comportamiento de la impedancia que tendría un filtro pasivo con sus elementos en serie en función de la frecuencia:

$$Z_F = R_F + j \left(n \cdot \omega \cdot L_F - \frac{1}{n \cdot \omega \cdot C_F} \right)$$

Ecuación 3.19 Impedancia de un filtro sintonizado simple en función de la frecuencia.

[20]

Donde:

Z_F : Impedancia del filtro en función de la frecuencia en ohmios.

ω : Frecuencia en rad/s. ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$)

R_F : Resistencia de la inductancia en ohmios.

L_F : Inductancia del filtro en Henrios.

C_F : Inductancia del filtro en Faradios.

n : Orden del armónico.

3.6.3. Cálculo de los parámetros de los filtros pasivos

Una vez definidas las ecuaciones que servirán para realizar los cálculos, es posible iniciar el proceso de diseño a partir del valor de potencia reactiva trifásica necesaria para la corrección del factor de potencia de la planta en el punto de conexión, tomando en cuenta que el diseño de los filtros se realiza para un nivel de voltaje de 23 kV_{L-L}.

Además, se realiza el cálculo de los parámetros de los filtros tomando en cuenta la operación de los hornos de arco eléctrico, es decir; el escenario de máxima demanda, dado que este escenario resulta ser el más habitual.

Podemos empezar a realizar el diseño de filtros pasivos tomando en cuenta que la potencia reactiva total debe ser suministrada por el número total de filtros que queremos diseñar. Para efectos de diseño es necesario dividir la potencia reactiva total calculada anteriormente en función del número de filtros que pretendemos diseñar.

En el presente trabajo el número de filtros pasivos se diseñan en función del número de armónicos existentes, tomando en cuenta las componentes armónicas más significativas en magnitud, lo cual ayudará a lograr una atenuación de dichas componentes.

Esta reducción de distorsión que se logrará con ayuda de los filtros pasivos debe cumplir con los límites establecidos por la norma IEEE 519 - 1992.

3.6.3.1. Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (2do armónico)

Para el diseño del filtro pasivo de orden 2 (120 Hz), se asigna una potencia reactiva de 10 MVAR y tomando en cuenta un voltaje de 23 kV_{L-L}, por lo tanto; esta será la potencia reactiva que el filtro debe entregar a la frecuencia fundamental de 60 Hz. Esta potencia será suplida principalmente por el condensador del filtro pasivo.

Se inicia con el cálculo de la potencia reactiva capacitiva del filtro la cual puede ser calculada de la siguiente manera:

$$Q_{cap} = (10 \text{ MVAR}) \cdot \left(1 - \frac{1}{2^2}\right)$$

$$Q_{cap} = 7,5 \text{ MVAR}$$

Posteriormente se calcula la potencia reactiva inductiva del filtro, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{rea} = (10 \text{ MVAR}) \cdot (2^2 - 1)$$

$$Q_{rea} = 30 \text{ MVAR}$$

La susceptancia capacitiva se determina a través del cálculo realizado de Q_{cap} , posteriormente es posible obtener el valor de la capacitancia del filtro según consta a continuación:

$$B_{cap} = \frac{7,5 \text{ MVAR}}{(23 \text{ kV})^2} \cdot 10^6$$

$$B_{cap} = 14177,7 \mu S$$

$$C_{cap} = \frac{14177,7 \mu S}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})}$$

$$C_{cap} = 37,61 \mu F$$

Ahora se determinará la reactancia inductiva para posteriormente obtener el valor de la inductancia del filtro:

$$X_{rea} = \frac{23 \text{ kV}^2}{30 \text{ MVAR}}$$

$$X_{rea} = 17,63 \Omega$$

$$L_{rea} = \frac{17,63 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})} \times 1000$$

$$L_{rea} = 46,77 \text{ mH}$$

Para el cálculo de la resistencia del filtro pasivo se ha definido un factor de calidad $Q = q_{rea} = 30$, con lo que procedemos al cálculo de dicho componente.

$$R_{rea} = \frac{17,63 \Omega}{30}$$

$$R_{rea} = 0,588 \Omega$$

La siguiente figura muestra la curva de la impedancia del filtro en función de la frecuencia para distintos valores del factor de calidad.

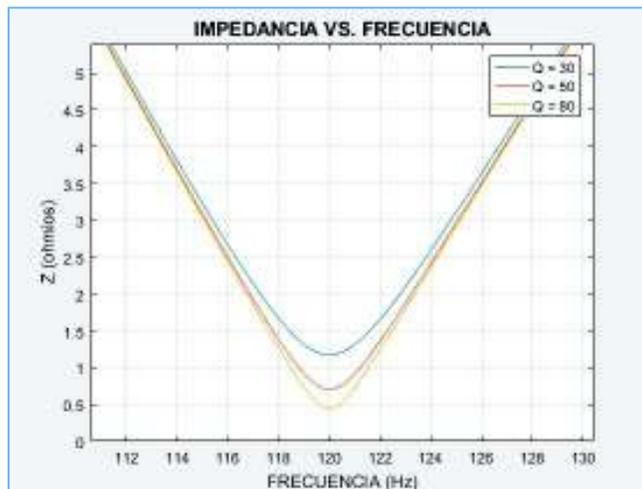


Figura 3.70 Filtro sintonizado simple, 2do Armónico, factor de calidad Q: 30, 50, 80.

Para el presente diseño se ha considerado un factor de calidad $Q = 30$.

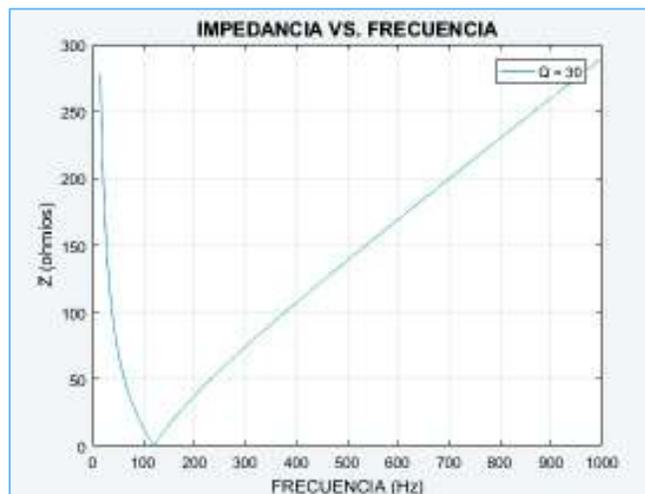


Figura 3.71 Filtro sintonizado simple, 23 kV, 10 MVAR, 2do Armónico, $Q = 30$.

3.6.3.2. Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (3er armónico)

Para el diseño del filtro pasivo de orden 3 (180 Hz), se asigna una potencia reactiva de 7,12 MVAR y tomando en cuenta un voltaje de 23 kV_{L-L}.

Se inicia con el cálculo de la potencia reactiva capacitiva del filtro la cual puede ser calculada de la siguiente manera:

$$Q_{cap} = (7,12 \text{ MVAR}) \cdot \left(1 - \frac{1}{3^2}\right)$$

$$Q_{cap} = 6,33 \text{ MVAR}$$

Posteriormente se calcula la potencia reactiva inductiva del filtro, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{rea} = (7,12 \text{ MVAR}) \cdot (3^2 - 1)$$

$$Q_{rea} = 56,97 \text{ MVAR}$$

La susceptancia capacitiva se determina a través del cálculo realizado de Q_{cap} , posteriormente es posible obtener el valor de la capacitancia del filtro según consta a continuación:

$$B_{cap} = \frac{7,33 \text{ MVAR}}{(23 \text{ kV})^2} \cdot 10^6$$

$$B_{cap} = 11965,3 \mu S$$

$$C_{cap} = \frac{11965,3 \mu S}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})}$$

$$C_{cap} = 31,74 \mu F$$

Ahora se determinará la reactancia inductiva para posteriormente obtener el valor de la inductancia del filtro:

$$X_{rea} = \frac{23 \text{ kV}^2}{56,97 \text{ MVAR}}$$

$$X_{rea} = 9,29 \Omega$$

$$L_{rea} = \frac{9,29 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})} \times 1000$$

$$L_{rea} = 24,63 \text{ mH}$$

Para el cálculo de la resistencia del filtro pasivo se ha definido un factor de calidad $Q = q_{rea} = 30$, con lo que procedemos al cálculo de dicho componente.

$$R_{rea} = \frac{9,29 \Omega}{30}$$

$$R_{rea} = 0,31 \Omega$$

La siguiente figura muestra la curva de la impedancia del filtro en función de la frecuencia para distintos valores del factor de calidad.

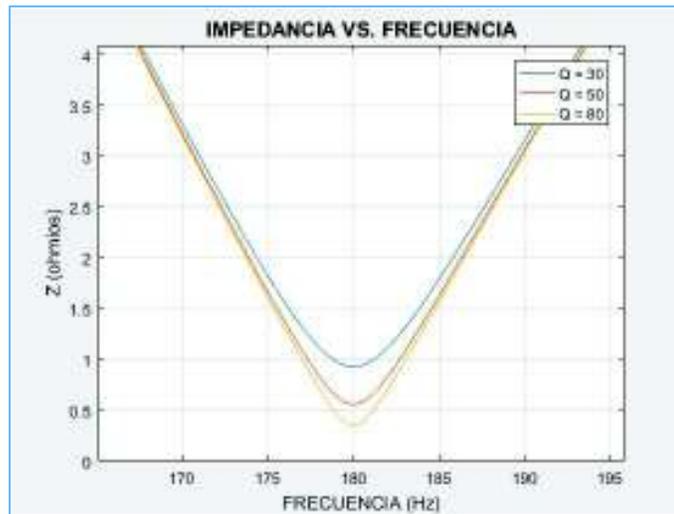


Figura 3.72 Filtro sintonizado simple, 3er Armónico, factor de calidad Q : 30, 50, 80.

Para el presente diseño se ha considerado un factor de calidad $Q = 30$

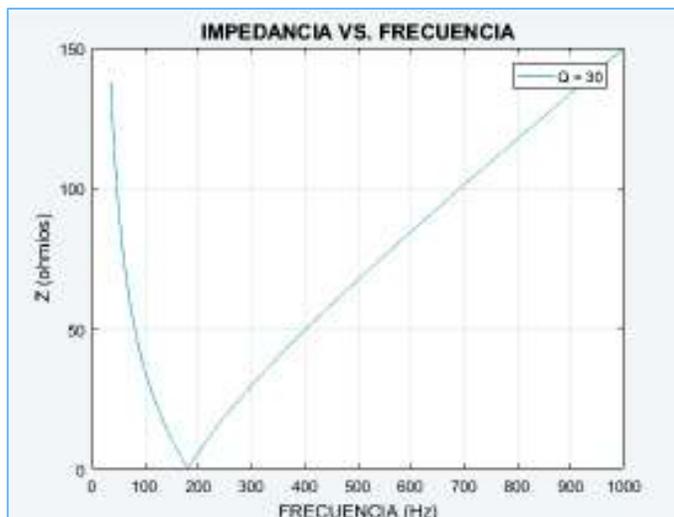


Figura 3.73 Filtro sintonizado simple, 23 kV; 7,12 MVAR, 3er Armónico, $Q = 30$.

3.6.3.3. Diseño del filtro pasivo sintonizado simple (5to armónico)

Para el diseño del filtro pasivo de orden 5 (300 Hz), se asigna una potencia reactiva de 3 MVAR y tomando en cuenta un voltaje de 23 kV_{L-L}.

Se inicia con el cálculo de la potencia reactiva capacitiva del filtro la cual puede ser calculada de la siguiente manera:

$$Q_{cap} = (3 \text{ MVAR}) \cdot \left(1 - \frac{1}{5^2}\right)$$

$$Q_{cap} = 2,88 \text{ MVAR}$$

Posteriormente se calcula la potencia reactiva inductiva del filtro, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{rea} = (3 \text{ MVAR}) \cdot (5^2 - 1)$$

$$Q_{rea} = 72 \text{ MVAR}$$

La susceptancia capacitiva se determina a través del cálculo realizado de Q_{cap} , posteriormente es posible obtener el valor de la capacitancia del filtro según consta a continuación:

$$B_{cap} = \frac{2,88 \text{ MVAR}}{(23 \text{ kV})^2} \cdot 10^6$$

$$B_{cap} = 5444,2 \mu S$$

$$C_{cap} = \frac{5444,2 \mu S}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})}$$

$$C_{cap} = 14,44 \mu F$$

Ahora se determinará la reactancia inductiva para posteriormente obtener el valor de la inductancia del filtro:

$$X_{rea} = \frac{23 \text{ kV}^2}{72 \text{ MVAR}}$$

$$X_{rea} = 7,35 \Omega$$

$$L_{rea} = \frac{7,35 \Omega}{2 \cdot \pi \cdot (60 \text{ Hz})} \times 1000$$

$$L_{rea} = 19,49 \text{ mH}$$

Para el cálculo de la resistencia del filtro pasivo se ha definido un factor de calidad $Q = q_{rea} = 30$, con lo que procedemos al cálculo de dicho componente.

$$R_{rea} = \frac{7,35 \Omega}{30}$$

$$R_{rea} = 0,245 \Omega$$

La siguiente figura muestra la curva de la impedancia del filtro en función de la frecuencia para distintos valores del factor de calidad.

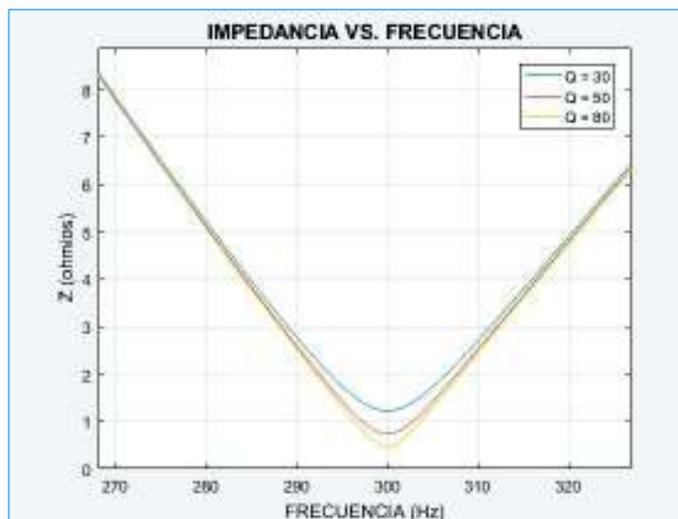


Figura 3.74 Filtro sintonizado simple, 5to Armónico, factor de calidad Q : 30, 50, 80.

Para el presente diseño se ha considerado un factor de calidad $Q = 30$.

Este factor de calidad permite tener un ancho de banda lo suficientemente grande para evitar posibles desintonizaciones en el futuro.

Se ha notado al realizar los respectivos diseños que debe existir un adecuado factor de calidad (Q), caso contrario los filtros resultarían ser ineficaces en su función principal.

Este factor de calidad debe ser adecuadamente elegido de tal manera que nos permitiera regular el ancho de banda de las frecuencias de filtrado.

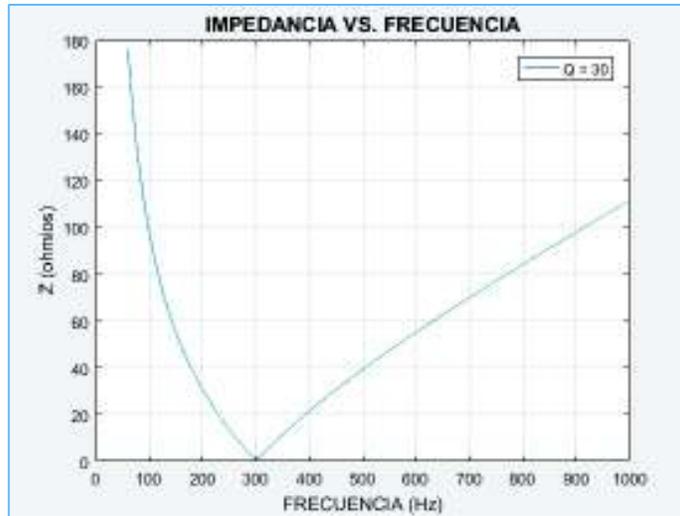


Figura 3.75 Filtro sintonizado simple, 23 kV, 3 MVAR, 5to Armónico, $Q = 30$.

Para observar el comportamiento de los filtros pasivos diseñados en función de la frecuencia, es posible realizar en Matlab/Simulink un barrido en frecuencia de los filtros diseñados. Esto nos da una mejor idea del comportamiento de conjunto de filtros diseñado y su respuesta en frecuencia.

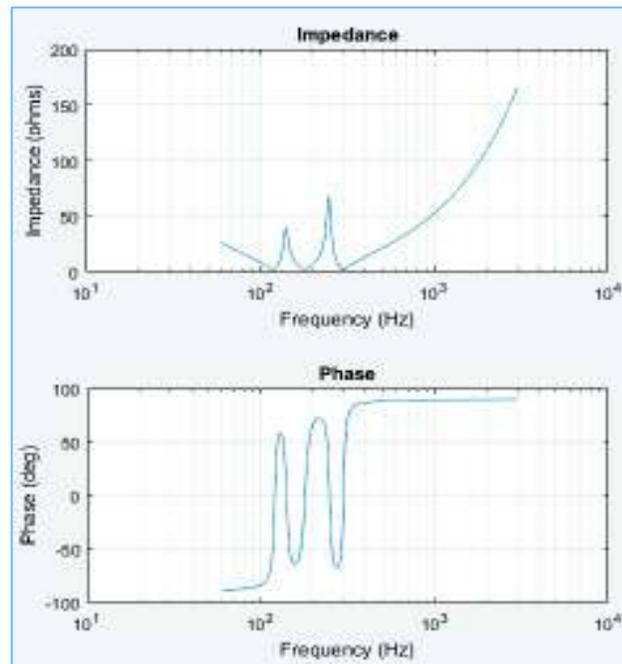


Figura 3.76 Impedancia Vs Frecuencia del banco de filtros pasivos diseñados.

Realizando un acercamiento en la Figura 3.76 es posible observar las frecuencias de resonancia para la cual los filtros fueron diseñados, también se puede apreciar dos picos

superiores los cuales muestran las frecuencias a las que se produciría una resonancia paralelo. Esta resonancia paralela se encuentra en medio de las frecuencias de diseño de los otros filtros y como se puede apreciar presentan una alta impedancia.

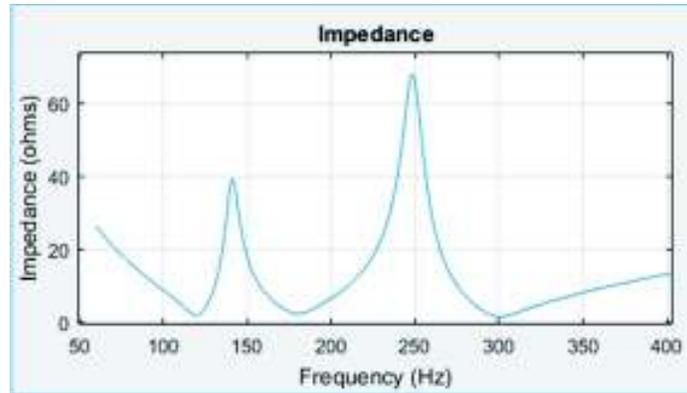


Figura 3.77 Frecuencias de resonancia del banco de filtros pasivos diseñados.

3.6.4. Modelación de los filtros diseñados en Matlab/Simulink

Para la modelación de los filtros pasivos se hace uso de un ramal R-L-C trifásico serie, dentro del bloque se debe introducir los valores de los parámetros calculados para cada ramal de filtros pasivos, esto nos permite evidenciar que el diseño que se ha realizado sirve de manera apropiada en la simulación.

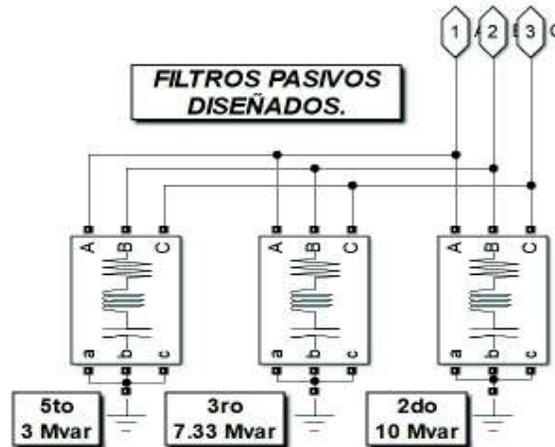


Figura 3.78 Banco de filtros pasivos diseñados en Matlab/Simulink.

En la Figura 3.79, Figura 3.80 y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los bloques RLC serie trifásicos de Matlab/Simulink. En estas figuras se aprecian los parámetros de los filtros diseñados que servirán para atenuar los armónicos para los cuales fueron diseñados.

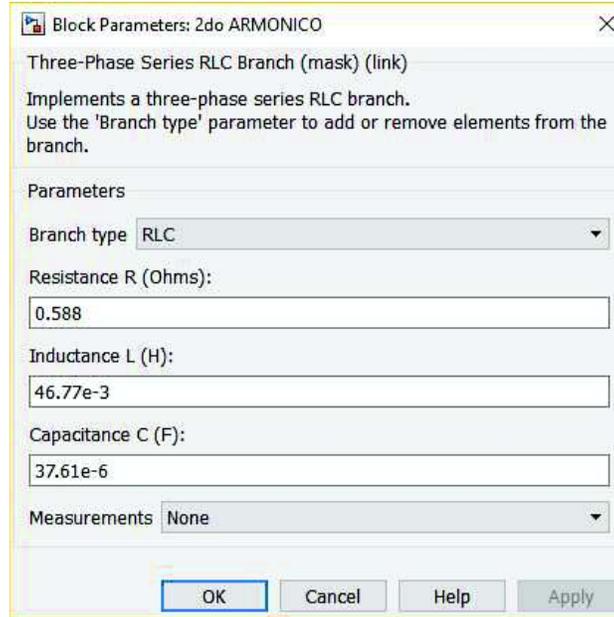


Figura 3.79 Parámetros calculados del filtro pasivo (2do Armónico) en Matlab/Simulink.

Los parámetros de los filtros diseñados se ingresan directamente en los bloques RLC. La resistencia en ohmios, la inductancia en henrios y la capacitancia en faradios. Con esto es posible proceder a la simulación de los filtros incorporados con el sistema modelado.

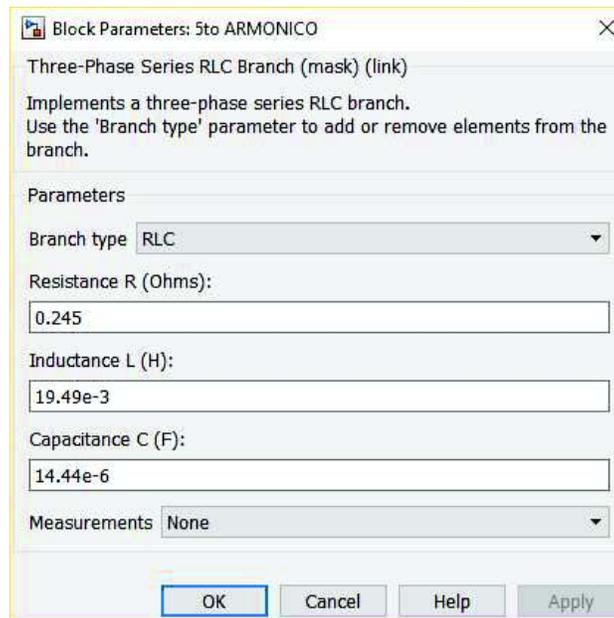


Figura 3.80 Parámetros calculados del filtro pasivo (5to Armónico) en Matlab/Simulink.

Se realiza lo mismo para cada uno de los filtros diseñados de tal manera que los filtros pasivos conforman un solo banco de filtros como el que se aprecia en la Figura 3.78.

4. Análisis en régimen permanente del sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag

La demanda instantánea de energía de la planta Adelca con sede en Alóag tiene un comportamiento variable debido principalmente a la operación de hornos de arco. Las cargas máximas se consideran cuando los hornos de arco (EAF-Electric Arc Furnace) y (LF-Ladle Furnace) trabajan simultáneamente, por el contrario se considera mínima carga cuando ambos hornos no están trabajando.

4.1. Flujos de carga del sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag

Dentro de los casos de estudio se analizan las siguientes condiciones:

Los casos de estudio se han establecido en función de la topología de la red en estudio. El sistema bajo estudio es un sistema radial compuesto de dos ramales principales nombrados B_HORNOS_1 y B_SERVICOS_1. En el primer ramal se tiene un sistema de alta, media y baja tensión que alimenta las dos cargas más importantes de la red en estudio, las cuales son los hornos de arco eléctrico EAF y LF.

En el segundo ramal se encuentran otras cargas que en conjunto resultan ser significativas, estas cargas son: SERVICIOS_ACERÍA, PLANTA_DE_HUMOS, OXIGENO, CHATARRA e INDURA. Para el análisis se considera como barra de referencia la barra ADELCA a 138 kV.

La planta de Adelca con sede en Alóag dispone de filtros pasivos para mitigar el 3ro y 4to armónico. Estos filtros fueron diseñados para condiciones distintas a las actuales por lo que se ha determinado que no poseen un desempeño óptimo para cumplir con su función primordial de atenuar armónicos en la magnitud esperada. Así mismo, se ha realizado un nuevo diseño de filtros pasivos en base a información actualizada de la planta de Adelca con sede en Alóag en la sección 3.6.3.

Por lo tanto se presentan flujos de carga para las condiciones de la planta industrial con los filtros actuales, con filtros diseñados en la sección 3.6.3. y un caso de contingencia de salida de los filtros pasivos. Dentro de cada caso se analizará un escenario de máxima carga y mínima carga en la planta industrial de estudio. Para esto se empieza analizando la planta industrial sin filtros pasivos existentes, posteriormente con filtros pasivos existentes y finalmente con los filtros pasivos diseñados.

4.1.1. Flujos de carga SIN FILTROS PASIVOS

- Condición de Máxima Carga en la planta Adelca.

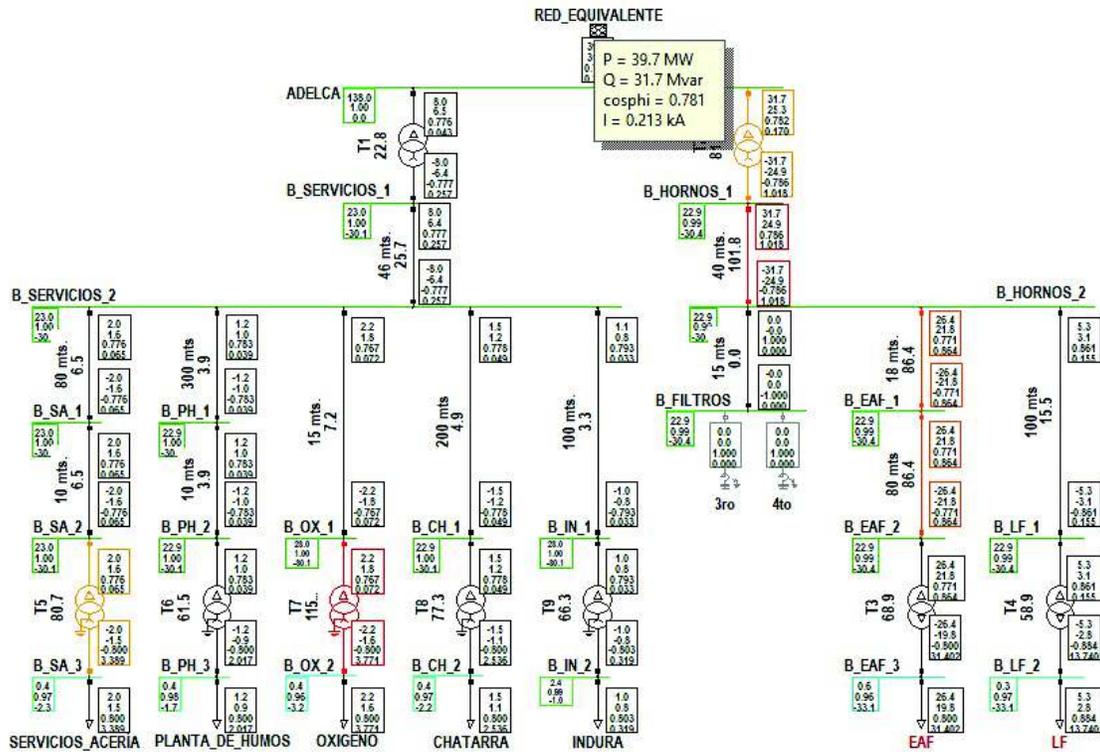


Figura 4.1 Flujo de carga para condición de máxima carga.

Se encuentra un caso de contingencia en el cual la planta hipotéticamente no tendría compensación reactiva de ningún tipo. Esto se ve claramente reflejado en el factor de potencia obtenido de 0,78 con característica inductiva.

Tabla 4.1 Flujo de potencia para máxima carga en la barra ADELCA.

<i>Barra ADELCA (138 kV)</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Potencia Activa</i>	39,7	MW
<i>Potencia Reactiva</i>	31,7	MVAR
<i>Factor de Potencia</i>	0,781	Inductivo

Los valores de voltaje en (pu) examinados en las barras de análisis no sobrepasan un valor que amerite corrección de algún tipo.

Tabla 4.2 Nivel de voltaje en las barras para máxima carga.

Barra de análisis.	Magnitud de voltaje (pu).
Horno EAF	0,96
Horno LF	0,97
Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

La cargabilidad del transformador T2 aumenta debido a la falta del suministro de potencia reactiva que otorgan los filtros pasivos.

Tabla 4.3 Cargabilidad de transformadores para máxima carga.

Transformador	Cargabilidad (%)
T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	81,1
T3-EAF	68,6
T4-LF	58,9
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	115
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

▪ **Condición de Mínima Carga en la planta Adelca.**

La potencia activa y reactiva en la barra ADELCA disminuyen con respecto al caso anterior, sin embargo el sistema mantiene un valor de factor de potencia similar a el caso anterior.

Tabla 4.4 Flujo de potencia para mínima carga en la barra ADELCA.

Barra ADELCA (138 kV)	Valor	Unidad
Potencia Activa	8	MW
Potencia Reactiva	6,5	MVAR
Factor de Potencia	0,776	inductivo

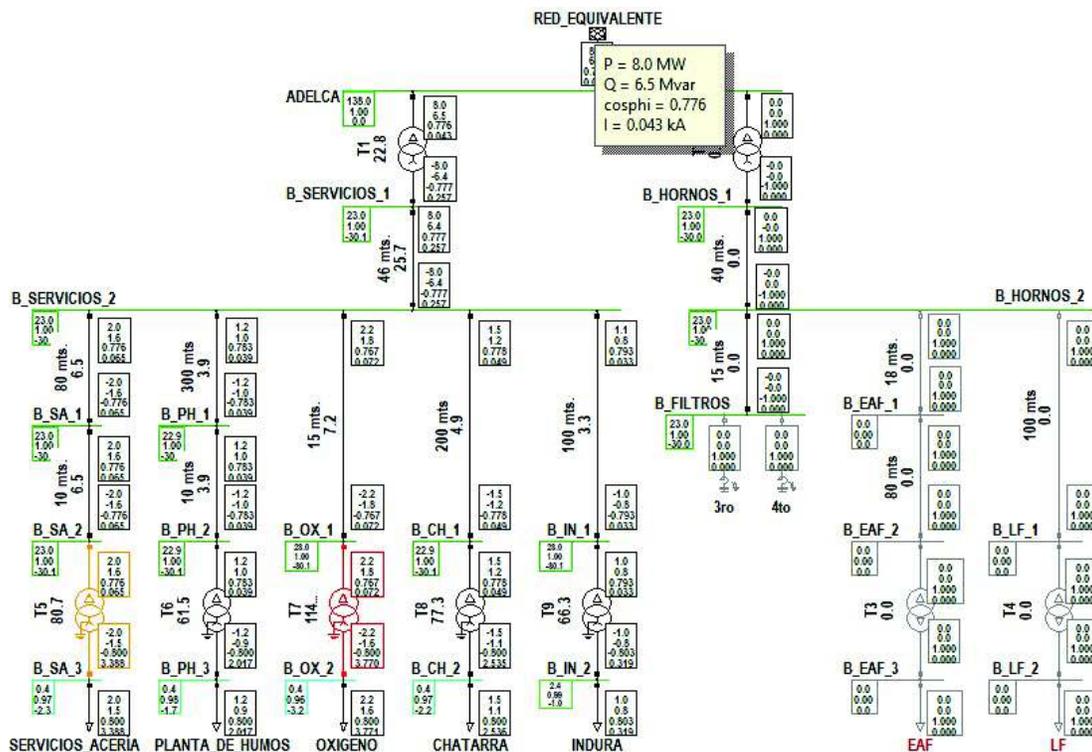


Figura 4.2 Flujo de carga para condición de mínima carga.

Los perfiles de voltaje en (pu) en las barras de estudio de la Tabla 4.5 mantienen valores aceptables. El resto de barras mantienen valores de voltaje nominales.

Tabla 4.5 Nivel de voltaje en las barras para mínima carga.

Barra de análisis	Magnitud de voltaje (pu)
Horno EAF	-
Horno LF	-
Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

En cuanto al transformador T2, su cargabilidad es 0, dado que no existen cargas asociadas que absorban o suministren reactivos.

Tabla 4.6 Cargabilidad de transformadores para máxima carga.

Transformador	Cargabilidad (%)
T1	100
T2	0
T3	100
T4	100
T5	100
T6	100
T7	100
T8	100
T9	100

T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	0
T3-EAF	-
T4-LF	-
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	114,9
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

4.1.2. Flujos de carga con FILTROS PASIVOS EXISTENTES

La Tabla 4.7 muestra los valores de los parámetros de los filtros implementados en la actualidad en la planta Adelca con sede en Alóag.

Tabla 4.7 Tabla resumen de los parámetros de los filtros pasivos existentes.

ORDEN ARMÓNICO	R [Ω]	L [mH]	C [uF]
n=3 – 9,82 MVAR - 23 kV	2,47	18,55	43,6
n=4 – 4,65 MVAR - 23 kV	1,37	21,69	21,8

- **Condición de Máxima Carga en la planta Adelca.**

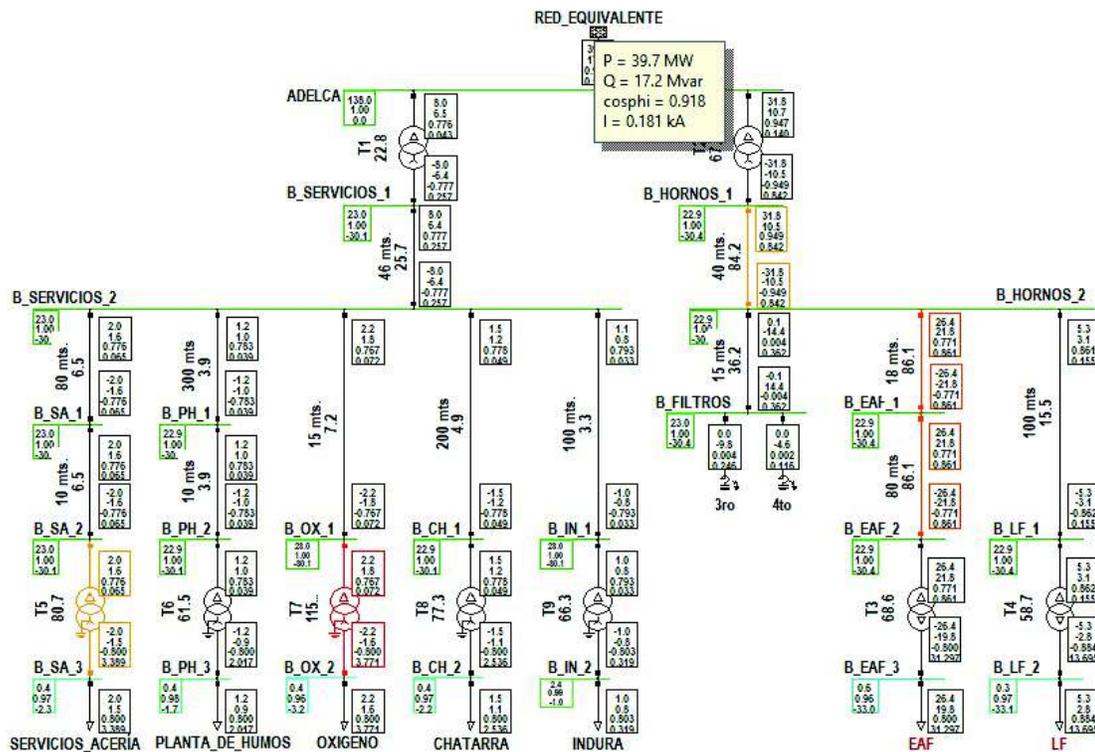


Figura 4.3 Flujo de carga para condición de máxima carga.

Como ya se ha mencionado anteriormente la condición de máxima carga para la planta de Adelca con sede en Alóag, se origina cuando los hornos de arco operan simultáneamente en conjunto con las cargas asociadas a la barra de B_SERVICIOS_2.

De la simulación realizada se puede deducir la siguiente información:

Los filtros pasivo actuales contribuyen con una potencia reactiva de compensación de (9,82 + 4,65) MVAR, es decir; 14,47 MVAR en total. Esto contribuye a mejorar sustancialmente el factor de potencia en el punto más externo de la red de estudio.

Pero se puede apreciar la necesidad de un ligera compensación reactiva adicional para solventar el problema de corrección de factor de potencia hasta por lo menos un valor recomendable de 0,93.

La Tabla 4.8 muestra un valor de factor de potencia en la barra ADELCA de 0,92.

Tabla 4.8 Flujo de potencia para máxima carga en la barra ADELCA.

Barra ADELCA (138 kV)	Valor	Unidad
Potencia Activa	39.7	MW
Potencia Reactiva	17,2	MVAR
Factor de Potencia	0,92	Inductivo

La Tabla 4.9 muestra caídas de voltaje en las barras de análisis, pero estas caídas de voltaje están dentro de un límite de 10 % e inclusive inferiores al 5 %.

Tabla 4.9 Nivel de voltaje en las barras para máxima carga.

Barra de análisis	Magnitud de voltaje (pu)
Horno EAF	0,96
Horno LF	0,97
Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

Los transformadores muestran una cargabilidad normal. A excepción del transformador T7 listado en la Tabla 4.10, el cual tiene un sobrecarga del 15%.

Tabla 4.10 Cargabilidad de transformadores para máxima carga.

<i>Transformador</i>	<i>Cargabilidad (%)</i>
T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	67,6
T3-EAF	68,6
T4-LF	58,7
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	115
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

- **Condición de Mínima Carga en la planta Adelca.**

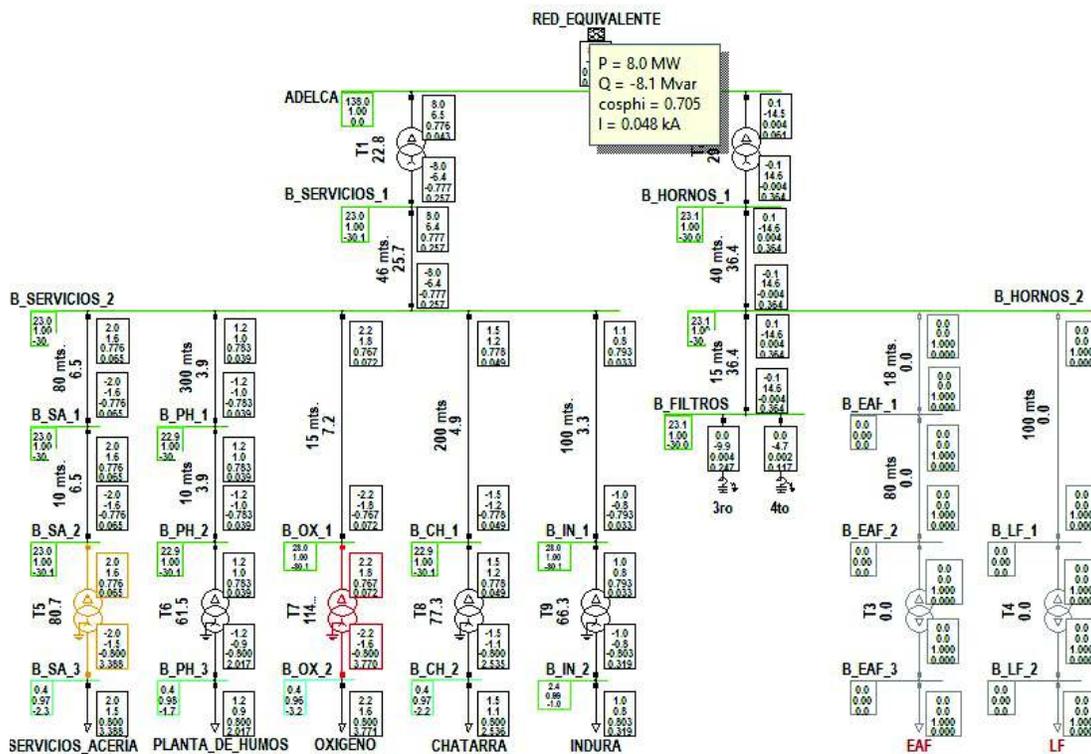


Figura 4.4 Flujo de carga para condición de mínima carga.

De la simulación realizada se puede deducir la siguiente información:

Es este caso el factor de potencia, en el escenario de no operación simultánea de los hornos de arco se traduce en un factor de potencia capacitivo, por la compensación

realizada por los filtros en la barra ADELCA. Esto conlleva a tener un factor de potencia relativamente bajo de 0,72 de característica capacitiva.

Tabla 4.11 Flujo de potencia para máxima carga en la barra ADELCA.

Barra ADELCA (138 kV)	Valor	Unidad
Potencia Activa	8,0	MW
Potencia Reactiva	-8.1	MVAR
Factor de Potencia	0,705	capacitivo

Los perfiles de voltaje mantienen una caída menor al 5 %. Lo cual puede considerarse aceptable. Los hornos de arco no intervienen en este análisis.

Tabla 4.12 Nivel de voltaje en las barras para mínima carga.

Barra de análisis	Magnitud de voltaje (pu)
Horno EAF	-
Horno LF	-
Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

El transformador T7 mantiene una sobrecarga del 15 %.

Tabla 4.13 Cargabilidad de transformadores para mínima carga.

Transformador	Cargabilidad (%)
T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	29
T3-EAF	-
T4-LF	-
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	114,9
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

4.1.3. Flujos de carga con Filtros Pasivos Diseñados

Los parámetros calculados en los filtros diseñados se tabulan en la Tabla 4.14, para esto se han tomado en cuenta los resultados de los cálculos expuestos en la sección 3.6.3.

Tabla 4.14. Tabla resumen de filtros pasivos diseñados.

ORDEN ARMÓNICO	R [Ω]	L [mH]	C [μ F]
n=2 - 10 MVAR - 23 kV	0,588	46,77	37,61
n=3 - 7,12 MVAR - 23 kV	0,31	24,63	31,74
n=5 - 3 MVAR - 23 kV	0,245	19,49	14,44

Estos parámetros fueron diseñados para atenuar el contenido armónico de los hornos, que se propaga directamente hacia la red externa. Otra de las funciones de los filtros diseñados corresponde a realizar una compensación reactiva efectiva que otorgue un factor de potencia cercano al factor de potencia asumido dentro de la etapa de diseño de los filtros pasivos. Este factor de potencia para cálculo de la potencia reactiva de compensación fue fijado en 0,96, por lo que se espera que las simulaciones con dicho filtros en el software computacional DigSILENT arrojen valores similares al 0,96 de factor de potencia.

- **Condición de Máxima Carga en la planta Adelca.**

Como se observa en la Figura 4.5 se incorporan los 3 filtros diseñados en la barra B_HORNOS_2 de 23 kV para realizar los respectivos flujos de carga.

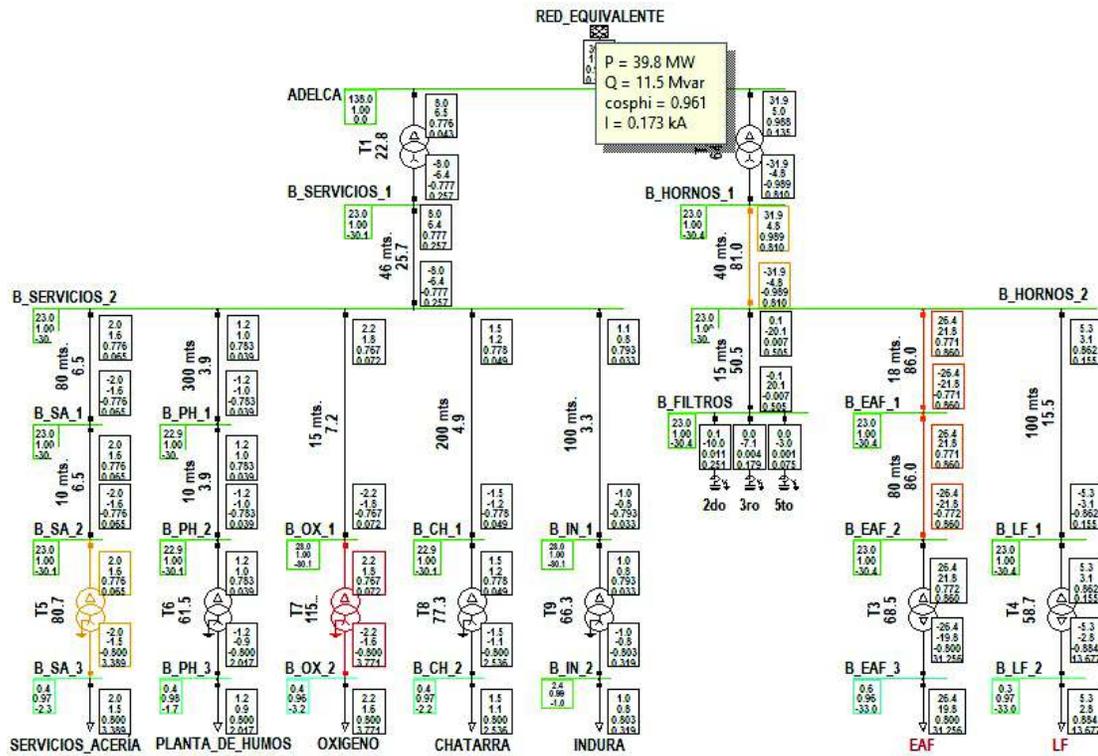


Figura 4.5 Flujo de carga para condición de máxima carga.

En los datos tabulados en Tabla 4.15 se aprecia que tras la colocación de los filtros pasivos diseñados se ha logrado obtener un factor de potencia de 0,96 inductivo a través de una potencia reactiva de compensación total de 20,12 MVAR.

Tabla 4.15 Flujo de potencia para máxima carga en la barra ADELCA.

Barra ADELCA (138 kV)	Valor	Unidad
Potencia Activa	39,8	MW
Potencia Reactiva	11,5	MVAR
Factor de Potencia	0,961	Inductivo

Las caídas de voltaje para este caso se mantienen al igual que el caso anterior por debajo de un 5 %.

Tabla 4.16 Nivel de voltaje en las barras para máxima carga.

Barra de análisis	Magnitud de voltaje (pu)
Horno EAF	0,96
Horno LF	0,97
Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

La cargabilidad del transformador T2, alcanza un valor de 66,4% por acción de los nuevos filtros los cuales aportan una mayor cantidad de potencia reactiva que los filtros anteriores.

Tabla 4.17 Cargabilidad de transformadores para máxima carga.

Transformador	Cargabilidad (%)
T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	66,4
T3-EAF	68,5
T4-LF	58,7
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	115
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

- **Condición de Mínima Carga en la planta Adelca.**

Para este escenario el factor de potencia en la barra ADELCA decae hasta un factor de potencia de 0,55 capacitivo. Para este caso, es recomendable utilizar unicamente el filtro de 3er armónico diseñado y desconectar el resto de filtros esto ayudará a mantener un valor cercano al factor de potencia unitario.

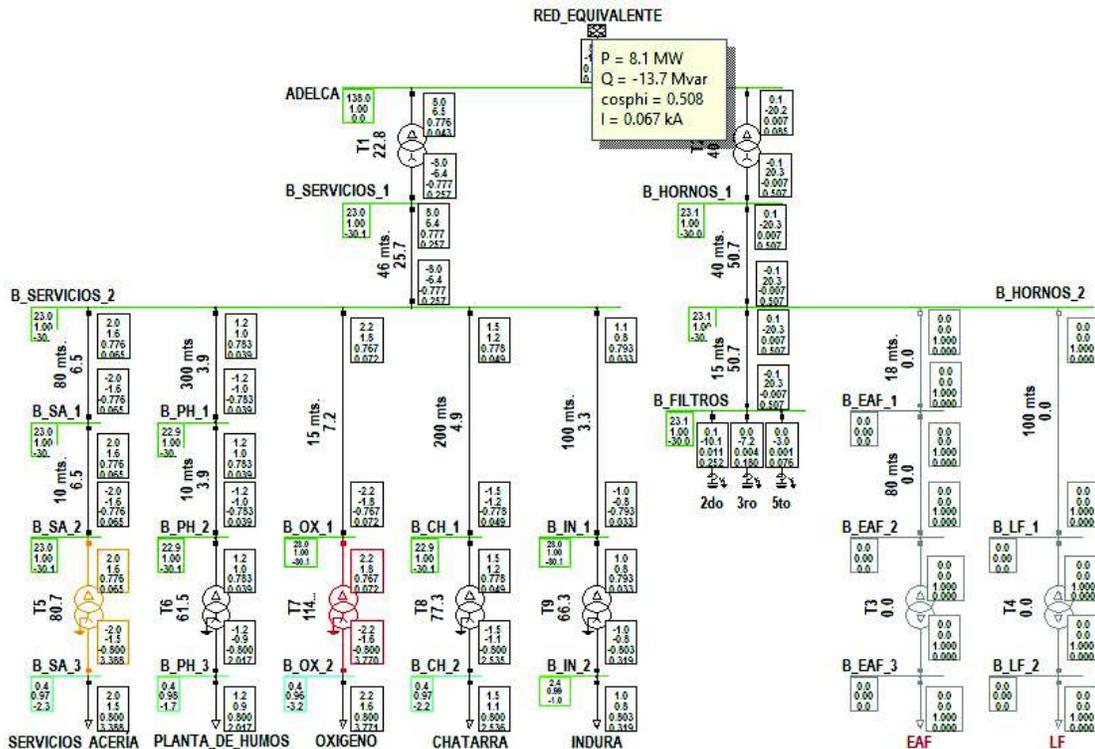


Figura 4.6 Flujo de carga para condición de mínima carga.

Tabla 4.18 Flujo de potencia para mínima carga en la barra ADELCA.

Barra ADELCA (138 kV)	Valor	Unidad
Potencia Activa	8.1	MW
Potencia Reactiva	-13,7	MVAR
Factor de Potencia	0,508	capacitivo

Los voltajes de los hornos de arco no interviene en este análisis y el resto de caídas de voltaje en las barras mantienen un valor aceptable.

Tabla 4.19 Nivel de voltaje en las barras para mínima carga.

Barra de análisis	Magnitud de voltaje (pu)
Horno EAF	-
Horno LF	-

Servicios Acería	0,97
Planta de Humos	0,98
Oxígeno	0,96
Chatarra	0,97
Indura	0,99

La cargabilidad del transformador T2 disminuye hasta un 40,4 %. Esto se debe a la no inclusión de los hornos de arco en la simulación del escenario.

Tabla 4.20 Cargabilidad de transformadores para mínima carga.

Transformador	Cargabilidad (%)
T1-Servicios	22,8
T2-Hornos	40,4
T3-EAF	-
T4-LF	-
T5-Servicios Acería	80,7
T6-Planta de Humos	61,5
T7-Oxígeno	114,9
T8-Chatarra	77,3
T9-Indura	66,3

4.2. Cálculo de cortocircuitos en el sistema eléctrico de la planta Adelca con sede en Alóag

4.2.1. Cortocircuito trifásico para máximas corrientes

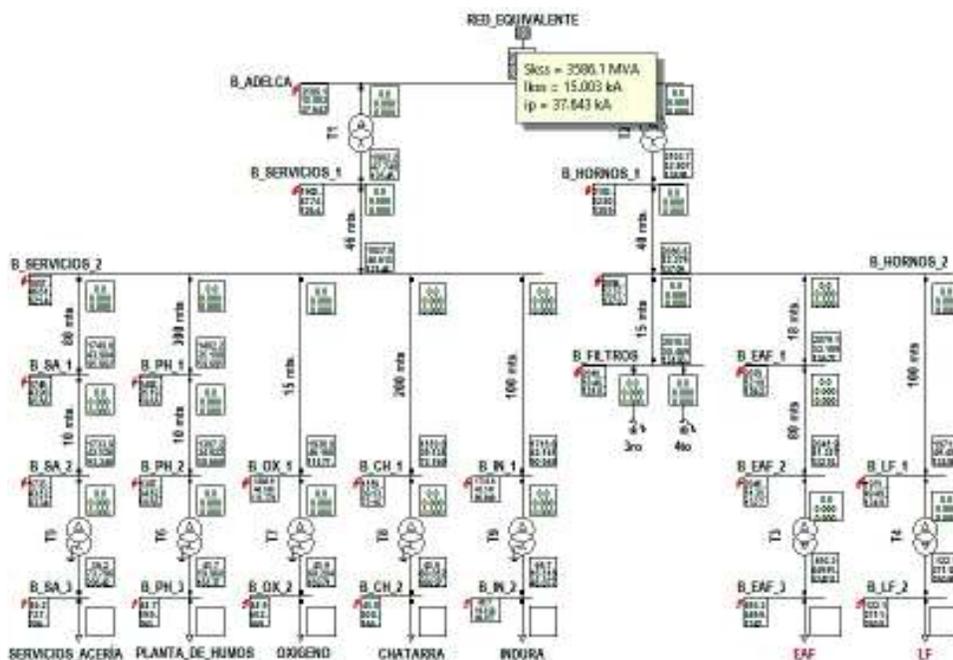


Figura 4.7 Cortocircuito trifásico para máximas corrientes en todas las barras del sistema.

4.2.2. Cortocircuito monofásico para máximas corrientes

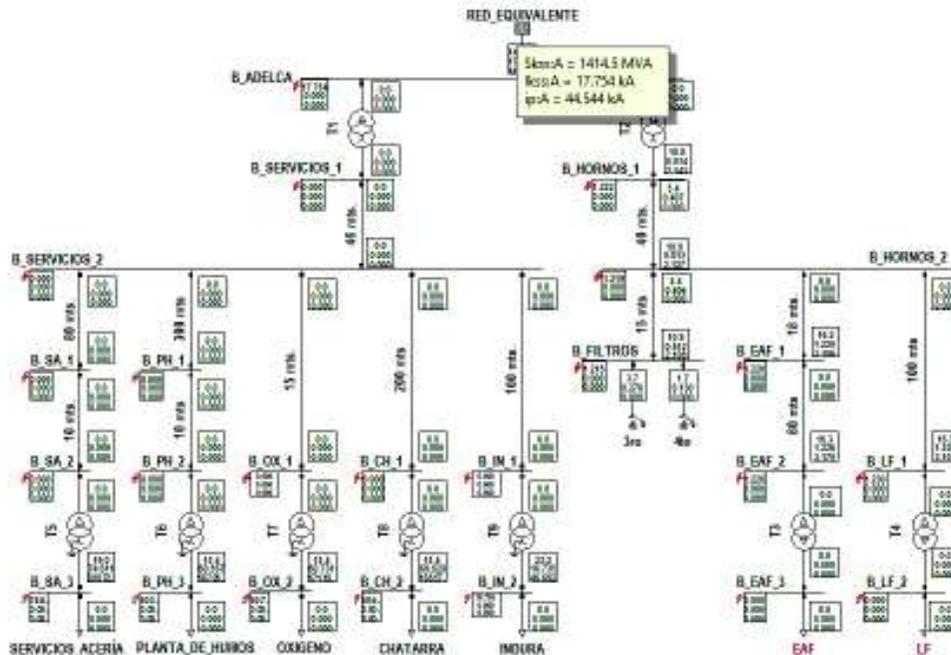


Figura 4.8 Cortocircuito monofásico para máximas corrientes en todas las barras del sistema.

Se puede apreciar que las fallas monofásicas en las barras de 23 kV son iguales a cero.

Tabla 4.21 Corrientes trifásicas y monofásicas en la barras de carga para máximas corrientes.

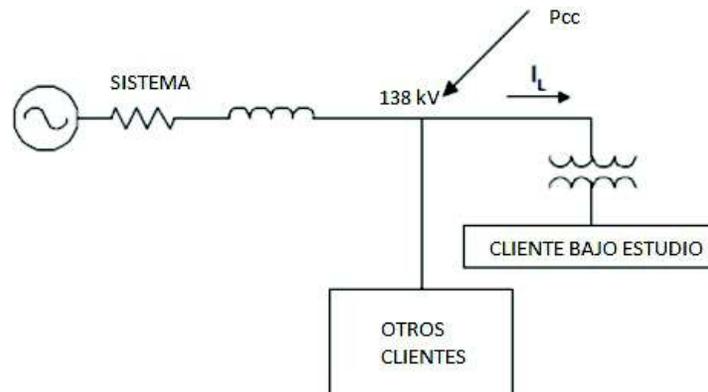
Barra de análisis.	Tipo de cortocircuito		Unidad
	Monofásico	Trifásico	
Horno EAF	0	449,92	kA
Horno LF	0	271,13	
Servicios Aciería	74,61	73,79	
Planta de Humos	60,57	59,96	
Oxígeno	60,73	60,2	
Chatarra	60,63	60,05	
Indura	16,74	16,51	

Dado que los equivalentes de la red para máximas y mínimas corrientes son similares, los valores de cortocircuitos resultan también ser similares. Independientemente de si se simulan los cortocircuitos con o sin filtros pasivos los resultados de los cortocircuitos monofásico y trifásico son los mismos.

4.3. Análisis de armónicos

4.3.1. Determinación del punto de acoplamiento común (Pcc)

La normativa IEEE 519 - 1992 explica que los límites en la práctica recomendada están destinados para aplicarlos en el punto de acoplamiento común (Pcc), es decir; es en este punto donde los componentes armónicos deben ser evaluados. El Pcc generalmente se toma como el punto en el sistema de potencia más cercano al cliente donde el operador del sistema podría ofrecer servicio a otro cliente.



Ecuación 4.1 Pcc en el lado de alto voltaje para usuarios industriales.

Frecuentemente para otorgar el servicio a clientes industriales el punto de acoplamiento común (Pcc) se encuentra en el lado de alto voltaje del transformador de servicio. La práctica recomendada en la norma IEEE 519 - 1992 evita que un cliente dañe a otro, mediante una posible contaminación armónica por presencia de cargas no lineales.

De esta manera, la norma no aplica los límites establecidos dentro del sistema de un usuario o para cargas individuales, sino; para clientes individuales.

Para el caso de estudio actual, el punto de acoplamiento común (Pcc) para analizar los límites de distorsión armónica de corriente está definido en el lado primario del transformador de servicio, que corresponde a un nivel de voltaje de 138 kV hacia la barra de la subestación de Santa Rosa.

4.3.2. Límites establecidos en la norma IEEE 519 - 1992

La norma IEEE 519 - 1992 establece límites definidos tanto para voltaje como para corriente. Estos valores deben ser evaluados en el punto de acoplamiento común (Pcc). Los límites establecidos por la norma IEEE 519 - 1992 se encuentran en la Tabla 4.22. Los

límites de distorsión total de voltaje se muestran para distintos valores de voltaje en el punto de acoplamiento común (Pcc).

Tabla 4.22 Límites de distorsión de voltaje según norma IEEE 519 - 1992.

<i>Voltaje de Barra en el Pcc</i>	<i>Distorsión de voltaje individual (%)</i>	<i>Distorsión de Voltaje Total THD (%)</i>
<i>$V \leq 1.0 \text{ kV}$</i>	5.0	8.0
<i>$1 \text{ kV} \leq V \leq 69 \text{ kV}$</i>	3.0	5.0
<i>$69 \text{ kV} \leq V \leq 161 \text{ kV}$</i>	1.5	2.5
<i>$161 \text{ kV} < V$</i>	1.0	1.5

Los límites establecidos para la distorsión de corriente se muestran en base a las distintas relaciones de cortocircuito ($SCR = I_{sc}/I_L$), distintos niveles de voltaje y para distintos órdenes de armónicos. Ha de notarse que estos límites se valoran en base al índice de distorsión de demanda total (TDD).

Tabla 4.23 Límites de distorsión de corriente para sistemas sobre 60 kV hasta 161 kV según norma IEEE 519 - 1992.

<i>Límites de Distorsión de Corriente para sistemas (desde 69 kV hasta 161 kV)</i>						
<i>Orden armónico individual (Armónicos Individuales)</i>						
<i>I_{sc}/I_L</i>	<i>$3 \leq h < 11$</i>	<i>$11 \leq h < 17$</i>	<i>$17 \leq h < 23$</i>	<i>$23 \leq h < 35$</i>	<i>$35 \leq h \leq 50$</i>	<i>TDD</i>
<i>< 20</i>	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
<i>20 < 50</i>	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
<i>50 < 100</i>	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
<i>100 < 1000</i>	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
<i>> 1000</i>	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Los límites de corriente armónica no usan las definiciones comunes de armónicos. Es por eso que la norma IEEE 519 - 1992 establece el análisis de la distorsión total en términos de la distorsión total de demanda (TDD), en vez de establecerlo en función de la distorsión armónica total (THD). Los límites establecidos en la Tabla 4.23 establecen que dichos límites corresponden a los armónicos de orden impar. Los armónicos pares se restringen

al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente en la práctica recomendada.

4.3.3. Límites de distorsión de corriente en el Pcc para el caso de estudio

Para el caso de la planta Adelca con sede en Alóag el voltaje en el punto de acoplamiento común con la red externa es igual a 138 kV, el factor I_{sc}/I_L es igual a 70,5; lo cual está comprendido entre 50 y 100.

$$I_L = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot V_N} = \frac{50,8}{\sqrt{3} \cdot (138)} = 0,213 \text{ kA}$$

$$SCR = I_{sc}/I_L = \frac{15,003 \text{ kA}}{0,213 \text{ kA}} = 70,5$$

Finalmente, como ya se ha establecido anteriormente; los armónicos de corriente predominantes en magnitud de distorsión con respecto a la fundamental son los armónicos de orden 2 hasta los armónicos de orden 7, siendo el resto de los ellos relativamente pequeños en magnitud. Entonces los armónicos generados por la operación de los hornos de arco están comprendidos en un rango menor al armónico de orden 11. Basados en lo anterior nuestro análisis lo realizaremos acorde a los límites establecidos en la Tabla 4.23 para un I_{sc}/I_L de $50 < 100$ y $h < 11$.

Tabla 4.24 Límites de distorsión de corriente establecidos para el caso de estudio.

I_{sc}/I_L	$h < 11$	TDD
50 < 100	5	6

De tal manera que la distorsión individual permitida por la norma sería del 5% para armónicos impares de corriente cuyo orden sea menor a los armónicos de orden 11, además; se contempla una distorsión total de demanda igual al 6%.

4.3.4. Índices de distorsión armónica de corriente en el Pcc

Simulink dispone de un módulo denominado “FFT” o mejor conocido como transformada rápida de Fourier, dentro del bloque “Powergui”; esta herramienta permite obtener los niveles de distorsión de corriente o voltaje en porcentaje de los componentes individuales con respecto a la componente fundamental.

La herramienta permite obtener un listado numérico de las componentes en porcentaje o bien un gráfico de barras de las componentes hasta la frecuencia de análisis deseada.

Las simulaciones se realizan para una sola fase dado que los hornos de arco para ambos casos han sido modelados como cargas balanceadas, de tal manera que los modelos de horno de arco de las tres fases trabajan con los mismos valores de parámetros estimados.

4.3.4.1. Determinación de los índices de distorsión armónica SIN FILTROS PASIVOS

Para la determinación de los índices de distorsión armónica de corriente se ha utilizado el módulo FFT de Matlab/Simulink con el cual se ha podido descomponer las formas de onda de corriente simuladas en la componente fundamental más las componentes armónicas, de esta manera es posible conocer el nivel de distorsión total de la corriente en el Pcc, además de conocer las componentes armónicas individuales en porcentaje de la corriente fundamental.

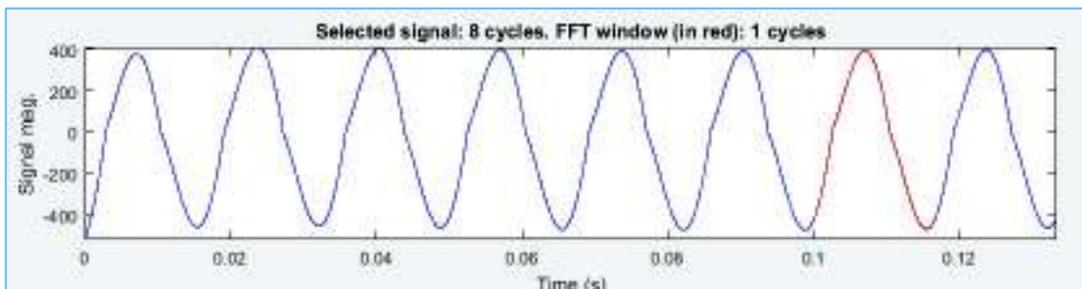


Figura 4.9 Forma de onda de corriente simulada en el Pcc.

Fundamental	= 422.7 peak (298.9 rms)
THD	= 6.94%
0 Hz (DC):	8.21% 270.0°
60 Hz (Fnd):	100.00% -57.8°
120 Hz (h2):	2.57% 258.6°
180 Hz (h3):	5.69% -64.3°
240 Hz (h4):	1.39% 159.6°
300 Hz (h5):	2.12% 192.5°
360 Hz (h6):	0.80% 60.2°
420 Hz (h7):	0.93% 93.2°
480 Hz (h8):	0.59% -51.1°
540 Hz (h9):	0.42% -14.9°
600 Hz (h10):	0.51% 206.5°
660 Hz (h11):	0.26% 234.4°
720 Hz (h12):	0.37% 111.4°
780 Hz (h13):	0.14% 143.9°
840 Hz (h14):	0.26% 2.6°
900 Hz (h15):	0.02% 54.4°
960 Hz (h16):	0.24% 253.8°

Figura 4.10 THD de corriente y componentes armónicas de corriente en el Pcc.

La herramienta proporciona información de las componentes armónicas individuales en porcentaje con respecto a la fundamental.

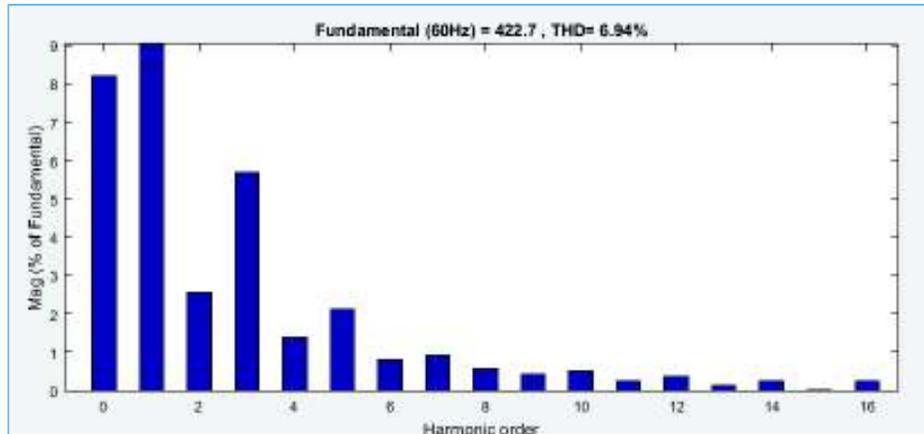


Figura 4.11 Diagrama de barras de espectro de frecuencias en Matlab/Simulink.

La Tabla 4.25 y Tabla 4.26 muestran una comparación de los índices armónicos individuales y el TDD con los valores establecidos en la normativa IEEE 519 - 1992.

Tabla 4.25 Comparación de los índices con los límites establecidos en IEEE 519 - 1992.

ORDEN ARMÓNICO	CORRIENTE ARMÓNICA INDIVIDUAL	LÍMITE IEEE 519-1992	EXCEDE	CUMPLE
2	2,57	1,25	1,32	NO
3	5,69	5	0,69	NO
4	1,39	1,25	0,14	NO
5	2,12	5	NO	SI
6	0,8	1,25	NO	SI
7	0,93	5	NO	SI

Para este caso se ha obtenido un índice de distorsión total de corriente de 6,94%. Un índice relativamente superior en comparación con lo establecido en la norma.

Tabla 4.26 Comparación del TDD con el límite establecido en IEEE 519 - 1992.

	TDD	LÍMITE TDD 519 - 1992	EXCEDE	CUMPLE
CORRIENTE	6,94	6	0,94	NO

Los valores calculados se desprenden del análisis para una sola fase. Los valores obtenidos mediante simulación para las fases restantes en el Pcc tienen valores similares a los obtenidos en la Tabla 4.25 y la Tabla 4.26.

4.3.4.2. Determinación de los índices de distorsión armónica con FILTROS PASIVOS ACTUALES

En la forma de onda simulada en el Pcc se aprecia una leve atenuación por efecto de los filtros actuales que dispone la planta de Adelca con sede en Alóag.

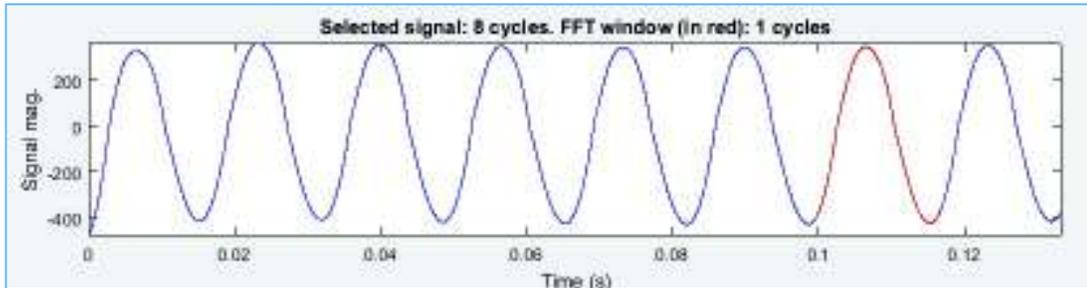


Figura 4.12 Forma de onda de corriente simulada en el Pcc.

El análisis del espectro de frecuencias se realiza hasta una frecuencia no mayor a 1000 Hz dado que son los componentes más importantes y significativos del espectro armónico.

La Figura 4.14 nos muestra un gráfico de barras donde se aprecia de mejor manera la magnitud de cada componente armónico con respecto a la fundamental.

Fundamental	= 396.2 peak (280.2 rms)
THD	= 5.67%
0 Hz (DC) :	9.11% 270.0°
60 Hz (Fnd) :	100.00% -53.2°
120 Hz (h2) :	3.69% 255.0°
180 Hz (h3) :	3.89% 237.4°
240 Hz (h4) :	0.61% 121.8°
300 Hz (h5) :	1.29% 183.7°
360 Hz (h6) :	0.51% 56.4°
420 Hz (h7) :	0.63% 89.0°
480 Hz (h8) :	0.41% -61.9°
540 Hz (h9) :	0.27% -26.2°
600 Hz (h10) :	0.40% 197.7°
660 Hz (h11) :	0.20% 221.5°
720 Hz (h12) :	0.28% 105.1°
780 Hz (h13) :	0.11% 141.1°
840 Hz (h14) :	0.18% -10.7°
900 Hz (h15) :	0.01% 176.5°
960 Hz (h16) :	0.19% 238.0°

Figura 4.13 THD de corriente y componentes armónicas de corriente en el Pcc.

Se aprecia una ligera atenuación de los componentes armónicos pero se sigue teniendo un fuerte componente del 3er armónico a pesar de tener un filtro dedicado para dicho armónico.

Además, debe notarse la presencia de un componente de orden 2 (120 Hz) en la simulación realizada.

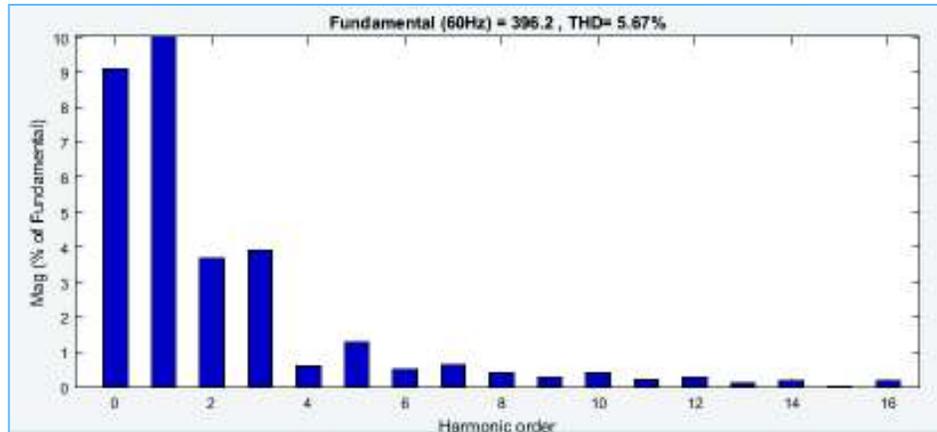


Figura 4.14 Diagrama de barras de espectro de frecuencias en Matlab/Simulink.

La Tabla 4.25 y Tabla 4.26 muestran la comparación de los índices armónicos individuales obtenidos mediante simulación con los filtros actuales que la planta Adelca con sede en Alóag dispone y el TDD para el mismo caso con los valores establecidos en la normativa IEEE 519 - 1992.

Tabla 4.27 Comparación de los índices con los límites establecidos en IEEE 519 - 1992.

ORDEN ARMÓNICO	CORRIENTE ARMÓNICA INDIVIDUAL	LÍMITE 519 - 1992	EXCEDE	CUMPLE
2	3,69	1,25	2,44	NO
3	3,89	5	NO	SI
4	0,61	1,25	NO	SI
5	1,29	5	NO	SI
6	0,51	1,25	NO	SI
7	0,63	5	NO	SI

La comparación realizada en la Tabla 4.27 muestra que a pesar de no cumplir con los límites individuales establecidos para el armónico de orden 2 (120 Hz), a través de los filtros actuales se logra cumplir con los requisitos de TDD como se muestra en la Tabla 4.28.

Tabla 4.28 Comparación del TDD con el límite establecido en IEEE 519 - 1992.

	TDD	LÍMITE TDD 519 - 1992	EXCEDE	CUMPLE
CORRIENTE	5,67	6	NO	SI

Se han obtenido valores similares en las simulaciones para las otras dos fases en el punto de acoplamiento común (Pcc) para este caso.

4.3.4.3. Determinación de los índices de distorsión armónica con FILTROS PASIVOS DISEÑADOS

Para la determinación de los índices de distorsión en este apartado, se ha utilizado la información de los parámetros de los filtros pasivos diseñados de la Tabla 4.14.

Los filtros pasivos fueron diseñados para atenuar los armónicos de orden 2 (120 Hz), 3 (180 Hz) y 5 (300 Hz). De esta manera debe notarse una disminución en la magnitud de dichos componentes a través de la siguiente simulación.

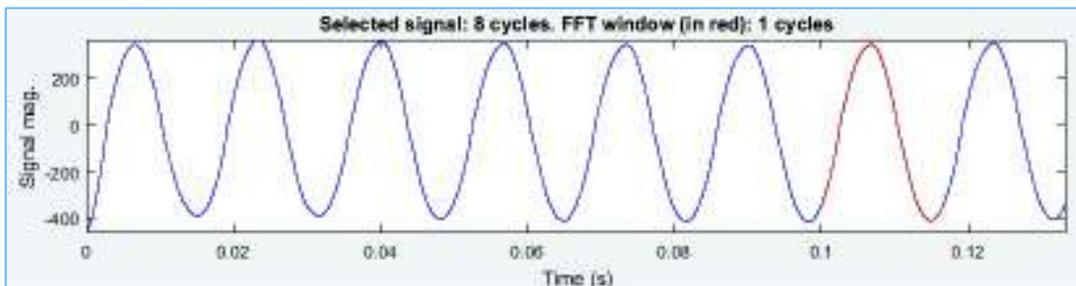


Figura 4.15 Forma de onda de corriente simulada en el Pcc.

Fundamental	= 384.9 peak (272.2 rms)
THD	= 3.62%
0 Hz (DC):	10.07% 270.0°
60 Hz (Fnd):	100.00% -51.2°
120 Hz (h2):	1.39% 194.0°
180 Hz (h3):	2.80% 229.8°
240 Hz (h4):	1.38% 152.6°
300 Hz (h5):	0.50% 125.5°
360 Hz (h6):	0.42% 56.4°
420 Hz (h7):	0.59% 87.4°
480 Hz (h8):	0.39% -65.3°
540 Hz (h9):	0.26% -30.0°
600 Hz (h10):	0.39% 194.0°
660 Hz (h11):	0.20% 217.7°
720 Hz (h12):	0.27% 100.6°
780 Hz (h13):	0.10% 137.3°
840 Hz (h14):	0.18% -17.3°
900 Hz (h15):	0.01% 185.0°
960 Hz (h16):	0.19% 231.8°

Figura 4.16 THD de corriente y componentes armónicas de corriente en el Pcc.

La Figura 4.16 muestra una disminución de las componentes armónicas individuales para las cuales los filtros pasivos fueron diseñados. Esto determina a su vez una disminución de la distorsión total armónica de corriente.

En la Figura 4.17 se puede apreciar una significativa disminución del contenido armónico de corriente en el Pcc tras la simulación de los filtros pasivos diseñados.

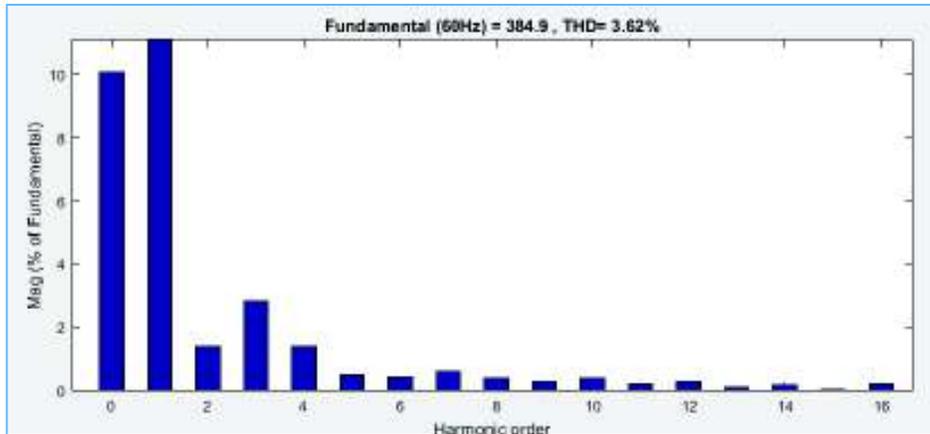


Figura 4.17 Diagrama de barras de espectro de frecuencias en Matlab/Simulink.

Las siguientes tablas muestran la comparación de los índices de distorsión con los límites recomendados para el caso de estudio.

Tabla 4.29 Comparación de los índices con los límites establecidos en IEEE 519 – 1992.

ORDEN ARMÓNICO	CORRIENTE ARMÓNICA INDIVIDUAL	LÍMITE 519 - 1992	EXCEDE	CUMPLE
2	1,39	1,25	0,07	NO
3	2,8	5	NO	SI
4	1,38	1,25	0,13	NO
5	0,50	5	NO	SI
6	0,42	1,25	NO	SI
7	0,59	5	NO	SI

El valor obtenido de TDD de corriente es igual al 3,62 %. Con este diseño se ha logrado disminuir la distorsión total de corriente y además se ha logrado disminuir la magnitud de las componentes individuales para cuya frecuencia los filtros han sido diseñados.

Tabla 4.30 Comparación del TDD con el límite establecido en IEEE 519 - 1992.

	TDD	TDD 519 - 1992	CUMPLIMIENTO NORMA
CORRIENTE	3,62	6	SI

La componente más importante en magnitud resulta ser el armónico de orden 3 (180 Hz) con un 2,8 % de distorsión con respecto a la fundamental. Sin embargo el resto de armónicos han sido atenuados satisfactoriamente, a excepción de los armónicos de orden 2 (120 Hz) y 4 (240 Hz) que mantienen un exceso de distorsión individual de corriente mínima superior a lo recomendado, como se evalúa en la Tabla 4.29.

Se han obtenido valores similares en las simulaciones para las otras dos fases en el punto de acoplamiento común (Pcc).

4.3.5. Interarmónicos de corriente de los hornos de arco eléctrico

El contenido armónico para los hornos de arco varía constantemente por lo que resulta difícil de valorarlo de una forma determinística. Sin embargo, es posible manejar de manera estadística datos que ayuden a comprender mejor el comportamiento de este tipo de cargas no lineales.

Tabla 4.31 Contenido armónico e interarmónico de corriente en porcentaje con respecto a la fundamental para el horno de arco (EAF).

ORDEN	FREC. (Hz)	FASE A	FASE B	FASE C
1	60	100,00	100,00	100,00
	90	8,07	6,46	7,28
2	120	3,06	4,61	5,35
	150	4,48	4,30	5,12
3	180	3,27	2,67	2,06
	210	3,74	3,32	2,85
4	240	1,38	1,56	1,71
	270	2,95	2,41	2,43
5	300	1,38	1,68	1,86
	330	2,24	1,86	2,19
6	360	1,51	1,32	0,96
	390	1,88	1,65	1,53
7	420	1,09	1,03	1,06
	450	1,82	1,75	1,63
8	480	1,00	0,95	1,35
	510	1,93	1,60	1,41
9	540	1,12	0,73	0,53
	570	1,41	1,22	1,07
10	600	0,86	0,43	0,32
	630	1,00	0,91	1,00
11	660	0,75	0,67	0,74
	690	1,22	1,30	1,32
12	720	0,74	0,68	0,70
	750	0,96	0,84	1,13
13	780	0,42	0,24	0,31
	810	0,96	0,78	0,72
14	840	0,47	0,18	0,32
	870	0,91	0,64	0,61
15	900	0,34	0,39	0,44
	930	0,82	0,64	0,68
16	960	0,37	0,26	0,23
	990	0,72	0,65	0,74

La Tabla 4.31 muestra la magnitud de las componentes armónicas e interarmónicas medidas en el horno de arco EAF.

Dicha tabla esta tabulada hasta una frecuencia de 1000 Hz para el análisis de los componente más representativos en magnitud. El analizador de calidad de energía utilizado otorga información de armónicos e interarmónicos cada 30 Hz, por lo que es posible apreciar los componentes que se encuentran a frecuencias intermedias entre los armónicos de orden entero.

Tabla 4.32 Contenido armónico e interarmónico de corriente en porcentaje con respecto a la fundamental para el horno cuchara (LF).

ORDEN	FREC. (Hz)	FASE A	FASE B	FASE C
1	60	100,00	100,00	100,00
	90	5,64	1,81	2,75
2	120	2,18	0,39	1,05
	150	1,29	0,44	0,58
3	180	6,50	1,84	2,67
	210	0,86	0,38	0,41
4	240	0,80	0,27	0,35
	270	0,62	0,20	0,31
5	300	1,92	0,82	0,79
	330	0,31	0,15	0,17
6	360	0,23	0,10	0,09
	390	0,27	0,08	0,13
7	420	0,69	0,35	0,44
	450	0,21	0,07	0,12
8	480	0,10	0,08	0,06
	510	0,17	0,04	0,08
9	540	0,39	0,07	0,12
	570	0,16	0,06	0,08
10	600	0,08	0,03	0,03
	630	0,11	0,03	0,06
11	660	0,17	0,06	0,07
	690	0,13	0,05	0,06
12	720	0,08	0,03	0,03
	750	0,09	0,03	0,05
13	780	0,11	0,06	0,05
	810	0,09	0,02	0,04
14	840	0,05	0,01	0,03
	870	0,10	0,02	0,05
15	900	0,06	0,03	0,02
	930	0,07	0,02	0,04
16	960	0,04	0,01	0,02
	990	0,08	0,02	0,04

De esta manera se puede visualizar una importante cantidad de componentes a frecuencias interarmónicas que se visualizan con una mayor magnitud en los componentes de menor orden.

Los resultados de interarmónicos obtenidos para el horno de arco LF (Ladle Furnace) son similares a los obtenidos en el horno EAF (Electric Arc Furnace) pero de menor magnitud. Por lo que ambos hornos guardan una cierta correlación en los resultados obtenidos.

4.4. Comparación del Índice de severidad de parpadeo de corto plazo (Pst) con los límites establecidos en el estándar IEC

Como fue establecido en la sección 2.3.5. los estándares IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-5 e IEC 61000-3-7, definen límites y procedimientos de evaluación para cargas fluctuantes en bajo, medio y alto voltaje. El contenido de los límites establecidos en dichos estándares se resume en la Tabla 4.33 como se muestra a continuación.

Tabla 4.33 Límites de los niveles de severidad de parpadeo de corto plazo (Pst).

<i>Nivel de voltaje</i>	<i>Pst</i>
<i>Bajo voltaje (BV)</i>	1
<i>Medio voltaje (MV)</i>	1
<i>Alto voltaje (AV)</i>	0,8

El índice de severidad de parpadeo de corto plazo (Pst) está establecido en base a un periodo de observación de 10 minutos. Los estándares IEC 61000-3-3 e IEC 61000-3-5 establecen que los límites serán aplicables al parpadeo de voltaje en los terminales de suministro de los equipos bajo prueba.

Mediante un analizador de calidad de energía se han obtenido mediciones de Pst en el horno de arco eléctrico (EAF), al ser la principal carga fluctuante; por lo cual requiere un análisis a través de los límites establecidos en Tabla 4.33. Para esto se utiliza la información del ANEXO XIV.

Tabla 4.34 Comparación del Pst medido en el horno de arco eléctrico (EAF) con el límite establecido.

	<i>Medición Pst</i>	<i>Límite Pst.</i>	<i>EXCESO</i>	<i>CUMPLE</i>
Línea 1	1,5	1	0,5	NO
Línea 2	2,1	1	1,1	NO
Línea 3	2,37	1	1,37	NO

Se puede distinguir que los índices de severidad Pst medidos son altos, lo cual supone un alto nivel de percepción del ojo humano del parpadeo lumínico. Esto se traduce como molestias visuales producidas en el sistema de bajo voltaje.

Para la obtención de los índices de severidad de corto plazo (Pst), en el punto de acoplamiento común definido en la sección 4.3.1. ; se ejecutan simulaciones utilizando los modelos de horno de arco para el comportamiento dinámico y fluctuaciones de voltaje sinusoidal y aleatoria definidos en la sección 3.5.1. Con lo cual se obtienen las formas de onda expuestas en las figuras siguientes:



Figura 4.18 Formas de onda de voltaje obtenidas en el Pcc. Modelo Hiperbólico-Exponencial. Variación de voltaje sinusoidal.

La información de los voltajes simulados en la Figura 4.18 y Figura 4.19 se ha ejecutado utilizando el modelo Hiperbólico-Exponencial.

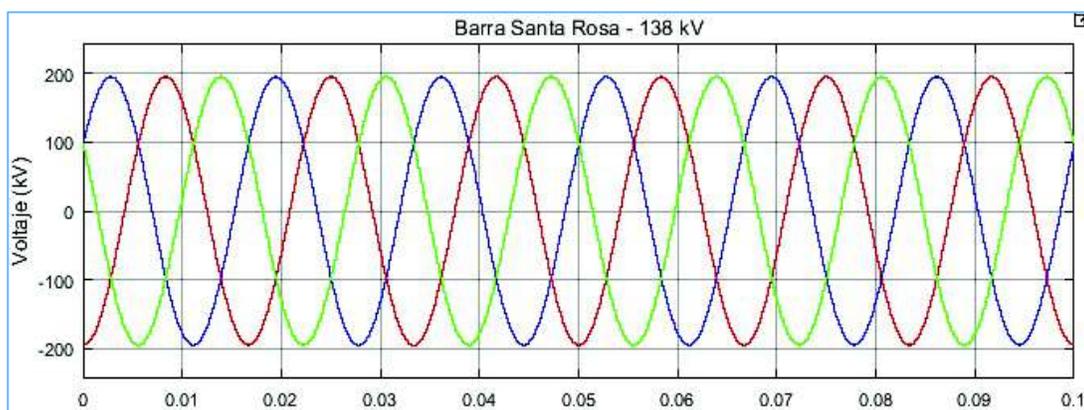


Figura 4.19 Formas de onda de voltaje obtenidas en el Pcc. Modelo Hiperbólico-Exponencial. Variación de voltaje aleatorio.

La información de los voltajes simulados en la Figura 4.18 y Figura 4.19 se almacena en las variables nombradas *Vabc_Pcc_Sinusoidal* y *Vabc_Pcc_Aleatorio*, correspondientes a la variación de voltaje sinusoidal y aleatorio del horno de arco (EAF), en el punto de acoplamiento común (Pcc).

El bloque de “Flickermeter digital” está implementado como se describe en el estándar IEC 61000-4-15. El modelo implementa los primeros cuatro módulos del diseño establecido en dicho estándar, mientras que el análisis estadístico especificado en el módulo 5, se implementa mediante una función externa para el análisis de la señal registrada. [21]

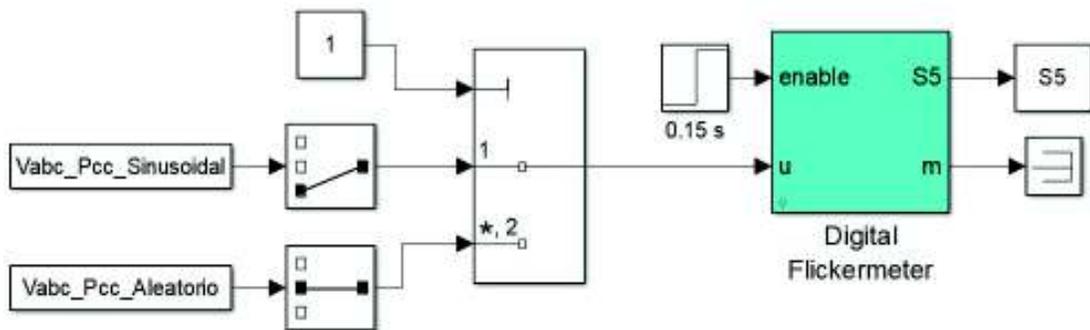


Figura 4.20 Bloque diseñado para el análisis de Pst.

A través del bloque implementado en la Figura 4.20 se realiza una nueva simulación utilizando las variables *Vabc_Pcc_Sinusoidal* y *Vabc_Pcc_Aleatorio* almacenadas anteriormente en el “Workspace” de Matlab. Para realizar esta simulación se debe establecer un tiempo en segundos equivalente a 10 minutos, es decir; por lo menos 600 segundos.

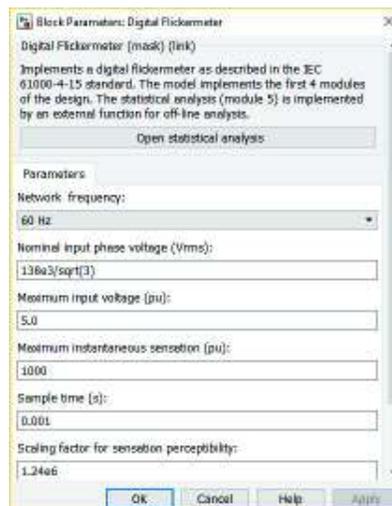


Figura 4.21 Parámetros del bloque “Digital Flickermeter”.

Una vez ejecutada la simulación anterior se procede a realizar el análisis estadístico a partir de la opción “Open statistical analysis” que se aprecia en la Figura 4.21. El bloque calcula los percentiles P0.1s, P1s, P3s, P10s y P50s, que son los niveles de parpadeo excedidos para el 0.1%, 1%, 3%, 10% y 50% del tiempo del período de observación.

De esta manera, el bloque calcula la severidad de parpadeo de corto plazo (Pst) a través de la variable almacenada en “S5”, la cual se aprecia en la Figura 4.20.

A partir de lo mencionado anteriormente, es posible obtener los valores conseguidos mediante simulación en la Figura 4.22 y Figura 4.23.

P0.1s	=	0.366535
P1s	=	0.00195312
P3s	=	0.00195312
P10s	=	0.00195312
P50s	=	0.00195312
Pst	=	0.111549
Pit	=	0.111549

Figura 4.22 Resultados de la simulación para la variación de voltaje sinusoidal.

Tabla 4.35 Comparación del Pst simulado en el Pcc para las tres líneas con el límite establecido.

	Medición Pst	Límite Pst.	EXCESO	CUMPLE
Línea 1	0.11549	0.8	NO	SI
Línea 2	0.11549	0.8	NO	SI
Línea 3	0.11549	0.8	NO	SI

De igual manera se realiza la comparación de los índices obtenidos para la variación de voltaje aleatorio, con lo que se obtiene los siguientes resultados.

P0.1s	=	3.3316
P1s	=	0.450443
P3s	=	0.280262
P10s	=	0.16348
P50s	=	0.0251044
Pst	=	0.440972
Pit	=	0.440972

Figura 4.23 Resultados de la simulación para la variación de voltaje aleatorio.

Tabla 4.36 Comparación del Pst simulado en el Pcc para las tres líneas con el límite establecido.

	Medición Pst	Límite Pst.	EXCESO	CUMPLE
Línea 1	0.440972	0.8	NO	SI
Línea 2	0.440972	0.8	NO	SI
Línea 3	0.440972	0.8	NO	SI

Los valores analizados en la Tabla 4.35 y Tabla 4.36 muestran niveles menores a los límites establecidos en el estándar IEC 61000-3-7 para las tres fases, con esto se puede apreciar que la severidad de las fluctuaciones resulta ser mayor entre más débil sea la red.

Debido a que el sistema dispone de una potencia de cortocircuito subtransitoria en el punto de acoplamiento común (Pcc) muy superior a la potencia nominal de los hornos, se garantiza que las variaciones de voltaje debidas a las cargas fluctuantes sean tolerables.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La discusión se plantea en torno a los resultados obtenidos al implementar mediante simulación los modelos de horno de arco y cómo influye la manera en que los parámetros pueden ser modulados para obtener una respuesta distinta ante el sistema.

5.1. Resultados de la simulación en Matlab/Simulink de los modelos de horno de arco implementados

La simulación de los modelos de horno de arco se ha realizado tomando en cuenta los parámetros estimados para el modelo hiperbólico, además; el modelo hiperbólico-exponencial para el caso del horno de arco eléctrico (EAF) y los parámetros estimados del modelo exponencial para el caso del horno de arco cuchara (LF). Una vez los parámetros fueron estimados para una fase, dichos parámetros fueron utilizados para simular el modelo trifásico del mismo.

La identificación de parámetros que se ha realizado en los experimentos creados en Matlab/Simulink, se ha realizado tomando como señal de salida para dicho experimento la corriente de arco generada por los modelos analizados, esto bajo la premisa de que el bloque de cada modelo utilizado, es un bloque en lazo cerrado donde la respuesta de la entrada del bloque depende a su vez de la nueva salida. Esto crea una retroalimentación donde la respuesta del voltaje de arco ante la variación de los parámetros de los modelos genera una respuesta distinta en la corriente de arco simulada.

Para realizar la identificación de parámetros se ha partido de la inicialización de las variables de los modelos establecidos en base a valores típicos de los mismos. Es probable que la identificación de parámetros inicialmente y especialmente ante un uso incorrecto de la herramienta de optimización de Matlab/Simulink, "Parameter estimation"; no otorgue un resultado adecuado de la estimación o inclusive el experimento no converja en una solución.

Para obtener parámetros que brinden una solución que se acerque a los datos adquiridos mediante mediciones, es posible realizar estimaciones sucesivas para ciertos parámetros, de esta manera se puede conocer la influencia de cada parámetro en el modelo, esto servirá para definir los límites de cada parámetro dentro de los cuales es posible encontrar una solución.

De esta manera, se ha conseguido adquirir una señal de corriente de arco con características similares a la forma de onda de corriente medida. Esto se corrobora al

realizar una descomposición de las formas de onda en su componente fundamental más sus componentes armónicas utilizando la herramienta de transformada rápida de Fourier (FFT) de Simulink. Pudiéndose ver un ajuste que resulta ser aceptable y sobre todo suficiente para la simulación de los contenidos armónicos que los hornos inyectan hacia la red.

La modulación de los parámetros internos del bloque produce respuestas distintas y cada bloque tendrá una respuesta también distinta, estos parámetros producen una respuesta en mayor o menor magnitud aproximados a la señal medida.

Mediante simulaciones se ha logrado apreciar en el punto de acoplamiento común (Pcc), la no existencia de distorsión armónica total de voltaje (THD_V), todo el interés del análisis de vuelve hacia la distorsión armónica de corriente. Dado que, debido a la baja impedancia que la red externa presenta, las corrientes armónicas sin el debido tratamiento podrían contaminar la red externa causando molestias a otros usuarios.

Al corroborar que este índice de distorsión de total de voltaje para ese punto de análisis (Pcc), no supera el 1% al 2 % de distorsión total en voltaje, inclusive sin la adición de ningún tipo de filtro o mecanismo para la mitigación de perturbaciones, concierne el hecho de conseguir una aproximación buena de la distorsión de corriente inyectada por los hornos, dado que esto nos entrega una idea más acertado del caso real en las instalaciones físicas en cuanto a distorsión de corriente se refiere.

Para analizar el efecto de los niveles de corrientes armónicas se ha realizado una modelación de las cargas no lineales por medio de modelos que describen un comportamiento aproximado las cuales permiten estudiar de manera independiente y aproximada el contenido armónico involucrado tras la operación de los hornos de arco eléctrico en la fundición.

Estos valores se ajustan en base a las mediciones realizadas en las instalaciones físicas de la planta industrial para enfocar las simulaciones a resultados que concuerden con el escenario real de la planta, dado que esto ayudará a una adecuada corrección de las corrientes a frecuencias armónicas a través de la incorporación de los filtros pasivos previa obtención de las características de las fuentes armónicas en estudio.

Una vez se encontró un resultado relativamente aproximado y satisfactorio se ha procedido a la medición de THD de corriente para la respectiva valoración y su la mitigación a través del diseño de filtros.

5.1.1. Modelación del horno de arco (EAF - Electric Arc Furnace)

El modelo de arco EAF posee dos estados claramente definidos. La fundición inicial, la cual mantiene un comportamiento dinámico estocástico que se aprecia por el arco activo de esta etapa. Para esta etapa los modelos establecidos evalúan las variaciones de voltaje producidas mediante una simulación de flicker sinusoidal o aleatorio.

Los modelos convencionales evalúan la dinámica del arco a través de un factor de modulación (m) y el voltaje de referencia (V_{at}) el cual puede variar de forma sinusoidal o de manera aleatoria.

Para el caso del comportamiento estático, los modelos establecen un comportamiento no lineal entre el voltaje y la corriente de arco generados, haciendo que mediante la estimación de parámetros estos modelos sea de mayor utilidad, al simular una respuesta similar a la real.

En el caso del horno EAF, después de realizar la estimación de parámetros para los modelos hiperbólico y exponencial-hiperbólico, se ha decidido optar por el modelo hiperbólico. En gran parte por la simpleza de este y la buena respuesta obtenida mediante simulación.

5.1.2. Modelación del horno de arco cuchara (LF - Ladle Furnace)

El horno de arco cuchara mantiene una respuesta no lineal similar a la etapa de refinamiento del horno EAF, este horno sirve para realizar una etapa de refinamiento secundaria de la colada terminada en el horno EAF y mejorar la calidad del acero mediante un ajuste de la composición química del material.

Tras realizar mediciones del contenido armónico de corriente se determinó que este horno posee los mismos armónicos característicos que posee el horno EAF, es decir; armónicos comprendidos entre los armónicos de orden 2 hasta el armónico de orden 7. A diferencia de que la distorsión de corriente en este horno resulta ser mucho menor que la distorsión del horno de arco EAF. Se puede destacar que para el caso del horno LF, el armónico más representativo es el armónico de orden 3, siendo el resto de ellos mucho menores en magnitud. Esta característica armónica se extiende a lo largo de la duración de su proceso de funcionamiento el cual dura aproximadamente 15 minutos.

Para la modelación de este horno se ha escogido el modelo exponencial dado que tras simular la respuesta del horno con los parámetros típicos, se obtuvo una respuesta similar

a las mediciones por lo que la estimación de parámetros con este modelo se realizó de manera más rápida con este modelo.

5.2. Resultados del diseño de filtros pasivos y compensación reactiva para la corrección del factor de potencia

Existen varios tipos de filtros pasivos que pueden ser utilizados para la mitigación de corrientes armónicas. Pero los filtros pasivos simples resultan ser efectivos en el desempeño de su función, dada su simpleza en el diseño al estar formado por elementos pasivos como resistencias, capacitores e inductancias.

Los criterios asumidos son importantes al momento de realizar un diseño, dado que esto nos dará las pautas para poder analizar y dar solución al problema de mitigación de armónicos en base a los requerimientos de la planta industrial.

Los criterios principales que se han tomado en consideración para el diseño son: el número de armónicos a ser filtrados, compensación de potencia reactiva, reducción de contenido armónico y la magnitud de cada componente armónica.

Los filtros pasivos suministran un determinado nivel de potencia reactiva, esta potencia reactiva es aprovechada para obtener un factor de potencia más elevado, disminuir las corrientes a frecuencia fundamental y disminución de pérdidas.

Como se ha mencionado, los filtros pasivos a través del inductor y el capacitor entregan una cantidad de potencia reactiva definida. Dado que a frecuencia fundamental (60 Hz), la reactancia inductiva resulta ser considerablemente menor que la reactancia capacitiva, la respuesta del filtro es predominantemente capacitivo. Es por esto que a frecuencia fundamental el capacitor es el principal elemento que suministra la potencia reactiva.

Los filtros se diseñan para una determinada frecuencia de resonancia. Para esta frecuencia de resonancia la impedancia total del filtro resulta ser mínima, dado que la reactancia inductiva del filtro aumenta proporcionalmente con la frecuencia, igualando el valor de la reactancia capacitiva. Al ser mínima la impedancia del filtro, las corrientes armónicas son guiadas fácilmente, logrando una disminución de las componentes de dicha frecuencia.

Cuando se sobrepasa la frecuencia de resonancia del filtro, la reactancia inductiva tiende a aumentar, por el contrario; la reactancia capacitiva tiende a disminuir.

Existen problemas relacionados al uso de filtros pasivos o bancos capacitivos, este problema es la tendencia de los capacitores a provocar una resonancia paralelo al interactuar con la red.

El factor de calidad (Q) de los filtros es un criterio importante de diseño, este factor ayuda a manejar un mayor o menor ancho de banda, esto quiere decir que ayuda a filtrar selectivamente las señales deseadas discriminando las señales de frecuencias diferentes.

Se ha escogido un diseño de filtros en media tensión, debido principalmente a la disponibilidad de espacio físico en la planta industrial, además de que se ha considerado filtrar la respuesta conjunta de los armónicos de ambos hornos de arco, en un punto común donde ambos ramales convergen, a través de un solo banco capacitivo que filtre la respuesta total de ambos hornos.

5.3. Resultados de la comparación de los índices obtenidos mediante simulación con la normativa IEEE 519 -1992

5.3.1. Comparación de los valores de TDD obtenidos en el punto de acoplamiento común (Pcc)

Como ya se ha mencionado anteriormente, las corrientes armónicas individuales no están dadas en términos de la componente fundamental, tal como resulta típico en la mayoría de mediciones de armónicos. El TDD compara las mediciones de corrientes armónicas con la corriente de máxima carga demandada.

Por definición I_L (corriente de máxima carga demandada) siempre resultará ser más grande que I_1 (componente fundamental), por tal motivo; el índice TDD en porcentaje con respecto a I_L en general será menor que el valor de THD en porcentaje de I_1 .

Particularmente, en este caso el THD es aproximadamente igual al TDD debido a que la planta industrial en análisis normalmente opera en condición de máxima carga.

Para realizar la comparación de los valores obtenidos mediante simulación con los valores establecidos en la norma IEEE 519 - 1992, se asumirá que I_L e I_1 tienen aproximadamente la misma magnitud, recordando que las mediciones realizadas en la planta industrial se realizaron bajo un escenario de máxima carga, por lo tanto se obtiene un valor aproximado y cercano entre los valores de THD y TDD.

5.3.2. Comparación de los límites SIN FILTROS

Queda claro que es necesario la utilización de filtros pasivos para la disminución de corrientes armónicas y compensación del factor de potencia. Las corrientes armónicas en el punto de acoplamiento común (Pcc), bordean valores entre el 6% al 12 % de THD de corriente y sin la respectiva corrección a través de filtros pasivos puede causar que el contenido armónico generado llegue de forma franca más allá del punto de acoplamiento común (Pcc).

5.3.3. Comparación de los límites CON FILTROS ACTUALES

La planta de Adelca con sede en Alóag dispone de un banco de filtros pasivos, los cuales son utilizados para atenuar el contenido del 3er y 4to armónico, estos filtros proporcionan una potencia reactiva de 9,82 MVAR y 4,65 MVAR respectivamente, es decir; entregan una potencia reactiva conjunta de 14,47 MVAR. Estos filtros fueron diseñados en condiciones distintas a las condiciones que actualmente se tienen en la planta industrial, principalmente porque el horno de arco eléctrico EAF sobrellevó una repotenciación, además; la topología de la red interna ha tenido cambios a lo largo de su existencia.

Es por esto, que se puede apreciar mediante simulación que los filtros aparentan no tener un buen desempeño reduciendo la distorsión de corriente y que la potencia reactiva de compensación que estos filtros corrigen el factor de potencia hasta un factor de potencia de 0,918. Para solucionar este inconveniente, es recomendable implementar un filtro adicional para disminuir la distorsión de corriente del 2do o 5to armónico.

5.3.4. Comparación de los límites CON FILTROS DISEÑADOS

En las simulaciones realizadas, el diseño incorporado prueba ser eficaz, obteniéndose valores por debajo del TDD = 6 %, establecido en la norma. De esta manera se ha logrado reducir las componentes armónicas correspondiente a los armónicos 2, 3 y 5 para los cuales se ha realizado el diseño. Se ha alcanzado de esta manera a cumplir con los límites establecidos según normativa internacional IEEE 519, la cual señala límites de la distorsión total de demanda no mayores a un 6% y valores de distorsión individual no mayores al 5 %, obteniendo de esta manera un TDD no mayor a dicho valor.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Mediante estudios existentes realizados para la planta Adelca con sede en Alóag se obtuvo la información necesaria para la modelación de los distintos componentes eléctricos de Adelca en el software informático, tomando en cuenta que existieron datos que tuvieron que ser actualizados mediante un levantamiento en las placas de transformadores y la exclusión de otros equipos que no figuran más en la red. Todo esto nos lleva a concluir que el diseño de filtros eléctricos existentes fue realizado bajo otras condiciones internas distintas a las analizadas en este estudio.
- Dado que la red eléctrica de la planta de Adelca con sede en Alóag ha tenido cambios y reestructuraciones en los años de funcionamiento, se ha determinado una nueva capacidad de compensación reactiva de 20,3 MVAR para llegar a un factor de potencia en el punto de conexión con la red externa de 0,96, lo cual influye en el propio diseño de filtros pasivos y también modifica el factor de potencia de operación de los hornos ayudando a los mismos a llegar al punto óptimo de operación.
- La distorsión armónica total de voltaje observado en las mediciones realizados en el horno de arco EAF muestran que dicha distorsión total es de alrededor del 42%, sin embargo; la distorsión producida hacia la barra principal del sistema se disipa por acción de la red externa. De igual manera el análisis de las fluctuaciones de voltaje muestran que el efecto producido hacia el punto de acoplamiento común por la operación de los hornos de arco es tolerable debido a que la potencia de cortocircuito en el punto de conexión es mucho mayor que la potencia conjunta de operación de ambos hornos.
- Tras realizar un análisis del espectro de frecuencia utilizando el analizador de calidad de energía FLUKE 435, se determinó que los armónicos característicos que mayor relevancia tienen en el horno de arco EAF son los armónicos de orden 2, 3, 4, 5 y 7, conservándose una característica similar pero de menor magnitud en el horno LF. Adicionalmente, mediante mediciones se ha podido corroborar la existencia no solo de armónicos sino también de interarmónicos, los cuales

tienen valores considerables y se encuentran presentes en el rango de las principales frecuencias armónicas que caracterizan las cargas no lineales analizadas.

- Dado que la normativa IEEE 519 - 1992 sugiere límites para la distorsión individual de las corrientes armónicas, se ha procurado a través de los filtros diseñados cumplir con los límites permisibles acorde a dicha norma. En el presente estudio se realizó un análisis en dominio de la frecuencia hasta los 1000 Hz, dado que las componentes armónicas de mayor importancia en porcentaje con respecto a la componente fundamental no sobrepasan los 420 Hz.

6.2. Recomendaciones

- Los filtros pasivos se han diseñado como mecanismo de mitigación y compensación reactiva tomando en cuenta la distorsión de corriente obtenida a través de simulaciones en el punto de conexión como alternativa a los filtros actuales. Las simulaciones de análisis para los filtros actuales muestran que cumplen la mayoría de los requisitos establecidos por la normativa IEEE 519 – 1992, sin embargo; la atenuación de armónicos debería ser realizado en los armónicos individuales de menor frecuencia. En caso de ser necesario, a futuro; una mayor compensación reactiva por parte de los filtros pasivos se sugiere implementar un filtro pasivo simple para el 2do ó 5to armónico.
- La implementación de nuevos filtros se puede desarrollar aprovechando los elementos funcionales y en buen estado de los filtros existentes, tomando en cuenta que los filtros con el paso de tiempo presentan una cierta pérdida de capacitancia lo que a largo plazo produce una pérdida de sintonía con respecto a las frecuencias de diseño de cada filtro.
- El factor de potencia en el punto de conexión con la red externa es de carácter inductivo dada la característica de las cargas asociada al sistema eléctrico de Adelca, sin embargo; se requiere una compensación reactiva adicional para cumplir con un factor de potencia mayor a 0,92. Por lo cual se sugiere a futuro la implementación de otro filtro en caso de una posible expansión interna.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, «IEEE Std 519,» de *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, 1992.
- [2] Adelca_Acería_del_Ecuador, «ADELCA,» [En línea]. Available: <http://www.adelca.com>.
- [3] J. Arrillaga, *POWER SYSTEM HARMONICS*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [4] R. C. Dugan, *Electrical Power Systems Quality*, Segunda ed., McGraw-Hill, 1996.
- [5] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, «IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» de *IEEE Std 519*, 2014.
- [6] ARCONEL, «Agencia de Regulación y Control de Electricidad,» [En línea]. Available: <http://www.regulacioneolica.gob.ec>.
- [7] CONELEC, «REGULACIÓN No. CONELEC - 003/08 “Calidad del Transporte de Potencia y del Servicio de Conexión en el SNI”,» Quito, 2008.
- [8] A. Ghosh and G. Ledwich, *POWER QUALITY ENHANCEMENT USING CUSTOM POWER DEVICES*, Boston: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002.
- [9] IEC, «INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-4-15,» de *Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications*, 2003.
- [10] IEC, «INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-3-3,» de *Part 3-3: Limits – Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection*, 2002.
- [11] IEC, «INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-3-5,» de *Part 3-5: Limits - Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A*, 2003.

- [12] IEC, «INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-3-7,» de *Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems*, 2008.
- [13] FLUKE Corporation, «FLUKE,» [En línea]. Available: <http://en-us.fluke.com>.
- [14] Fluke Corporation, *Fluke 434/435 Users Manual*, Netherlands, 2008.
- [15] G. Salazar, «Curso de Calidad de la Energía,» *Escuela Politécnica Nacional*, 2012.
- [16] SERCONEL_CÍA_LTDA., *Estudio de coordinación de protecciones-Sistema eléctrico de Adelca.*, Alóag, 2011.
- [17] M. Şeker y A. Memmedov, «Investigation of Voltage Quality in Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink,» 2014.
- [18] MathWorks, *Simulink Design Optimization. User's Guide*, Natick, 2015.
- [19] DigSILENT_PowerFactory, *Filter/Shunt*, Gomaringen, 2015.
- [20] IEEE STANDARDS ASSOCIATION, «Guide for Application and Specification of Harmonic Filters,» de *IEEE Std 1531*, 2003.
- [21] The MathWorks, Inc., «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com>.
- [22] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, McGraw Hill, 1996.
- [23] V. Raúl, "Modelación, simulación y determinación de índices de distorsión armónica y efecto flicker, en el sistema nacional de transmisión. Causado por la conexión de hornos de arco, aplicado al caso de Novacero S.A.", Quito, 2008.
- [24] N. Gabriela, "Análisis de armónicos en las unidades de generación de las centrales hidroeléctricas Illuchi 1 e Illuchi 2 de ELEPCO S.A.", Quito, 2013.
- [25] IEC, «INTERNATIONAL STANDARD IEC 61000-4-7,» de *Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*, 2002.

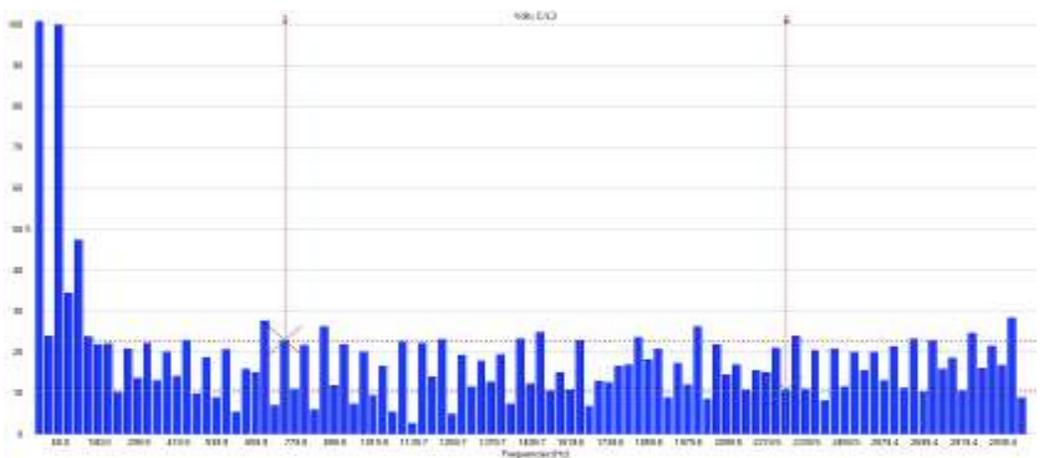
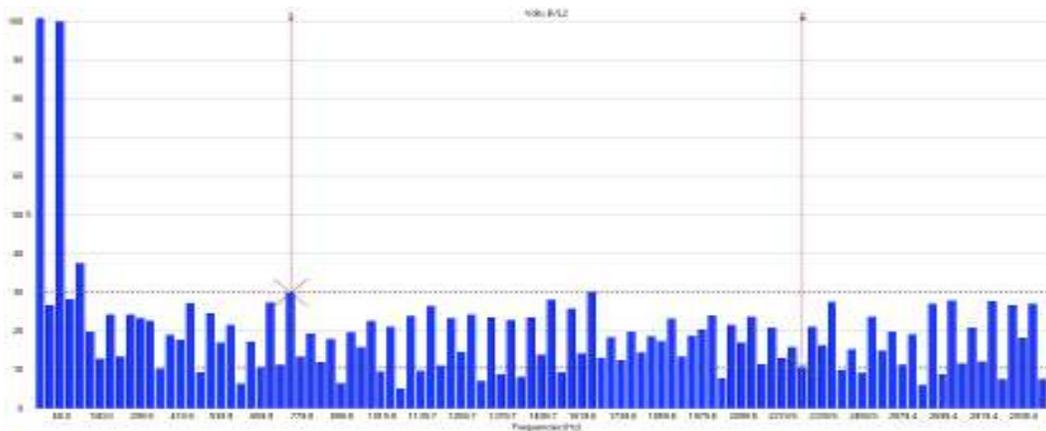
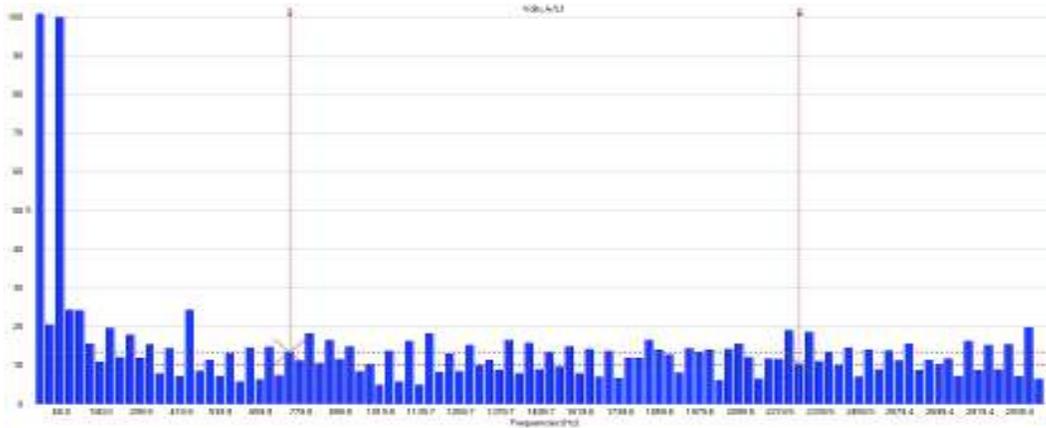
[26] DigSILENT, «DigSILENT Power System Software & Engineering,» [En línea].
Available: <https://www.digsilent.de/en/>.

[27] Fluke Corporation, SW43W. FlukeView Power Quality Analyzer Software. Users
Manual, Netherlands, 2005.

8. ANEXOS

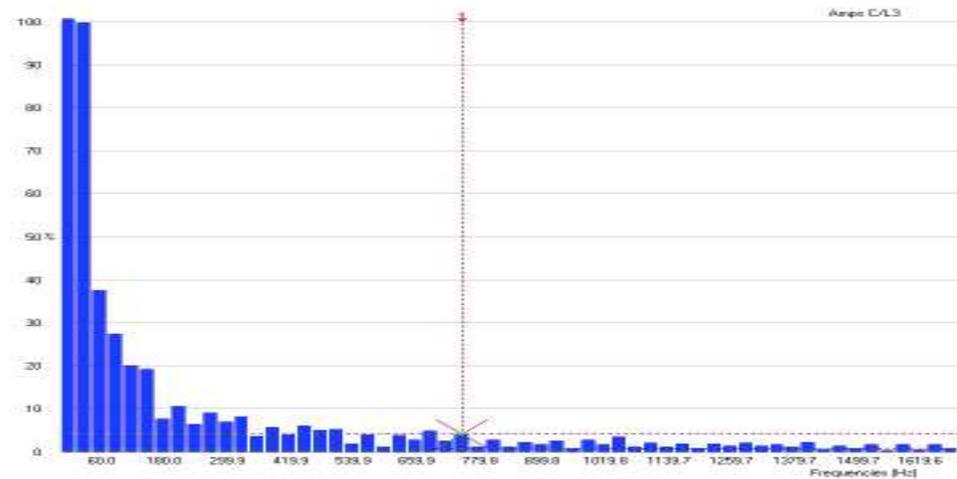
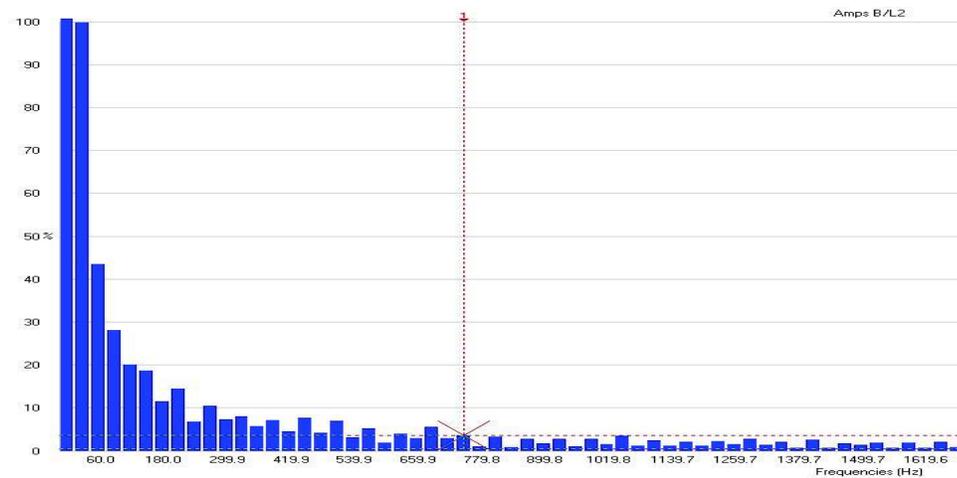
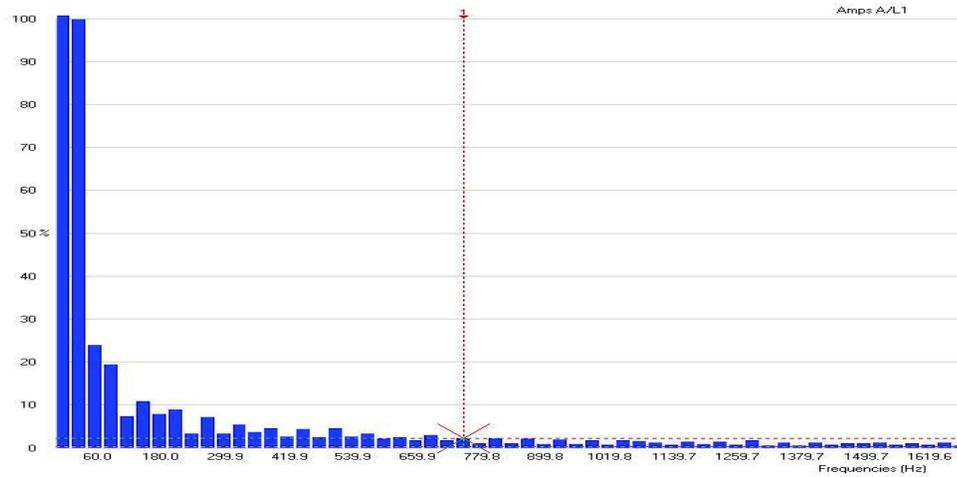
ANEXO I

ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE VOLTAJE MEDIDO EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)



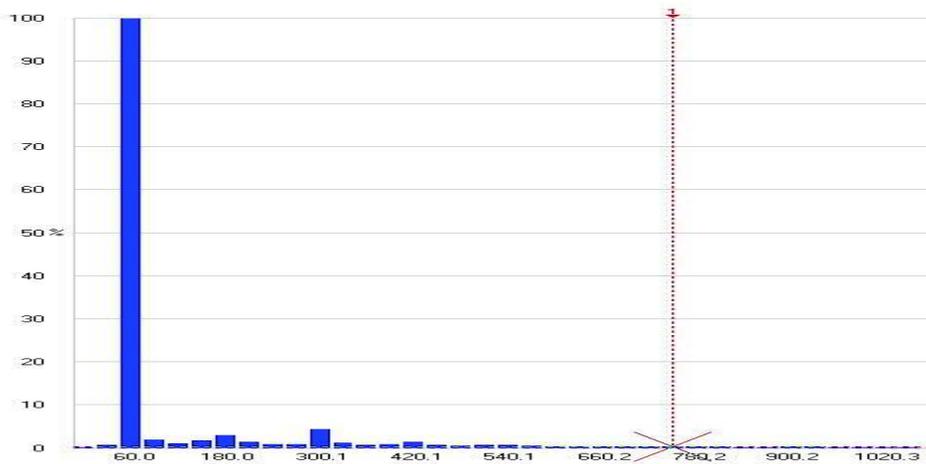
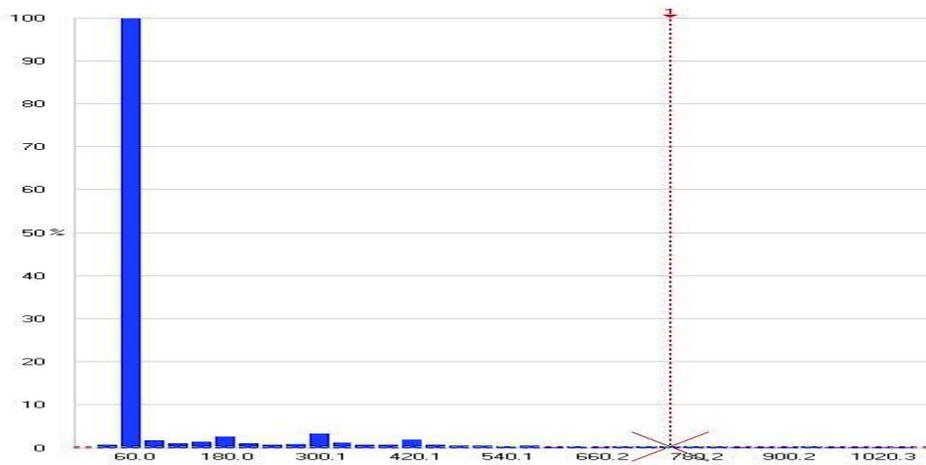
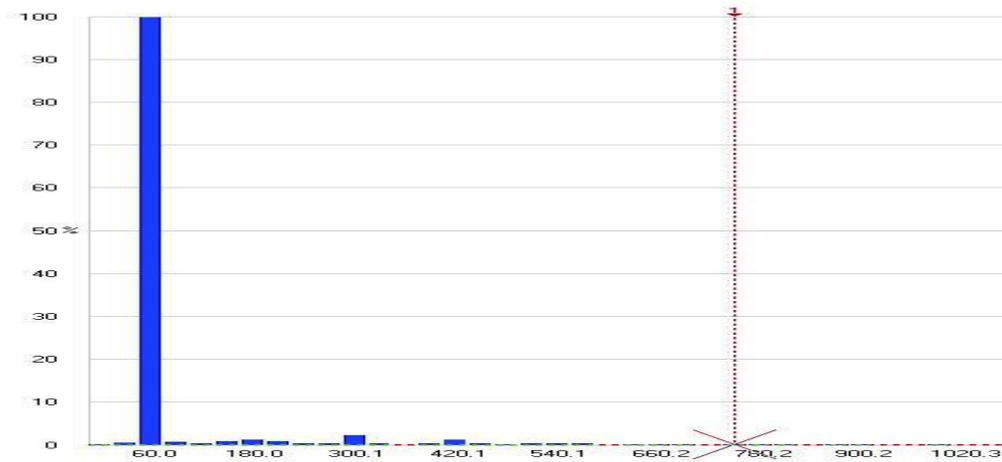
ANEXO II

ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE CORRIENTE MEDIDO EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)



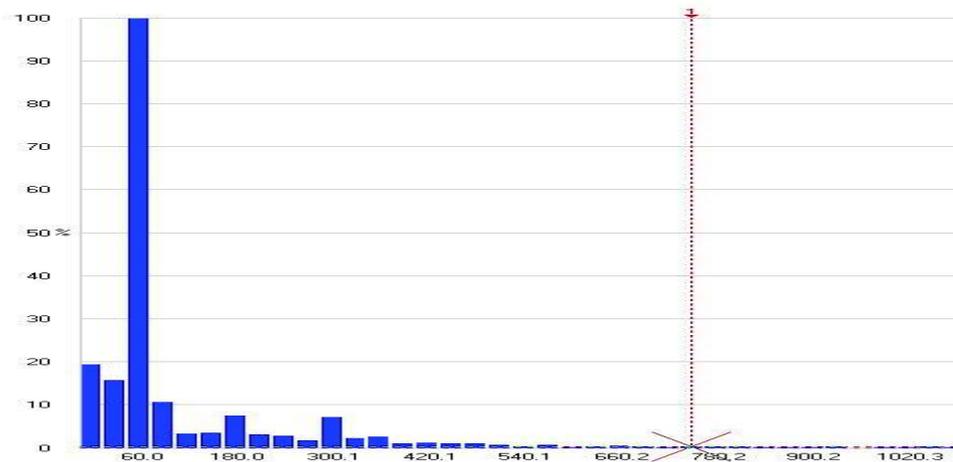
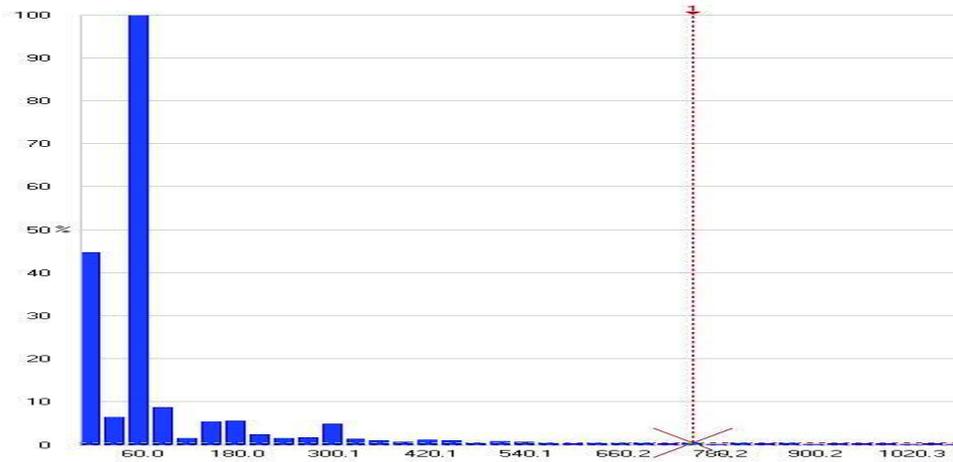
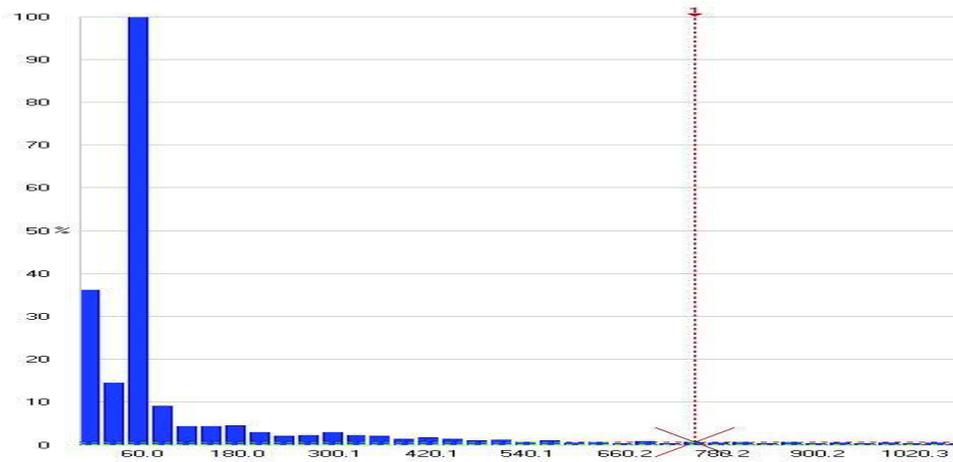
ANEXO III

ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE VOLTAJE MEDIDO EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (LF)



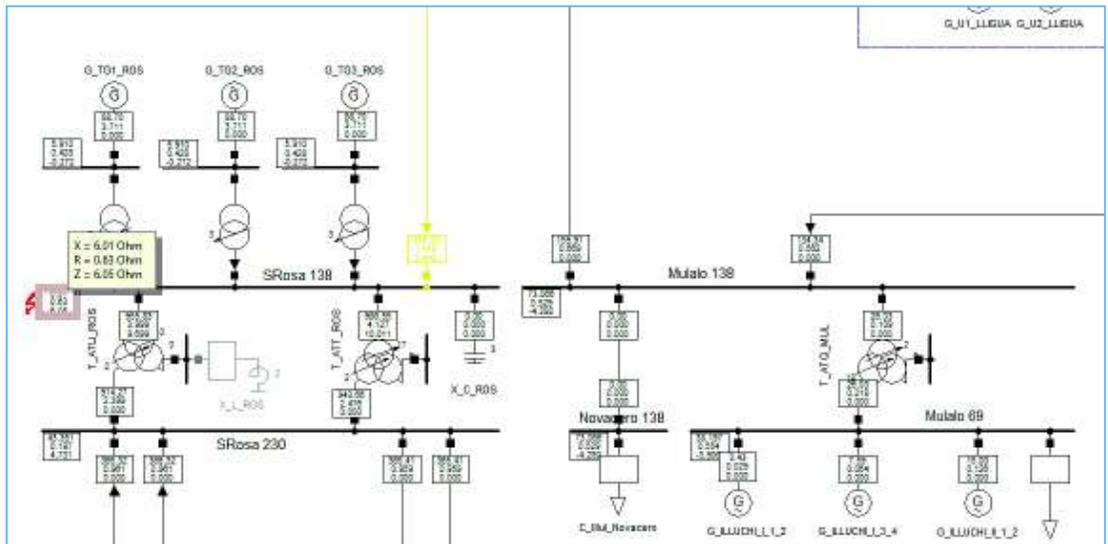
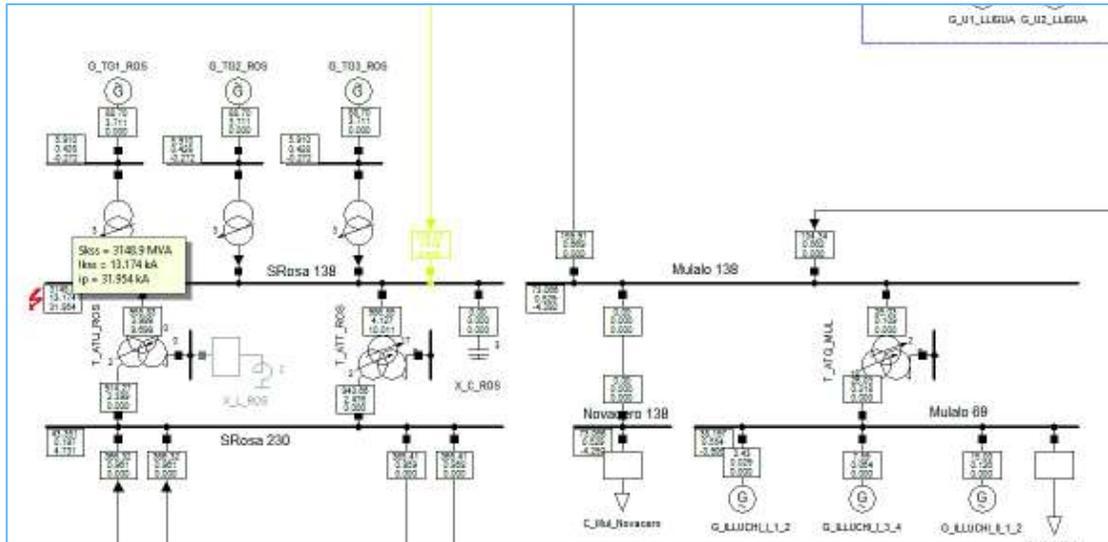
ANEXO IV

ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE CORRIENTE MEDIDO EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (LF)



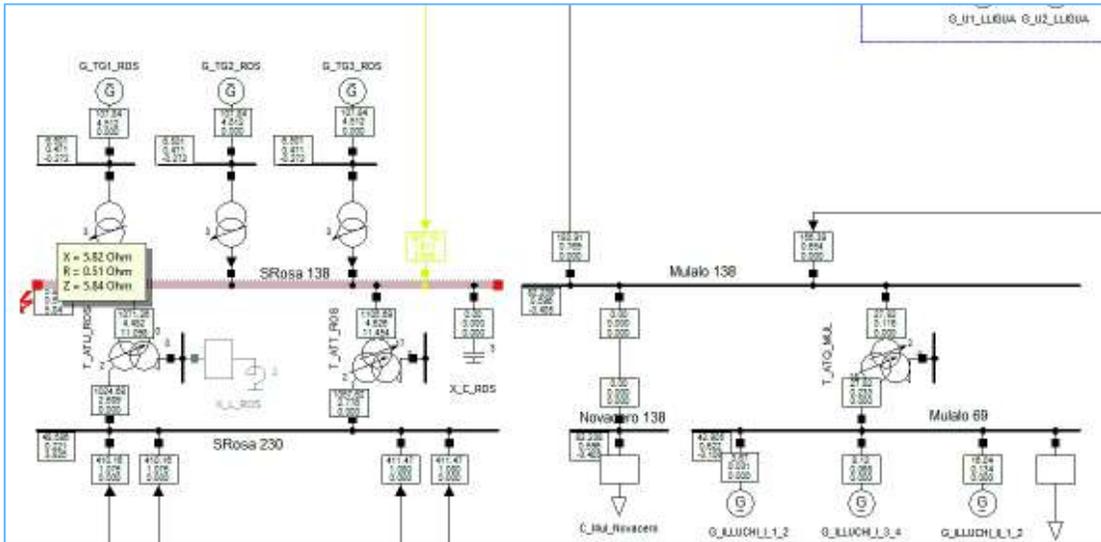
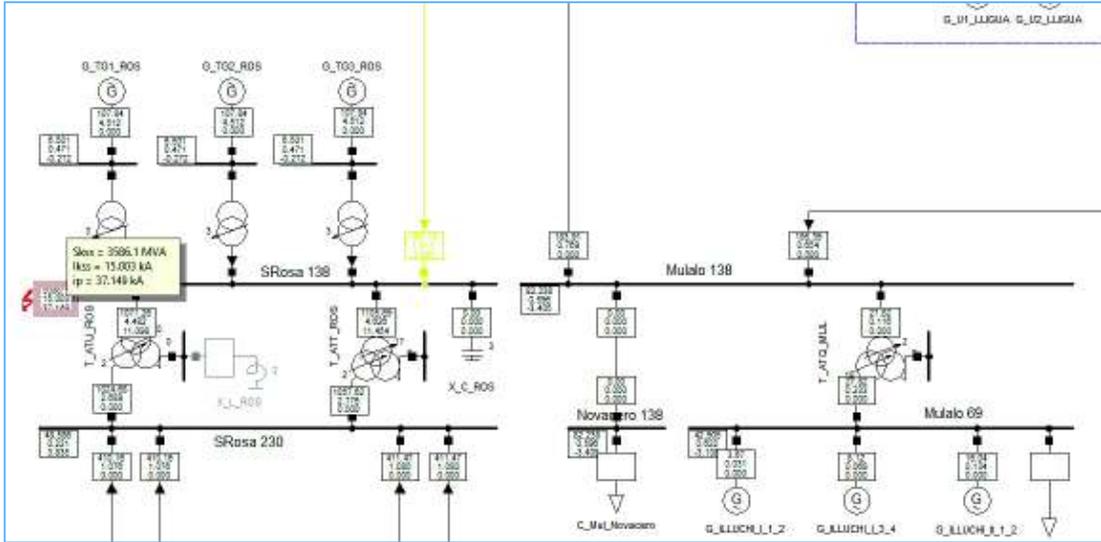
ANEXO VI

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO PARA MÍNIMAS CORRIENTES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA S/E SANTA ROSA



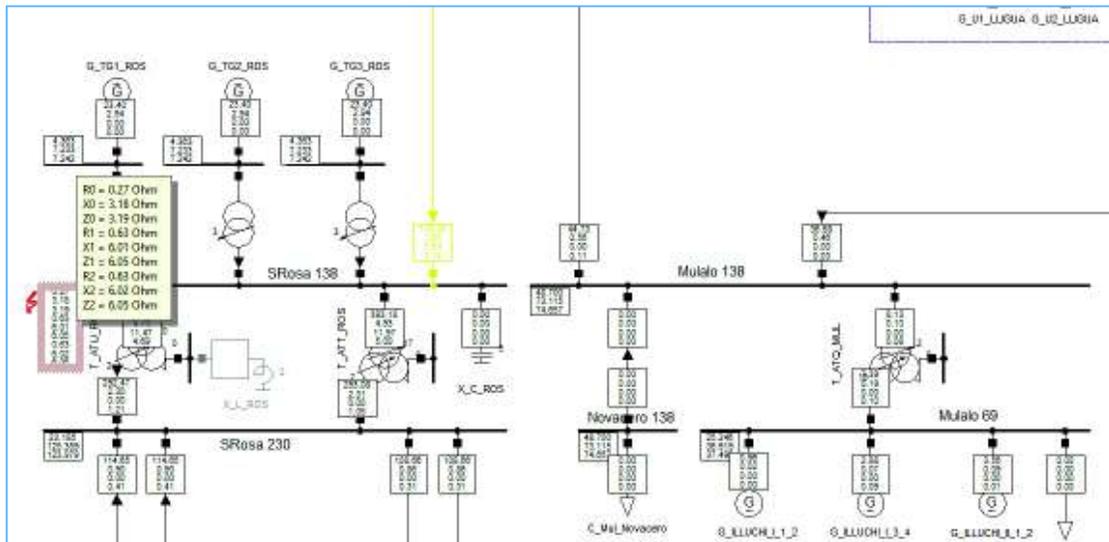
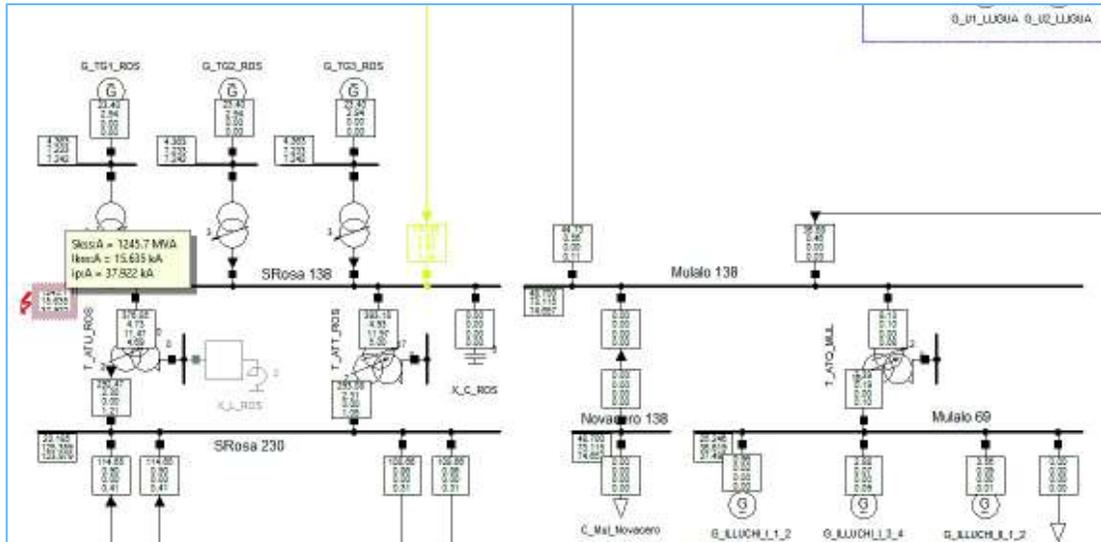
ANEXO VII

CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO PARA MÁXIMAS CORRIENTES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA S/E SANTA ROSA



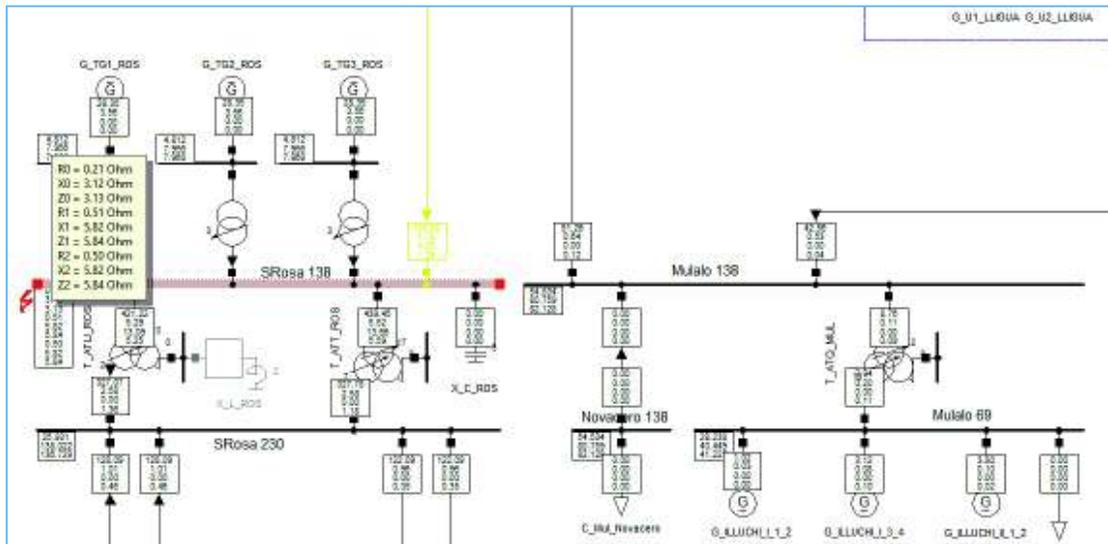
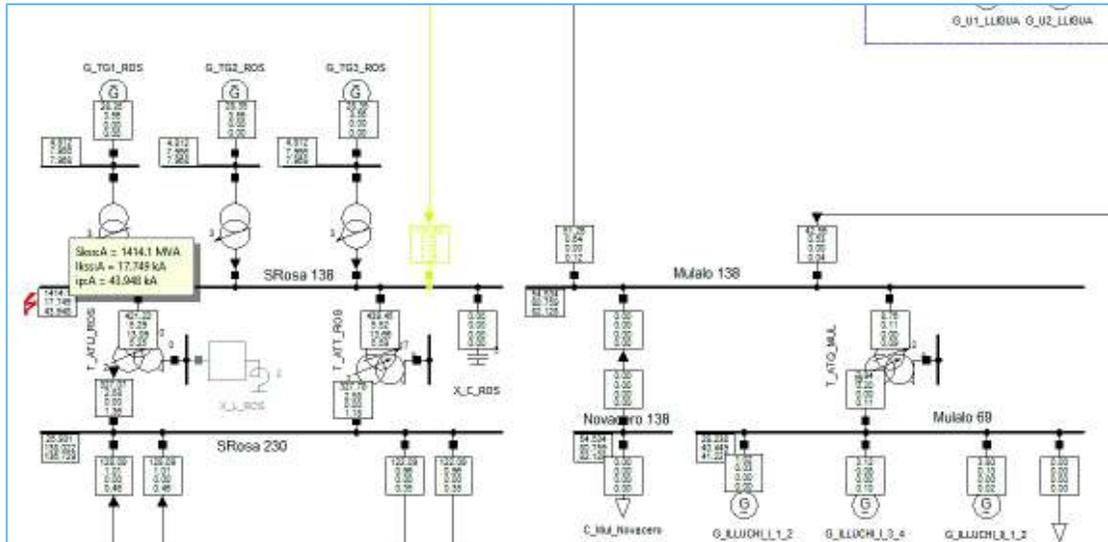
ANEXO VIII

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO PARA MÍNIMAS CORRIENTES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA S/E SANTA ROSA



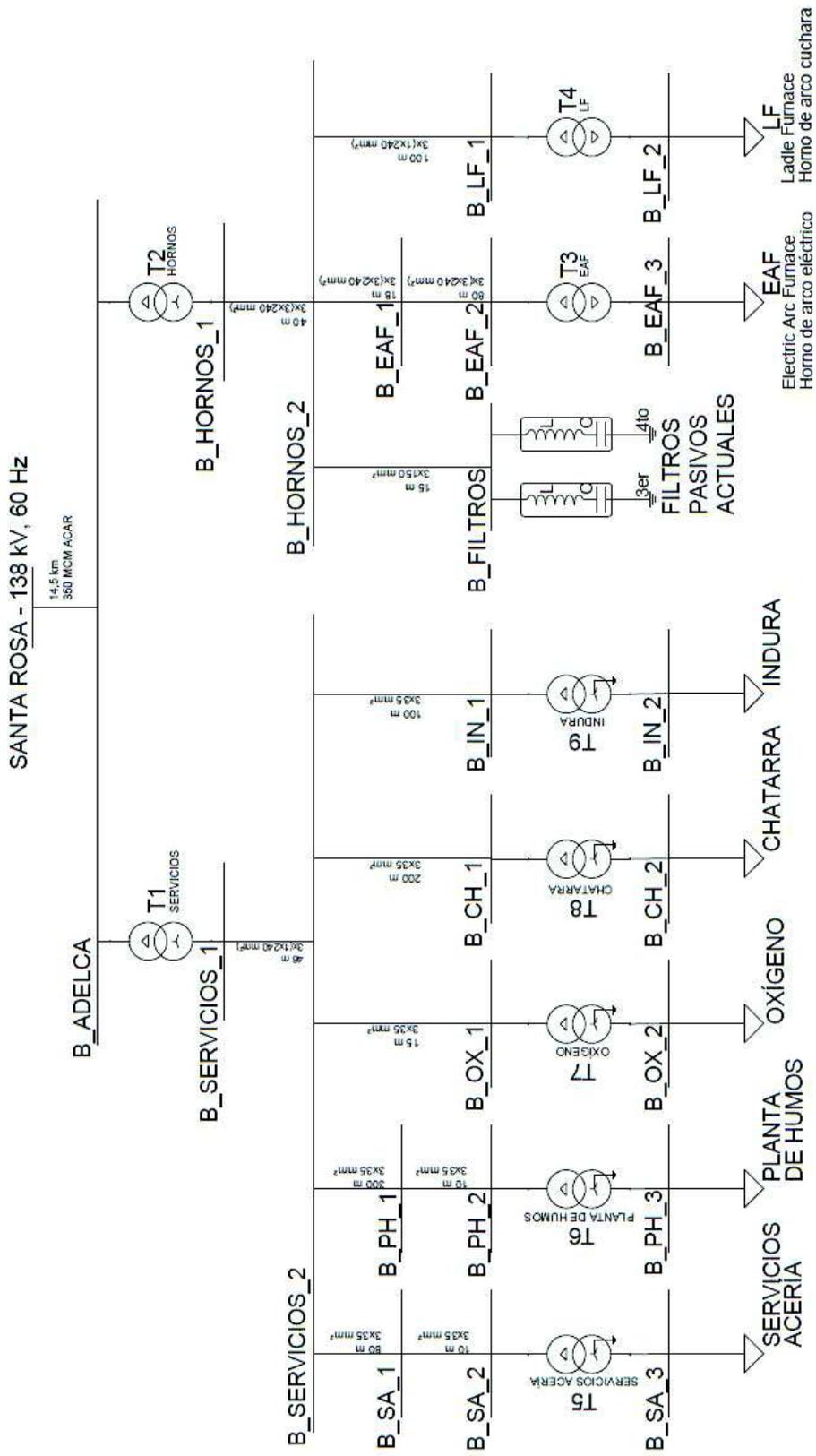
ANEXO IX

CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO PARA MÁXIMAS CORRIENTES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA S/E SANTA ROSA



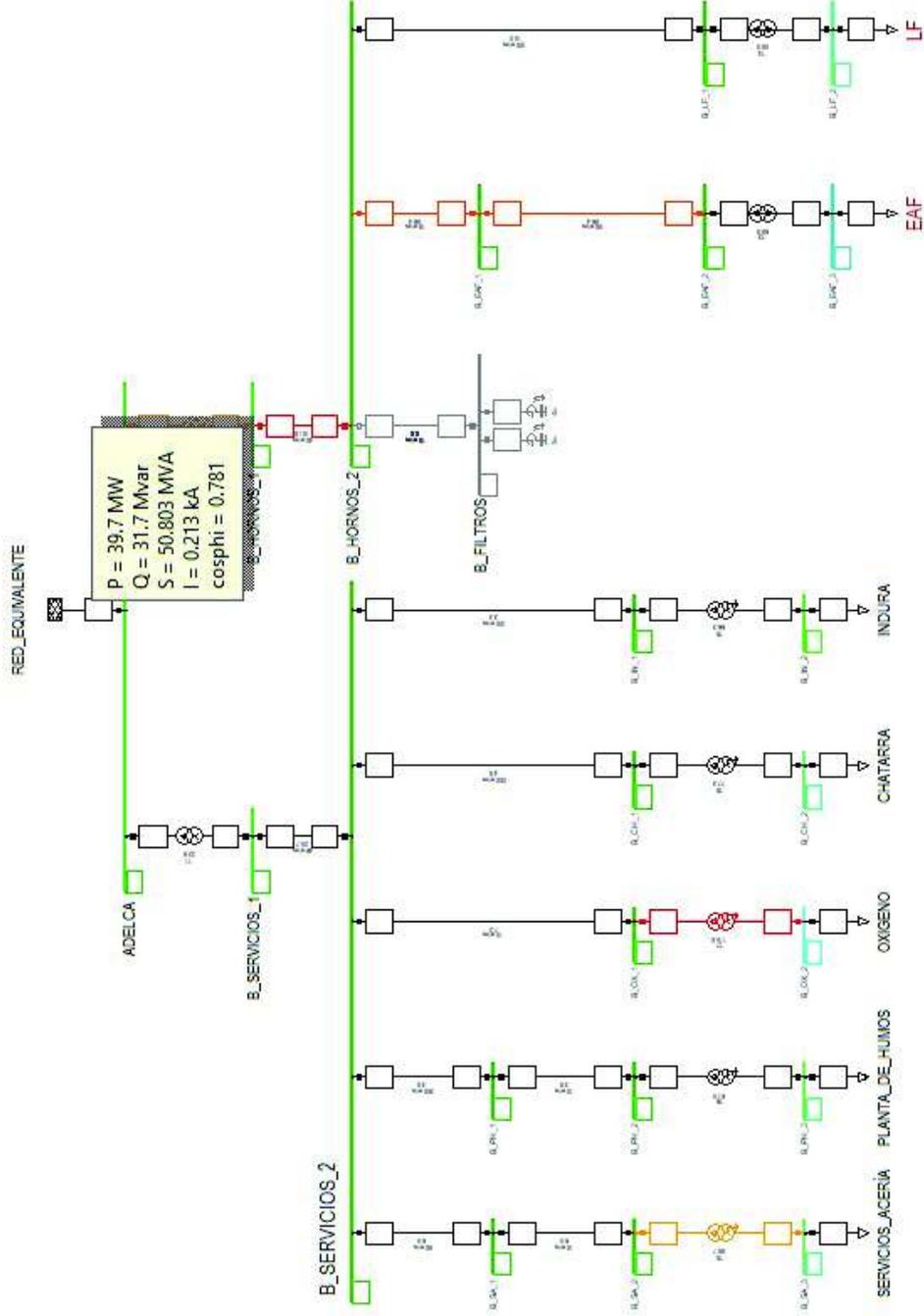
ANEXO X

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA PLANTA DE ADELCA CON SEDE EN ALÓAG



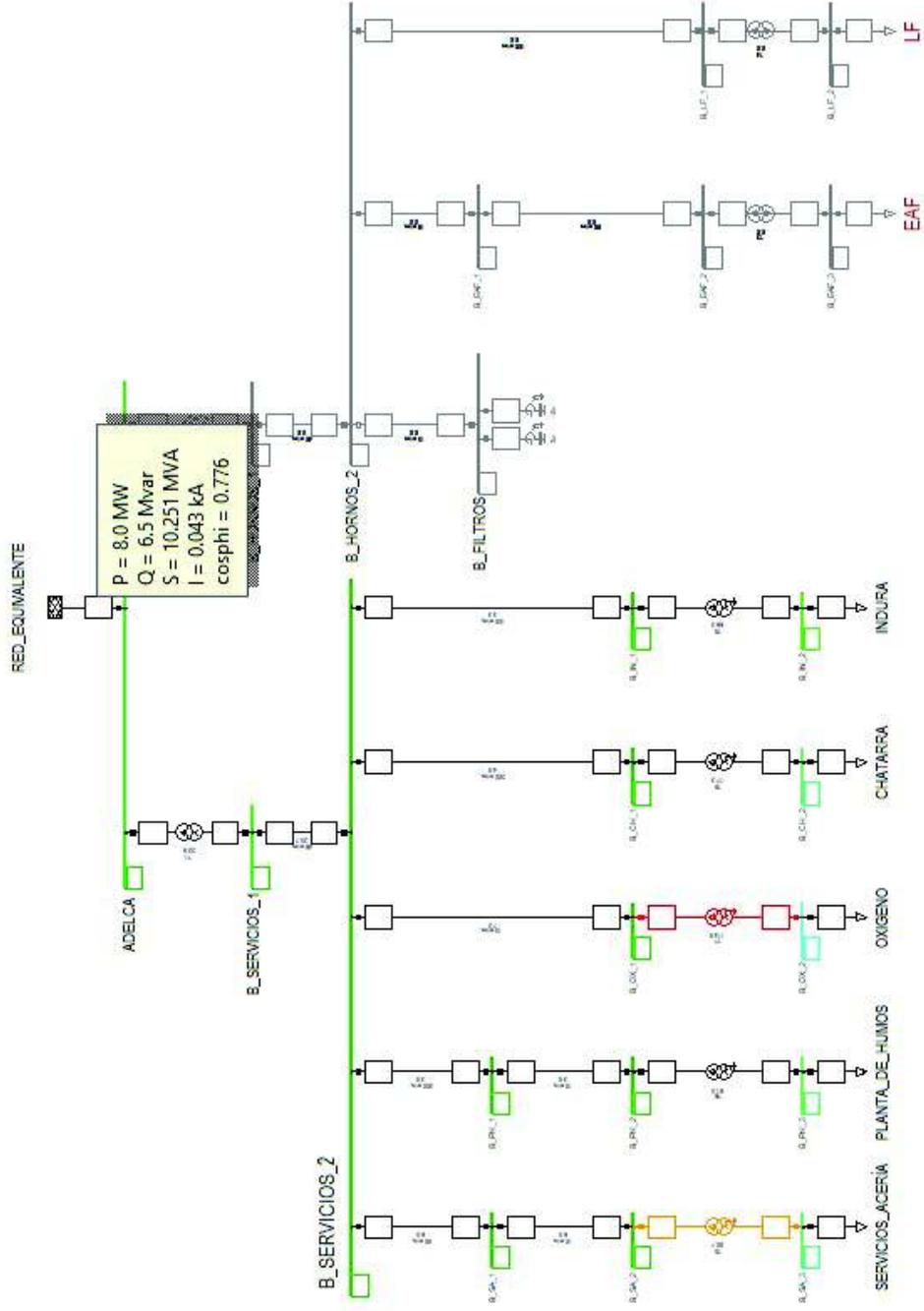
ANEXO XII

FLUJO DE CARGA DE LA PLANTA ADELCA CON SEDE EN ALÓAG PARA MÁXIMA CARGA (SIN FILTROS PASIVOS)



ANEXO XIII

FLUJO DE POTENCIA DE LA PLANTA ADELCA CON SEDE EN ALÓAG PARA MÍNIMA CARGA (SIN FILTROS PASIVOS)



ANEXO XIV

MEDICIÓN DE LOS ÍNDICES Pst y Plt CON UN ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA EN EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)

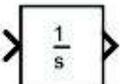
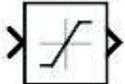
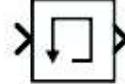
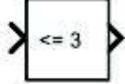
	AB	BC	CA
Pst(1min)	1.57	2.10	1.92
Pst	1.50	2.10	2.37
Plt	2.28	2.20	2.45
Dc(%)	0.0	0.0	0.0
Dmax(%)	0.0	0.0	0.0
TD<(s)	0.000	0.000	0.000

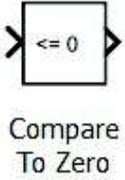
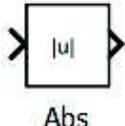
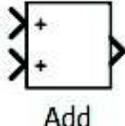
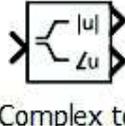
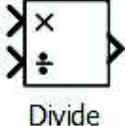
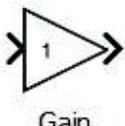
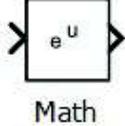
01/10/18 12:03:03 600V 60Hz 3Ø IT EN50160

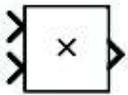
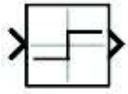
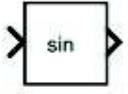
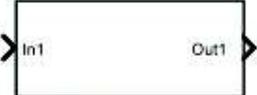
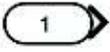
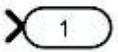
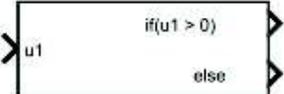
MAX-D VALUES PF5 TREND HOLD RUN

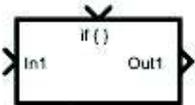
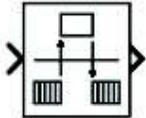
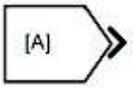
ANEXO XV

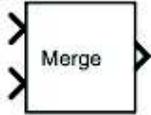
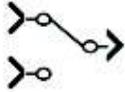
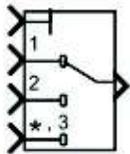
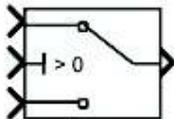
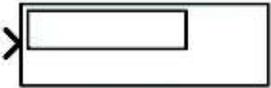
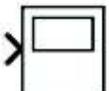
BLOQUES Y FUNCIONES UTILIZADOS EN MATLAB/SIMULINK

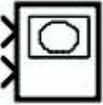
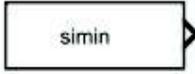
Bloque/Función	Nombre	Descripción
 Derivative	Derivada	El bloque de derivada numérica aproxima la derivada de la señal de entrada con respecto al tiempo de simulación.
 Transport Delay	Retraso	El bloque retrasa la entrada por un período de tiempo específico. La entrada a este bloque debe ser una señal continua.
 Integrator	Integrador	El bloque realiza una integración continua en el tiempo de la señal de entrada.
 Saturation	Saturación	El bloque de saturación impone límites superiores e inferiores a una señal de entrada.
 Memory	Memoria	El bloque de memoria retiene y retrasa su entrada en un gran paso de tiempo de integración. Cuando se coloca en un subsistema iterador, retiene y retrasa su entrada en una iteración.
 Compare To Constant	Comparar con constante	El bloque compara una señal de entrada con una constante. Es posible especificar el valor de la constante.

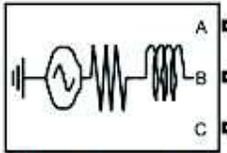
 <p>Compare To Zero</p>	<p>Comparar con cero</p>	<p>El bloque compara una señal de entrada con cero. Es posible especificar cómo se compara la entrada con cero.</p>
 <p>Abs</p>	<p>Abs</p>	<p>El bloque emite el valor absoluto de la entrada.</p>
 <p>Add</p>	<p>Sumar</p>	<p>El bloque Suma realiza sumas o restas en sus entradas. Este bloque puede sumar o restar entradas escalares, vectoriales o matriciales.</p>
 <p>Complex to Magnitude-Angle</p>	<p>Complejo a Magnitud-Ángulo</p>	<p>El bloque da salida a la magnitud y / ó al ángulo de fase de la señal de entrada, dependiendo de la configuración del parámetro salida.</p>
 <p>Divide</p>	<p>Dividir</p>	<p>Multiplica y divide escalares y no escalares ó multiplica e invierte matrices.</p>
 <p>Gain</p>	<p>Ganancia</p>	<p>El bloque de ganancia multiplica la entrada por un valor constante. La entrada y la ganancia puede ser escalares, vectores o matrices.</p>
 <p>Math Function</p>	<p>Función matemático</p>	<p>El bloque de funciones matemáticas realiza numerosas operaciones matemáticas comunes.</p>

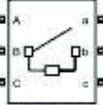
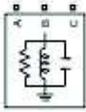
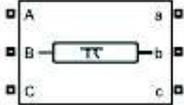
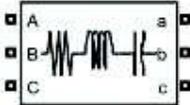
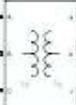
 Product	Producto	El bloque multiplica y divide escalares y no escalares ó multiplica e invierte matrices.
 Sign	Signo	Para valores reales de la entrada, el bloque emite el signo de dicha entrada.
 Sum	Suma	El bloque suma o resta sus entradas.
 Trigonometric Function	Función trigonométrica	El bloque especifica funciones trigonométricas aplicadas a la entrada.
 Subsystem	Subsistema	Un bloque de subsistema contiene un subconjunto de bloques o código dentro de un modelo o sistema general.
 In1	Puerto de Entrada	El bloque crea un puerto de entrada para un subsistema o una entrada externa.
 Out1	Puerto de Salida	El bloque crea un puerto de salida para un subsistema o una salida externa.
 If	If	El bloque If, junto con el bloque If Action Subsystem que contiene un puerto de acción, implementa la lógica if-else estándar.

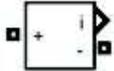
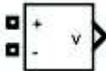
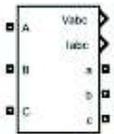
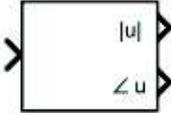
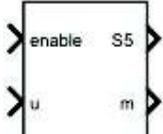
 <p>If Action Subsystem</p>	<p>Subsistema de acción If</p>	<p>El bloque de acción está pre configurado para servir como punto de partida para crear un subsistema cuya ejecución es activada por un bloque If.</p>
 <p>Rate Transition</p>	<p>Transición de frecuencia</p>	<p>Manejar la transferencia de datos entre bloques que operan a diferentes velocidades.</p>
 <p>Bus Selector</p>	<p>Selector de Bus</p>	<p>El bloque genera un subconjunto específico de los elementos del bus en su entrada.</p>
 <p>Demux</p>	<p>Demultiplexor</p>	<p>El bloque extrae los componentes de una señal de entrada y emite los componentes como señales separadas.</p>
 <p>Mux</p>	<p>Multiplexor</p>	<p>El bloque combina varias señales de entrada en un vector.</p>
 <p>Goto</p>	<p>Hacia</p>	<p>El bloque Goto pasa su entrada a sus bloques correspondientes From.</p>
 <p>From</p>	<p>Desde</p>	<p>El bloque From acepta una señal de su bloque Goto correspondiente, luego lo emite como salida.</p>

 <p>Merge</p>	Unir	El bloque combina sus entradas en una sola salida cuyo valor en cualquier momento es igual a la salida calculada más reciente de sus bloques.
 <p>Manual Switch</p>	Interruptor manual	El bloque de interruptor manual es un interruptor selecciona una de sus dos entradas para pasar a la salida. Para alternar entre las entradas, se hace doble clic en el bloque.
 <p>Multiport Switch</p>	Interruptor multipuerto	El bloque determina cuál de las múltiples entradas pasa a la salida. El bloque basa esta decisión en el valor de la primera entrada.
 <p>Switch</p>	Interruptor	Cambia la salida entre la primera entrada y la tercera entrada según el valor de la segunda entrada.
 <p>Display</p>	Display	El bloque muestra el valor de su entrada.
 <p>Scope</p>	Scope	Muestra señales en el dominio de tiempo con respecto al tiempo de simulación.
 <p>Terminator</p>	Terminator	El bloque sirve para limitar los bloques cuyos puertos de salida no se conectan a otros bloques.

 To Workspace	A Workspace	El bloque ingresa una señal y escribe los datos de la señal en el Workspace de Matlab.
 XY Graph	Diagrama X-Y	Muestra un diagrama X-Y de las señales en sus entradas usando una ventana de MATLAB.
 Band-Limited White Noise	Ruido blanco	El bloque introduce ruido blanco en un sistema continuo. El bloque genera números aleatorios normalmente distribuidos para su uso en sistemas continuos o híbridos.
 Clock	Reloj	El bloque genera el tiempo de simulación actual en cada paso de simulación.
 Constant	Constante	El bloque genera un valor de constante real o compleja.
 From Workspace	Desde Workspace	El bloque lee los datos de la señal desde el Workspace de Matlab y emite los datos como una señal.
 Ground	Tierra	El bloque de se conecta a bloques cuyos puertos de entrada no se conectan a otros bloques.
 Sine Wave	Onda sinusoidal	El bloque de onda sinusoidal produce una forma de onda sinusoidal.

 Step	Paso	El bloque genera una función que proporciona un paso entre dos niveles definibles en un tiempo específico.
 MATLAB Function	Función MATLAB	El bloque puede escribir una función para usarse en un modelo Simulink. La función se ejecuta para la simulación y genera código en Simulink.
 powergui	Powergui	El bloque permite resolver el circuito a través de distintos métodos. El bloque también abre herramientas para el análisis de resultados de estado estable.
 Three-Phase Source	Fuente trifásica	El bloque implementa una fuente de tensión trifásica equilibrada con una impedancia interna R-L.
 Controlled Voltage Source	Fuente de voltaje controlada	El bloque de fuente de voltaje controlada convierte la señal de entrada del bloque en una fuente de voltaje equivalente.
 Connection Port	Puerto de conexión	El bloque proporciona un puerto de conexión para subsistemas.
 Ground	Tierra	El bloque implementa una conexión a tierra.

 <p>Neutral</p>	<p>Neutro</p>	<p>El bloque implementa un nodo común con un número de nodo específico. Puede usarse para crear un neutro flotante o interconectar dos puntos sin dibujar una línea de conexión.</p>
 <p>Three-Phase Breaker</p>	<p>Interruptor trifásico</p>	<p>El bloque implementa un interruptor trifásico donde los tiempos de apertura y cierre se pueden controlar desde una señal externa o desde un temporizador de control interno.</p>
 <p>Three-Phase Parallel RLC Load</p>	<p>Carga trifásica RLC paralela</p>	<p>El bloque implementa una carga equilibrada trifásica como una combinación paralela de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga exhibe una impedancia constante.</p>
 <p>Three-Phase PI Section Line</p>	<p>Sección PI trifásica</p>	<p>El bloque implementa un modelo de línea de transmisión trifásica equilibrada con parámetros agrupados en una sección PI.</p>
 <p>Three-Phase Series RLC Branch</p>	<p>Ramal trifásico RLC</p>	<p>El bloque implementa tres ramificaciones balanceadas que consisten cada una de una resistencia, un inductor, un capacitor o una combinación en serie de estas.</p>
 <p>Three-Phase Series RLC Load</p>	<p>Carga trifásica RLC serie</p>	<p>El bloque implementa una carga equilibrada trifásica como una combinación en serie de elementos RLC. A la frecuencia especificada, la carga exhibe una impedancia constante.</p>
 <p>Three-Phase Transformer (Two Windings)</p>	<p>Transformador trifásico</p>	<p>Este bloque implementa un transformador trifásico utilizando tres transformadores monofásicos.</p>

 <p>Current Measurement</p>	<p>Medición de corriente</p>	<p>El bloque mide la corriente instantánea que fluye en cualquier bloque eléctrico o línea de conexión.</p>
 <p>Voltage Measurement</p>	<p>Medición de voltaje</p>	<p>El bloque mide el voltaje instantáneo entre dos nodos eléctricos.</p>
 <p>Impedance Measurement</p>	<p>Medición de impedancia</p>	<p>El bloque mide la impedancia entre dos nodos de un circuito lineal en función de la frecuencia.</p>
 <p>Three-Phase V-I Measurement</p>	<p>Medición trifásica V-i</p>	<p>El bloque se utiliza para medir tensiones y corrientes trifásicas instantáneas en un circuito.</p>
 <p>Fourier</p>	<p>Fourier</p>	<p>El bloque realiza un análisis de Fourier de la señal de entrada. El bloque de Fourier devuelve la magnitud y la fase de cualquier componente armónico de la señal de entrada.</p>
 <p>Digital Flickermeter</p>	<p>Flickermetro digital</p>	<p>El bloque implementa un Flickermetro digital como se describe en la norma IEC 61000-4-15.</p>
 <p>THD</p>	<p>THD</p>	<p>El bloque calcula la distorsión armónica total de una señal.</p>