BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

"ANÁLISIS DEL IMPACTO A LA RED POR LA CONEXIÓN DE UN CENTRO DE CARGA CON ALTA GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y CONTENIDO ARMÓNICO"

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

PEDRO OCTAVIO DOMÍNGUEZ LOBATÓN

Asesores de tesis:

DR. ISMAEL ALBINO PADILLA
DR. CARLOS RAMIREZ PACHECO

Puebla, Pue. Junio 2021

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

Oficio No. SIEP0698/2021

C. Pedro Octavio Domínguez Lobatón
Matrícula 219470124
Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Análisis del impacto a la red por la conexión de un centro de carga con alta generación de potencia reactiva y contenido armónico**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, asignándose como Director al
M.C. Ismael Albino Padilla y Codirector al Dr. Carlos Ramírez Pacheco.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, marzo 11 de 2021.

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director

C.c.p. M.C. Ismael Albino Padilla y Dr. Carlos Ramírez Pacheco, Director y Codirector del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

AEPS/JCES/sco*

Facultad de Ingeniería
Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
222 229 55 00 Ext. 7610

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

M.I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería, BUAP
Presente

Asunto: Autorización de Impresión

Los suscritos Dr. Ismael Albino Padilla y Dr. Carlos Ramírez Pacheco, asesores del tema de tesis **"ANÁLISIS DEL IMPACTO A LA RED POR LA CONEXIÓN DE UN CENTRO DE CARGA CON ALTA GENERACIÓN DE POTENCIA REACTIVA Y CONTENIDO ARMÓNICO"**, presentada por Pedro Octavio Domínguez Lobatón, con número de matrícula 219470124, pasante de la maestría en ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia, nos permitimos informar a usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodológico, redacción y ortográfica, tenemos a bien autorizar la impresión de tesis anteriormente mencionada.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

H. Puebla de Zaragoza, a 22 de junio de 2021

A T E N T A M E N T E

Dr. Ismael Albino Padilla

Dr. Carlos Ramírez Pacheco

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

Para las tres mujeres de mi vida

Mi mamá

Mi esposa

Mi hija

<<Las amo>>

"No existe criatura más fascinante

que aquella que es capaz de crear

luz por sí misma"

Paul Pen

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores de tesis el Dr. Ismael Albino Padilla y el Dr. Carlos Ramírez Pacheco, por todo lo que me enseñaron, el tiempo que me dedicaron y la paciencia que me tuvieron, no solo para el desarrollo de este trabajo de tesis, sino también por apoyarme a resolver cada una de las dudas que me surgieron a lo largo de mis estudios de maestría.

Al M.I. Genaro Campos García, por brindarme la oportunidad de estudiar la maestría.

Al Ing. Antonio Ortiz Salinas por darme su apoyo y brindarme todas las facilidades necesarias para poder desarrollar mis estudios de maestría.

A todos mis profesores y compañeros.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnológica (Conacyt), por la beca recibida durante mis estudios de maestría.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por haberme formado y a cada una de las instituciones que emanan de esta en las que tuve el honor de pertenecer, en especial a la Facultad de Ingeniería, el Colegio de Ingeniería Mecánica Eléctrica y a la Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo evaluar el impacto a la red por el uso de hornos de arco eléctrico en plantas acereras, visto desde el punto de común acoplamiento entre el usuario y el proveedor de energía eléctrica, enfocado a la entrega de potencia reactiva a la red por parte del usuario y a la medición de los parámetros de calidad de la energía, a través del uso de un modelo de horno de arco implementado en el software de simulación ATP, permitiendo así adecuar sus parámetros eléctricos conforme a la legislación vigente establecida en el Código de Red.

ABSTRACT

The present thesis work aims to evaluate the impact on the network by the use of electric arc furnaces in steel plants, seen from the point of common coupling between the user and the electricity supplier, focused on the delivery of reactive power to the network by the user and the measurement of power quality parameters, through the use of an arc furnace model implemented in the ATP simulation software, thus allowing its electrical parameters to be adapted in accordance with the current legislation established in the Grid Code.

.

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ÍNDICE

RESUMEN ..... a
ABSTRACT ..... a
ÍNDICE I
ÍNDICE DE FIGURAS V
ÍNDICE DE GRÁFICAS VII
ÍNDICE DE TABLAS X
ÍNDICE DE ECUACIONES XIII
Capítulo 1 PROTOCOLO 17
1.1 INTRODUCCIÓN 17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 18
1.3 JUSTIFICACIÓN 21
1.4 OBJETIVOS 21
OBJETIVO GENERAL 21
OBJETIVOS PARTICULARES 21
Capítulo 2 MARCO DE REFERENCIA 25
2.1 ESTADO DEL ARTE 25
2.1.1 ARCO ELÉCTRICO 25
2.1.2 MODELO DE ARCO ELÉCTRICO 27
2.1.3 MODELO DE CASSIE 28
2.1.4 HORNO DE ARCO ELÉCTRICO 29
2.2 MARCO TEÓRICO 32
2.2.1 PERTURBACIONES ELÉCTRICAS 32
2.2.2 DISTURBIOS DE VOLTAJE 33
2.2.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA 41

2.2.4 DESBALANCE DE CORRIENTE 45
2.2.5 CORTO CIRCUITO 45
2.2.6 VARIACIONES DE FRECUENCIA 48
2.2.7 FACTOR DE POTENCIA 48
Capítulo 3 MARCO NORMATIVO 55
3.1 GENERALIDADES 55
3.1.1 INTRODUCCIÓN 55
3.1.2 INCUMPLIMIENTO Y SANCIONES 56
3.2 REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO DE RED PARA CENTROS DE CARGA ESPECIALES 56
3.2.1 TENSIÓN 57
3.2.2 FRECUENCIA 59
3.2.3 REQUERIMIENTO DE FACTOR DE POTENCIA 60
3.2.4 CALIDAD DE LA ENERGÍA 60
Capítulo 4 MODELO DE SIMULACIÓN 67
4.1 CASO DE ESTUDIO 67
4.2 MODELOS DE SIMULACIÓN PREVIOS 72
4.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN 73
4.2.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN 73
4.2.3 TRANSFORMADOR STEP-DOWN 75
4.2.4 TRANSFORMADOR HORNO ARCO ELÉCTRICO 76
4.2.5 MODELO HORNO DE ARCO ELÉCTRICO 77
4.2.6 PARÁMETROS ELÉCTRICOS PARA COMPARACIÓN 77
4.3 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP SIN FILTRO. 79
4.3.1 CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN 79
4.3.2 CONSIDERACIONES DE LAS MEDICIONES 79

4.3.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE 80

4.3.4 NIVEL DE CORTO CIRCUITO EN EL PCC 85

4.3.5 MEDICIÓN DE CORRIENTE 88

4.3.6 MEDICIÓN DE POTENCIA 93

4.4 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA 96

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO UNA SINTONÍA 96

4.4.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN 98

4.4.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE 99

4.4.4 MEDICIÓN DE CORRIENTE 104

4.4.5 MEDICIÓN DE POTENCIA 109

4.5 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO DOBLE SINTONÍA. 112

4.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO DOBLE SINTONÍA 112

4.5.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE 113

4.5.3 MEDICIÓN DE CORRIENTE 119

4.5.4 MEDICIÓN DE POTENCIA 124

4.6 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA, CON DESCONEXIÓN SIMULTÁNEA DE HORNO Y FILTRO 127

4.6.1 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN 127

4.6.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE 128

4.6.3 MEDICIÓN DE POTENCIA 129

4.7 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA, CON DESCONEXIÓN SIMULTÁNEA DE HORNO Y FILTRO, CON COMPENSACIÓN EN PRIMARIO TRANSFORMADOR STEP DOWN 131

4.7.1 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN 131

4.7.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE 132

4.7.3 MEDICIÓN DE POTENCIA 133

4.7.4 COMPROBACIÓN DEL FILTRADO ARMÓNICO 135

Capítulo 5 CONCLUSIONES. 141

5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS RESPECTO A NORMATIVA VIGENTE 141

5.1.1 COMPARACIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO DE VOLTAJE 141

5.1.2 COMPARACIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO DE CORRIENTE 142

5.1.3 COMPARACIÓN DE FACTOR DE POTENCIA 143

5.2 CONCLUSIONES 144

5.3 TRABAJOS FUTUROS 145

REFERENCIAS 149

ANEXO A DIAGRAMAS DE SIMULACIÓN 153

ANEXO A.1 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN SIN FILTRO 155

ANEXO A.2 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO UNA SINTONÍA 157

ANEXO A.3 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO DOBLE SINTINÍA 159

ANEXO A.3 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO UNA SINTONÍA Y COMPENSACIÓN EN PRIMARIO TRANSFORMADOR STEP DOWN 161

ANEXO B CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN MATLAB 165

ANEXO B.1 CÓDIGO DE CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTO EN PCC 165

ANEXO B.2 CÓDIGO GRÁFICA IMPEDANCIA VS FRECUENCIA FILTRO UNA SINTONÍA 166

ANEXO B.3 CÓDIGO DE CÁLCULO FILTRO DOBLE SINTONÍA 167

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Alcance y aplicación de los criterios para Centros de Carga [6] 19
Figura 2-1 Distribuciones en el arco [5] 26
Figura 2-2 Características estáticas *v-i* de arcos en convección forzada o libre [5] 27
Figura 2-3 Horno de arco eléctrico [11] 31
Figura 2-4 Forma de onda de una caída de tensión [13] 33
Figura 2-5 Depresión de voltaje por el comienzo del proceso de fusión de un horno de arco eléctrico sin compensación [17] 35
Figura 2-6 Forma de onda de una sobre tensión [16] 35
Figura 2-7 Forma de onda de una sobre tensión transitoria [16] 36
Figura 2-8 Tipos de fluctuaciones de tensión tipos [13] 39
Figura 2-9 Curva límite de flicker [13] 40
Figura 2-10 Gráfica Voltaje – Corriente de una resistencia y una resistencia no lineal 41
Figura 2-11 Distorsión de corriente causado por una resistencia no lineal [19] 42
Figura 2-12 Representación de las series de Fourier de una forma de onda distorsionada [19] 43
Figura 2-13 Circuito Rl para análisis de la naturaleza transitoria de la corriente de corto circuito 46
Figura 2-14 Comportamiento en estado estable de la corriente de corto circuito [23] 47
Figura 2-15 Comportamiento transitorio de la corriente de corto circuito [23] 47
Figura 2-16 Comparación de la forma de onda del voltaje y la corriente de una carga 100% resistiva con (FP = 1) 49
Figura 2-17 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga 100% inductiva (FP = 0) 50
Figura 2-18 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga 100% capacitiva (FP = 0) 50

Figura 2-19 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga mixta (FP=0.89) 51
Figura 2-20 Curva característica de carga de un horno de arco eléctrico [17] 52
Figura 3-1 Actividades reguladas en el Código de Red [27] 55
Figura 3-2 Curva ITIC [26] 59
Figura 4-1 Diagrama unifilar modelo de simulación 72
Figura 4-2 Parámetros introducidos en subrutina Line Constants [32] 74
Figura 4-3 Datos de conductores y arreglo geométrico introducido a subrutina Line Constants [32] 74
Figura 4-4 Arreglo transformador Step-Down [32] 75
Figura 4-5 Arreglo transformador Horno Arco Eléctrico [32] 76
Figura 4-6 Modelo Horno de Arco Eléctrico [32] 77
Figura 4-7 ATP ajustes de Simulación 79
Figura 4-8 Resultados del análisis de corto circuito 87
Figura 4-9 Datos de filtro una sintonía introducidos a ATP 97
Figura 4-10 Ajustes de simulación con filtro 98
Figura 4-11 Ajustes de operación del interruptor HVCB HORNO 98
Figura 4-12 Datos de filtro doble sintonía introducidos a ATP 112

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1 Medición por CFE de la Forma de onda de voltaje y corriente en la Fase A [31] 67
Gráfica 4-2 Medición por CFE del factor de potencia total en 230 kV [31] 68
Gráfica 4-3 Medición por CFE del voltaje THD% - Fase A en 230 kV [31] 68
Gráfica 4-4 Medición por CFE del corriente THD% - Fase A en 230 kV [31] 69
Gráfica 4-5 Medición por CFE del espectro armónicos de voltaje [31] 69
Gráfica 4-6 Medición por CFE del espectro de armónicos de corriente [31] 70
Gráfica 4-7 Valores de voltaje y corriente obtenidos en [32] en 0.779 kV 78
Gráfica 4-8 Valores de voltaje y corriente obtenidos por el modelo de Cassie 78
Gráfica 4-9 Medición de voltaje 80
Gráfica 4-10 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase A 81
Gráfica 4-11 Espectro armónico de voltaje – Fase A 81
Gráfica 4-12 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase B 82
Gráfica 4-13 Espectro armónico de voltaje – Fase B 82
Gráfica 4-14 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase C 83
Gráfica 4-15 Espectro armónico de voltaje – Fase C 83
Gráfica 4-16 Corriente de Corto Circuito en el PCC 86
Gráfica 4-17 Medición de corriente 88
Gráfica 4-18 Análisis de forma de onda de corriente – Fase A 89
Gráfica 4-19 Espectro armónico de corriente – Fase A 90
Gráfica 4-20 Análisis de forma de onda de corriente – Fase B 90
Gráfica 4-21 Espectro armónico de corriente – Fase B 91
Gráfica 4-22 Análisis de forma de onda de corriente – Fase C 91
Gráfica 4-23 Espectro armónico de corriente – Fase C 92
Gráfica 4-24 Medición de potencia activa, aparente y reactiva 94
Gráfica 4-25 Medición de factor de potencia 95

Gráfica 4-26 Reactancia vs frecuencia filtro una sintonía 97
Gráfica 4-27 Medición de voltaje con filtro una sintonía 99
Gráfica 4-28 Medición de sobretensión por salida de horno con filtro una sintonía..... 100
Gráfica 4-29 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía– Fase A..... 101
Gráfica 4-30 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía– Fase A..... 101
Gráfica 4-31 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía – Fase B 102
Gráfica 4-32 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía – Fase B..... 102
Gráfica 4-33 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía – Fase C 103
Gráfica 4-34 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía – Fase C..... 103
Gráfica 4-35 Medición de corriente con filtro una sintonía 105
Gráfica 4-36 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía– Fase A..... 105
Gráfica 4-37 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase A..... 106
Gráfica 4-38 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía Fase B 106
Gráfica 4-39 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase B..... 107
Gráfica 4-40 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía – Fase C 107
Gráfica 4-41 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase C..... 108
Gráfica 4-42 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con filtro una sintonía ... 110
Gráfica 4-43 Medición de factor de potencia con filtro una sintonía..... 111
Gráfica 4-44 Reactancia vs frecuencia filtro doble sintonía 113
Gráfica 4-45 Medición de voltaje con filtro doble sintonía 114
Gráfica 4-46 Medición de sobretensión por salida de horno con filtro doble sintonía 114
Gráfica 4-47 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase A..... 115
Gráfica 4-48 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase A..... 116
Gráfica 4-49 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase B..... 116
Gráfica 4-50 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase B..... 117
Gráfica 4-51 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase C..... 117
Gráfica 4-52 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase C..... 118
Gráfica 4-53 Medición de corriente con filtro doble sintonía 120

Gráfica 4-54 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía– Fase A ... 120
Gráfica 4-55 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía– Fase A..... 121
Gráfica 4-56 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía – Fase B .. 121
Gráfica 4-57 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía – Fase B..... 122
Gráfica 4-58 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía – Fase C .. 122
Gráfica 4-59 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía – Fase C..... 123
Gráfica 4-60 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con filtro doble sintonía 125
Gráfica 4-61 Medición de factor de potencia con filtro doble sintonía 127
Gráfica 4-62 Medición de voltaje con horno y filtro de una sintonía desconectados..... 128
Gráfica 4-63 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con horno y filtro una sintonía desconectados 129
Gráfica 4-64 Medición de factor de potencia con horno y filtro una sintonía desconectados 131
Gráfica 4-65 Medición de voltaje con horno y filtro de una sintonía desconectado, con compensación fija en primario transformador STEP DOWN 132
Gráfica 4-66 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con horno y filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN 133
Gráfica 4-67 Medición de factor de potencia con horno y filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN 134
Gráfica 4-68 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A 135
Gráfica 4-69 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A 136
Gráfica 4-70 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD - Fase A 136
Gráfica 4-71 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A 137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 - Requerimientos específicos para centros de cargas especiales [6]..... 20
Tabla 2-1 Perturbaciones eléctricas [13] 32
Tabla 2-2 Clasificación de los sobre voltajes [18] 37
Tabla 2-3 Clases y formas de tensiones y sobretensiones de baja frecuencia [18] 37
Tabla 2-4 Clases y formas de tensiones y sobretensiones transitorio [18] 38
Tabla 3-1 Nivel de tensión conforme el Código de Red..... 57
Tabla 3-2 Valores máximos y mínimos de tensión que deben soportar los centros de carga de manera permanente [26]..... 57
Tabla 3-3 Valores máximos y mínimos de tensión que deben soportar los centros de carga hasta por 20 minutos [26]..... 58
Tabla 3-4 Valores de frecuencia máxima y mínima que debe soportar el Centro de Carga. [26] 59
Tabla 3-5 - Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones menores o iguales a 69 kV [26] 61
Tabla 3-6 Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones mayores de 69 kV a 161 KV [26] 61
Tabla 3-7 Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones mayores a 161 kV [26] 62
Tabla 3-8 Límites de distorsión de voltaje [21]..... 62
Tabla 3-9 Límites de fluctuaciones de tensión [26] 63
Tabla 3-10 Desbalance máximo permitido en la corriente en el punto de acometida [26] 64
Tabla 4-1 Medición del factor de potencia por CFE..... 70
Tabla 4-2 Medición de voltaje THD% en Fase A por CFE 71
Tabla 4-3 Medición de corriente THD% en Fase A por CFE 71
Tabla 4-4 Medición de espectro armónico de voltaje por CFE..... 71
Tabla 4-5 Medición de espectro armónico de corriente por CFE..... 71

Tabla 4-6 Comparación de las componentes armónicas de voltaje presentes con los límites de la Tabla 3-8 84
Tabla 4-7 THD de voltaje 85
Tabla 4-8 Equivalente de Thevenin en el punto de acometida 85
Tabla 4-9 Análisis de Gráfica 4-17 88
Tabla 4-10 Comparación de las componentes armónicas de corriente presentes con los límites de la Tabla 3-7 92
Tabla 4-11 THD de corriente 93
Tabla 4-12 Análisis de la Gráfica 4-24 94
Tabla 4-13 Cálculo de la impedancia en 34.5 kV 96
Tabla 4-14 Datos para cálculo de filtro una sintonía 96
Tabla 4-15 Comparación de las componentes armónicas de voltaje con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3-8 100
Tabla 4-16 THD de voltaje con filtro una sintonía 104
Tabla 4-17 Comparación de las componentes armónicas de corriente con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3-7 108
Tabla 4-18 THD de corriente con filtro una sintonía 109
Tabla 4-19 Análisis de la Gráfica 4-42 con el horno en operación 110
Tabla 4-20 Análisis de la Gráfica 4-42 con el horno fuera de operación 111
Tabla 4-21 Comparación de las componentes armónicas de voltaje con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3 8 115
Tabla 4-22 THD de voltaje con filtro doble sintonía 119
Tabla 4-23 Comparación de las componentes armónicas de corriente con filtro doble sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3 7 123
Tabla 4-24 THD de corriente con filtro doble sintonía 124
Tabla 4-25 Análisis de la Gráfica 4-60 con el horno en operación 126
Tabla 4-26 Análisis de la Gráfica 4-60 con el horno fuera de operación 126
Tabla 4-27 Análisis de la Gráfica 4-63 con el horno y el filtro una sintonía en operación 130

Tabla 4-28 Análisis de la Gráfica 4-63 con el horno y el filtro una sintonía desconectados 130
Tabla 4-29 Características del banco de capacitores fijo para transformador STEP DOWN 132
Tabla 4-30 Análisis de la Gráfica 4-66 con el horno y el filtro una sintonía en operación y compensación en primario transformador STEP DOWN 133
Tabla 4-31 Análisis de la Gráfica 4-66 con el horno y el filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN 134
Tabla 4-32 THD de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario transformador STEP DOWN 138
Tabla 4-33 THD de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario transformador STEP DOWN 138
Tabla 5-1 Resumen de resultados - Comparación de las componentes armónicas de voltaje presentes con los límites de distorsión armónica de la Tabla 3-8 141
Tabla 5-2 Resumen de resultados - Comparación de las componentes armónicas de corriente presentes con los límites de la Tabla 3-7 142
Tabla 5-3 Resumen de resultados – Comparación de medición de factor de potencia con los límites establecidos en 3.2.3 143
Tabla 5-4 Continuación Tabla 5-3 144

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1 Ecuación de Cassie 28
Ecuación 2-2 Ecuación de Cassie modificada 28
Ecuación 2-3 Ecuación de Cassie en función de i de arco 29
Ecuación 2-4 Profundidad del hueco de tensión 34
Ecuación 2-5 Severidad del Flicker 40
Ecuación 2-6 Análisis por serie de Fourier para una onda de forma cuadrada 42
Ecuación 2-7 Distorsión armónica total de tensión THD 44
Ecuación 2-8 Desbalance de tensión en por ciento 45
Ecuación 2-9 Voltaje al momento de la falla 45
Ecuación 2-10 Aplicación de la ley de voltajes de Kirchoff a un circuito RL 46
Ecuación 2-11 Ecuación diferencial que representa el comportamiento transitorio del circuito RL 46
Ecuación 2-12 Solución de la ecuación diferencial del circuito RL 46
Ecuación 4-1 Cálculo de la Impedancia relativa en el punto de común acoplamiento 87

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

BUAP / FACULTAD INGENIERÍA

CAPÍTULO I
PROTOCOLO

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO 1 PROTOCOLO

1.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de fundición de una industria acerera provoca un fuerte impacto en la calidad del servicio de energía eléctrica al sistema, lo que resulta en disturbios que afectan al resto de los usuarios, por tal motivo la legislación lo clasifica como un centro de carga especial, por lo que se requiere realizar un estudio de impacto en el sistema y calidad del servicio; este estudio tiene como objeto analizar las variables de voltaje, contenido armónico, así como verificar que los filtros instalados y los elementos que se requieren para compensar la variación de potencia reactiva demandada por la carga sean los adecuados para las características particulares del proceso y el punto de conexión. Para poder realizar este estudio se requiere un modelo que represente el comportamiento de la carga especial [1].

El contar con un modelo que represente adecuadamente la carga, es de suma importancia en el análisis de sistemas eléctricos de potencia porque permite simular el comportamiento de un sistema en estado estable o en presencia de un disturbio [2]. La carga es la suma de los dispositivos que consumen energía, por lo que se considera como un torque negativo al sistema eléctrico de potencia y estos pueden ser estáticos, dinámicos o híbridos [2] [3].

Un modelo estático es aquel que expresa la potencia activa y reactiva en un instante del tiempo en función del voltaje del bus (magnitud y frecuencia) en el mismo instante. Este representa los parámetros eléctricos como constantes: impedancia constante (Z), corriente constante (I) y potencia constante (P) [2] [3]. Un modelo dinámico es aquel que expresa la potencia activa y reactiva en un instante de tiempo en función del voltaje del bus (magnitud y frecuencia) en un instante atrás de tiempo. Este modelo describe los efectos de ambos tipos de carga: estática y dinámica [2] [3].

El presente trabajo de tesis implementa en una red de prueba el modelo de arco de Cassie, que es un modelo dinámico ya que está basado en ecuaciones diferenciales que dependen de

valores pasados [4] [5], con el fin de obtener una aproximación de los parámetros eléctricos obtenidos en un estudio real de calidad de la energía realizado en una planta acerera con hornos de arco eléctrico y poder corregirlos conforme al Código de Red vigente.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Ley de la Industria Eléctrica en el Artículo 12 Fracción XLII establece que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) está facultada para: "*Dictar o ejecutar las medidas necesarias para proteger los intereses del público en relación con la Calidad, Confiabilidad, Continuidad y Seguridad del Suministro Eléctrico, y solicitar a otras autoridades, en el ámbito de su competencia, la aplicación de medidas de seguridad adicionales o necesarias*".

El principal instrumento en materia de confiabilidad emitido por la CRE corresponde a las Disposiciones Administrativas de Carácter General (Código de Red), que establecen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional [6].

El Código de Red establece, a través de requerimientos técnicos mínimos, las obligaciones que deben cumplir todos los usuarios del SEN en el desarrollo de sus actividades, para asegurar la operación, desarrollo, acceso y uso del sistema eléctrico, en condiciones que promuevan la continuidad y calidad del suministro eléctrico. Las obligaciones establecidas en el Código de Red están definidas considerando las actividades y funciones de cada usuario del SEN y están encaminadas a promover que cada usuario mitigue los efectos que provoque en detrimento de la continuidad y calidad del suministro eléctrico [6].

En la Figura 1-1 se presenta el alcance y la aplicación de los requerimientos técnicos para centros de carga previstos en el Código de Red [6].

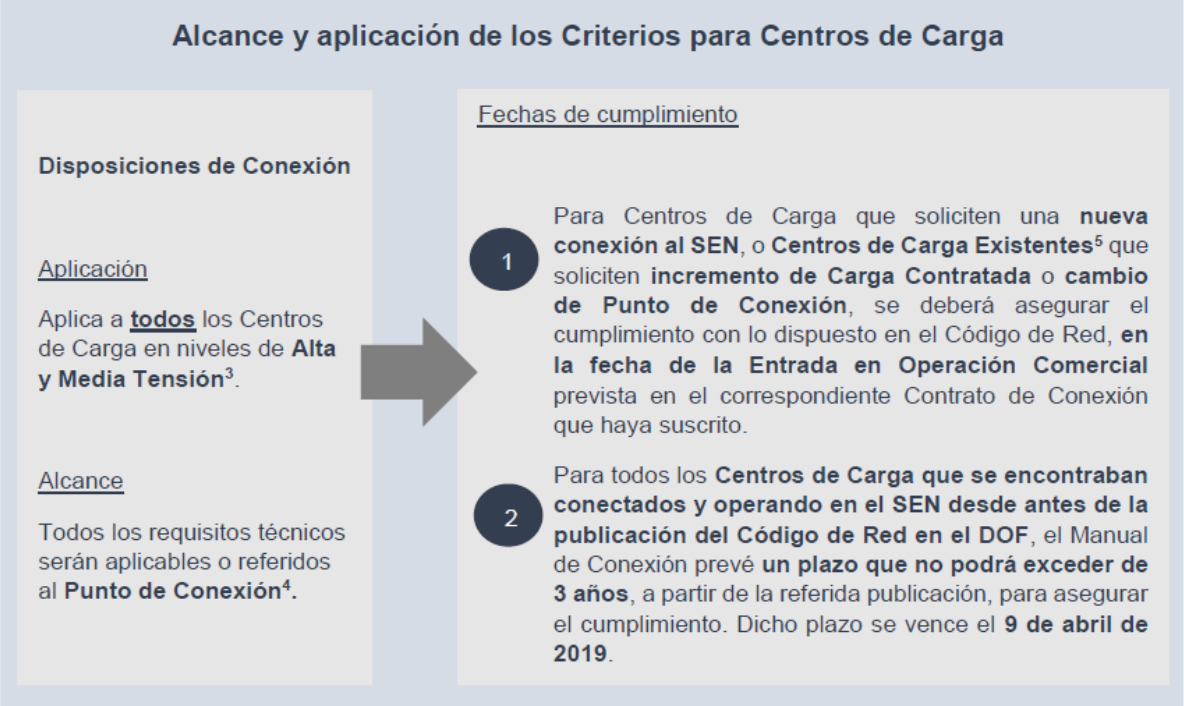


Figura 1-1 Alcance y aplicación de los criterios para Centros de Carga [6]

Las Disposiciones de Conexión del Código de Red son aplicables a todos los centros de carga conectados en Media y Alta Tensión, independientemente de la demanda contratada por el Centro de Carga o del esquema bajo el cual el Centro de Carga reciba el Suministro eléctrico. En este contexto, cada Centro de Carga está obligado a asegurar que cumple con los requerimientos técnicos que le correspondan en función del nivel de tensión en el que esté conectado. [6] Los requerimientos técnicos específicos para centros de carga especiales en el punto de conexión establecidos en el manual regulatorio de requerimientos técnicos para la conexión de centros de carga se muestran en la Tabla 1-1 [6].

REQUERIMIENTOS ESPECÍFICOS PARA CENTROS DE CARGAS ESPECIALES
1. Tensión **a. Variaciones de tensión de manera permanente** **b. Variaciones de tensión de manera temporal** **c. Condiciones transitorias de variación de tensión**

2. **Frecuencia**
    a. **Variaciones de frecuencia de manera permanente y temporal.**
    b. **Variaciones de frecuencia ante la conexión o desconexión de carga**
3. **Corto Circuito**
4. **Factor de potencia**
5. **Protecciones**
6. **Control**
7. **Intercambio de información**
8. **Calidad de la energía**
    a. **Distorsión armónica en corriente**
    b. **Fluctuación de tensión (Flicker)**
    c. **Desbalance de corriente**

Tabla 1-1 - Requerimientos específicos para centros de cargas especiales [6]

Los hornos de arco eléctrico debido a su naturaleza no lineal generan distintos disturbios a la red que perjudican tanto a las mismas empresas como a otros usuarios, que pueden conducir a interrupciones y perturbaciones de la red. Los disturbios que genera un horno de arco eléctrico son:

- Fluctuaciones de tensión
- Bajo factor de potencia.
- Distorsión armónica
- Huecos de tensión
- Flicker

Durante el proceso de fundición un horno de arco eléctrico demanda una gran cantidad de potencia reactiva, por lo que se cuentan con compensación estática, que al dejar de fundir inyectan una gran cantidad de potencia reactiva a la red provocando sobre tensiones, en el caso de que la compensación no sea suficiente, durante el proceso se pueden presentar problemas de abatimiento de voltaje que pueden provocar paros de planta y pérdida de producción. Por tal motivo es de suma importancia controlar los disturbios generados por el horno de arco eléctrico, en cumplimiento de los requerimientos específicos del Código de Red.

1.3 JUSTIFICACIÓN

El implementar el modelo de arco de Cassie en una red de prueba propuesta, permitirá obtener parámetros eléctricos similares a los que se obtendrían en una medición real de calidad de la energía, representado así el comportamiento no lineal y aleatorio del horno de arco eléctrico, permitiendo analizar el impacto que tiene la conexión de un centro de carga con hornos de arco eléctrico al Sistema Eléctrico Nacional, así como también, brindará la información necesaria, para corregir estos parámetros eléctricos conforme al Código de Red vigente.

1.4 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el impacto en la red que se produce al conectar una planta de horno de arco eléctrico, a través del análisis de los parámetros eléctricos obtenidos con base en el modelo de arco de Cassie, para así poder corregirlos dentro de los límites establecidos en la normativa vigente.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Implementar el modelo de Cassie en una red de prueba en el software ATP y medir sus parámetros eléctricos de voltaje, corriente, distorsión armónica en corriente, distorsión armónica de voltaje, consumo de potencia activa y consumo de potencia reactiva.
2. Diseñar un filtro para la corrección de la distorsión armónica de voltaje conforme a los límites establecidos en el IEEE-519.
3. Diseñar un filtro para la corrección de la distorsión armónica de corriente conforme a los límites establecidos en el Código de Red.
4. Corregir el factor de potencia conforme a los límites establecidos en el Código de Red.

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO II
MARCO DE REFERENCIA

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO 2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 ESTADO DEL ARTE

2.1.1 ARCO ELÉCTRICO

Un arco eléctrico es una descarga autosostenida que se comporta como una resistencia no lineal, la cual se produce por la separación de unos contactos en los cuales fluye corriente, generando una descarga lumínica y un impulso de chispa de alta frecuencia, produciendo temperaturas mayores a 3728°C (4000°K) en el gas conductor entre los contactos. El arco eléctrico tiene la característica que a corrientes bajas, el voltaje cae con el incremento de la corriente, esto se denomina como característica negativa, pero a corrientes altas, el voltaje tiende a incrementarse lentamente, esto se denomina como característica positiva, está dos características nos indican que se tiene un voltaje presente a través de la longitud del arco [7].

La Figura 2-1 muestra las tres regiones en las que un arco eléctrico puede ser dividido, la primera región es la columna del arco o columna positiva, la segunda es la región catódica y la tercera es la región anódica [7].

2.1.1.1 COLUMNA DE ARCO

La columna de arco es una región cilíndrica de gases a alta presión, considerados como plasma, en la cual los gases ionizados generan dos componentes de carga, una carga de electrones J- y una carga de iones positivos J+, estas componentes tienen casi el mismo número de densidad de carga. El calor producido por el efecto Joule en la columna del arco mantienen la ionización y fluye axialmente hacia los electrodos y radialmente hacia afuera del arco [7].

2.1.1.2 REGIÓN CATÓDICA

El cátodo tiene como función satisfacer la condición de brindar continuamente electrones libres a la columna del arco a través de una transición del metal a gas. Los materiales refractarios con punto de ebullición alto como pueden ser Tungsteno, el carbón, etc., emiten electrones cuando se calientan a temperaturas menores a las de evaporación [7].

2.1.1.3 REGIÓN ANÓDICA

La región anódica es similar a la región catódica, sin embargo, ya que el cátodo no produce iones positivos necesarios para la conducción de corriente, estos son producidos por el ánodo. La región anódica no tiene condiciones tan extremas como en la región catódica [7].

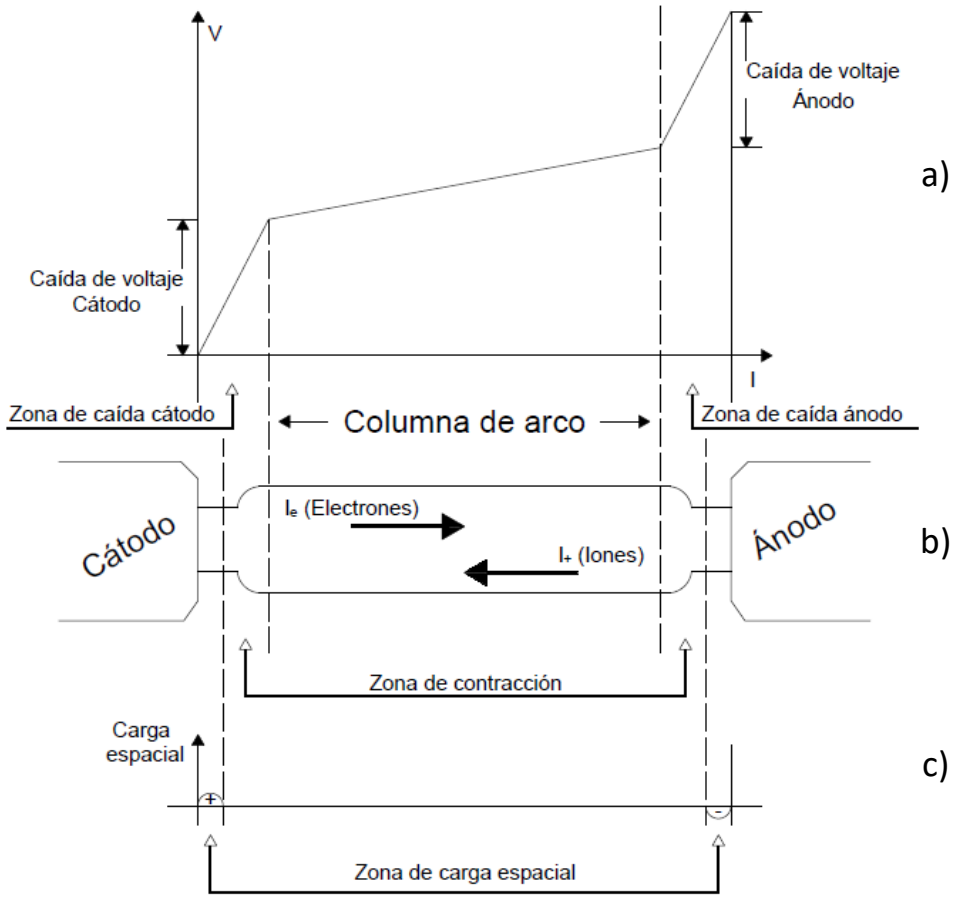


Figura 2-1 Distribuciones en el arco [5]

- En la parte a) se muestra la distribución del voltaje a lo largo del arco eléctrico, se observa que el gradiente de voltaje depende de la corriente de arco.
- En la parte b) se observa el flujo de la corriente dentro de la columna del arco.
- En la parte c) se muestra la zona de carga espacial que es donde se producen los electrones y iones necesarios requeridos para la columna del arco.

2.1.2 MODELO DE ARCO ELÉCTRICO

Un horno de arco eléctrico tiene una naturaleza variante. Por tal motivo es de suma importancia contar con un modelo que pueda brindar la información básica como es la potencia activa, así como la generación de armónicos de forma parecida a las que se obtendrían en la realidad en condiciones similares [4]. El modelo más simple de un arco eléctrico es aquel que muestra las características típicas en estado cuasi – estable como son voltaje y corriente, sin embargo, existen diferentes factores que afectan estas características, como pueden ser: El tipo de gas donde se presenta el arco, la presión del gas, la separación de los electrodos, la forma de los electrodos, el material de los electrodos, etc. [5].

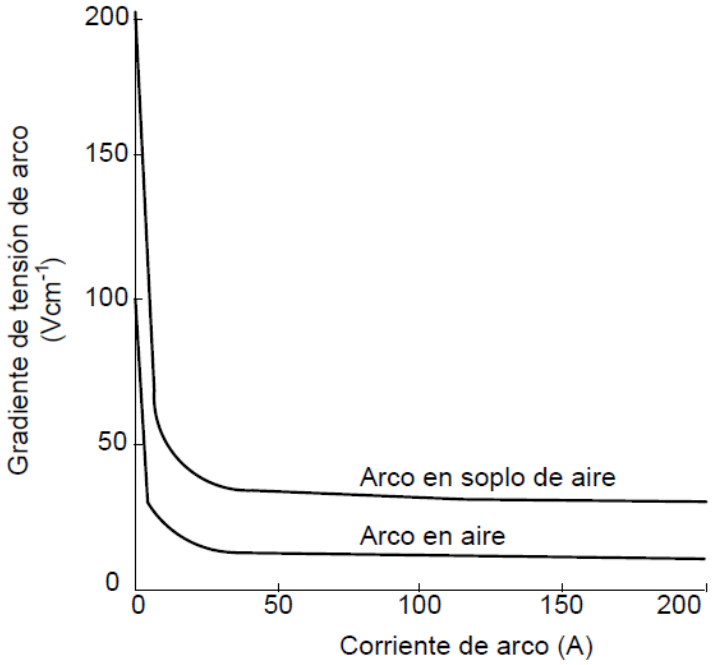


Figura 2-2 Características estáticas *v-i* de arcos en convección forzada o libre [5]

La Figura 2-2 [5] muestra las características típicas en estado cuasi - estable de un arcó eléctrico. La trama de la curva *v-i* se explica como la forma en la que el arco pierde calor, esto, considerando una densidad de corriente constante y una pérdida de calor constante por unidad de volumen de una superficie cilíndrica del arco.

2.1.3 MODELO DE CASSIE

Cassie postulo un modelo de arco [8] en el que se tiene una densidad de corriente constante, por lo que la sección transversal del arco varia directamente con el valor de la corriente, también tiene una resistividad constante y el almacenaje de la energía constante por unidad de volumen [5]. El modelo Cassie es un modelo dinámico ya que sus parámetros eléctricos dependen de valores pasados, es decir que está basado en ecuaciones diferenciales y se expresa mediante la Ecuación 2-1 [4] [5] :

$$\frac{1}{R}\frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta}\left(1 - \frac{e^2}{E_0^2}\right)$$

Ecuación 2-1 Ecuación de Cassie

Dónde:

R	Resistencia del arco - Variable dependiente (Ohm)
θ	Constante de tiempo - Esta dada por la energía almacenada por unidad de volumen / tasa de perdida de energía por unidad de volumen (Segundos)
Eo	Voltaje inicial de arco - Voltaje en estado estable – Constante (Volts)
e	Voltaje de arco (Volts)

Sin embargo, se han encontrado problemas de convergencia cuando se utiliza ***R*** como variable dependiente, por lo que se opta por usar la conductancia ***G***, obteniendo la ecuación de Cassie modificada.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta}\left(\frac{e^2}{E_0^2} - 1\right)$$

Ecuación 2-2 Ecuación de Cassie modificada

Dónde:

G	Conductancia del arco - Variable dependiente (Mhos)
$\boldsymbol{\theta}$	Constante de tiempo - Esta dada por la energía almacenada por unidad de volumen / tasa de perdida de energía por unidad de volumen (Segundos)
Eo	Voltaje inicial de arco - Voltaje en estado estable – Constante (Volts)
e	Voltaje de arco (Volts)

La Ecuación 2-2 [9] muestra el cambio en la conductancia en función del tiempo y del voltaje del arco (e) y del voltaje inicial (Eo), parámetros que dependen de la corriente de arco eléctrico y en consecuencia a la sección transversal del arco. La Ecuación 2-2 también se puede escribir en términos de la corriente de arco *i = Ge,* esta ecuación puede ser convenientemente escrita como [10]:

$$\frac{dG^2}{dt} + \frac{2G^2}{\theta} = \frac{2}{\theta}\left(\frac{i}{E_0}\right)^2$$

Ecuación 2-3 Ecuación de Cassie en función de i de arco

Dónde:

G	Conductancia del arco - Variable dependiente (Mhos)
$\boldsymbol{\theta}$	Constante de tiempo - Esta dada por la energía almacenada por unidad de volumen / tasa de perdida de energía por unidad de volumen (Segundos)
Eo	Voltaje inicial de arco - Voltaje en estado estable – Constante (Volts)
i	Corriente de arco

2.1.4 HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Alrededor de una cuarta parte del acero en el mudo se produce mediante el método del arco eléctrico, que utiliza arcos eléctricos de alta corriente para fundir chatarra de acero y convertirlo en acero líquido de una composición química específica.

Un horno de arco eléctrico es un recipiente cilíndrico hecho de placas pesadas de acero. En el fondo tiene una cubierta refractaria en forma de plato revestida con ladrillos de magnesita adheridos con alquitrán y tres electrodos verticales que se extienden hacia abajo a través de un techo removible en forma de cúpula.

La mayor parte de las paredes están hechas de paneles remplazables enfriados con agua, estos están cubiertos con refractarios y escoria para protección y evitar pérdidas de calor, el techo también está hecho de paneles enfriados con agua y tiene tres aberturas circulares, igualmente espaciadas, para la inserción de los electrodos cilíndricos.

Los electrodos se conforman por cadenas de pequeños electrodos de grafito individuales atornillados de extremo a extremo, los tres electrodos se sujetan a los brazos que se extienden sobre el techo del horno y que se atornillan a un mástil verticalmente móvil ubicado al lado del horno. El mástil controla la distancia entre cada punta de los electrodos y la chatarra o la masa fundida, regulando la longitud del arco y el flujo de corriente.

La fuente de alimentación conformada por un transformador reductor, interruptores al vacío e intercambiador de taps para regulación de voltaje, se instala en una bóveda para transformadores de concreto armado a poca distancia del horno. Los conductores que conectan del trasformador al brazo de los electrodos también son enfriados por agua.

Las plantas con hornos de arco eléctrico son más pequeñas y menos costas de construir que las plantas siderúrgicas integradas, que, además de los hornos de oxígeno básicos, contienen altos hornos, plantas de sinterización y baterías de coque para la fabricación de hierro. Los hornos de arco eléctrico también son rentables a bajas tasas de producción y pueden funcionar de forma intermitente, sin embargo, el consumo de energía eléctrica es muy alto, y la infraestructura eléctrica es sustancialmente mayor [11].

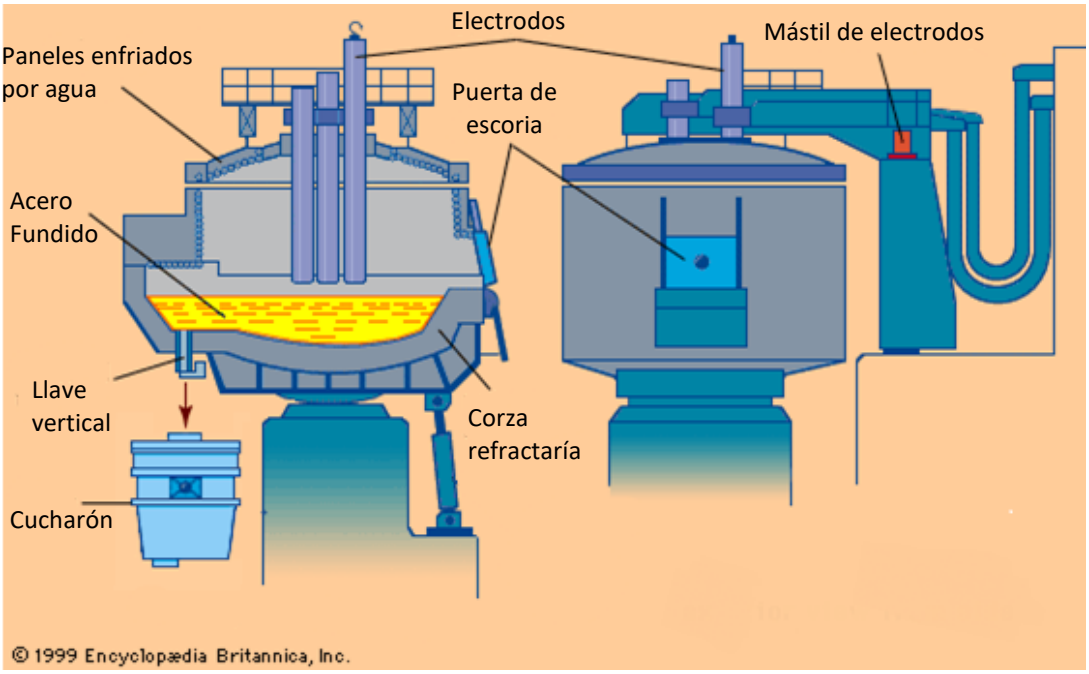


Figura 2-3 Horno de arco eléctrico [11]

2.1.4.1 PROCESO DE FUNDICIÓN

El proceso de fusión comienza con baja potencia hasta que los electrodos se han quemado en la chatarra encima de la carga protegiendo las paredes laterales del sobrecalentamiento durante la fusión de mayor potencia dejando un poco de chatarra sin fundir en la pared del horno para su protección. Se carga por segunda vez de chatarra y se sigue el mismo procedimiento de fusión, el proceso de fusión de chatarra ligera pude llegar a requerir que el horno se cargue tres o incluso cuatro veces [11]. Durante el proceso de fusión se presentan grandes desbalances entre fases, ya que una fase puede estar en corto circuito y otra puede estar en circuito abierto. Las grandes variaciones de potencia reactiva provocan fluctuaciones en la tensión de la red, para mantener la estabilidad del arco durante esta etapa, el consumo de potencia activa es del mismo orden de la potencia reactiva y como consecuencia se tiene un bajo factor de potencia. Durante la etapa de afino el consumo de potencia activa es menor y el factor de potencia alcanza valores de hasta 0.9, siendo una etapa más estable y las fluctuaciones de potencia activa y reactiva son menores [12].

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 PERTURBACIONES ELÉCTRICAS

En los sistemas eléctricos de potencia, las perturbaciones son cualquier desviación con respecto de la onda sinusoidal, teórica, producida en los centros de generación, estas desviaciones se muestran en la Tabla 2-1, estas se pueden presentar en cualquiera de los parámetros de onda, como son frecuencia, amplitud, forma de onda y simetría entre fases.

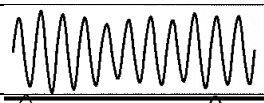
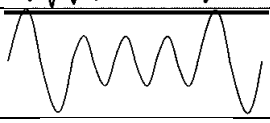
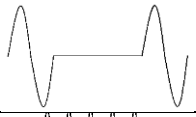
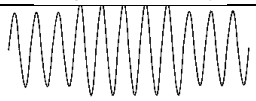
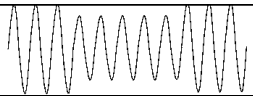
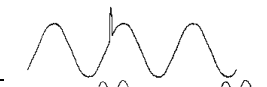
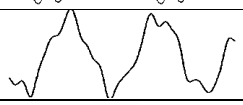
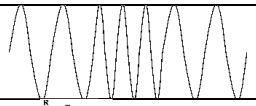
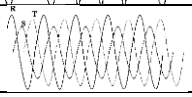
Parámetro	Nombre	Definición
Amplitud	Fluctuación de tensión	
	Hueco de tensión	
	Interrupción de alimentación - Corte breve - Corte largo	
	Sobretensión temporal	
	Variación de tensión	
Forma de onda	Sobretensión transitoria	
	Tensión armónica	
	Tensión interarmónica	
	Señales de información transmitidas por la red	
Frecuencia	Variación de frecuencia	
Simetría	Desequilibrio de tensión	

Tabla 2-1 Perturbaciones eléctricas [13]

2.2.2 DISTURBIOS DE VOLTAJE

La mayor parte de los equipos eléctricos utilizados hoy en día, en especial los equipos electrónicos requieren de una buena calidad de la energía, sin embargo, son estos mismos equipos los que causan distorsión a las fuentes de voltaje en las instalaciones ya que son cargas no lineales, que tienen una forma no sinusoidal de corriente, alimentados con una fuente de voltaje sinusoidal [14].

En un sistema eléctrico se definen dos tipos diferentes de voltaje [15]:

- Voltaje de la fuente, que es el voltaje de línea a línea o línea a neutro en el punto de acometida.
- Voltaje de carga, que es el voltaje de línea a línea o línea a neutro en el punto de conexión o en las terminales de los equipos eléctricos.

2.2.2.1 CAÍDAS DE TENSIÓN

Las variaciones de tensión son incrementos o decrementos del voltaje debido a la variación de la carga, las variaciones de tensión se clasifican como caídas de voltaje y sobre tensione [14] s. Una caída de voltaje es la reducción del valor rms del voltaje en el rango de 1% a 90%, seguido de una recuperación del voltaje después de un corto periodo de tiempo y tiene una duración mayor de ½ ciclo y menor a 1 minuto, ocasionado generalmente por aumento en la demanda o eventos como entradas de grandes motores [16].

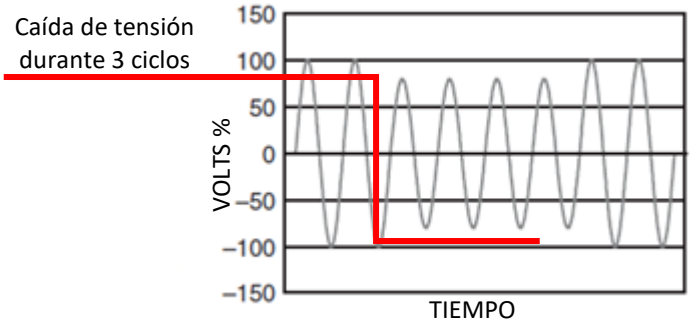


Figura 2-4 Forma de onda de una caída de tensión [13]

En la Figura 2-4 se observa una caída de tensión a un porcentaje cercano al 75% del valor nominal con una duración aproximada de 3 ciclos. La profundidad del hueco de tensión está

definida como la diferencia entre el valor rms mínimo durante la caída de voltaje y el voltaje nominal. Una reducción del voltaje que no sea menor al 10% no se considera una caída de tensión [14].

$$\Delta V\ (\%) = \frac{V_{nom} - V_{min}}{V_{nom}}\ x\ 100$$

Ecuación 2-4 Profundidad del hueco de tensión

Dónde:

$\boldsymbol{\Delta V\ (\%)}$	Profundidad del hueco de tensión en porciento
$\boldsymbol{V_{nom}}$	Voltaje rms nominal del sistema
$\boldsymbol{V_{min}}$	Voltaje mínimo durante la caída de tensión

Uno de los aspectos principales del efecto de las acerías en los sistemas eléctricos de potencia y sobre todo en los sistemas débiles es la depresión del voltaje en el proceso de fundición. Esto se debe a una absorción súbita de potencia reactiva. Compensando la potencia reactiva absorbida por el horno, la tensión de la barra que alimenta el horno va a permanecer estable y va a verificarse también un aumento de valor RMS. Este aumento de la tensión y la estabilización tiene como consecuencia un aumento de suministro de potencia activa al horno [17].

En la Figura 2-5 [17] se observa la caída de tensión que se presenta en el voltaje cuando un horno de arco eléctrico sin compensación comienza su proceso de fundición. Se observa que durante el primer cuarto de ciclo la depresión es mayor y de un cuarto de ciclo al ciclo el voltaje se comienza a recuperar, pero presenta oscilaciones.

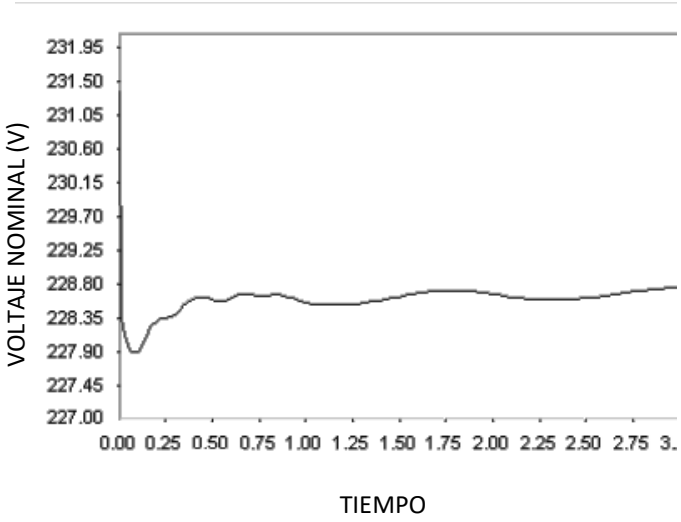


Figura 2-5 Depresión de voltaje por el comienzo del proceso de fusión de un horno de arco eléctrico sin compensación [17]

2.2.2.2 SOBRETENSIÓN TRANSITORIA

Las sobre tensiones son el incremento del valor rms del voltaje en el rango de 110% a 180% para duraciones mayores a ½ ciclo y menor a 1 minuto, ocasionado por fallas en el sistema, suicheo de carga o suicheo de capacitores. La magnitud de la sobretensión depende de la ubicación de la falla, la impedancia de sistema y la puesta a tierra [16]. En la Figura 2-6 [16] se observa una sobre tensión de aproximadamente 120% del valor nominal con una duración aproximada de 4 ciclos.

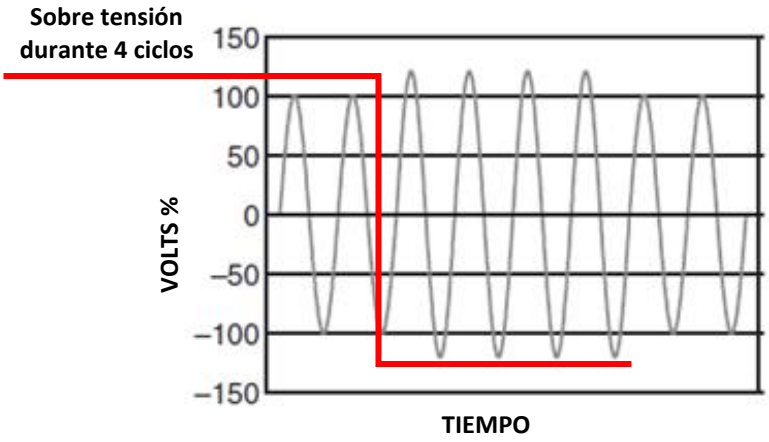


Figura 2-6 Forma de onda de una sobre tensión [16]

Una sobretensión transitoria se define como una sobretensión oscilatoria o no oscilatoria de corta duración generalmente fuertemente amortiguada y que dura como máximo algunos milisegundos, su origen pude ser ocasionado por una descarga atmosférica, operaciones de suicheo y salidas de cargas inductivas [14]. Se destaca el aspecto de variación brusca en la tensión, con valores que superan varias veces el valor máximo de la tensión nominal, y que pueden poner en peligro determinados equipos eléctricos [13]. Un transitorio no oscilatorio es un cambio brusco que ocurre fuera del rango de la frecuencia de la fuente y es unidireccional en polaridad. Los transitorios no oscilatorios se caracterizan por la tasa de cambio de voltaje, es decir, los tiempos de acenso y descenso. Los transitorios oscilatorios se caracterizan por su frecuencia, contenido y duración, a menudo son en respuesta a un impulso no oscilatorio [16].

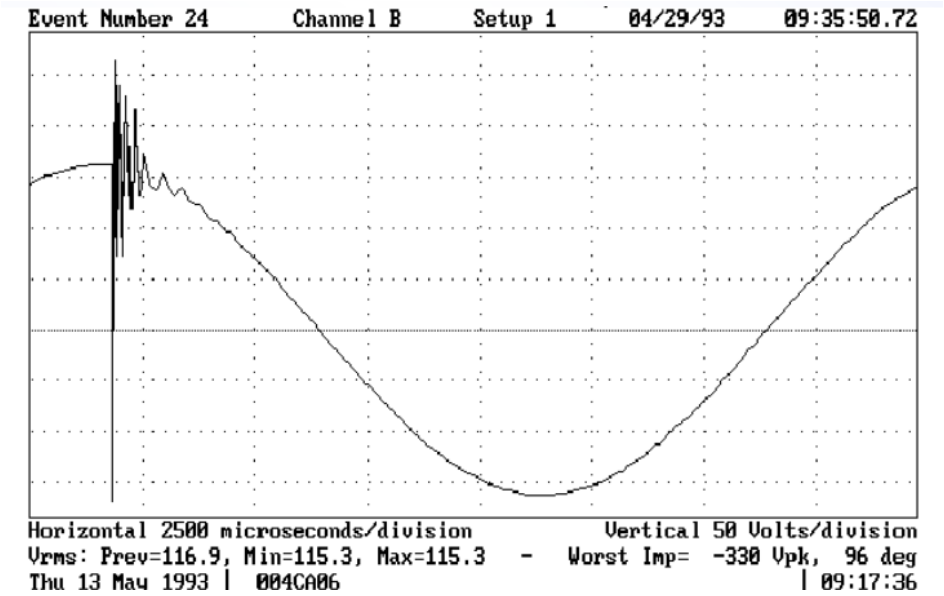


Figura 2-7 Forma de onda de una sobre tensión transitoria [16]

En la Figura 2-7 corresponde a una medición donde se observa la forma de onda del voltaje, observa un evento transitorio oscilatorio causado posiblemente por el suicheo o salida de una carga grande [16].

En [18], se clasifican las sobretensiones de acuerdo con su duración y naturaleza tal como se indica en Tabla 2-2, Tabla 2-3 y Tabla 2-4.

Baja frecuencia	Continuo	El voltaje se considera que tiene un valor constante rms continuamente aplicado a un par de terminales
	Temporal	El sobrevoltaje es relativamente de larga duración algunos segundo o minutos
Transitorios	Transitorio -Frente lento -Frente rápido -Frente muy rápido	Los sobrevoltajes tienen una corta duración de algunos milisegundos o menos y puede ser oscilatorio o no oscilatorio usualmente muy amortiguado

Tabla 2-2 Clasificación de los sobre voltajes [18]

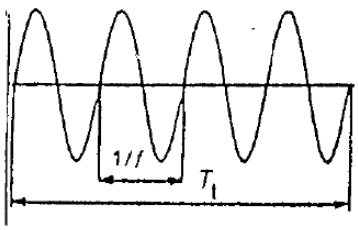
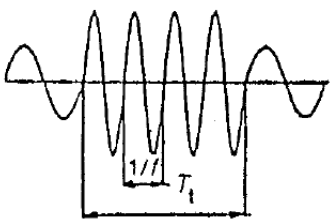
TIPO	**BAJA FRECUENCIA**	
	CONTINUO	**TEMPORALES**
Forma de voltaje o sobre voltaje		
Rango de voltaje o sobre voltaje	f = 50 o 60 Hz $T_t \geq$ 3 600 S	*10* Hz < f < *500* Hz 3 600 S ≥ $T_t \geq$ 0.03 s
Forma de voltaje nominal	f = 50 o 60 Hz T_t *)	*48* Hz < f < *62* Hz T_t = 60 s
Prueba de resistencia estándar	*)	Prueba de corta duración potencia - frecuencia
*) A ser especificado por los comités de aparatos pertinentes		

Tabla 2-3 Clases y formas de tensiones y sobretensiones de baja frecuencia [18]

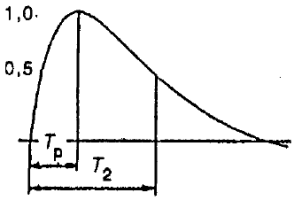
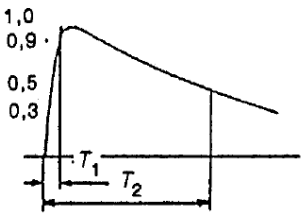
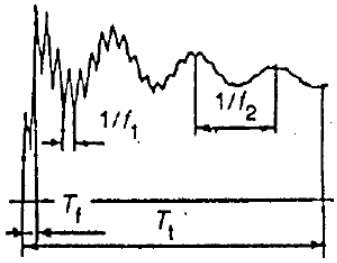
TIPO	TRANSITORIOS		
	FRENTE LENTO	**FRENTE RAPIDO**	**FRENTE MUY RAPIDO**
Forma de voltaje o sobre voltaje			
Rango de voltaje o sobre voltaje	*5000 µs* ≥ T_p ≥ *20 µs* T_2 ≤ 20 ms	*20 µs* ≥ T_1 ≥ *0.1 µs* T_2 ≤ *300 µs*	100 ns ≥ T_f > *3ns* 0.3 MHz < f_1 < 100 MHz 300 kHz < f_2 < 300 kHz T_t ≤ 3 ms
Forma de voltaje nominal	T_p = *250 µs* T_2 = *2500 µs*	T_1 = *1.2 µs* T_2 = *20 µs*	*)
Prueba de resistencia estándar	Prueba de impulso de suicheo	Prueba de impulso por rayo	*)
*) A ser especificado por los comités de aparatos pertinentes			

Tabla 2-4 Clases y formas de tensiones y sobretensiones transitorio [18]

2.2.2.3 FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

Las fluctuaciones de tensión, entre las cuales se encuentra el flicker, se definen como variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión de alimentación. Su duración va desde varios milisegundos hasta unos 10 segundos y con una amplitud no mayor al ±10% del voltaje nominal [14]. La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) clasifica las fluctuaciones de tensión en cuatro tipos [13]:

- Tipo A: Variaciones rectangulares de tensión (cambios en escalón o almena) de periodo constante y de la misma amplitud.
- Tipo B: Variaciones rectangulares de tensión (cambios en escalón) que se presentan de forma irregular en el tiempo. Sus amplitudes pueden ser iguales o no y pueden ser en sentido positivo o negativo.

- Tipo C: Variaciones de tensión claramente separadas que no siempre llevan aparejados escalones de tensión.
- Tipo D: Variaciones de tensión esporádicas o repetitivas.

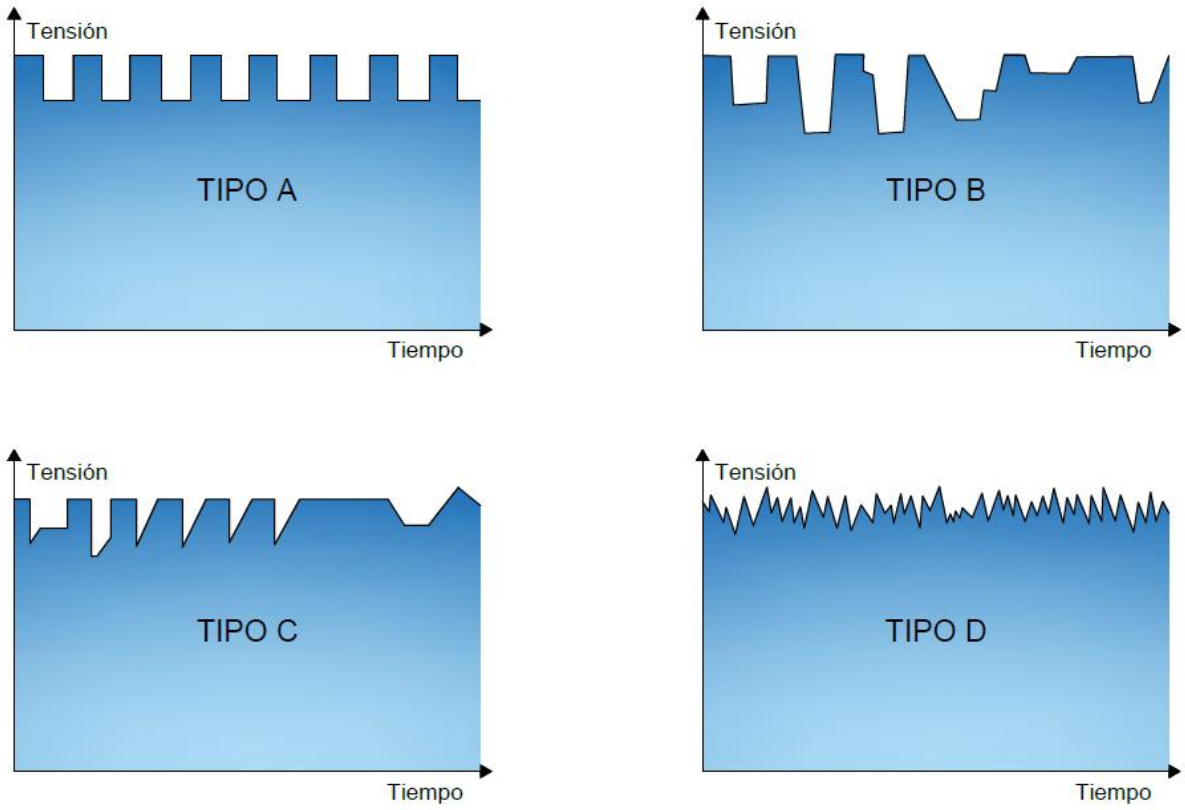


Figura 2-8 Tipos de fluctuaciones de tensión tipos [13]

El flicker se define como la impresión de inestabilidad de la sensación visual debida al estímulo luminoso en el cual la luminosidad o la distribución espectral fluctúan en el tiempo [14], es decir es el nivel de molestia que percibe un observador como consecuencia de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionado por las fluctuaciones de tensión en la red, el flicker depende fundamentalmente de la amplitud y de la frecuencia de las fluctuaciones de tensión que lo causan [13].

Los medición del flicker permite conocer el nivel de molestia que percibiría un observador medio en el punto de la red en el que se conecte el medidor, para ello, se emplea un algoritmo que traduce las fluctuaciones de tensión en ese punto de la red de alimentación eléctrica, en

los niveles de molesta equivalentes que sería percibidos por el sistema ojo-cerebro del observador [13]. La severidad de la intensidad del flicker se mide en dos índices básicos [14]:

- P_{st} - Indicador de variación de tensión de corto plazo. Expresa la severidad de la fluctuación durante un período de 10 min, siendo Pst=1 el umbral de irritabilidad.
- P_{lt} - Indicador de variaciones de tensión de largo plazo. Expresa la severidad de la fluctuación durante un periodo largo de 2 horas, empleando valores sucesivos de Pst.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} Pst_i^3}{12}}$$

Ecuación 2-5 Severidad del Flicker

En condiciones normales de operación, para cada periodo de una semana, el nivel de severidad de larga duración del flicker Plt debido a las fluctuaciones de la tensión debería ser menor o igual a 1 durante el 95% del tiempo. La Figura 2-9 [13] muestra los valores máximos permitidos de las variaciones de tensión en función de la frecuencia dentro del espectro del flicker para la curva límite del Pst=1.

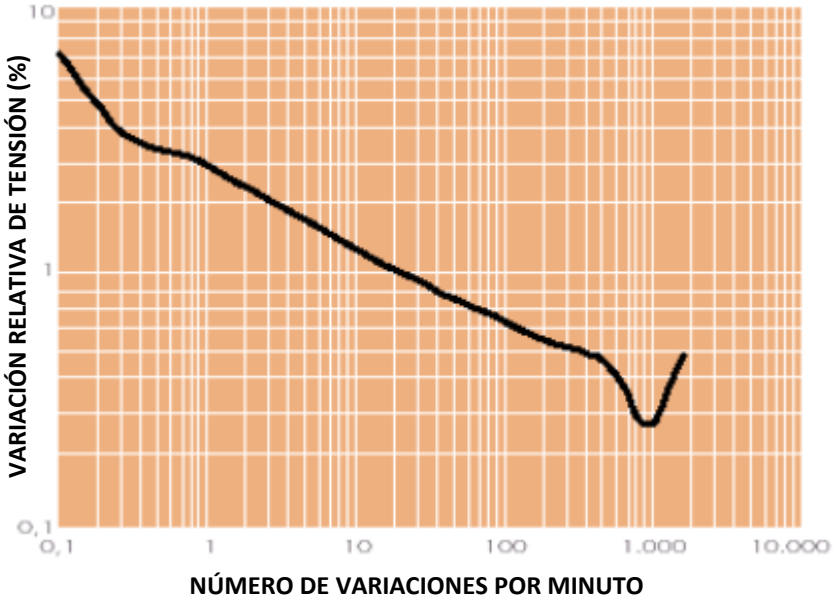


Figura 2-9 Curva límite de flicker [13]

Las fluctuaciones de voltaje generalmente son generadas por los usuarios del sistema eléctrico, las principales fuentes de generación de fluctuaciones de voltaje son:

- Hornos de arco eléctrico.
- Máquinas de soldar.
- Alternadores (Generadores eólicos e impulsados por combustión interna)

2.2.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA

Los armónicos son una distorsión periódica de la forma sinusoidal de la onda del voltaje de la fuente o de la corriente de la carga, causado por cargas no lineales [16]. Una carga no lineal es aquella en la que la corriente no es proporcional al voltaje aplicado. Las cargas no lineales son aquellas que contienen electrónica en su etapa de entrada, como pueden ser diodos, transistores, tiristores, puertas IGBT, etc.

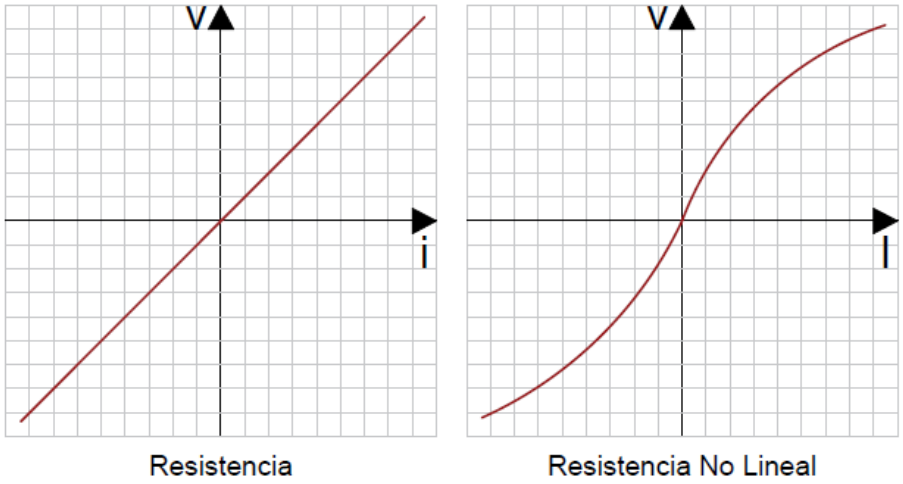


Figura 2-10 Gráfica Voltaje – Corriente de una resistencia y una resistencia no lineal

En la Figura 2-10, se observa el comportamiento de la corriente cuando a una resistencia y a una resistencia no lineal se le aplica un voltaje con una forma de onda senoidal pura. En la resistencia no lineal, cuando el voltaje se incrementa en un pequeño porcentaje, este puede llegar a doblar el valor de la corriente, generando así una forma de onda de corriente distorsionada. En el caso de la resistencia convencional, se observa que la corriente es proporcional al voltaje aplicado.

En la Figura 2-11 se muestra como la forma de onda de la corriente, se ve distorsionada respecto a la forma de onda del voltaje, causado por el efecto de la resistencia no lineal [19].

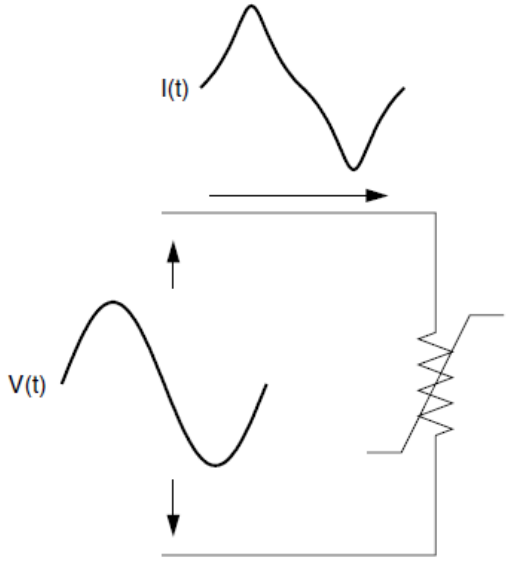


Figura 2-11 Distorsión de corriente causado por una resistencia no lineal [19]

Una forma de onda periódica distorsionada se puede expresar como la suma de las formas de onda senoidales, en la cual la frecuencia de cada forma de onda individual es un múltiplo de la frecuencia fundamental. Estos múltiplos son los armónicos de la fundamental y son descritas con base en las series de Fourier [19].

Utilizando el análisis de series de Fourier del componente individual de la frecuencia de la forma de onda distorsionada, podemos describir a cada elemento de los armónicos en términos de orden, magnitud y fase, ya que permite evaluar el ancho de banda de una señal a través del dominio de la frecuencia [20].

$$v(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{\substack{n=1 \\ n\ impares}}^{\infty} \frac{1}{n} sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$$

Ecuación 2-6 Análisis por serie de Fourier para una onda de forma cuadrada

Donde:

V	Señal de voltaje
t	Tiempo en segundos
T	Periodo de la función
n	Número de armónico impar

La serie de Fourier tiene un número infinito de armónicos impartes que se combinan para representar la onda cuadrada. Cada armónico más alto es más pequeño en amplitud que el anterior debido al término 1 / n en la ecuación. Debido a que nuestra onda cuadrada ideal tiene un tiempo de subida cero, el ancho de banda de la señal será infinito. Dicho de otra manera, necesitamos incluir todos los armónicos para representar la onda cuadrada perfectamente [20].

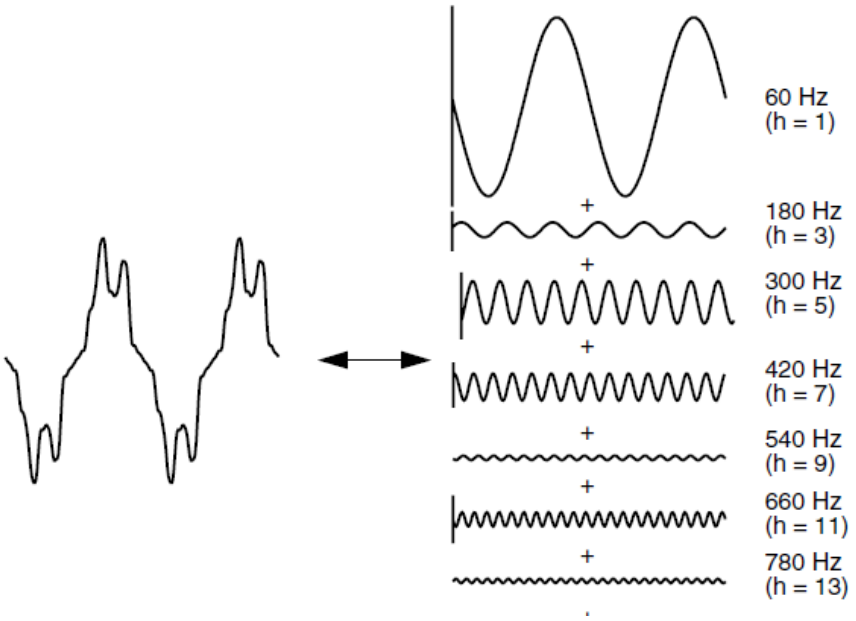


Figura 2-12 Representación de las series de Fourier de una forma de onda distorsionada [19]

La Figura 2-12 representa como una forma de onda distorsionada, puede ser expresada como la suma de formas de ondas senoidal de mayor frecuencia. En análisis de sistemas eléctricos

de potencia, las armónicas veinticincoavas en adelante son despreciables, ya que estas solo pueden causar disturbios en sistemas eléctricos de bajo voltaje [19].

El valor rms del contendió armónico (THD) representa la suma de todos los componentes armónicos presentes en una forma de onda expresados como el por ciento de la fundamental, considerando componentes armónicos hasta el orden de la cincuentava armónica y excluyendo interarmónicos [21].

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{H} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}$$

Ecuación 2-7 Distorsión armónica total de tensión THD

Donde:

Un	La suma de todas las componentes armónicas de tensión hasta un orden especificado H.
H	Orden especificado de componentes armónicas
U1	Valor eficaz de la componente fundamental

Los hornos de arco eléctrico producen armónicos por las variaciones aleatorias de los instantes de establecimiento del arco, los cuales se combinan con los producidos por las características altamente no lineales de la impedancia del arco, ocasionando fluctuaciones de tensión debido a las rápidas variaciones de la longitud del arco, produciendo frecuencias entre 0.1 – 30 Hz a cada lado de los armónicos característicos. Este efecto es más acentuado en el periodo de fusión debido al movimiento errático de la chatarra y la interacción electromagnética entre los arcos de diferentes electrodos. Durante el proceso de refinado, el arco, es más estable, aunque todavía existe alguna modulación de su longitud por las ondulaciones que se presentan en la superficie del metal fundido. Estos armónicos, si no se instalan filtros, serán directamente inyectados en el sistema de suministro de potencia [17].

2.2.4 DESBALANCE DE CORRIENTE

El desbalance de corriente se produce cuando por las tres fases del sistema, la magnitud de la corriente no es la misma en cada una de ellas, para poder determinar el desbalance de tensión en porciento se utiliza la Ecuación 2-8. [22]

$$\%Desbalance = \frac{Desviación\ estandar}{Corriente\ Promedio}$$

Ecuación 2-8 Desbalance de tensión en por ciento

2.2.5 CORTO CIRCUITO

Un cortocircuito es una conexión casual, accidental o intencional de baja impedancia, o resistencia establecida entre dos o más puntos de un circuito eléctrico con diferencia de potencial entre ellos. Esa conexión causa una corriente excesiva que quema, sobrecalienta, mueve, expande, etc. causando daños a personas y equipos.

2.2.5.1 NATURALEZA TRANSITORIA DE UN CIRCUITO RL

Con el objeto de poder aproximarse al problema de calcular la corriente inicial cuando un sistema se encuentra en condición de corto circuito, se considera lo que pasa cuando se aplica un voltaje de corriente alterna a un circuito con elementos resistivos e inductivos. [23].

Este voltaje se define como:

$$V_{max}Sen(wt + \alpha)$$

Ecuación 2-9 Voltaje al momento de la falla

Donde:

- w Velocidad angular (2πf).
- t Tiempo (Cero al momento de aplicar voltaje).
- α Posición inicial del ángulo del voltaje.

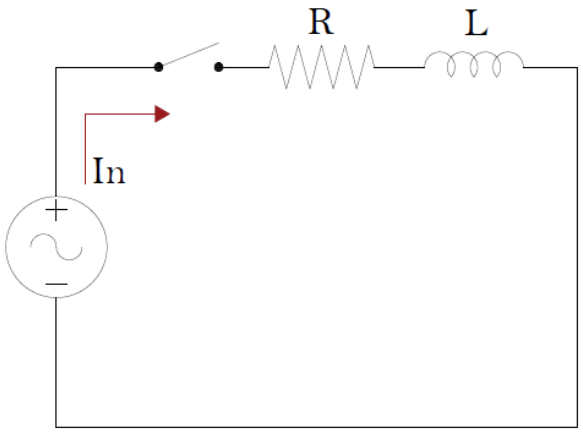


Figura 2-13 Circuito Rl para análisis de la naturaleza transitoria de la corriente de corto circuito

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff

$$-V_{Fuente} + V_{Resistencia} + V_{Inductacia} = 0$$

Ecuación 2-10 Aplicación de la ley de voltajes de Kirchoff a un circuito RL

$$V_{max}Sen(wt + \alpha) = Ri + L\frac{di}{dt}$$

Ecuación 2-11 Ecuación diferencial que representa el comportamiento transitorio del circuito RL

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$i(t) = \frac{V_{max}}{|Z|}\left[sen(wt + \alpha - \theta) - e^{-Rt/L}\, sen(\alpha - \theta)\right]$$

Ecuación 2-12 Solución de la ecuación diferencial del circuito RL

Donde:

$|Z| = \sqrt{R^2 + wL^2}$

$\theta = \tan^{-1}(wL/R)$

El primer término en la Ecuación 2-12, "$\boldsymbol{sen(wt + \alpha - \theta)}$" varía sinusoidalmente con el tiempo y representa el comportamiento en estado estable del sistema. El segundo término en la Ecuación 2-12, "$\boldsymbol{e^{-Rt/L}\, sen(\alpha - \theta)}$", es aperiódico y decae exponencialmente con una constante de tiempo de $\boldsymbol{R/L}$, a este término aperiódico se le conoce como componente de corriente directa de la corriente [23].

Si el termino sinusoidal no es cero cuando t=0, la componente de corriente directa aparece en la solución con el fin de satisfacer la condición física de corriente cero en el instante de cerrar el interruptor. La componente de corriente directa no existe en el circuito si se cierra en un punto de onda de voltaje tal que $\boldsymbol{\alpha - \theta} = 0°$ o $\boldsymbol{\alpha - \theta} = 180°$

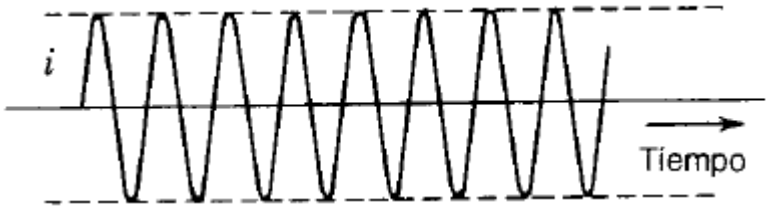


Figura 2-14 Comportamiento en estado estable de la corriente de corto circuito [23]

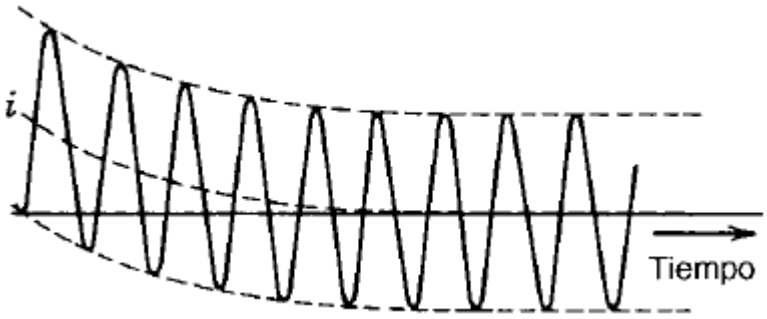


Figura 2-15 Comportamiento transitorio de la corriente de corto circuito [23]

En la Figura 2-14 se muestra la variación de la corriente con el tiempo tal que $\boldsymbol{\alpha - \theta} = \boldsymbol{0°}$ o $\boldsymbol{\alpha - \theta} = \boldsymbol{180°}$, representa el comportamiento en estado estable del sistema. En la Figura 2-15 se muestra la variación de la corriente si el interruptor se cierra en el punto tal que el voltaje se encuentre en $\boldsymbol{\alpha - \theta} = \boldsymbol{\pm 90°}$. La componente de corriente directa puede tener cualquier valor desde cero hasta $\boldsymbol{V_{max}/|Z|}$ y depende del valor instantáneo del voltaje cuando

el circuito se cierra. En el instante de aplicar el voltaje, la componente de corriente directa y el valor de estado estable tienen siempre la misma magnitud, pero con signos opuestos con el fin de expresar el valor cero de corriente que existe en ese punto [23].

2.2.6 VARIACIONES DE FRECUENCIA

La frecuencia de alimentación se define como la tasa de repetición de la componente fundamental de la tensión de alimentación, medida durante un intervalo de tiempo determinado. Cualquier cambio sobre la componente fundamental constituye una variación de frecuencia. Se dice que existen variaciones de frecuencia en un sistema eléctrico de corriente alterna cuando se produce una alteración del equilibrio entre carga y generación. La frecuencia, en un sistema eléctrico de corriente alterna, está directamente relacionada con la velocidad de giro, es decir, con el número de revoluciones por minuto de los alternadores. Dado que la frecuencia es común a toda la red, todos los generadores conectados a ella girarán de manera síncrona, a la misma velocidad angular eléctrica.

Las variaciones de frecuencia se presentan cuando se produce un desequilibro importante entre la generación y la carga es decir cuando la carga es superior a la generación la frecuencia disminuye y su velocidad dependerá de la reserva de energía rodante y de la constante de inercia del conjunto de los generadores conectados a la red. Cuando la carga es inferior a la generación la frecuencia aumenta y el equilibrio se establece mediante un proceso sobre los sistemas de regulación de los alternadores para disminuir la capacidad de generación [24].

2.2.7 FACTOR DE POTENCIA

El factor de potencia (FP) se considera como un indicador sobre el correcto aprovechamiento de la energía eléctrica. El factor de potencia puede tomar valores entre 0 y 1, donde 1 es el valor ideal e indica que toda la energía consumida por los aparatos ha sido transformada en trabajo. Por el contrario, un factor de potencia menor a la unidad significa mayor consumo de energía para producir un trabajo útil. Considerando lo anterior, el factor de potencia por debajo del 0.90 indica la existencia de energía desperdiciada y, en consecuencia, un incremento innecesario en el importe de su facturación eléctrica por este concepto [25].

El factor de potencia es la relación entre la potencia activa y la potencia aparente. En sistemas de corriente alterna el factor de potencia es el Cos θ, donde θ es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente [16].

En la Figura 2-16 se observa el comportamiento de la forma de onda del voltaje y la corriente cuando se alimenta una carga 100% resistiva, en la que ambas ondas están en fase, o tienen el mismo ángulo, En la Figura 2-17 se muestra cuando se alimentan puras cargas inductivas la corriente se atrasa 90° respecto al voltaje y en la Figura 2-18 se muestra cuando se alimentan puras cargas capacitivas la corriente se adelanta 90° respecto al voltaje. En la Figura 2-19 se muestra cuando se alimenta una combinación de cargas resistivas, cargas inductivas y cargas capacitivas como sucede en la industria lo que nos origina un factor de potencia en atraso de 0.89

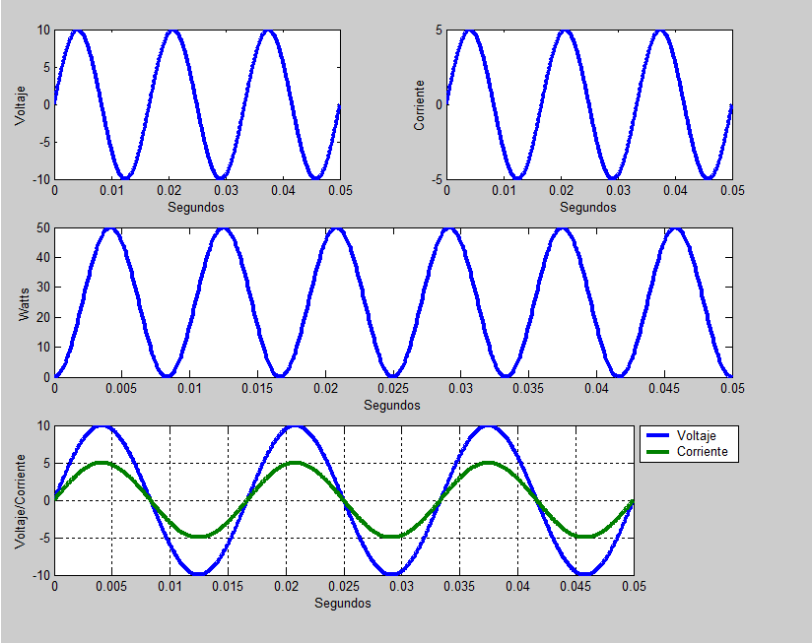


Figura 2-16 Comparación de la forma de onda del voltaje y la corriente de una carga 100% resistiva con (FP = 1)

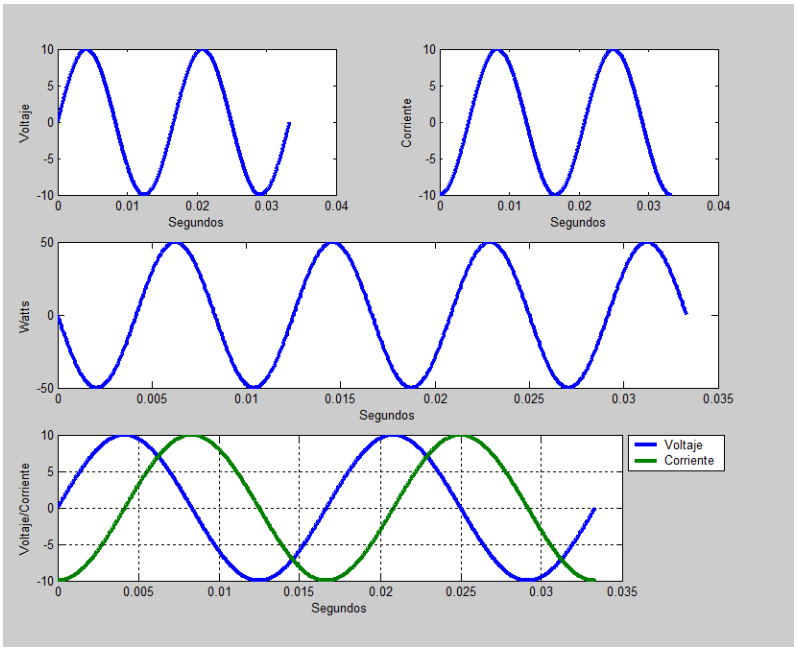


Figura 2-17 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga 100% inductiva (FP = 0)

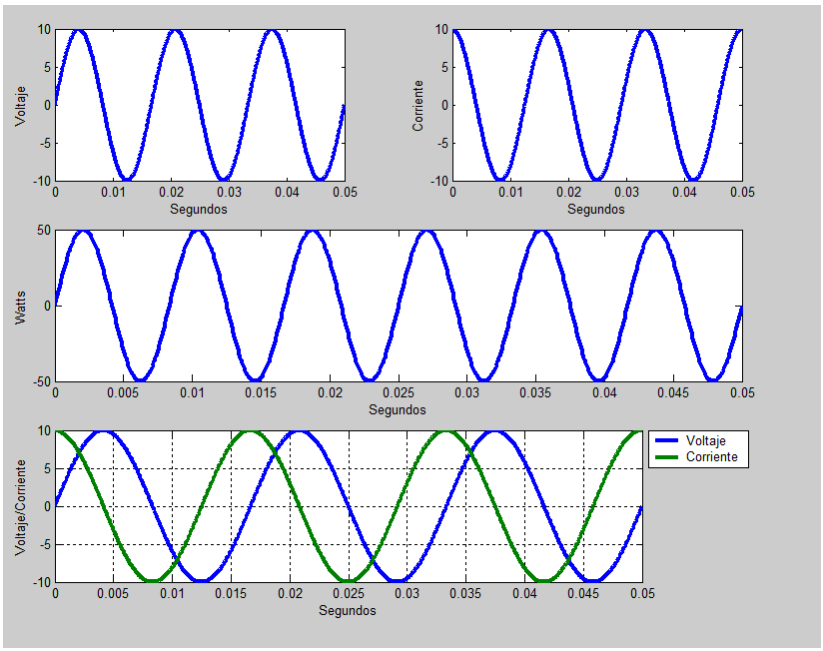


Figura 2-18 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga 100% capacitiva (FP = 0)

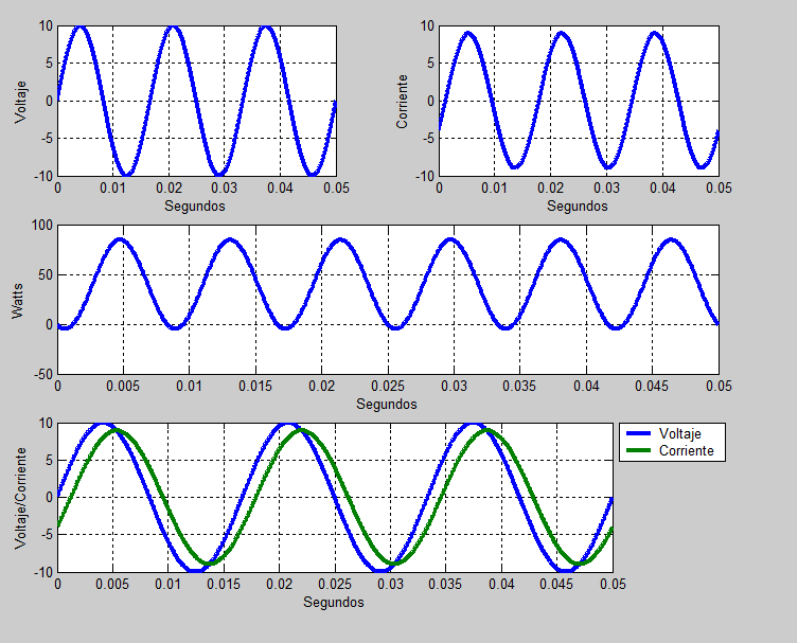


Figura 2-19 Comparación de la forma de onda de voltaje y corriente de una carga mixta (FP=0.89)

Un bajo factor de potencia puede ser causado por:

- Hornos de arco eléctrico
- Una gran cantidad de motores
- Una subutilización de la capacidad instalada en equipos electromecánicos

Al corregir el factor de potencia se obtiene reducción en el costo de la facturación de la energía eléctrica y se evitan penalizaciones, se disminuyen las perdidas eléctricas en los conductores por efecto Joule, reducción de perdidas por caída de tensión y aumento de la disponibilidad de potencia en transformadores y líneas de transmisión.

Los hornos de arco eléctrico durante la etapa de fusión, su consumo de potencia activa y reactiva son del mismo orden lo que ocasiona un bajo factor de potencia. Con el bajo factor de potencia se permite un mejor aprovechamiento del horno logrando un arco mucho más estable. La potencia transmitida al horno es máxima cuando se tiene $\theta = 45°$, que corresponde a un factor de potencia de 0.7071. En el momento en el que el arco se extingue, la corriente

se hace cero y si se tiene un bajo factor de potencia se establece una tensión alta entre el electrodo y la carga reiniciándose de forma fácil el arco eléctrico [12].

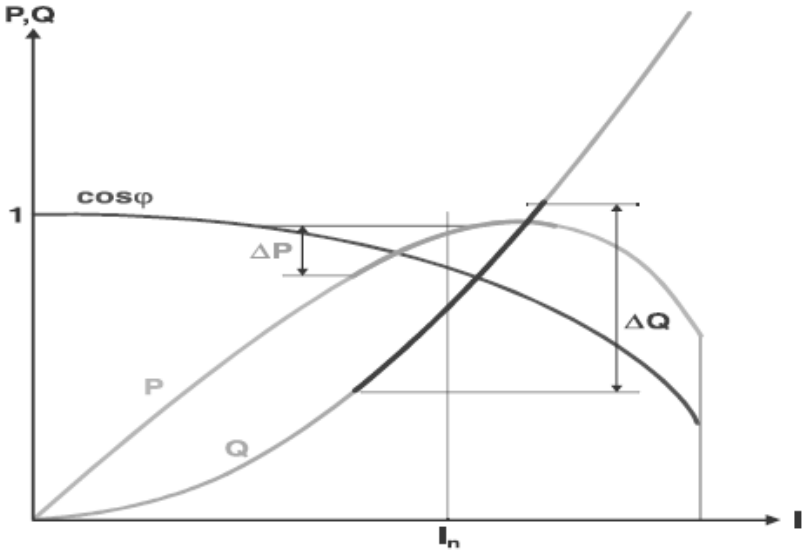


Figura 2-20 Curva característica de carga de un horno de arco eléctrico [17]

En la Figura 2-20 se observa que cerca del intervalo de operación ΔQ, es mucho mayor que el correspondiente a ΔP, cuando la red de suministro no está diseñada para suministrar potencia reactiva con variaciones violentas de tensión, el bus que alimenta al horno de arco eléctrico tiene fuertes variaciones de tensión [17].

BUAP / INGENIERÍA FACULTAD

CAPÍTULO III
MARCO NORMATIVO

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO 3 MARCO NORMATIVO

3.1 GENERALIDADES

3.1.1 INTRODUCCIÓN

El Código de Red es la regulación técnica emitida por la Comisión Reguladora de Energía , en adelante CRE, cuyo objetivo es establecer las obligaciones que deben cumplir los usuarios del Sistema Eléctrico Nacional, en adelante SEN, que lleven a cabo actividades como planeación, control operativo, control físico, interconexión y conexión, principalmente, con la finalidad de garantizar la continuidad y la calidad del suministro de energía eléctrica, y fomentar el desarrollo eficiente y confiable de la infraestructura del SEN, para beneficio de todos sus usuarios [6]. El Código de Red es de cumplimiento obligatorio para los Integrantes de la Industria Eléctrica y corresponderá a la CRE su interpretación y vigilancia [26]. El Código de Red se conforma por dos grandes secciones. La primera se refiere a las Disposiciones Generales del SEN, en las que se prevén criterios de carácter general con respecto a todas las actividades que se regulan a través del referido documento. La segunda sección se refiere a las Disposiciones Operativas del SEN que se integran por Manuales Regulatorios, Procedimientos y Anexos Técnicos [6]. Las actividades reguladas por el Código de Red se muestran en la Figura 3-1 [27].

Figura 3-1 Actividades reguladas en el Código de Red [27]

3.1.2 INCUMPLIMIENTO Y SANCIONES

Los integrantes de la industria eléctrica que dejen de observar, de manera grave a juico de la CRE, las disposiciones establecidas en el Código de Red se sujetarán a las sanciones establecidas en el artículo 165 de la LIE [28]:

- **Fracción I, Inciso k):** Dejar de observar, las disposiciones en materia de la Calidad, Confiabilidad, Continuidad y Seguridad del Sistema Eléctrico Nacional; Con multa del 2% al 10% de los ingresos brutos percibidos en el año anterior.
- **Fracción II, Inciso c):** Incumplir las disposiciones en materia de la Calidad, Confiabilidad, Continuidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional; Con multa de cincuenta mil a doscientos mil salarios mínimos.

Además de las sanciones, se deberá presentar de forma obligatoria, en un plazo no mayor de 30 días hábiles un plan de trabajo detallando las acciones que serán implementadas para cumplir con los criterios sobre los cuales se dio la sanción. La magnitud de la condición de incumplimiento será evaluada por la CRE con el apoyo técnico del CENACE, y considera el impacto asociado a [26]:

- Número de usuarios afectados.
- Tiempo de interrupción del Suministro Eléctrico.
- Energía no suministrada.
- Corte manual de carga no controlable
- Otras.

3.2 REQUERIMIENTOS DEL CÓDIGO DE RED PARA CENTROS DE CARGA ESPECIALES

El manual regulatorio de requerimientos técnicos para la conexión de centros de carga tiene como objeto regular las responsabilidades de los centros de carga conectados al SEN en alta tensión o en media tensión para garantizar la eficiencia, confiabilidad, continuidad, calidad y sustentabilidad del SEN y del suministro eléctrico. Los criterios contenidos son referidos al punto de conexión [26].Los niveles de en media y alta tensión conforme el Código de Red se muestran en la Tabla 3-1.

Media Tensión	Alta tensión
>1 kV, ≤ 35 kV	≥ 35 kV

Tabla 3-1 Nivel de tensión conforme el Código de Red

Un centro de carga especial se define como una carga demandada por un Centro de Carga en alta o media tensión y que, por las características propias de sus procesos, presentan distorsiones armónicas, fluctuación de tensión y desbalance de corriente más allá de los límites establecidos en el Código de Red vigente, aun cuando dispongan de filtros y controladores para la calidad de la energía [29].

3.2.1 TENSIÓN

En estado de operación normal, los Centros de Carga deberán soportar variaciones de tensión de manera permanente y seguir conectados de acuerdo con los valores de la Tabla 3-2 [26].

Tensión nominal (KV)	Tensión máxima (KV)	Tensión mínima (KV)
400.0	420.0	380.0
230.0	245.0	218.5
161.0	170.0	152.9
138.0	145.0	131.1
115.0	123.0	109.2
85.0	92.0	80.7
69.0	72.5	65.5
34.5	38.0	32.7
23.0	25.0	21.8
13.8	15.0	13.1

Tabla 3-2 Valores máximos y mínimos de tensión que deben soportar los centros de carga de manera permanente [26]

Nota 1. Se toma como tensión máxima, el valor que soporta el aislamiento de los equipos del centro de carga.
Nota 2. Se toma como tensión mínima el 95% de la tensión nominal.

En condiciones distintas al estado de operación normal, los centros de carga deberán soportar variaciones de tensión de manera temporal hasta por 20 minutos y seguir contactos de acuerdo con los valores de la Tabla 3-3 [26].

Tensión nominal (KV)	Tensión máxima (KV)	Tensión mínima (KV)
400.0	440	360
230.0	253	207
161.0	177.1	144.9
138.0	151.8	124.2
115.0	126.5	103.5
85.0	93.5	76.5
69.0	75.9	62.1
34.5	37.9	31.0
23.0	25.3	20.7
13.8	15.1	12.4

Tabla 3-3 Valores máximos y mínimos de tensión que deben soportar los centros de carga hasta por 20 minutos [26]

Nota 1. Se toma como tensión temporal máxima, el 110% del valor nominal de tensión.
Nota 2. Se toma como tensión temporal mínima, el 90% del valor nominal de tensión.

Los equipos de los Centros de Carga deberán permanecer conectados ante condiciones transitorias de variación de tensión, siempre que se encuentren dentro de la "Región de funcionamiento sin interrupción" de acuerdo con la Figura 3-2. Si las variaciones transitorias de la tensión se encuentran fuera de la región de funcionamiento sin interrupción, los equipos de los Centros de Carga deberán estar compensados con equipamiento acondicionador para incrementar el nivel de inmunidad ante estas variaciones [26].

La curva ITIC desarrollada por el Consejo Industrial de Tecnología de la Información, en inglés Information Technology Industry Council, tiene el objetivo de mejorar el rendimiento de las computadoras 1F-2H de 120 V a 60 Hz y de sus periféricos, aunque también se ha aplicado a la evaluación general de la calidad de la energía y se utiliza como referencia para definir la capacidad de resistencia de varias cargas y dispositivos para protección contra problemas de calidad de la energía, esto se debe a que la curva es generalmente aplicable a otros equipos que contienen dispositivos de estado sólido, sin embargo, se debe tener en cuenta que la curva ITIC no pretende reflejar el rendimiento de todos los equipos electrónicos. La aplicación de la curva ITIC para voltajes diferentes a 120 V obtenidos de sistemas 208 Y/120 V y 240/120 V y para frecuencias diferentes a 60 Hz es responsabilidad del usuario [30].

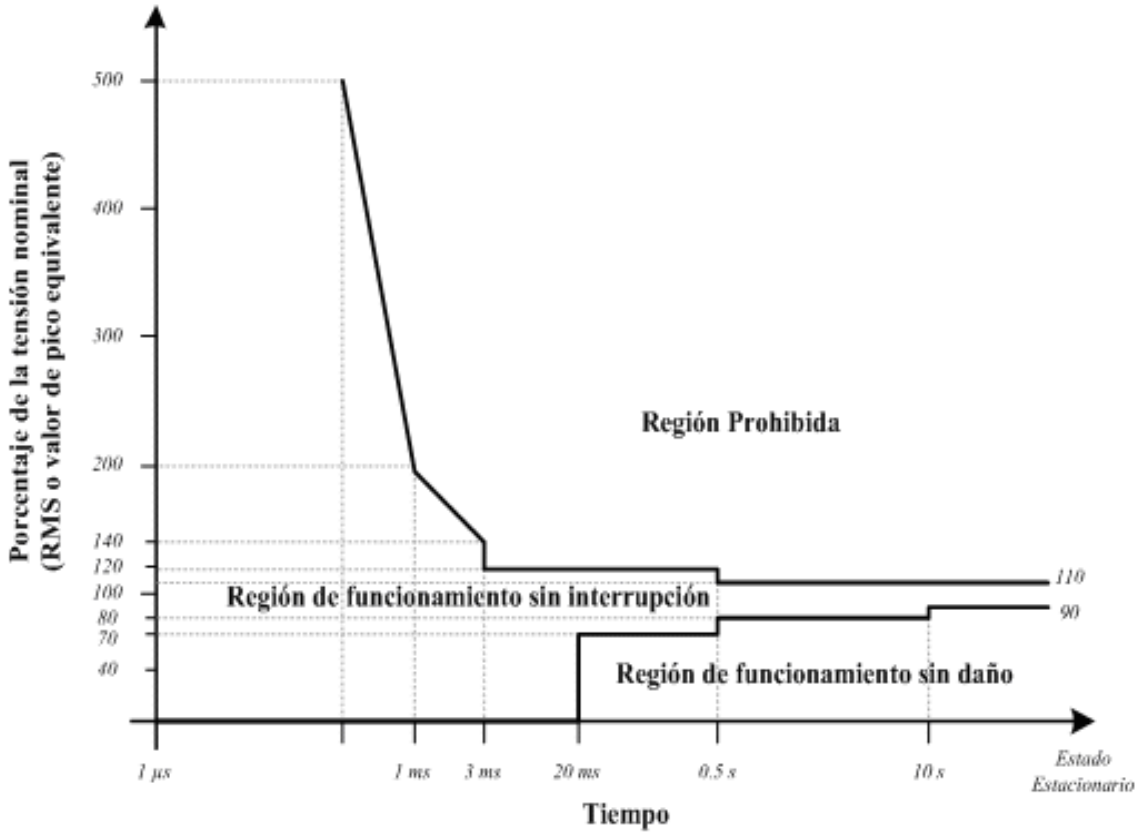


Figura 3-2 Curva ITIC [26]

3.2.2 FRECUENCIA

Los Centros de Carga deberán ser capaces de soportar variaciones de frecuencia y permanecer conectados, de acuerdo con lo establecido en la Tabla 3-4 [26].

Tiempo	Frecuencia máxima (Hz)	Frecuencia mínima (Hz)
Permanente	61.0	59.0
30 minutos	62.5	58.0

Tabla 3-4 Valores de frecuencia máxima y mínima que debe soportar el Centro de Carga. [26]

La conexión o desconexión de la carga no deberá causar variaciones de frecuencia mayores a ±0.1 Hz en el Sistema Eléctrico Nacional [26].

3.2.3 REQUERIMIENTO DE FACTOR DE POTENCIA

En Estado Operativo Normal, los Centros de Carga conectados en Alta Tensión deberán mantener un factor de potencia entre 0.95 en atraso y 1.0, con medición cinco-minutal. Dichos Centros de Carga deberán cumplir con este requerimiento al menos el 95% del tiempo durante un periodo mensual. Este requerimiento tendrá una vigencia de 10 años a partir de la publicación del Manual en el DOF. Posterior a este periodo, el requerimiento del factor de potencia será de 0.97 en atraso y 1.0, con medición cinco-minutal. Los Centros de Carga deberán cumplir con este requerimiento al menos el 97% del tiempo durante un periodo mensual [26].

El factor de potencia en tensiones menores o iguales a 35 kV se medirá en nodos de calidad de energía, de conformidad con las "Disposiciones administrativas de carácter general en materia de acceso abierto y prestación de los servicios en la red nacional de transmisión y las redes generales de distribución de energía eléctrica" [26].

3.2.4 CALIDAD DE LA ENERGÍA

El Código de Red establece que mientras no se cuente con una Norma Oficial Mexicana en materia de calidad de la energía se deberá cumplir con los siguientes criterios:

Los centros de carga deberán asegurarse que en los puntos de conexión a la red no existan distorsiones ni fluctuaciones en la tensión de suministro causadas por sus instalaciones más allá de lo especificado en: Tabla 3-5, Tabla 3-6 y Tabla 3-7 [26].

Los centros de carga especiales deberán cumplir con los límites especificados de distorsión armónica de corriente, además de cumplir con los límites de fluctuación de tensión (flicker) y desbalance de corriente indicados en: Tabla 3-9 y Tabla 3-10. Los centros de carga convencionales solamente deberán cumplir con los límites especificados de desbalance de corriente [26].

Respecto a los límites de distorsión armónica de voltaje en el punto de común acoplamiento no se especifican en el Código de Red, sin embargo, se tomará como marco normativo los límites de distorsión armónica de voltaje indicados en la Tabla 3-8 [21].

Impedancia Relativa o razón de corto circuito (I_{CC}/I_L)	Límites para componentes armónicas impares en % de I_L					Distorsión armónica total de demanda en % (%DATD)
	Armónicas <11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 34	Armónicas >34	
$I_{CC}/I_L < 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 \leq I_{CC}/I_L < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 \leq I_{CC}/I_L < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 \leq I_{CC}/I_L < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$I_{CC}/I_L \geq 1000$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 3-5 - Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones menores o iguales a 69 kV [26]

Impedancia Relativa o razón de corto circuito (I_{CC}/I_L)	Límites para componentes armónicas impares en % de I_L					Distorsión armónica total de demanda en % (%DATD)
	Armónicas <11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 34	Armónicas >34	
$I_{CC}/I_L < 20$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$20 \leq I_{CC}/I_L < 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
$50 \leq I_{CC}/I_L < 100$	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
$100 \leq I_{CC}/I_L < 1000$	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
$I_{CC}/I_L \geq 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 3-6 Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones mayores de 69 kV a 161 KV [26]

Impedancia Relativa o razón de corto circuito (Icc/IL)	Límites para componentes armónicas impares en % de I_L					Distorsión armónica total de demanda en % (%DATD)
	Armónicas <11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 34	Armónicas >34	
Icc/IL < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
Icc/IL ≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Tabla 3-7 Límites de distorsión armónica máxima permisible en corriente para tensiones mayores a 161 kV [26]

Donde:

IL Corriente Máxima de Carga, correspondiente al promedio de las corrientes de demanda máxima de los últimos 12 meses. Si no se dispone de este valor, se asume la corriente nominal de los transformadores de corriente del equipo de medición del suministrador.

Icc Corriente de Corto Circuito en el punto de acometida

%DATD Porcentaje de distorsión armónica total de demanda.

Nota 1. En el caso de armónicas pares, los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares.
Nota 2. Los límites mostrados en las tablas anteriores deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en 50%.
Nota 3. En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.
Referencia. Especificación CFE L0000-45 “Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica” (IEEE-519).

Voltaje de Bus en PCC	Armónica Individual (%)	Distorsión armónica total THD (5)
V ≤ 1.0 kV	5.0	8.0
1 kV < V ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 kV < V ≤ 161 kV	1.5	2.5
161 kV < V	1.0	1.5[a]

Tabla 3-8 Límites de distorsión de voltaje [21]

[a] *Los sistemas de alto voltaje pueden tener hasta 2% de THD cuando la causa es un terminal de HVDC, cuyo efecto es atenuar los puntos in el sistema donde futuros usuarios podrán conectarse*

Las variaciones periódicas de amplitud de la tensión (fluctuación de tensión o flicker). El número de variaciones por minuto, en acometidas de Media Tensión y Alta Tensión en estado estacionario, debe limitarse de acuerdo con la Tabla 3-9 (Tabla 3.8.D del Código de Red) [26].

Indicador	Límite
P_{st}	≤ 1
P_{lt}	≤ 0.65
d_t	$\leq 3.3\%$ Durante el cambio de tensión para más de 500 ms.
d_c	$\leq 3.3\%$
$d_{máx}$	$\leq 4\%$ Sin condiciones adicionales. $\leq 6\%$ Para equipo que es conmutado manualmente o con una frecuencia mayor a 2 veces por día y también con arranque retardado de más de 10 segundos, o arranque manual después de una interrupción en el suministro de energía. $\leq 7\%$ Para equipo que es conmutado hasta dos veces al día.

Tabla 3-9 Límites de fluctuaciones de tensión [26]

Nota 1. Pst y Plt no aplica para cambios de tensión por conmutación manual que ocurre una vez cada día y los límites dt, dc y dmáx deben aplicarse con las tensiones previas multiplicadas por el factor 1.33.
Nota 2. Los límites no aplican a conmutaciones por interrupciones de emergencia
Nota 3. En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.

Donde:

Pst	Indicador de variación de tensión de corto plazo. Expresa la severidad de la fluctuación durante un período de 10 min, siendo Pst=1 el umbral de irritabilidad.
Plt	Indicador de variaciones de tensión de largo plazo. Expresa la severidad de la fluctuación durante un periodo largo de 2 horas, empleando valores sucesivos de Pst.
dt	Característica de cambio de tensión, ΔU(t). Es el cambio de tensión rcm evaluado de fase a tierra como un valor simple para cada medio periodo sucesivo entre cruces por cero de la fuente de tensión entre intervalos de tiempo en los cuales la tensión está en condiciones de estado estacionario hasta 1 segundo.
dc	Cambio de tensión en estado estacionario, ΔUc. Es la diferencia entre dos tensiones medidas de fase a tierra y en estado estacionario separados por una característica de cambio de tensión.

dmáx Característica de cambio de tensión máxima ΔUmax. Es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la característica de cambio de tensión.

Respecto al desbalance de corriente en el punto de común acoplamiento, el Código de Red estable el máximo desbalance permitido en la Tabla 3-10 (Tabla 3.8.E del Código de Red) [26].

Impedancia Relativa o razón de corto circuito (I_{CC}/I_L)	Desbalance (%)		
	Menor a 1 kV	De 1 kV a 35 kV	Mayor a 35 kV
$I_{CC}/I_L < 20$	5.0	2.5	2.5
$20 \leq I_{CC}/I_L < 50$	8.0	4.0	3.0
$50 \leq I_{CC}/I_L < 100$	12.0	6.0	3.75
$100 \leq I_{CC}/I_L < 1000$	15.0	7.5	4.0
$I_{CC}/I_L \geq 1000$	20.0	10.0	5.0

Tabla 3-10 Desbalance máximo permitido en la corriente en el punto de acometida [26]

BUAP / INGENIERÍA FACULTAD

CAPÍTULO IV
MODELO DE SIMULACIÓN

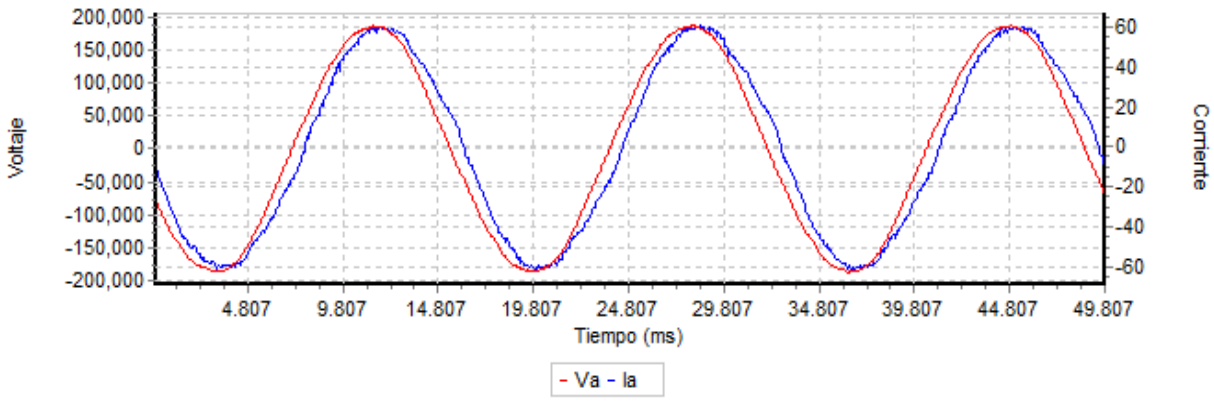
PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO 4 MODELO DE SIMULACIÓN

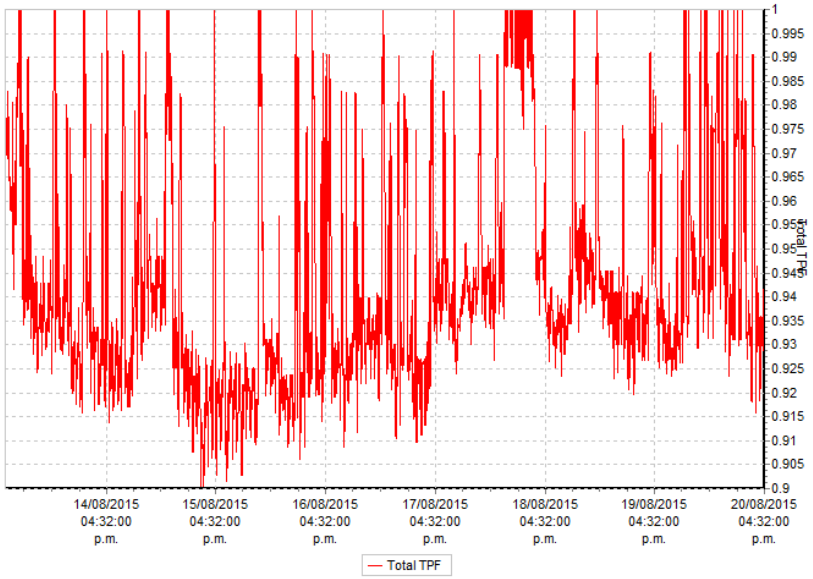
4.1 CASO DE ESTUDIO.

Para el presente caso de estudio se tomó como base una planta acerera en la cual se realizó un estudio de calidad de la energía realizado por la Comisión Federal de Electricidad, con el objeto de verificar los parámetros de calidad de la energía en el punto de común acoplamiento [31].

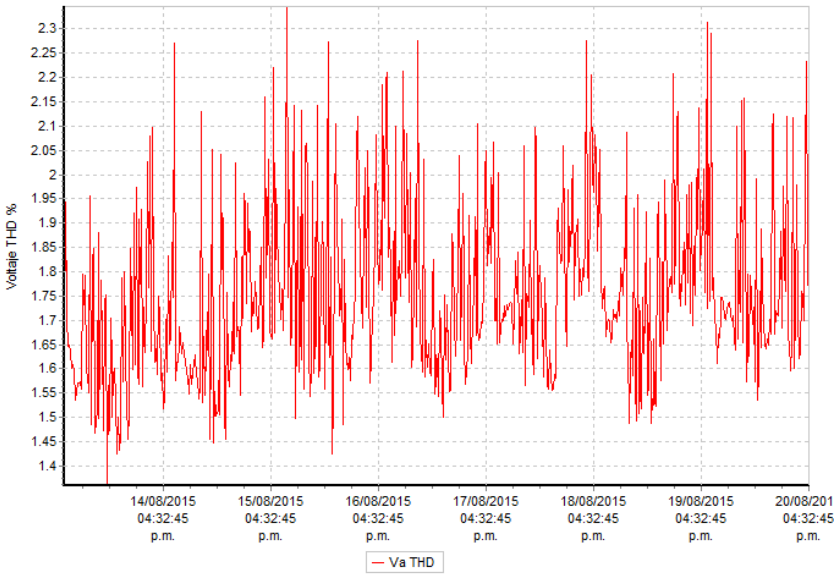
Los resultados obtenidos en las mediciones realizadas por la Comisión Federal de Electricidad sirven para comprender el comportamiento de una planta acerera con hornos de arco eléctrico, así como tener un parámetro de comparación con los resultados obtenidos en la simulación de ATP. Las mediciones realizadas por la Comisión Federal de Electricidad se tomaron en el punto de común acoplamiento en 230 kV, durante un lapso de 77 días con periodos de una semana [31].



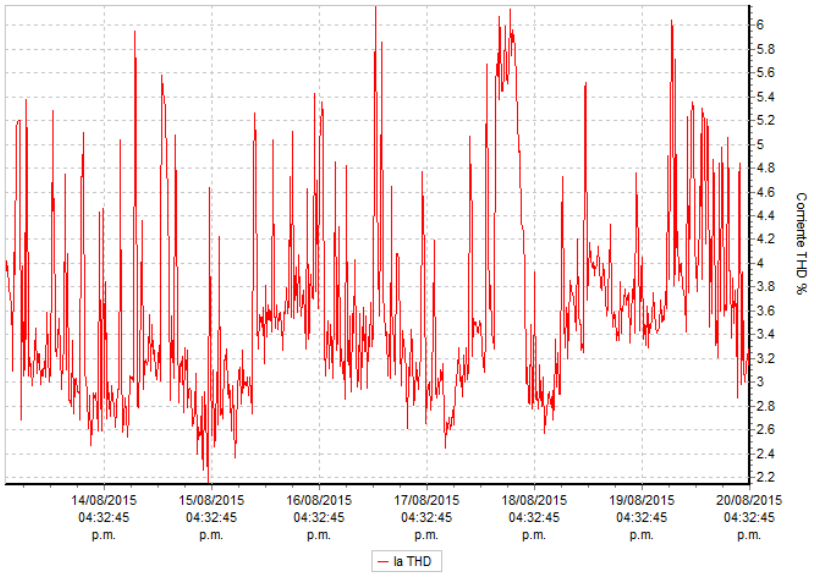
Gráfica 4-1 Medición por CFE de la Forma de onda de voltaje y corriente en la Fase A [31]



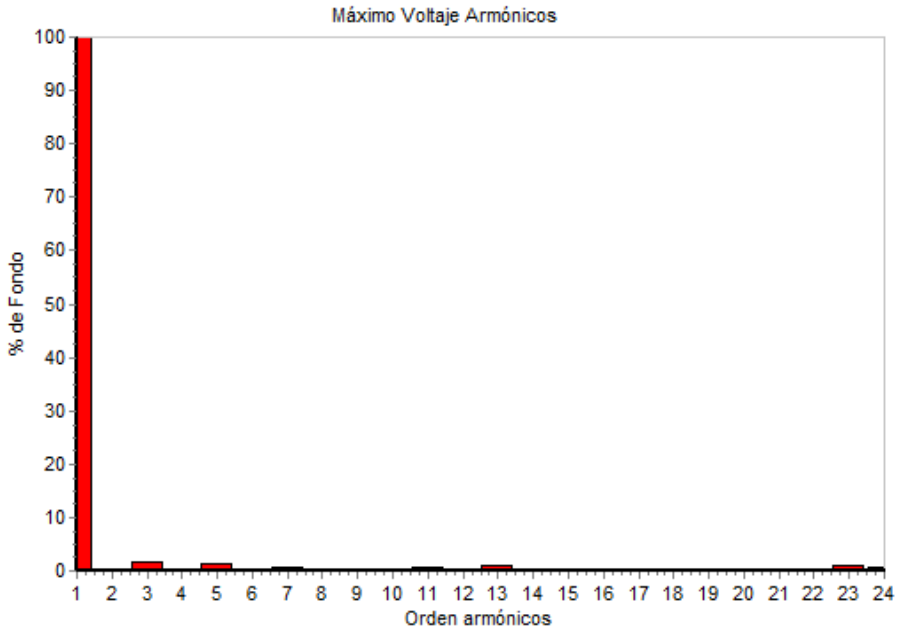
Gráfica 4-2 Medición por CFE del factor de potencia total en 230 kV [31]



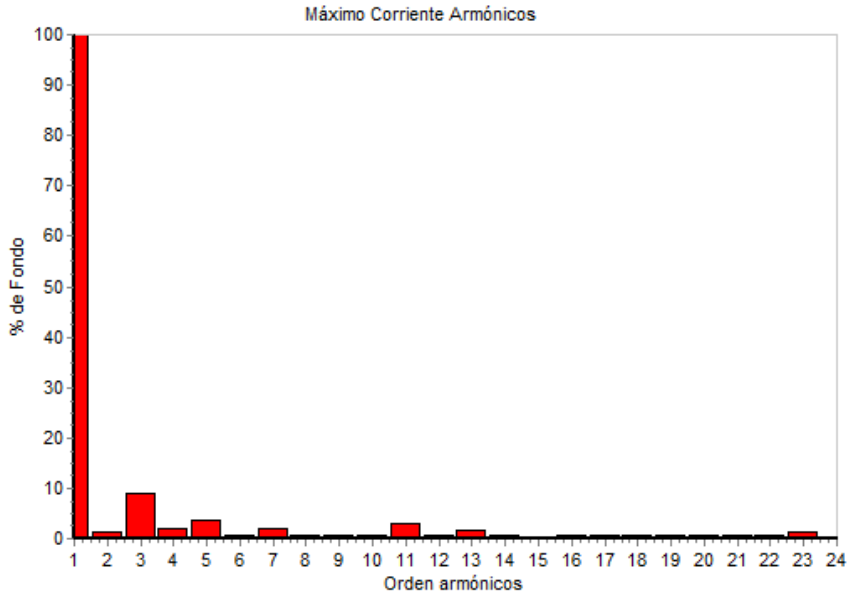
Gráfica 4-3 Medición por CFE del voltaje THD% - Fase A en 230 kV [31]



Gráfica 4-4 Medición por CFE del corriente THD% - Fase A en 230 kV [31]



Gráfica 4-5 Medición por CFE del espectro armónicos de voltaje [31]



Gráfica 4-6 Medición por CFE del espectro de armónicos de corriente [31]

En la Gráfica 4-1 se observa la forma de onda de voltaje (rojo) y la forma de onda de corriente (azul), en esta figura se observa que el desfasamiento entre el voltaje y la corriente es bajo, lo que indica que el factor de potencia en el momento en el que se tomó la medición es alto, lo que se comprueba con la Gráfica 4-2. También se observa que la forma de onda de la corriente se encuentra un poco distorsionada, esto por la presencia de armónicos, como se observa en la Gráfica 4-4 y la Gráfica 4-6.

La Gráfica 4-2 muestra el factor de potencia total medido, teniendo como parámetros máximos y mínimos:

Factor de potencia total medido	
Máximo	Mínimo
0.90	1.0

Tabla 4-1 Medición del factor de potencia por CFE

La Gráfica 4-3 muestra la distorsión armónica total de voltaje en la fase A, teniendo como parámetros máximos y mínimos:

THD% Voltaje Fase A	
Máximo	Mínimo
2.35%	1.36%

Tabla 4-2 Medición de voltaje THD% en Fase A por CFE

La Gráfica 4-4 muestra la distorsión armónica total de corriente en la fase A, teniendo como parámetros máximos y mínimos:

THD% Corriente Fase A	
Máximo	Mínimo
6.17%	2.14%

Tabla 4-3 Medición de corriente THD% en Fase A por CFE

La Gráfica 4-5 muestra el espectro armónico de voltaje, teniendo como parámetros máximos y mínimos:

Espectro armónico de voltaje				
Canal	Armónico Impar		Armónico Par	
	Orden	%	Orden	%
Fase A	3	1.68%	24	0.50%
Fase B	5	1.31%	24	0.53%
Fase C	3	1.60%	24	0.42%

Tabla 4-4 Medición de espectro armónico de voltaje por CFE

La Gráfica 4-6 muestra el espectro armónico de corriente, teniendo como parámetros máximos y mínimos:

Espectro armónico de corriente				
Canal	Armónico Impar		Armónico Par	
	Orden	%	Orden	%
Fase A	3	6.20%	4	1.59%
Fase B	3	9.11%	4	1.69%
Fase C	3	4.61%	4	1.84%

Tabla 4-5 Medición de espectro armónico de corriente por CFE

Se observa que los valores medidos por CFE se encuentran fuera de los límites máximos permitidos en 3.2.4. Estos resultados sirven como parámetro para poder comparar el modelo de simulación en ATP, teniendo en cuenta que el tiempo de simulación establecido es de 5 segundos.

4.2 MODELOS DE SIMULACIÓN PREVIOS

Con el fin de poder comparar los resultados con un caso previamente estudiado se toma como referencia la configuración de la red propuesta en [32], la cual se detalla en el siguiente diagrama unifilar.

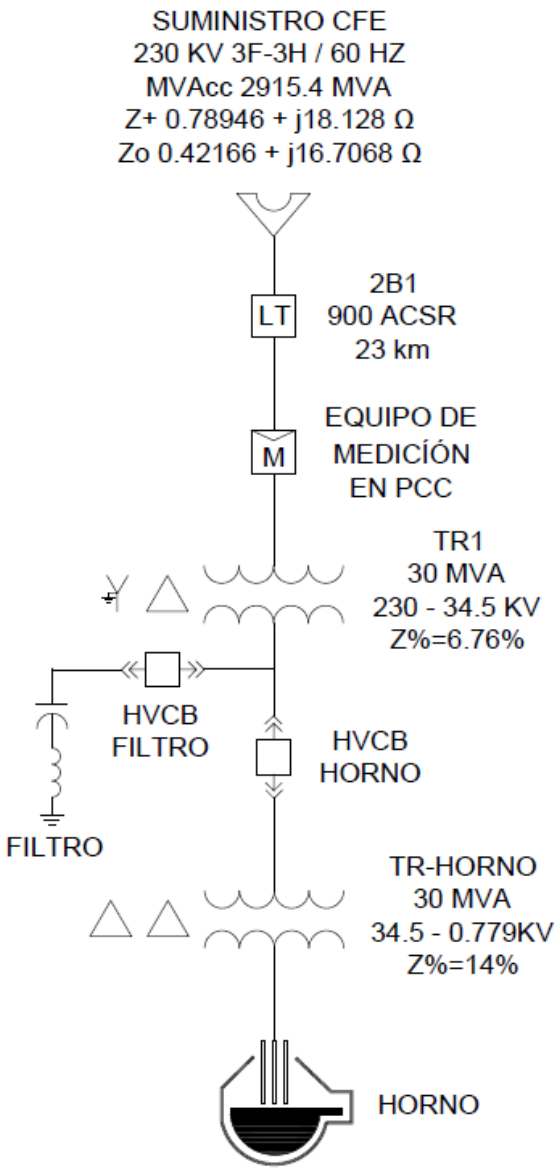


Figura 4-1 Diagrama unifilar modelo de simulación

4.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación se consideró una fuente trifásica en 230 kV en serie con un equivalente de Thevenin de una subestación real (No se especifica cuál) con los siguientes parámetros [32]:

Fuente de alimentación [32]

Volts	$230\ kV\ rms$
Hz	$60\ Hz$
MVAcc	$2915.4\ MVA$
Isc	$7.3182\ ka$
Z_+	$0.78946\ +\ j18.128\ \Omega$
Z_0	$0.42166\ +\ j16.7068\ \Omega$

4.2.2 LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Para la línea de transmisión se utilizó la subrutina de ATPDraw Line Constants con los parámetros mostrados en la Figura 4-2 y la Figura 4-3 [32]:

Línea de Transmisión [32]

Tipo	$2B1$
Calibre	$900\ ACSR$
Longitud	$23\ km$

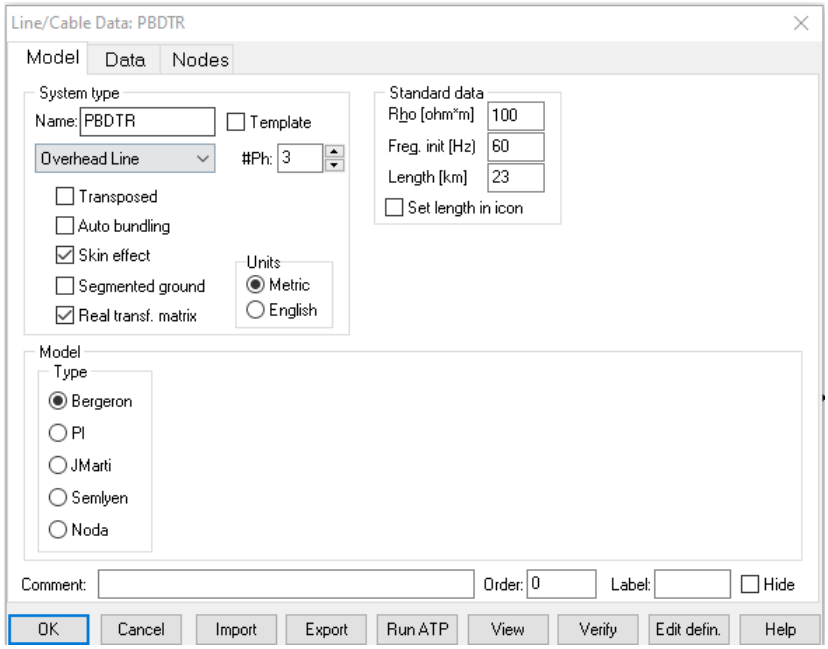
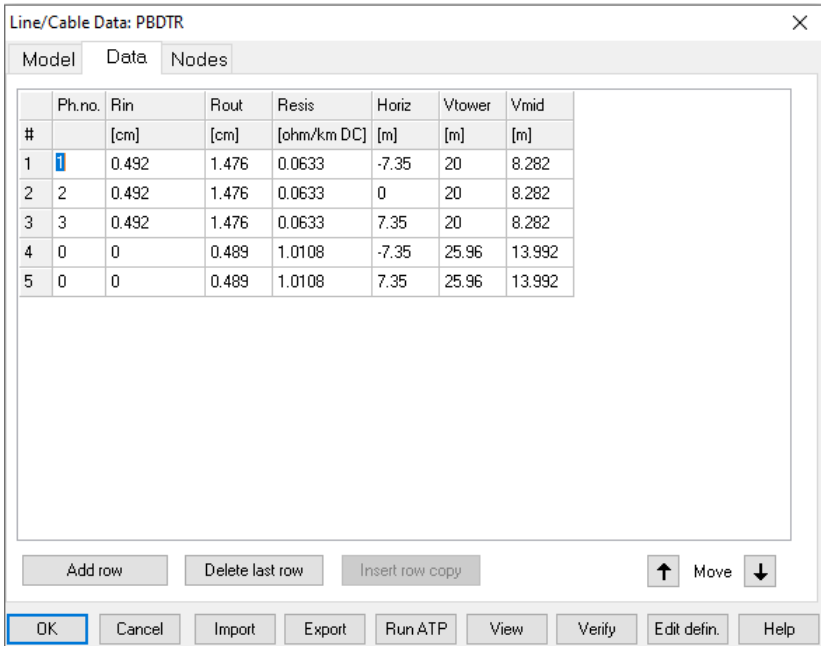


Figura 4-2 Parámetros introducidos en subrutina Line Constants [32]



#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.492	1.476	0.0633	-7.35	20	8.282
2	2	0.492	1.476	0.0633	0	20	8.282
3	3	0.492	1.476	0.0633	7.35	20	8.282
4	0	0	0.489	1.0108	-7.35	25.96	13.992
5	0	0	0.489	1.0108	7.35	25.96	13.992

Figura 4-3 Datos de conductores y arreglo geométrico introducido a subrutina Line Constants [32]

4.2.3 TRANSFORMADOR STEP-DOWN

Para el modelo del transformador principal en 230 kV se utilizó la subrutina BCTRAN, con tres transformadores monofásicos con conexión Estrella – Delta con los siguientes parámetros [32]:

Transformador Step-Down [32]

Conexión Primario	$Estrella\ Aterrizado$
Conexión Secundario	$Delta$
Voltaje Primario	$230\ kV$
Voltaje Secundario	$34.5\ \ kV$
Potencia	$30\ MVA$
Impedancia	$6.76\ \%$

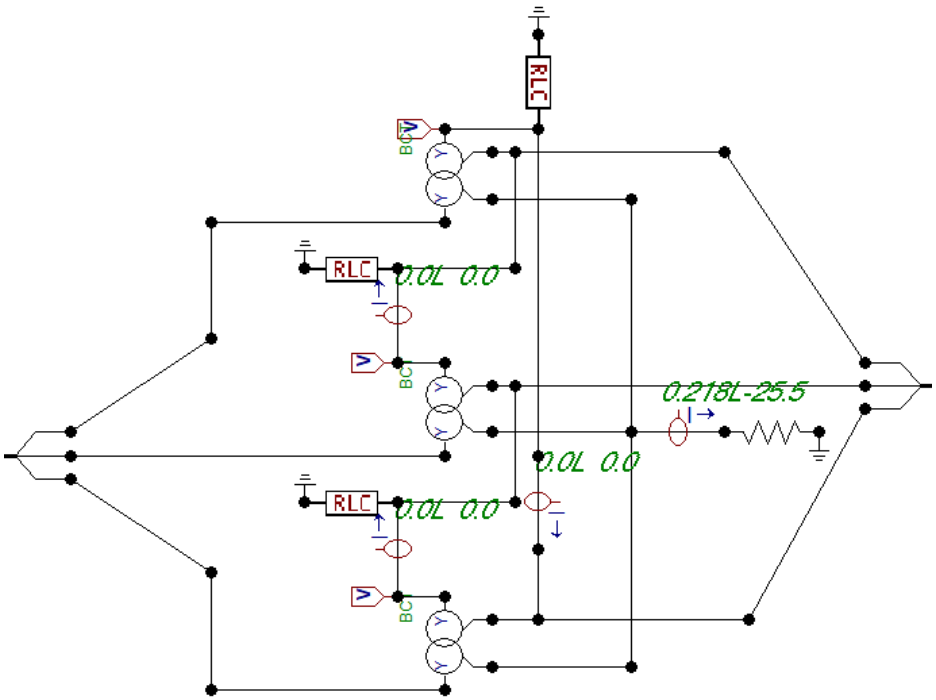


Figura 4-4 Arreglo transformador Step-Down [32]

4.2.4 TRANSFORMADOR HORNO ARCO ELÉCTRICO

Para el modelo del transformador de alimentación al horno se utilizó la subrutina BCTRAN, con tres transformadores monofásicos con conexión Delta – Delta con los siguientes parámetros [32]:

Transformador Step-Down [32]

Conexión Primario	$Delta$
Conexión Secundario	$Delta$
Voltaje Primario	$34.5\ kV$
Voltaje Secundario	$0.779\ \ kV$
Potencia	$30\ MVA$
Impedancia	$14\ \%$

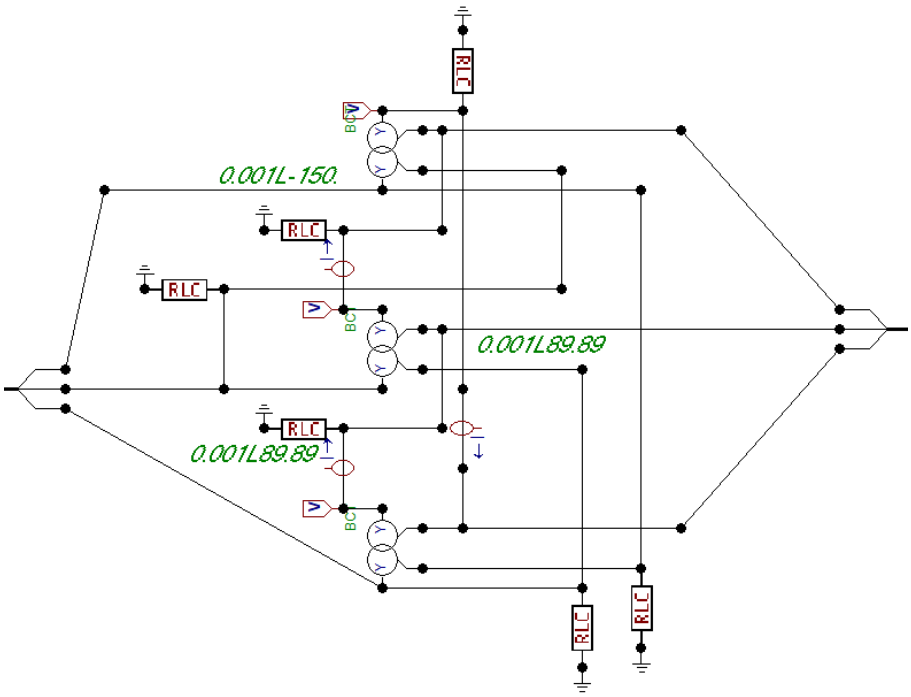


Figura 4-5 Arreglo transformador Horno Arco Eléctrico [32]

4.2.5 MODELO HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Para el modelo de horno de arco eléctrico, [32] lo represento como una resistencia variable para cada fase con los módulos GROUP HAE, GROUP HAE2 y GROUP HAE3, los cuales fueron realizados con programación TACS, sin embargo, no se especifican sus parámetros de entrada.

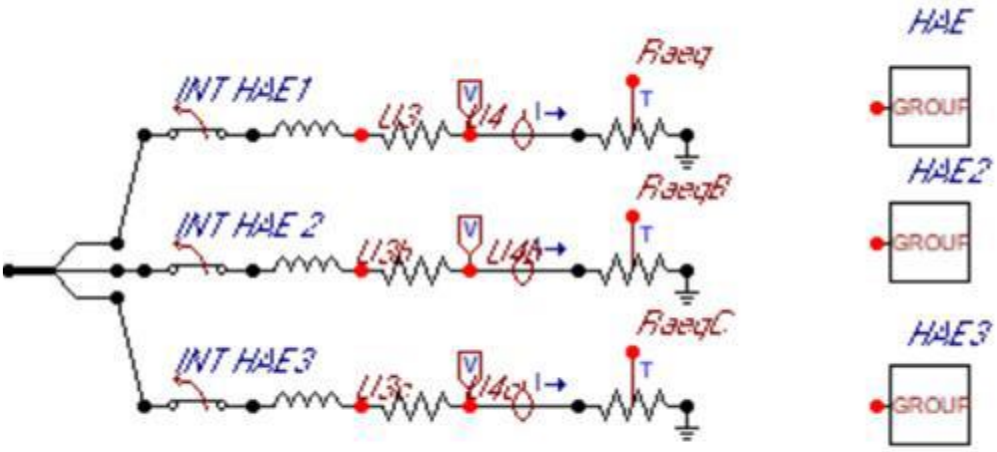
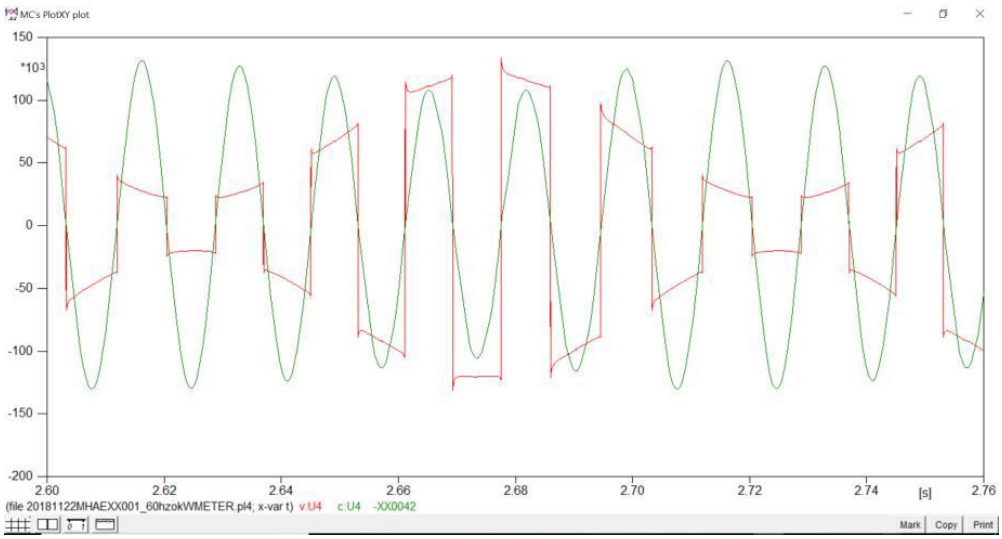


Figura 4-6 Modelo Horno de Arco Eléctrico [32]

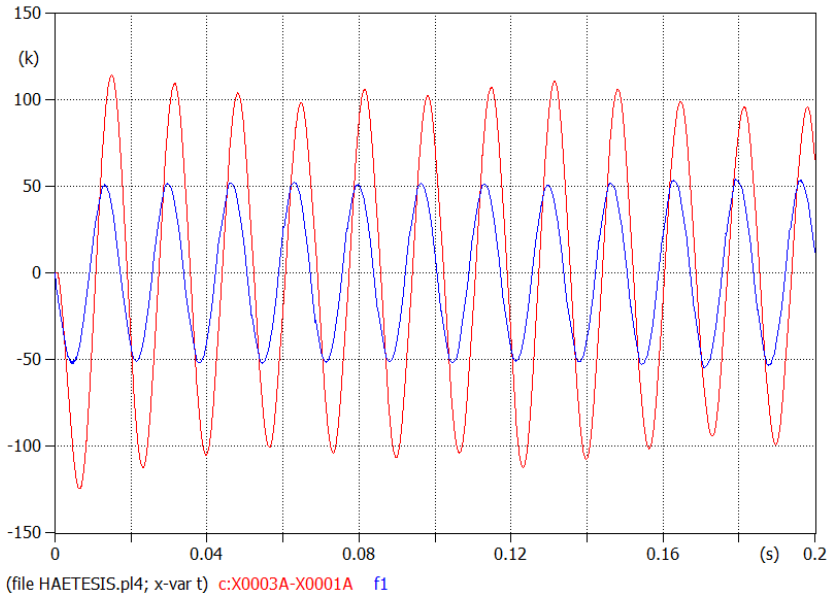
4.2.6 PARÁMETROS ELÉCTRICOS PARA COMPARACIÓN

Para comparar el comportamiento del modelo de Cassie, se analizaron los resultados de corriente y voltaje a la entrada del horno de arco eléctrico obtenidos en [32],buscando que al menos en magnitud de los valores obtenidos sean similares. La Gráfica 4-7 muestra que la magnitud de corriente oscila en valores de aproximadamente 100 – 130 kA y la forma de onda se mantiene sinusoidal. Respecto al voltaje no se indica si tiene un factor de escala, por lo que la magnitud no se puede determinar, sin embargo, se observa que la forma de onda es cuadrada y que en el cruce por cero de la corriente el voltaje se encuentra en su valor máximo, esto para que el re encendido del arco sea de forma inmediata [32]. En la Gráfica 4-8 se muestran los resultados de voltaje y corriente medidos en 0.779 kV obtenidos con el modelo de Cassie, se observa que los valores de corriente tienen una magnitud de entre 114 kA y 95 kA, un valor que se asemeja a las magnitudes obtenidas por [32], respecto al voltaje en el modelo de Cassie se observa que la forma de onda no se vuelve cuadrada, sin embargo,

presenta una distorsión en la forma de onda, causado por el contenido armónico. Con este resultado, se puede concluir que el modelo de Cassie representa el comportamiento de un horno de arco eléctrico.



Gráfica 4-7 Valores de voltaje y corriente obtenidos en [32] en 0.779 kV



Gráfica 4-8 Valores de voltaje y corriente obtenidos por el modelo de Cassie

4.3 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP SIN FILTRO.

4.3.1 CONFIGURACIÓN DE SIMULACIÓN

La simulación se realizó en el software ATP-EMTP, con la interfaz gráfica 7.2p10, los parámetros de la simulación se muestran en la Figura 4-7:

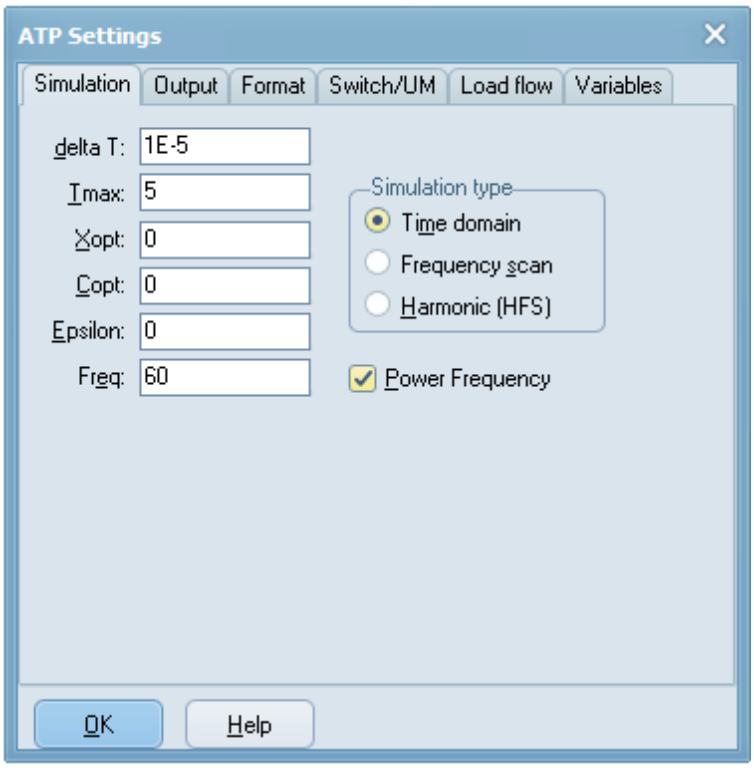
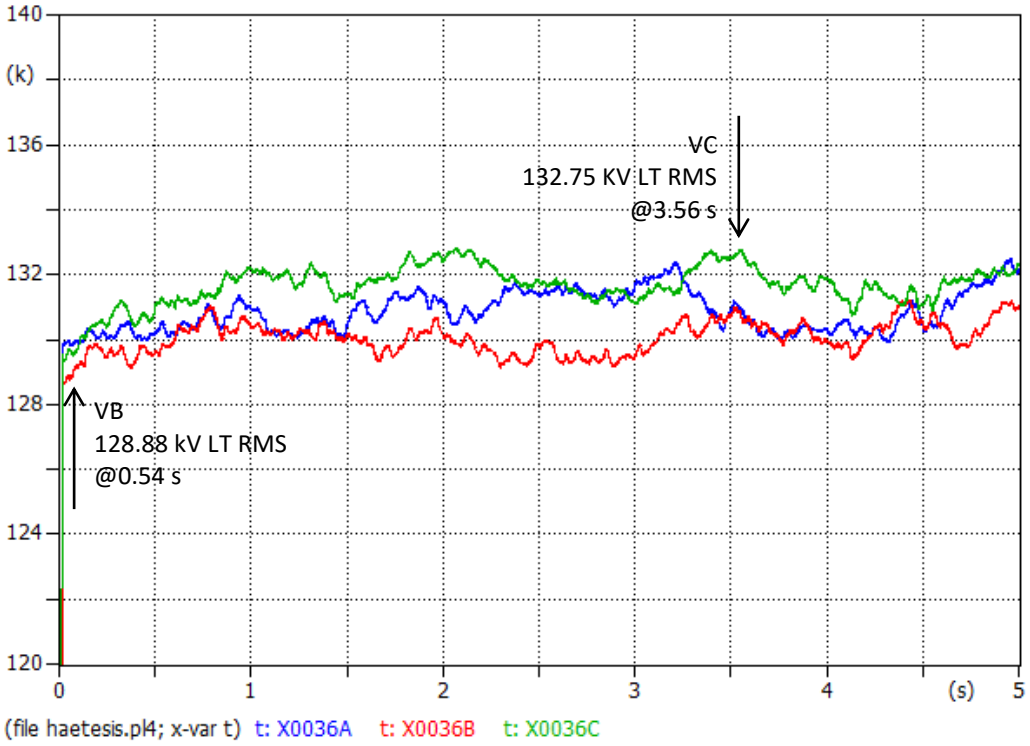


Figura 4-7 ATP ajustes de Simulación

4.3.2 CONSIDERACIONES DE LAS MEDICIONES

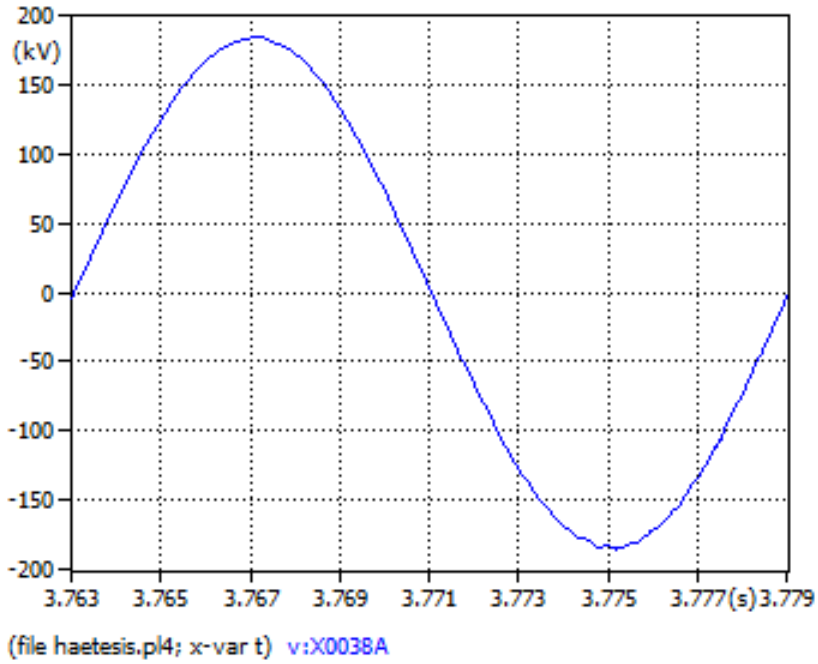
Las mediciones de los parámetros eléctricos obtenidos durante la simulación como son: voltaje, corriente, distorsión armónica de voltaje, distorsión armónica de corriente, potencia activa, potencia reactiva, potencia aparente y factor de potencia, se realizaron en el punto de común acoplamiento (PCC), tal como se estable en el Código de Red. Las mediciones de distorsión armónica se tomarón en los puntos con mayor consumo, buscando un punto en el que el sistema se encuentra en estado estable y el transitorio que se pueda presentar cuando el horno de arco eléctrico se energiza no afecte la interpretación de los resultados.

4.3.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE

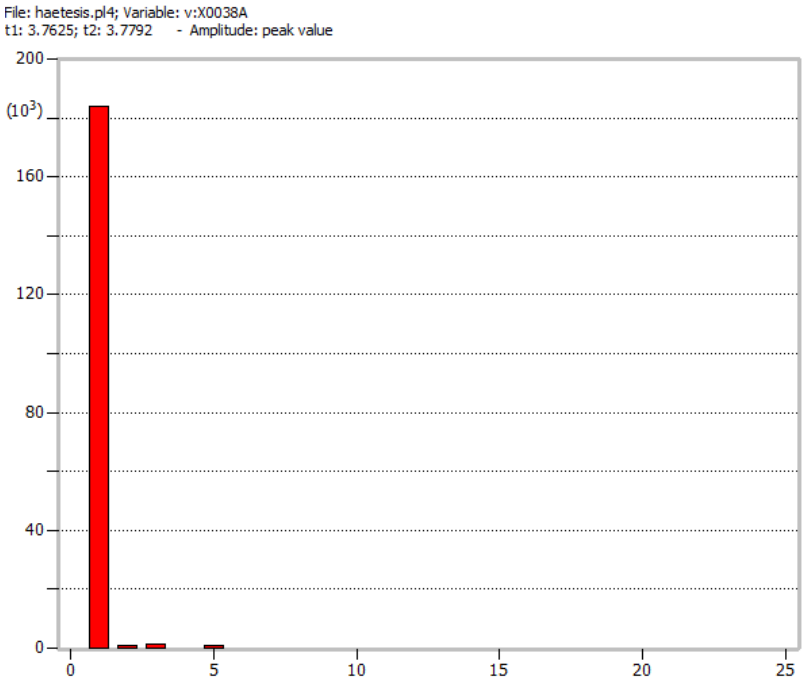


Gráfica 4-9 Medición de voltaje

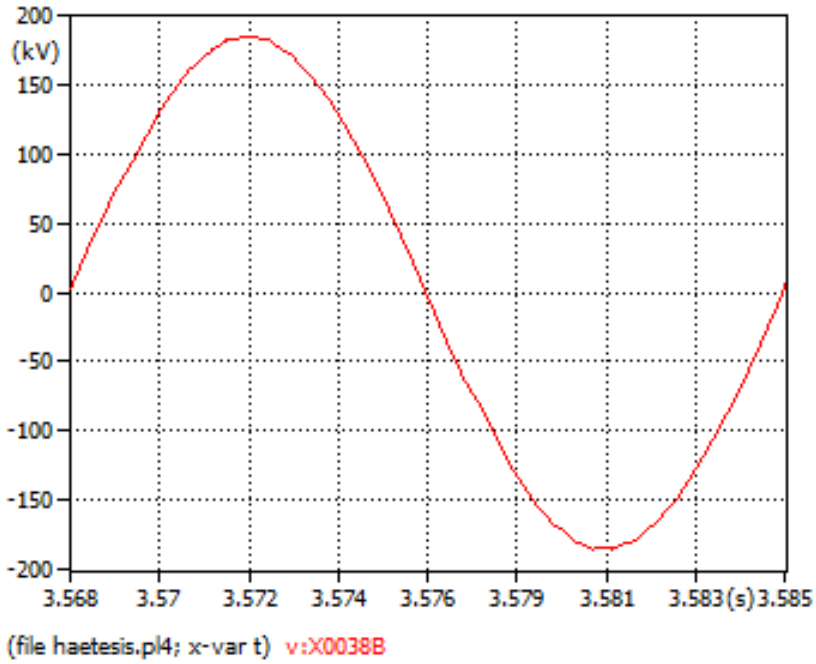
El voltaje nominal RMS en el punto de acometida es de 230 kV L-L / 132.79 kV L-T, en la Gráfica 4-9 se observa que el voltaje mínimo medido en el punto de común acoplamiento corresponde a la Fase B en 0.54 segundos con un valor de 128.88 kV L-T RMS, lo que equivale al 97.06% de la tensión nominal. El valor de tensión máximo medido en la simulación, corresponde a la Fase C en 3.56 segundos, con un valor de 133.37 kV L-T RMS lo que equivale al 99.97% de la tensión nominal, ambos valores se encuentran dentro de las variaciones de tensión que un centro de carga debe de soportar en condiciones de operación normal conforme a la Tabla 3-2. En la Gráfica 4-9, se observa la similitud de la depresión de voltaje por el comienzo del proceso de fusión del horno con el mostrado en la Figura 2-5.



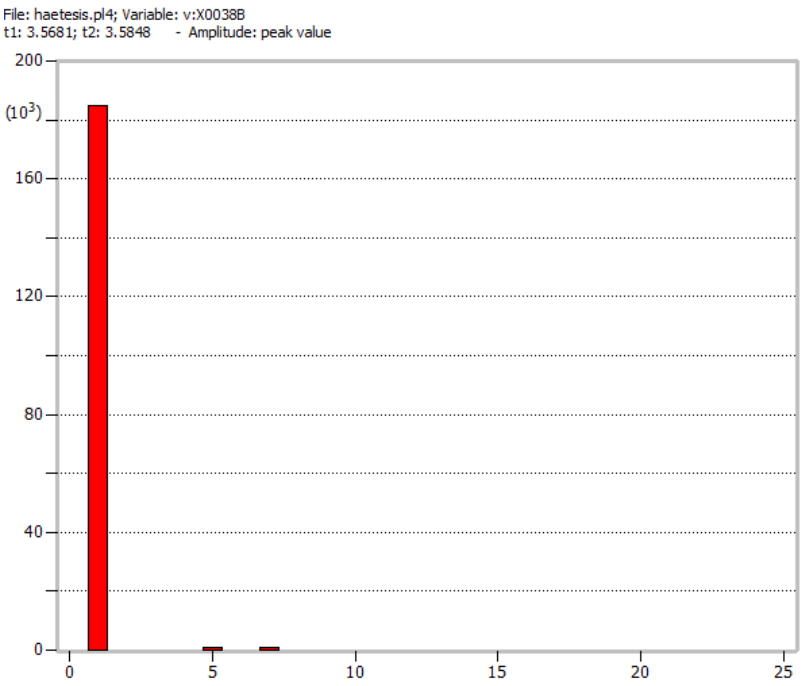
Gráfica 4-10 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase A



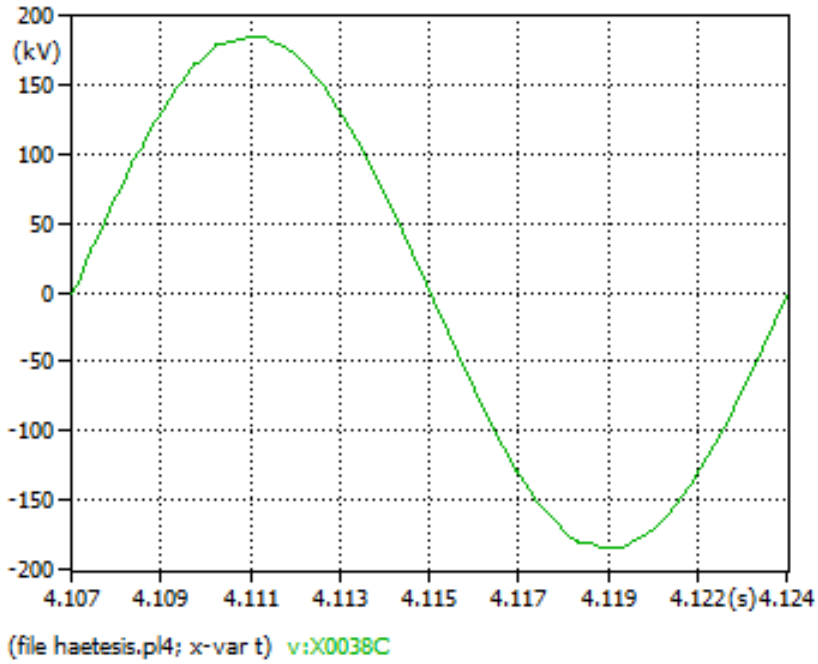
Gráfica 4-11 Espectro armónico de voltaje – Fase A



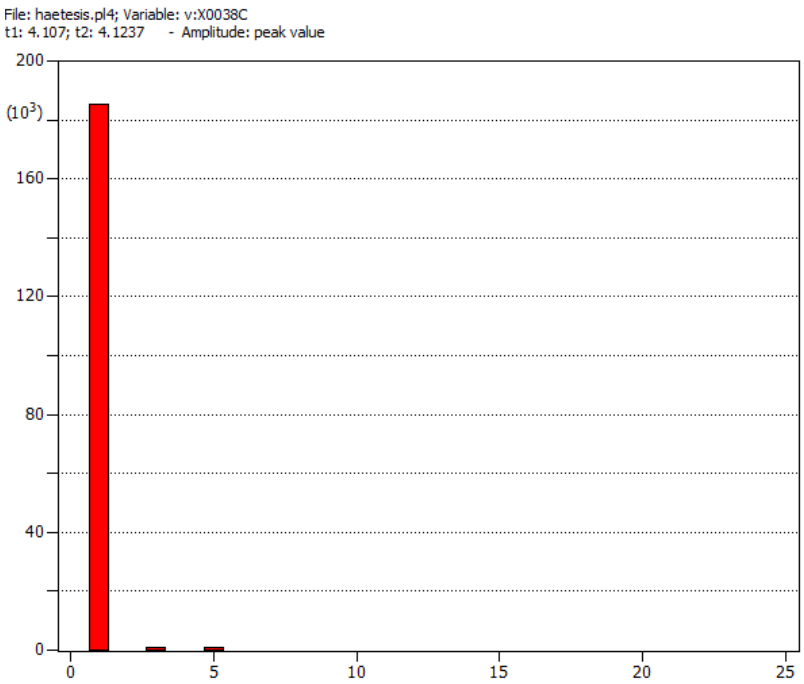
Gráfica 4-12 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase B



Gráfica 4-13 Espectro armónico de voltaje – Fase B



Gráfica 4-14 Análisis de forma de onda de voltaje – Fase C



Gráfica 4-15 Espectro armónico de voltaje – Fase C

De la Gráfica 4-10 a la Gráfica 4-15Análisis de forma de onda de voltaje – Fase A, se observa la forma de onda de voltaje y su espectro armónico para cada una de las fases, durante un ciclo en estado estable, en la Tabla 4-6, se realizó la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-8.

Fase	Límite de distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THDV%
	1.0 %	1.5 %
Fase A	3.ª - 0.50%	0.70%
Fase B	5.ª - 0.40%	0.70%
Fase C	3.ª - 0.34%	0.53%

Tabla 4-6 Comparación de las componentes armónicas de voltaje presentes con los límites de la Tabla 3-8

De la Tabla 4-6, se observa, que las componentes armónicas individuales como, la distorsión armónica total, presentes en voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-8 para cada una de las fases. En la Tabla 4-7 se detalla el contenido armónico presente en voltaje en el punto de común acoplamiento, tomando en cuenta hasta el armónico número 24. También se observa que el contenido armónico de voltaje presente en la simulación es de menor magnitud que la distorsión armónica de voltaje medida por CFE, que tiene valores que oscilan de 1.36% a 2.35%, como se indica en la Tabla 4-2.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: v:X0038A				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0038B				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0038C			
t1: 3.7625; t2: 3.7792 - Amplitude: peak value				t1: 3.5681; t2: 3.5848 - Amplitude: peak value				t1: 4.107; t2: 4.1237 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	-70.4687	0		0	-17.4091	0		0	92.9205	0	
1	183880	-108.897	100.00%	1	184533	123.779	100.00%	1	185087	-132.106	100%
2	540.463	-35.1265	0.29%	2	431.243	50.1859	0.23%	2	99.7592	77.9197	0.05%
3	921.489	150.687	0.50%	3	395.326	159.99	0.21%	3	638.468	-138.731	0.34%
4	221.204	106.425	0.12%	4	103.25	-1.60173	0.06%	4	88.6194	148.983	0.05%
5	503.144	-8.00579	0.27%	5	730.504	-44.7177	0.40%	5	574.52	-121.618	0.31%
6	65.8027	-102.904	0.04%	6	160.811	-128.263	0.09%	6	32.3466	157.478	0.02%
7	347.374	121.873	0.19%	7	470.361	162.615	0.25%	7	167.582	135.361	0.09%
8	74.5902	28.804	0.04%	8	128.921	125.247	0.07%	8	64.1495	-107.778	0.03%
9	156.092	-111.159	0.08%	9	307.896	-14.8082	0.17%	9	248.377	104.358	0.13%
10	77.0577	-167.286	0.04%	10	282.238	0.722048	0.15%	10	57.1445	-26.3194	0.03%
11	46.4918	98.0485	0.03%	11	238.265	-152.897	0.13%	11	183.929	21.4106	0.10%
12	102.684	-5.48719	0.06%	12	183.426	-179.838	0.10%	12	28.1335	53.9756	0.02%
13	70.409	-43.6838	0.04%	13	305.374	24.1026	0.17%	13	102.573	-8.31562	0.06%
14	42.2839	121.207	0.02%	14	141.392	103.952	0.08%	14	38.0851	175.074	0.02%
15	77.7816	31.0997	0.04%	15	126.73	-120.614	0.07%	15	108.928	-65.0233	0.06%
16	30.2577	-121.07	0.02%	16	123.213	-103.522	0.07%	16	11.2061	164.873	0.01%
17	129.909	131.159	0.07%	17	204.996	95.9887	0.11%	17	93.7955	-147.478	0.05%
18	21.5543	51.6448	0.01%	18	30.2772	4.0709	0.02%	18	30.5705	57.3609	0.02%
19	84.7546	-95.2345	0.05%	19	90.8348	-87.4375	0.05%	19	136.188	-168.513	0.07%
20	52.4761	-137.359	0.03%	20	81.5329	-121.843	0.04%	20	31.9441	95.0415	0.02%
21	8.85862	-148.983	0.00%	21	37.0987	145.364	0.02%	21	71.4601	89.6547	0.04%
22	58.4752	11.926	0.03%	22	104.561	80.5804	0.06%	22	36.8726	-128.712	0.02%
23	57.0651	-13.5665	0.03%	23	47.8544	-89.3065	0.03%	23	152.183	68.2998	0.08%
24	48.3397	149.602	0.03%	24	206.998	-58.8004	0.11%	24	58.8895	-62.6432	0.03%
THDV - FASE A			0.70%	**THDV - FASE B**			0.70%	**THDV - FASE C**			0.53%

Tabla 4-7 THD de voltaje

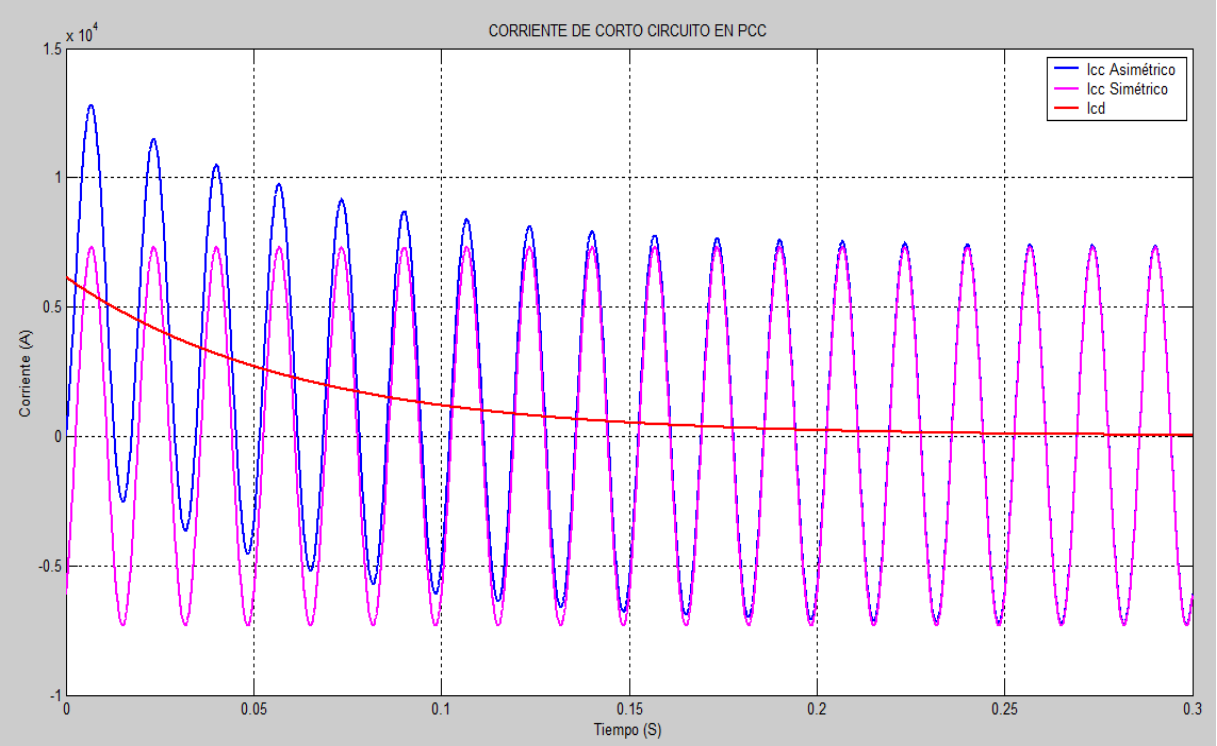
4.3.4 NIVEL DE CORTO CIRCUITO EN EL PCC

Para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos para las mediciones de corriente es necesario determinar la corriente de corto circuito en el punto de acometida, así como la corriente de carga. Para obtener el nivel de corto circuito en el punto de acometida, por fines prácticos se omitió la impedancia de la línea y solo se consideró el equivalente de Thevenin con los valores indicados en la Tabla 4-8.

kV	Z+	
	R1	X1
230 kV	0.78964	18.128

Tabla 4-8 Equivalente de Thevenin en el punto de acometida

Para el cálculo de la corriente de corto circuito se utilizó el código de Matlab del Anexo B.1, considerando que la falla ocurre cuando la onda de voltaje se encuentra en 66.895 kV. Del programa de Matlab se obtiene la Gráfica 4-16 en la cual se muestra en color azul la corriente de corto circuito asimétrica, en color magenta la corriente de corto circuito simétrica y en color rojo la componente de corriente directa. En la Figura 4-8 se resumen los valores de corriente de corto circuito, potencia de corto circuito, relación x/r, etc.



Gráfica 4-16 Corriente de Corto Circuito en el PCC

Para determinar la impedancia relativa o Icc/IL se utilizó el valor de corriente de corto circuito simétrico de 7318.2 A y con base en la Tabla 4-9, se determinó la corriente promedio de 176.51 A, obteniendo el siguiente resultado:

$$I_{CC}/_{I_L} = {}^{7318.2}/_{176.51} = 41.46$$

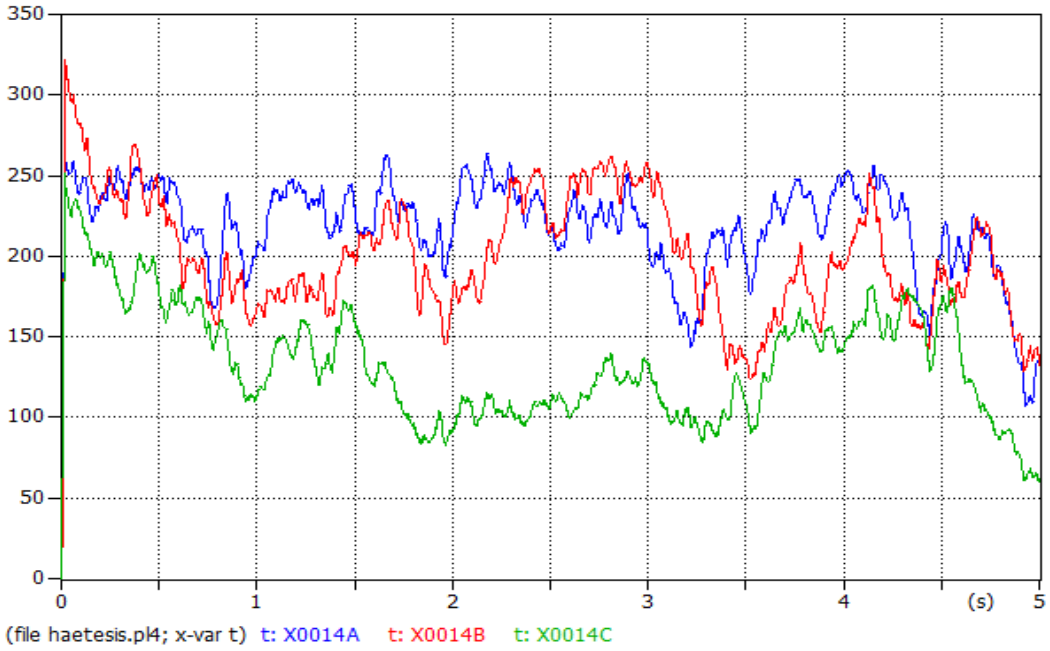
Ecuación 4-1 Cálculo de la Impedancia relativa en el punto de común acoplamiento

```
>> BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA
NATURALEZA TRANSITORIA DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO

CALCULO DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO

Voltaje del Sistema en kV
   230

Impedancia equivalente de secuencia positiva
   0.7896 +18.1280i

Potencia de corto circuito en MVA :
 2.9154e+003

Corriente de corto circuito simetrica en kA:
 7.3182e+003

Corriente de corto circuito asimetrica en kA:
 1.2825e+004

Componente de corriente directa en kA
 6.1554e+003

Relacion X/R
   22.9573

Constante de propagacion    0.0609

Duracion de la componente de corriente directa    0.3045
```

Figura 4-8 Resultados del análisis de corto circuito

4.3.5 MEDICIÓN DE CORRIENTE

En la Gráfica 4-17 se observa el comportamiento de la corriente durante la simulación, en la Tabla 4-9 se analizan los datos obtenidos para así poder determinar el desbalance máximo en el punto de acometida, el cual se determina como se establece en [22].

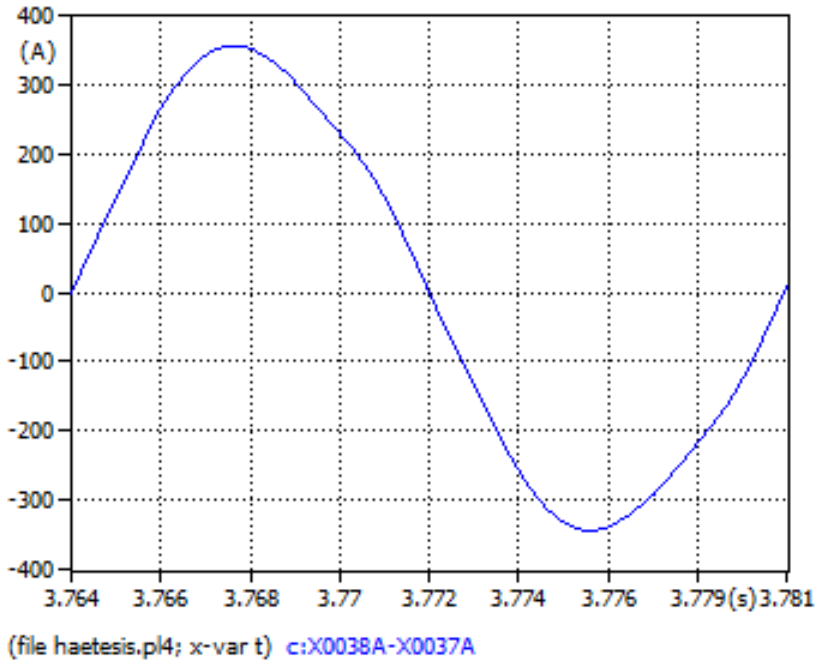


Gráfica 4-17 Medición de corriente

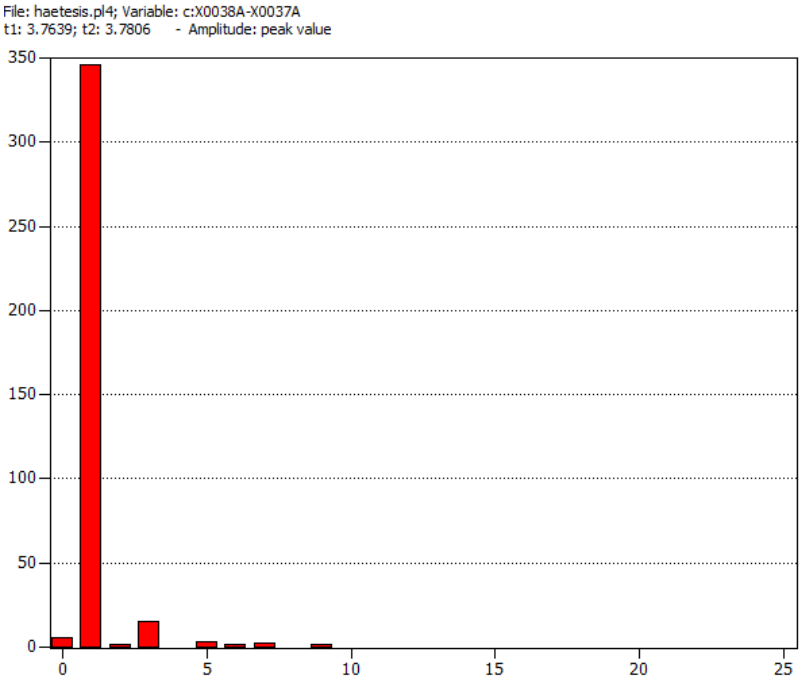
tiempo	Fase A	Fase B	Fase C	Desviación	Promedio	% Desbalance
0.5	250.85	239.30	177.32	39.542	222.490	17.77%
1	209.46	170.68	116.70	46.587	165.613	28.13%
1.5	234.33	199.43	162.71	35.814	198.823	18.01%
2	217.10	181.36	91.35	64.797	163.270	39.69%
2.5	216.42	217.15	108.65	62.433	180.740	34.54%
3	214.78	258.40	132.08	64.160	201.753	31.80%
3.5	191.16	135.92	103.59	44.282	143.557	30.85%
4	244.20	191.15	141.26	51.478	192.203	26.78%
4.5	207.30	187.10	171.64	17.882	188.680	9.48%
5	131.91	131.86	60.25	41.358	108.007	38.29%
Promedio	211.75	191.24	126.56	44.465	176.514	25.19%

Tabla 4-9 Análisis de Gráfica 4-17

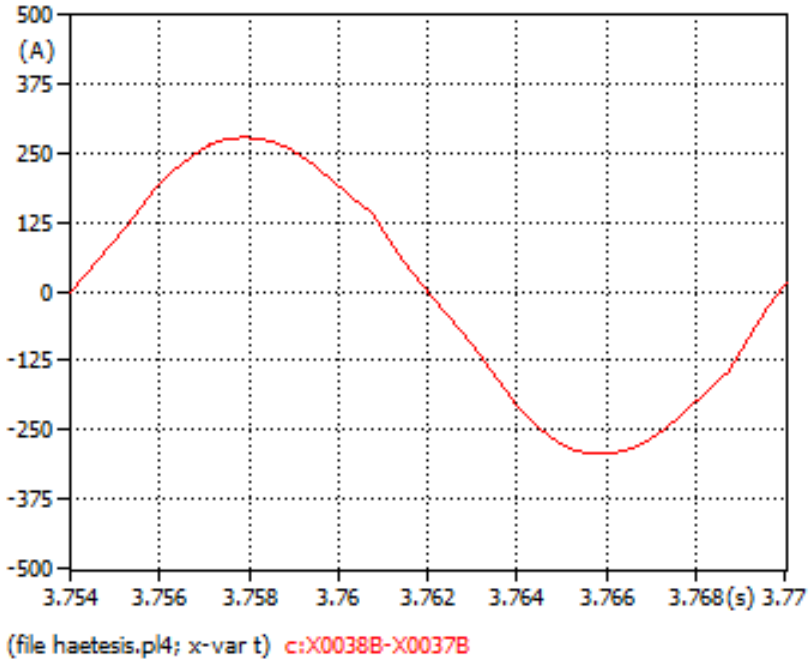
De la Tabla 4-9 se observa que el desbalance de corriente presente en el punto de común acoplamiento supera al desbalance máximo permitido en la Tabla 3-10, para una Icc/IL de 41.46 de 3.75%, sin embargo, por las características del modelo del horno de arco eléctrico, este parámetro no es posible corregirlo. De la Gráfica 4-18 a la Gráfica 4-23 se observa la forma de onda de corriente y su espectro armónico para cada una de las fases durante un ciclo en estado estable, en la Tabla 4-10, se realizó la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-7, para determinar si se encuentran dentro o fuera de los límites establecidos.



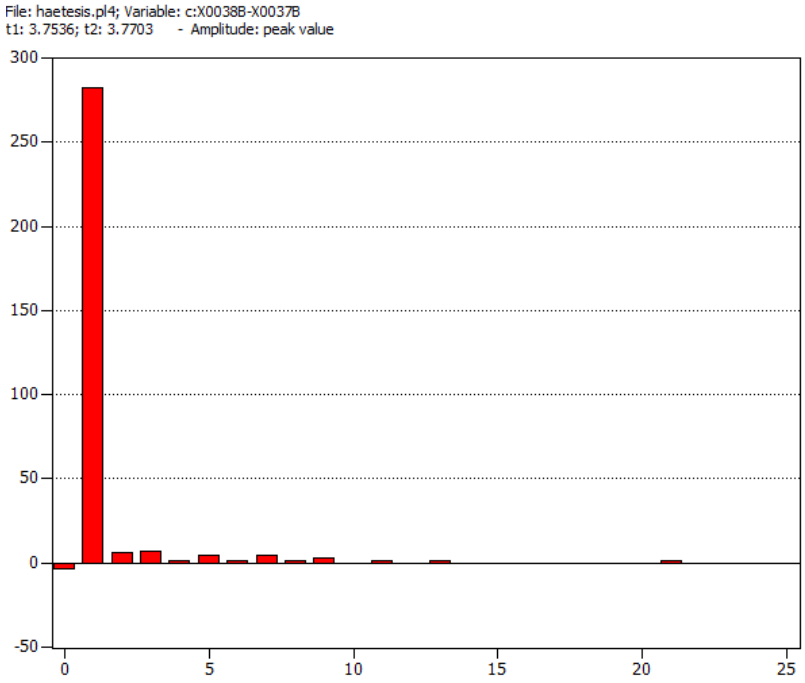
Gráfica 4-18 Análisis de forma de onda de corriente – Fase A



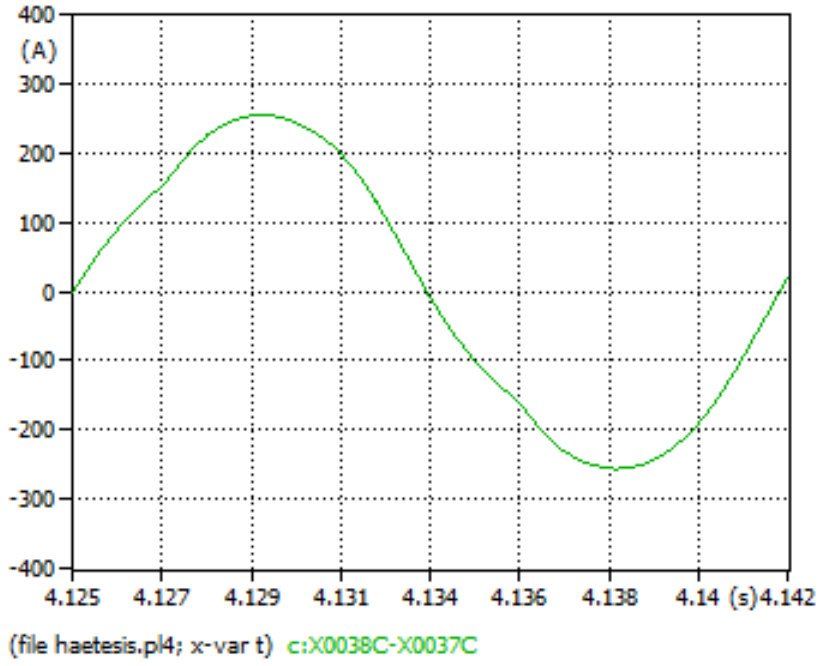
Gráfica 4-19 Espectro armónico de corriente – Fase A



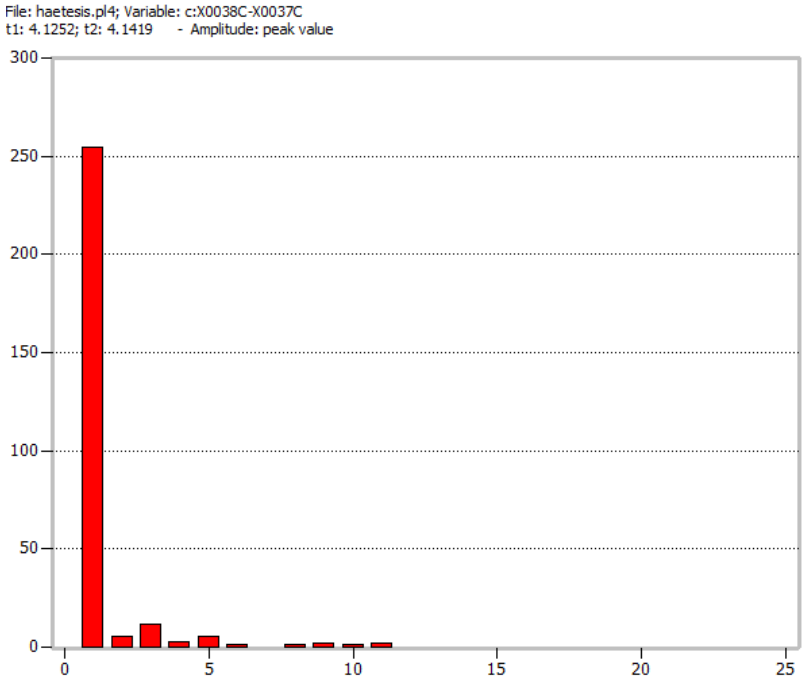
Gráfica 4-20 Análisis de forma de onda de corriente – Fase B



Gráfica 4-21 Espectro armónico de corriente – Fase B



Gráfica 4-22 Análisis de forma de onda de corriente – Fase C



Gráfica 4-23 Espectro armónico de corriente – Fase C

Impedancia relativa	Límites para componentes armónicas impares En % de IL				Distorsión armónica total THDC%
	Armónicas < 11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 24	
Icc/IL <50	2.0%	1.0%	0.75%	0.30%	2.5
Fase A	**3.ª - 4.33%**	13.ª – 0.12%	19.ª – 0.06%	23.ª – 0.03%	**4.50%**
Fase B	**3.ª – 2.31%**	11.ª – 0.47%	21.ª – 0.21%	23.ª – 0.18%	**3.96%**
Fase C	**3.ª – 4.53%**	13.ª – 0.19%	19.ª – 0.23%	23.ª – 0.13%	**5.56%**

Tabla 4-10 Comparación de las componentes armónicas de corriente presentes con los límites de la Tabla 3-7

De la Tabla 4-10, se observa que la tercera armónica, en cada una de las fases, supera el límite de componente armónico presente en porcentaje de la corriente nominal para armónicas menores a la undécima de 2.0%, también se observa que la distorsión armónica total, en cada una de las fases, supera el límite de distorsión armónica total de 2.5%. El contenido armónico se detalla en la Tabla 4-11, considerando hasta el armónico 24. También se observa que el THD% de corriente se encuentra dentro del rango de los valores medidos por CFE, sin embargo,

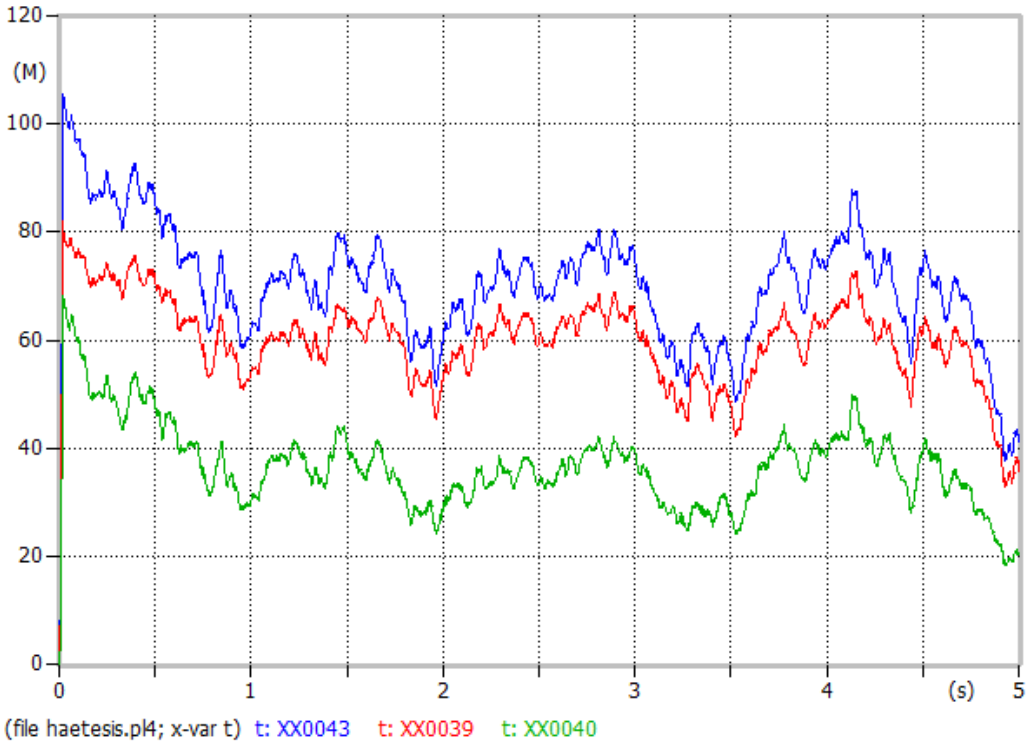
para la medición de armónicas individuales obtenidas en la simulación, se observa que son de menor magnitud que las presentes en la medición de CFE, como se indica en la Tabla 4-3 y la Tabla 4-5.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s)			
File: haetesis.pl4; Variable: c:X0038A-X0037A				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0038B-X0037B				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0038C-X0037C			
t1: 3.7639; t2: 3.7806 - Amplitude: peak value				t1: 3.7536; t2: 3.7703 - Amplitude: peak value				t1: 4.1252; t2: 4.1419 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	5.48706	0		0	-3.49145	0		0	-0.091386	0	
1	345.366	28.5324	100.00%	1	282.3	-62.7961	100.00%	1	254.108	-166.971	100.00%
2	1.48392	-78.0561	0.43%	2	5.39395	-19.7376	1.91%	2	4.9728	-163.239	1.96%
3	14.9613	-4.90019	4.33%	3	6.52859	25.1198	2.31%	3	11.5093	-41.0486	4.53%
4	0.690722	-46.9466	0.20%	4	1.21949	-128.665	0.43%	4	2.19603	-118.141	0.86%
5	3.01477	-174.729	0.87%	5	4.31574	175.066	1.53%	5	5.30098	-24.9814	2.09%
6	0.86687	32.2542	0.25%	6	1.06587	146.673	0.38%	6	0.983162	-70.8885	0.39%
7	1.87405	-76.6997	0.54%	7	4.1995	38.9883	1.49%	7	0.52976	-154.282	0.21%
8	0.200446	33.5558	0.06%	8	0.614552	21.831	0.22%	8	1.05442	-67.6002	0.41%
9	0.95496	16.2768	0.28%	9	2.97885	-61.8228	1.06%	9	1.66285	157.129	0.65%
10	0.349187	89.6059	0.10%	10	0.308544	-106.747	0.11%	10	0.761055	-47.9916	0.30%
11	0.199832	107.224	0.06%	11	1.3406	-124.963	0.47%	11	1.39214	126.846	0.55%
12	0.190073	-174.326	0.06%	12	0.265296	160.939	0.09%	12	0.380316	-8.13813	0.15%
13	0.413267	103.108	0.12%	13	1.1688	154.444	0.41%	13	0.488175	145.164	0.19%
14	0.298397	-170.89	0.09%	14	0.317603	22.8823	0.11%	14	0.460198	23.9262	0.18%
15	0.215402	-157.415	0.06%	15	0.441955	94.4218	0.16%	15	0.298269	-91.9849	0.12%
16	0.251633	-96.9854	0.07%	16	0.311079	-102.117	0.11%	16	0.472456	55.9623	0.19%
17	0.124169	174.698	0.04%	17	0.50381	63.2749	0.18%	17	0.518549	-94.6599	0.20%
18	0.172929	-43.3186	0.05%	18	0.240951	131.118	0.09%	18	0.37707	68.6355	0.15%
19	0.193273	-77.2359	0.06%	19	0.46194	-3.56929	0.16%	19	0.590778	-92.6761	0.23%
20	0.200137	-1.19989	0.06%	20	0.211891	10.0897	0.08%	20	0.26514	102.602	0.10%
21	0.0856616	13.9131	0.02%	21	0.592863	-72.8426	0.21%	21	0.265533	-81.7358	0.10%
22	0.146022	63.0146	0.04%	22	0.191373	-119.086	0.07%	22	0.28874	147.374	0.11%
23	0.0887375	20.1725	0.03%	23	0.510335	-172.996	0.18%	23	0.167407	-17.5634	0.07%
24	0.116322	96.3053	0.03%	24	0.184507	112.171	0.07%	24	0.331453	169.687	0.13%
THDC - FASE A			4.50%	**THDC - FASE B**			3.96%	**THDC - FASE C**			5.56%

Tabla 4-11 THD de corriente

4.3.6 MEDICIÓN DE POTENCIA

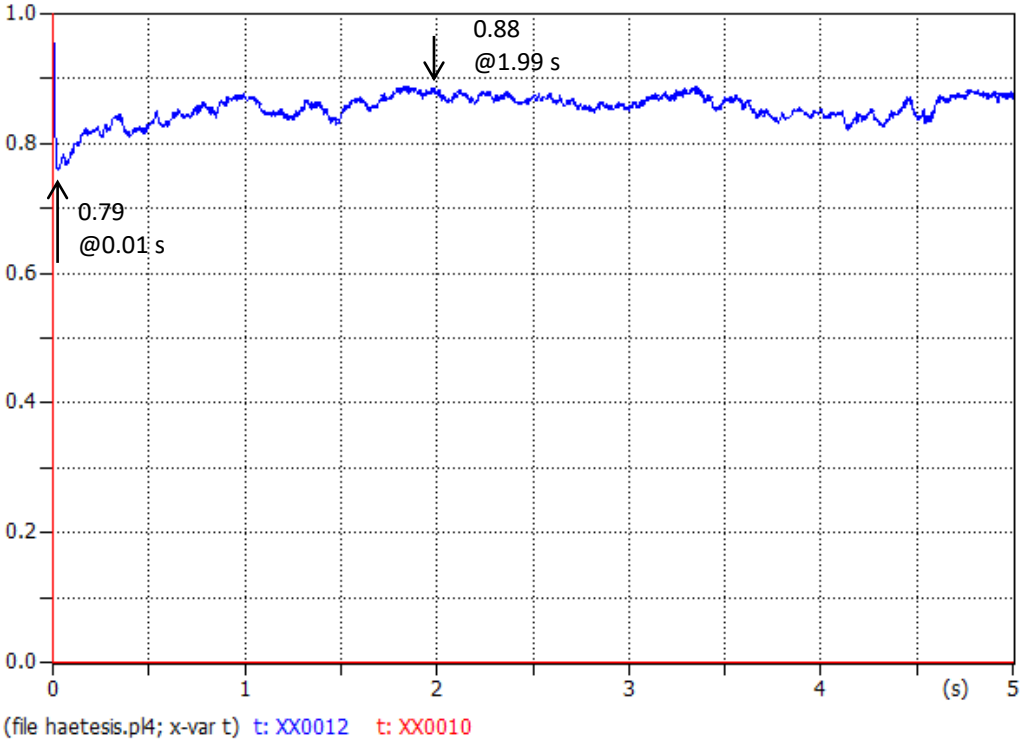
El comportamiento de la potencia aparente en MVA (Azul), potencia activa en MW (Rojo) y potencia reactiva en MVAR (Verde), se muestran en la Gráfica 4-24, en la Tabla 4-12 se analizan y se obtienen sus valores promedios, las lecturas se tomaron cada 0.5 segundos haciendo un símil a la medición cinco-minutal indicada en 3.2.3. Los valores promedio de la potencia aparente y el factor de potencia se tomaron como base para el cálculo del filtro de armónicas.



Gráfica 4-24 Medición de potencia activa, aparente y reactiva

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
0+	81.75	63.28	103.38	0.79
0.5	70.91	48.76	86.06	0.82
1	54.98	31.43	63.33	0.87
1.5	64.33	42.25	76.96	0.84
2	53.63	29.83	61.1	0.88
2.5	60.02	33.55	68.76	0.87
3	65.31	39.11	76.12	0.86
3.5	48.23	27.49	55.51	0.87
4	63.83	39.39	75.01	0.85
4.5	62.13	39.64	73.70	0.84
5	35.80	20.30	41.15	0.87
Promedio	60.08	37.73	71.01	0.85

Tabla 4-12 Análisis de la Gráfica 4-24



Gráfica 4-25 Medición de factor de potencia

En la Gráfica 4-25, muestra el comportamiento del factor de potencia, en color azul se grafica el factor de potencia en atraso y en color rojo se grafica el factor de potencia en adelanto, se observa que cuando el sistema no cuenta con ningún tipo de compensación el factor de potencia siempre se encuentra en atraso, tal como se especifica en el punto 3.2.3; Sin embargo, se observa que el valor mínimo que presenta es de 0.79 y el valor máximo es de 0.88, valores que se encuentran fuera de los límites establecidos en el punto 3.2.3, el cual indica que el factor de potencia se debe de encontrar en un valor de 0.95 el 95% del tiempo. También se observa que los resultados obtenidos con la simulación presentan un factor de potencia más bajo que las mediciones realizadas por CFE donde el factor de potencia oscila entre 0.9 a 1.0, como se indica en la Tabla 4-1.

4.4 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA

4.4.1 CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO UNA SINTONÍA

El filtro de armónicas se calculó para filtrar la tercera armónica, sintonizado al 98%, conforme los resultados obtenidos en la Tabla 4-7 y la Tabla 4-11, y para corregir el factor de potencia de 0.85 a 0.95, conforme a los resultados promedio obtenidos en la Tabla 4-12. La ubicación del filtro es en 34.5 kV como se indica en la Figura 4-1. Como el filtro está instalado en 34.5 kV, se calculó la impedancia equivalente en 34.5 kV, para esto, se despreció la parte de alta tensión y solamente se realizó el cálculo considerando el transformador Step-Down, y ya que no se indica una relación X/R se propone un valor típico de 23.7.

Cálculo de Impedancia en 34.5 kV			
Voltaje	34.5	Z Calculada	2.68
Icc (kA)	7.427	X/R Propuesta	23.7
R Calculada			0.11
Xl Calculada			2.68

Tabla 4-13 Cálculo de la impedancia en 34.5 kV

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4-13 y con los datos mostrados en la Tabla 4-14, se realizó el cálculo del filtro de una sintonía.

Datos para cálculo del filtro			
Sistema		Carga	
Volts	34.5 kv	Carga	70000 KVA
R	0.11 Ohm	In	1171.47 A
Xl	2.6795 Ohm	F.P. Actual	0.85
Z	2.682 Ohm	F.P. Nuevo	0.95
Icc	7.43 kA	h más baja	3
MVAcc	443.81 MVA	% Sintonizar	0.98
X/R	23.70	h sintonizar	2.94

Tabla 4-14 Datos para cálculo de filtro una sintonía

Los valores de inductancia y capacitancia introducidas en ATP se muestran en la Figura 4-9, en la Gráfica 4-26 se muestra el comportamiento de la reactancia del filtro contra las diferentes frecuencias, se observa que la frecuencia de resonancia es en el armónico 2.5.

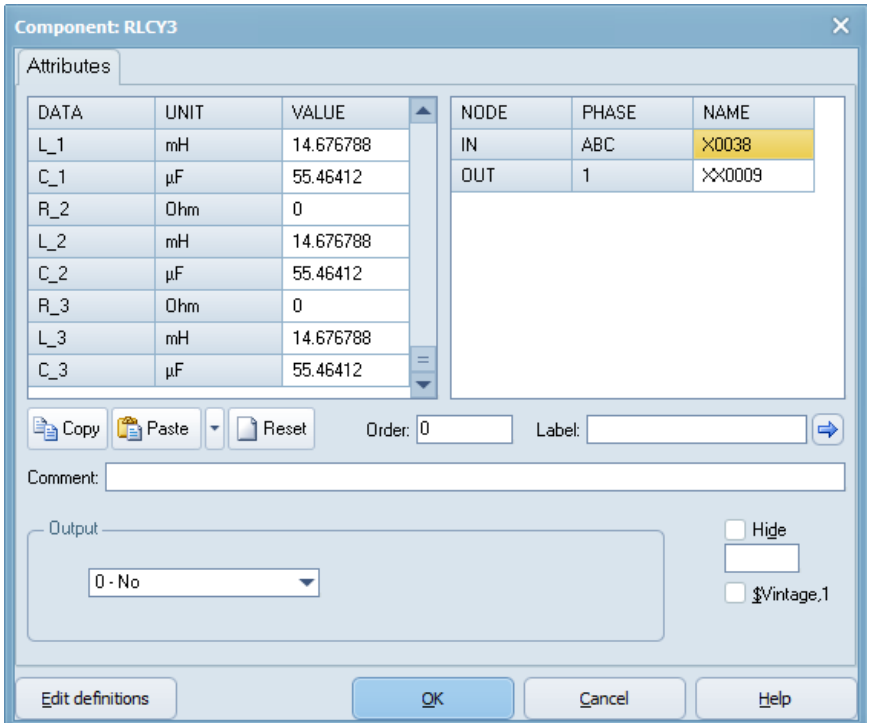
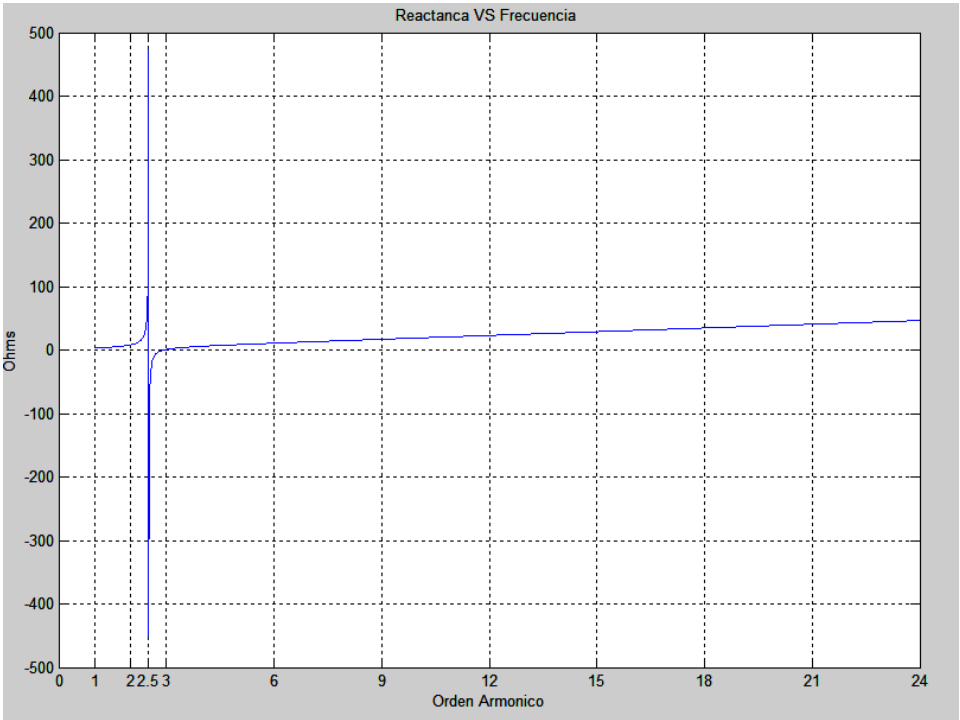


Figura 4-9 Datos de filtro una sintonía introducidos a ATP



Gráfica 4-26 Reactancia vs frecuencia filtro una sintonía

4.4.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Con la finalidad de observar el comportamiento del sistema con el filtro en operación y posteriormente cuando el horno sale de operación, pero el filtro se mantiene, se aumentó a 6 segundos el tiempo de simulación, tal como se indica en la Figura 4-10, permitiendo así que el interruptor HVCB, indicado en la Figura 4-1, opere a los 5 segundos de simulación, tal como se indica en la Figura 4-11, dando 1 segundo de simulación para analizar el comportamiento del sistema sin el horno. Esta misma configuración se mantiene para la simulación con el filtro de doble sintonía.

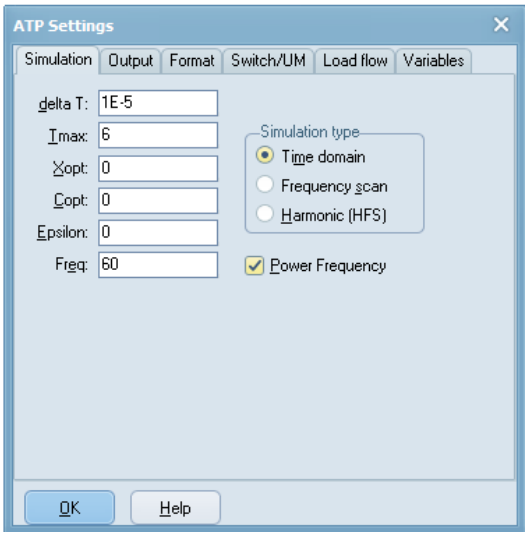


Figura 4-10 Ajustes de simulación con filtro

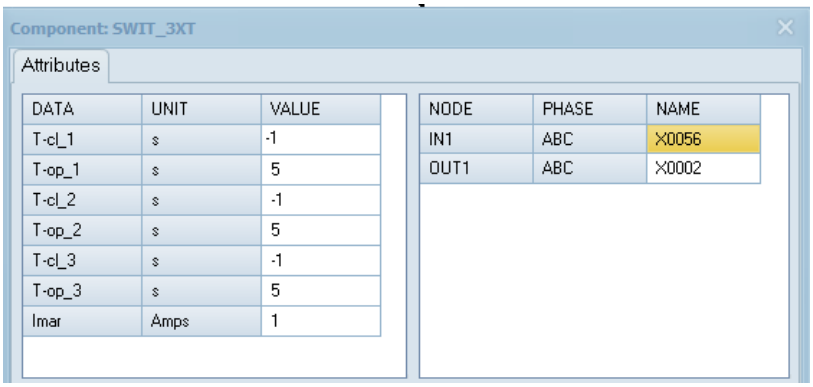
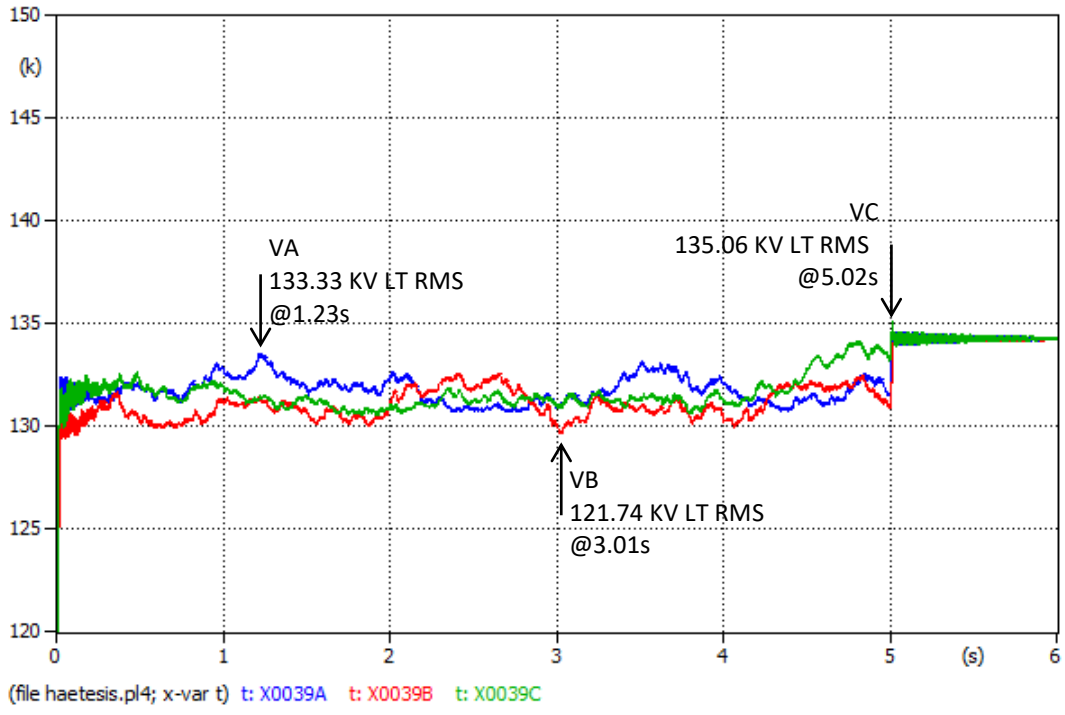


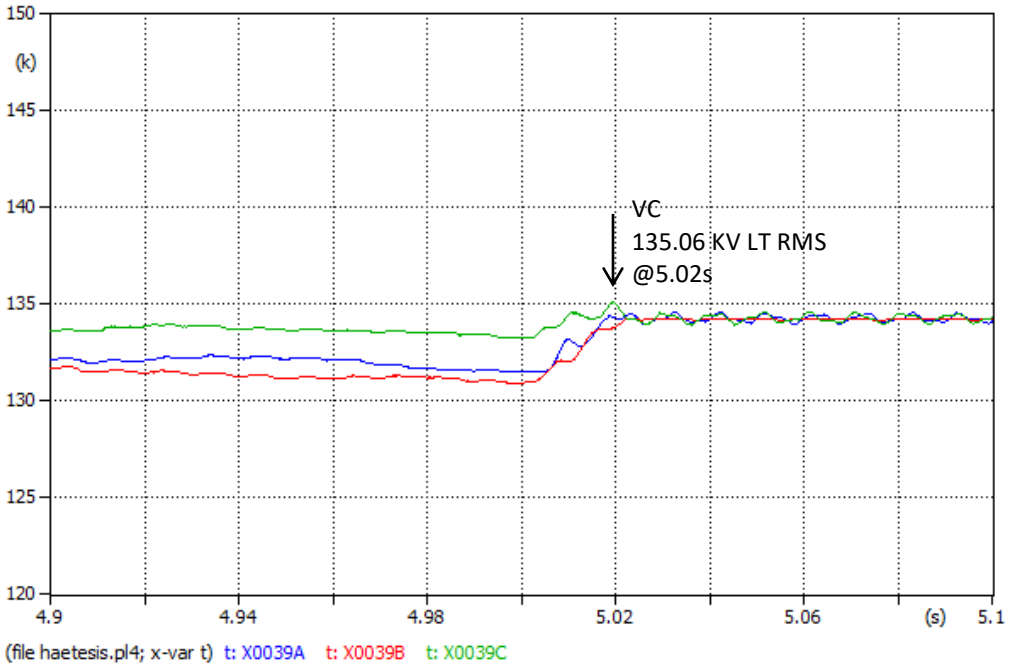
Figura 4-11 Ajustes de operación del interruptor HVCB HORNO

4.4.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE

En la Gráfica 4-27 se muestra el voltaje medido para cada una de las fases en el punto de común acoplamiento con el filtro instalado, el voltaje mínimo medido, antes de la salida del horno, corresponde a la Fase B en 3.01 segundos, con un valor de 129.74 KV L-T RMS, equivalente al 97.70% de la tensión nominal, el valor de tensión máxima medida, antes de la salida del horno, corresponde a la Fase A en 1.23 segundos, con un valor de 133.33 KV L-T RMS, equivalente al 99.97% de la tensión nominal. Se observa que en el segundo 5, cuando el horno se desconecta, se presenta una sobretensión, alcanzando a un valor máximo en la Fase C en 5.02 segundos, con un valor de 135.06 KV L-T RMS, equivalente al 101.27% de la tensión nominal. Los valores de tensión medidos se encuentran dentro de las variaciones de tensión que un centro de carga debe de soportar en condiciones de operación normal conforme a la Tabla 3-2.



Gráfica 4-27 Medición de voltaje con filtro una sintonía

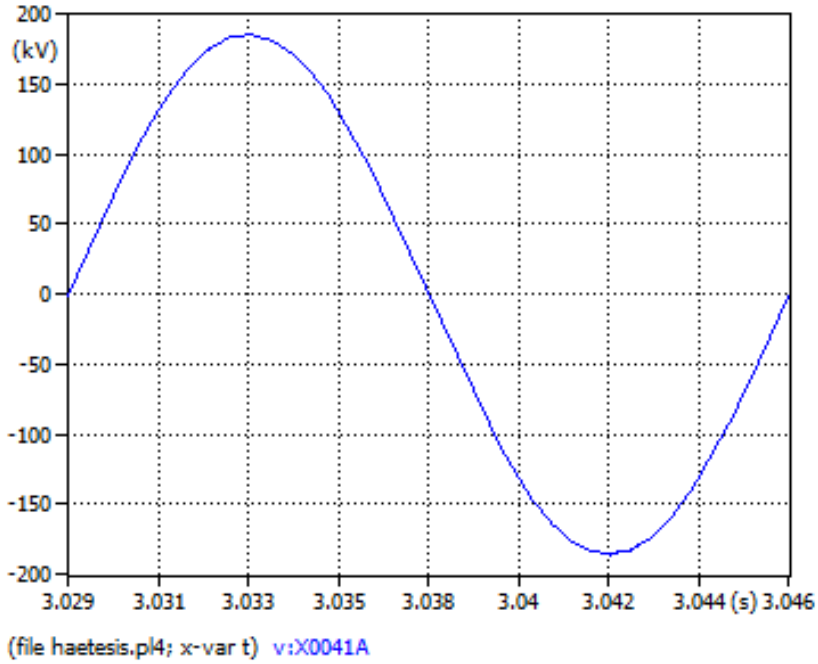


Gráfica 4-28 Medición de sobretensión por salida de horno con filtro una sintonía

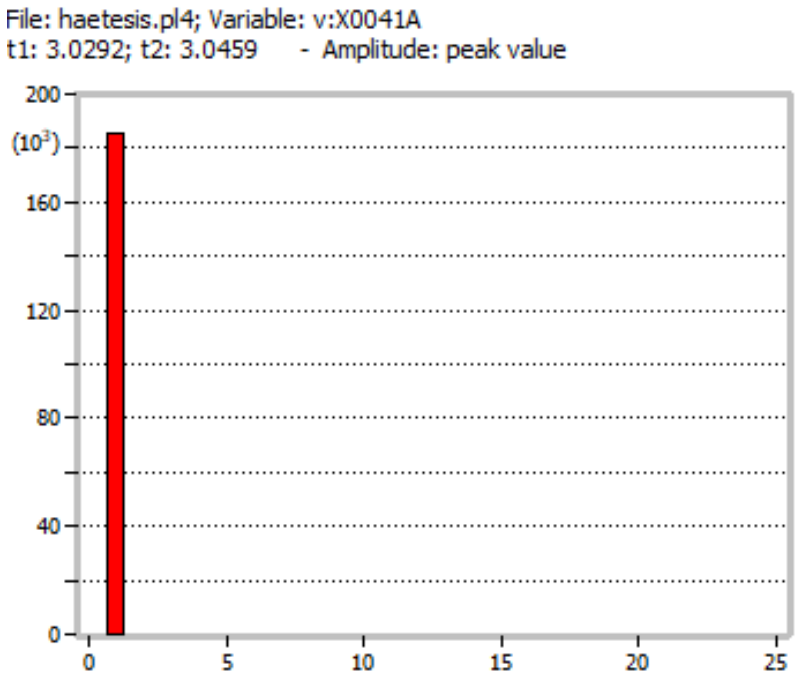
De la Gráfica 4-29 a la Gráfica 4-34 se observa la forma de onda de voltaje y su espectro armónico para cada una de las fases, durante un ciclo en estado estable, en la Tabla 4-15, se realizó la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-8.

Fase	Límite de distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THDV%
	1.0 %	1.5 %
Fase A	5.ª - 0.14%	0.24%
Fase B	7.ª - 0.11%	0.17%
Fase C	2.ª - 0.19%	0.23%

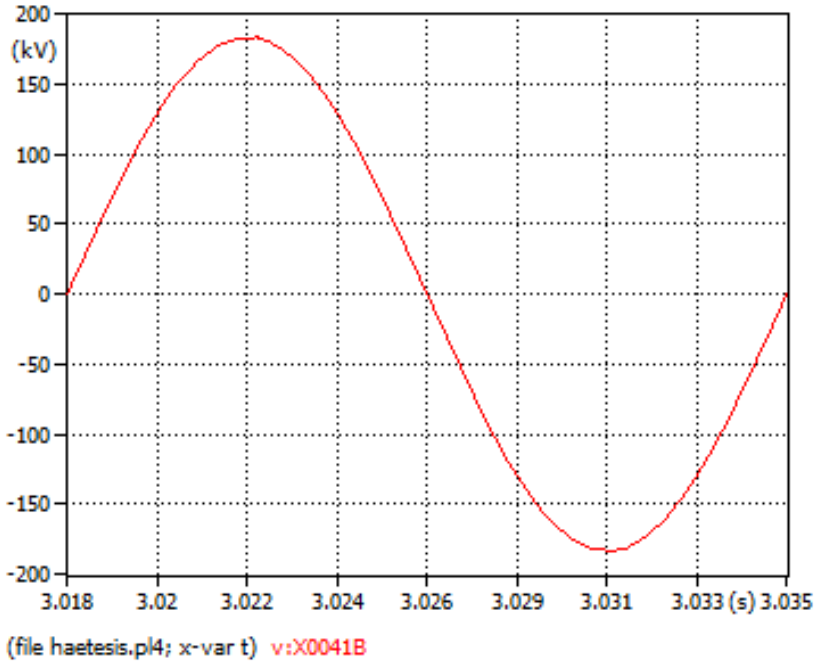
Tabla 4-15 Comparación de las componentes armónicas de voltaje con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3-8



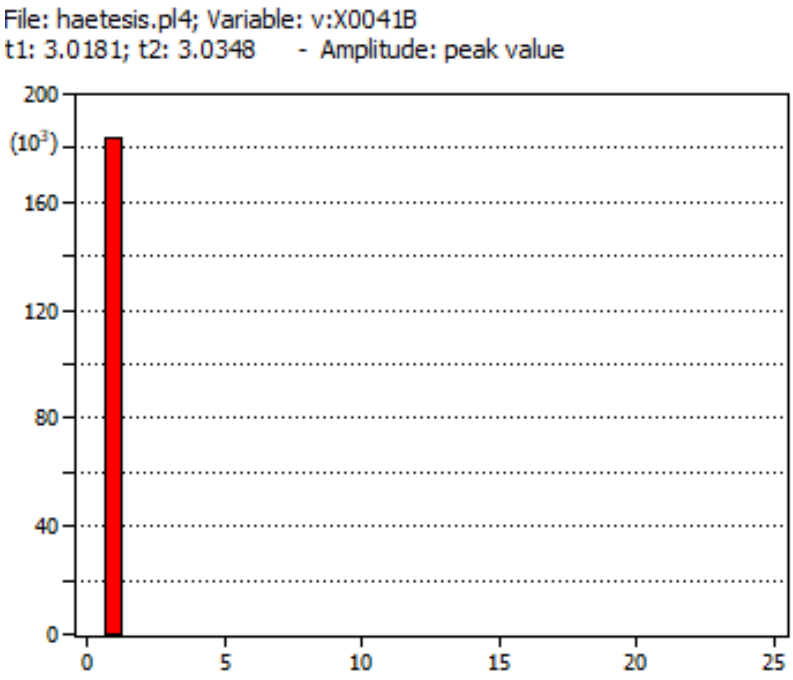
Gráfica 4-29 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía– Fase A



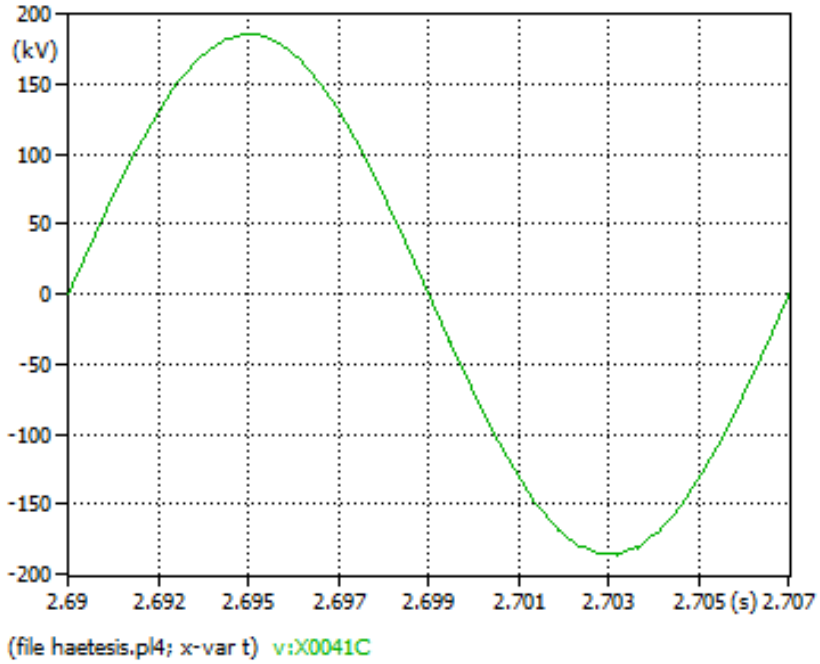
Gráfica 4-30 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía– Fase A



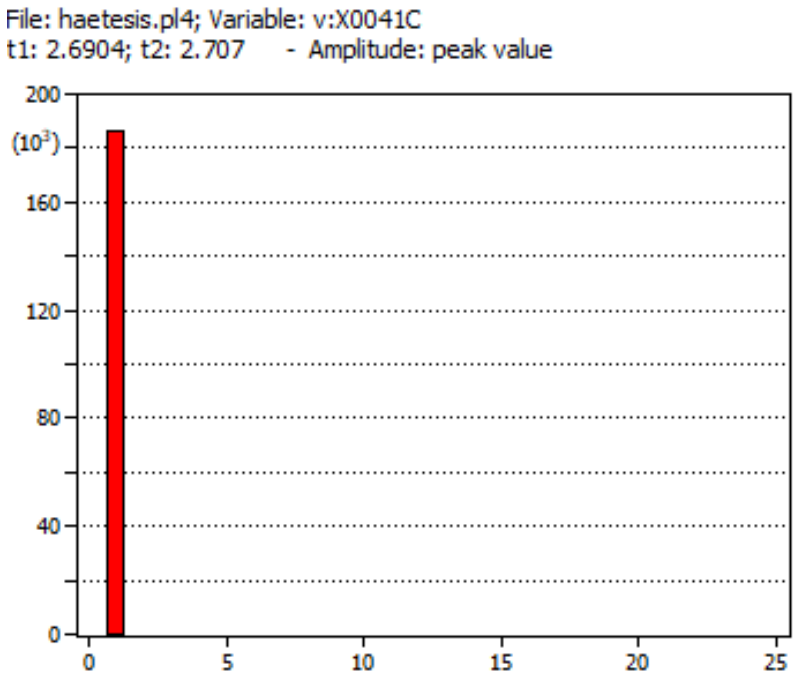
Gráfica 4-31 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía – Fase B



Gráfica 4-32 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía – Fase B



Gráfica 4-33 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía – Fase C



Gráfica 4-34 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía – Fase C

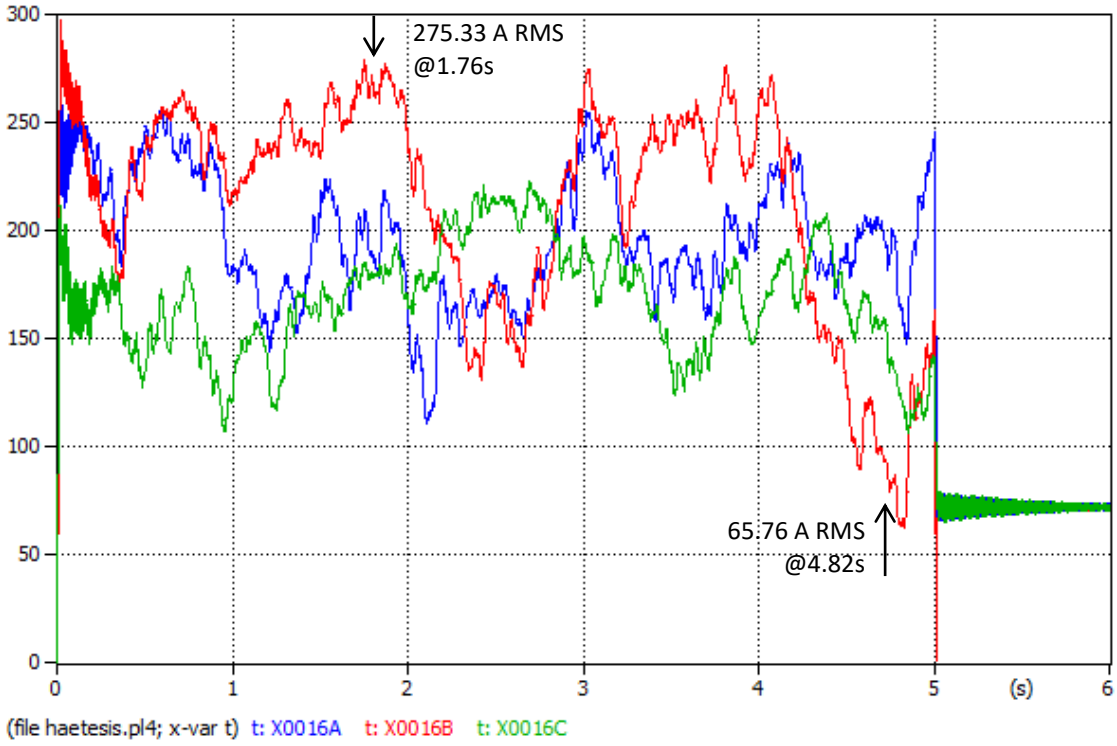
MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: v:X0041A				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0041B				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0041C			
t1: 3.0292; t2: 3.0459 - Amplitude: peak value				t1: 3.0181; t2: 3.0348 - Amplitude: peak value				t1: 2.6904; t2: 2.707 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	-31.4615	0		0	15.7458	0		0	22.7281	0	
1	185463	61.8091	100.00%	1	183418	-18.6097	100.00%	1	185562	149.921	100%
2	160.706	-169.55	0.09%	2	99.0921	97.6465	0.05%	2	360.368	-52.5058	0.19%
3	145.453	92.8056	0.08%	3	118.074	-174.364	0.06%	3	165.379	-63.9877	0.09%
4	32.0912	107.993	0.02%	4	37.9628	172.049	0.02%	4	37.3467	159.78	0.02%
5	260.751	158.596	0.14%	5	104.241	81.6234	0.06%	5	73.1051	-169.611	0.04%
6	24.3332	-17.8877	0.01%	6	14.4113	7.58976	0.01%	6	34.3853	135.996	0.02%
7	111.774	-137.941	0.06%	7	196.246	-21.7192	0.11%	7	38.2782	-22.7517	0.02%
8	8.74321	55.5445	0.00%	8	5.02435	-89.9945	0.00%	8	21.0135	104.188	0.01%
9	199.21	-32.2063	0.11%	9	46.2206	92.6013	0.03%	9	77.5479	-132.592	0.04%
10	19.8864	154.031	0.01%	10	8.30372	-168.259	0.00%	10	30.5115	46.8486	0.02%
11	50.8433	-30.047	0.03%	11	72.1316	-49.3666	0.04%	11	33.4023	43.5104	0.02%
12	8.06015	-80.8658	0.00%	12	4.19517	-46.5276	0.00%	12	4.87201	1.81367	0.00%
13	81.4143	66.3265	0.04%	13	67.6798	-26.5547	0.04%	13	30.0839	-141.889	0.02%
14	12.4492	-155.491	0.01%	14	8.70959	-120.96	0.00%	14	4.22971	-117.661	0.00%
15	87.2927	98.7653	0.05%	15	65.1339	179.19	0.04%	15	44.5446	86.7684	0.02%
16	23.079	40.5949	0.01%	16	9.45609	-100.48	0.01%	16	15.0155	-125.891	0.01%
17	82.369	-177.634	0.04%	17	67.3304	-70.0451	0.04%	17	27.8357	-44.1124	0.02%
18	2.31382	-104.236	0.00%	18	4.47447	141.727	0.00%	18	10.7451	139.339	0.01%
19	58.5905	-143.258	0.03%	19	29.8773	98.0124	0.02%	19	19.6672	113.184	0.01%
20	26.0473	-156.128	0.01%	20	11.2786	112.119	0.01%	20	2.05625	73.6404	0.00%
21	67.3906	-62.1476	0.04%	21	51.8493	-175.113	0.03%	21	30.3724	-43.7154	0.02%
22	26.7154	81.6537	0.01%	22	13.2	99.3507	0.01%	22	5.80328	153.163	0.00%
23	46.5322	-33.4087	0.03%	23	33.2402	19.7016	0.02%	23	29.2863	168.666	0.02%
24	19.8351	-132.733	0.01%	24	13.2066	41.0834	0.01%	24	12.2397	1.13224	0.01%
THDV - FASE A			0.24%	**THDV - FASE B**			0.17%	**THDV - FASE C**			0.23%

Tabla 4-16 THD de voltaje con filtro una sintonía

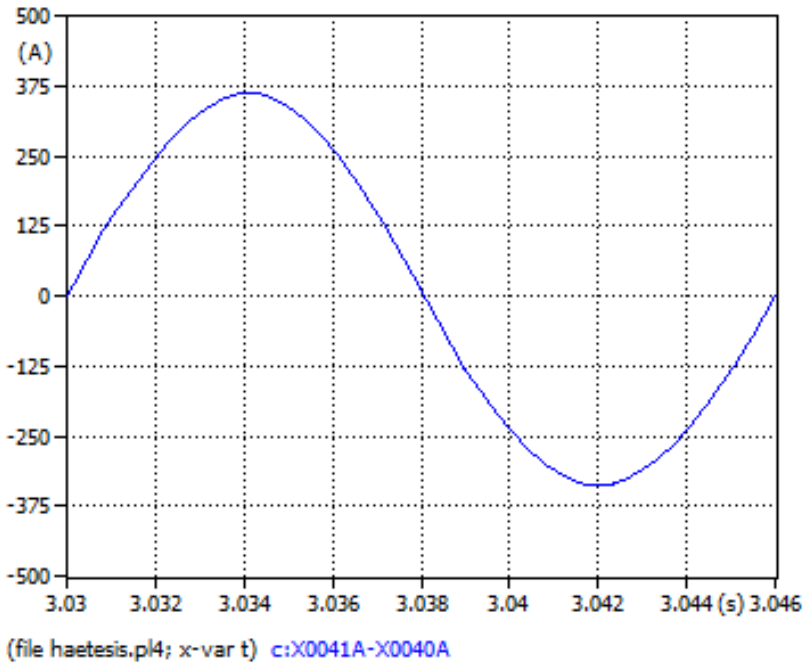
De la Tabla 4-15, se observa, que las componentes armónicas individuales, como la distorsión armónica total, presentes en voltaje se encuentran dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-8 para cada una de las fases, también se observa que el contenido armónico disminuyó respecto a las mediciones realizadas sin el filtro. En la Tabla 4-16 se detalla el contenido armónico presente en voltaje hasta el armónico número 24.

4.4.4 MEDICIÓN DE CORRIENTE

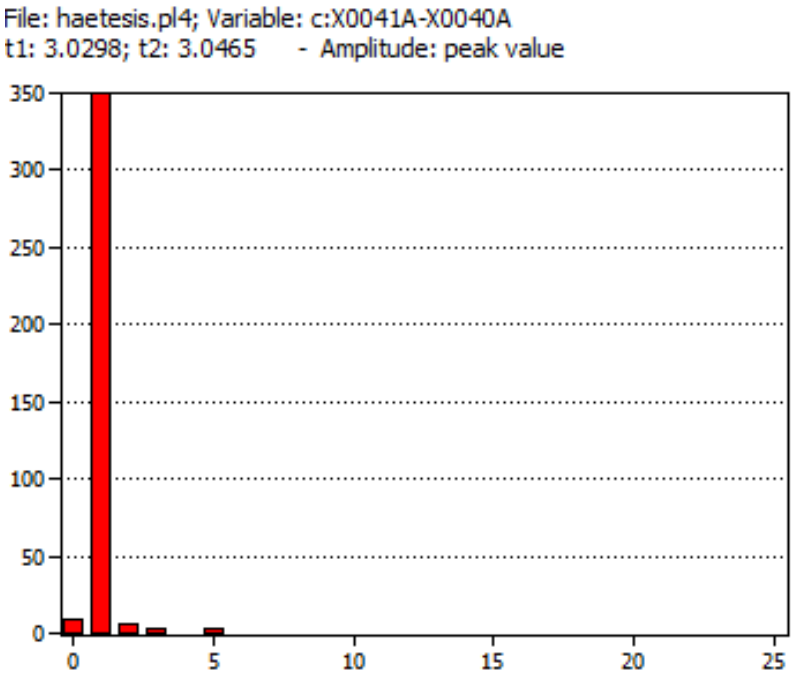
En la Gráfica 4-35 se muestra el comportamiento de la corriente con el filtro instalado, se observa que la corriente máxima presente se encuentra en la Fase B, en 1.76 segundos, con un valor de 275.33 A RMS y la corriente mínima presente también se encuentra en la Fase B, en 4.82 segundos, con un valor de 65.76 A RMS. De igual forma se observa que el desbalanceo entre las tres fases se mantiene, esto debido a la naturaleza estocástica del sistema.



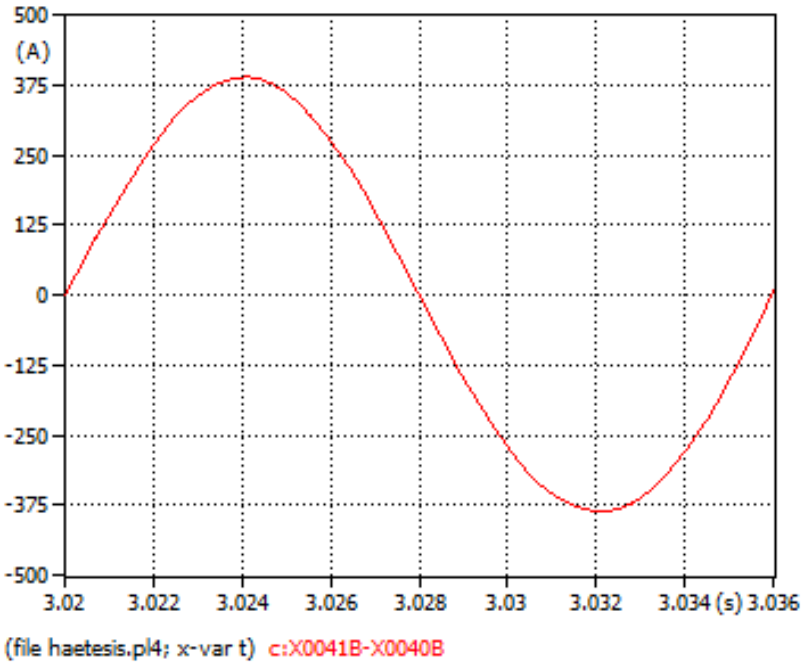
Gráfica 4-35 Medición de corriente con filtro una sintonía



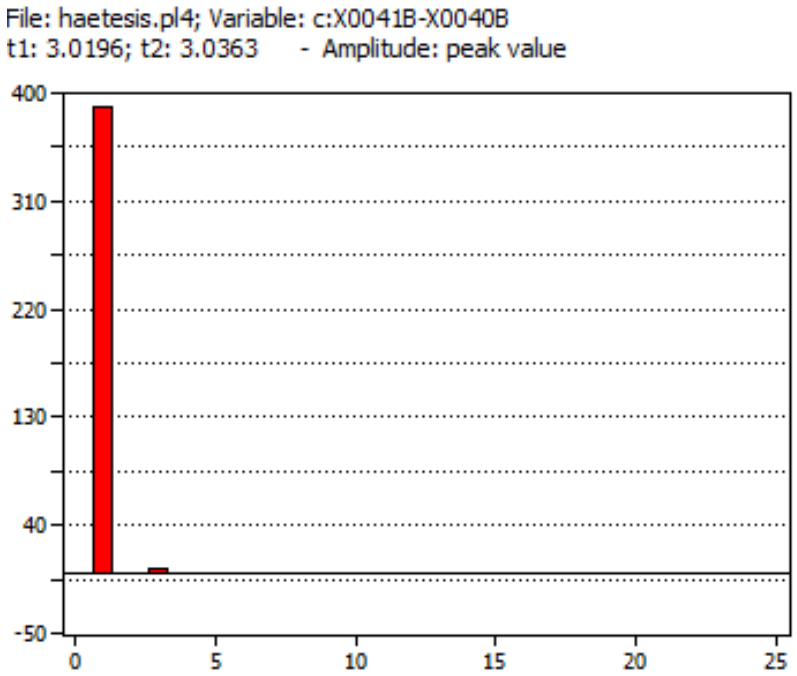
Gráfica 4-36 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía– Fase A



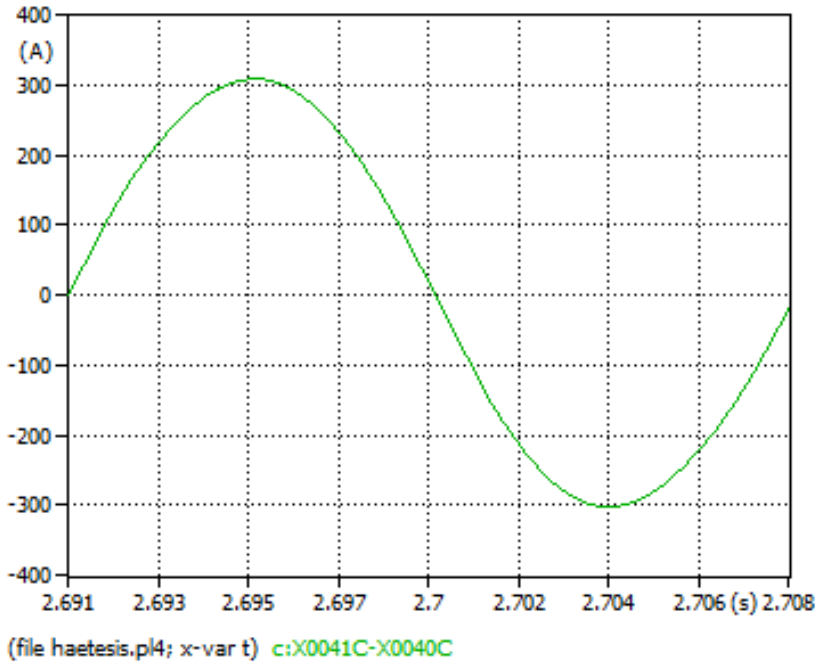
Gráfica 4-37 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase A



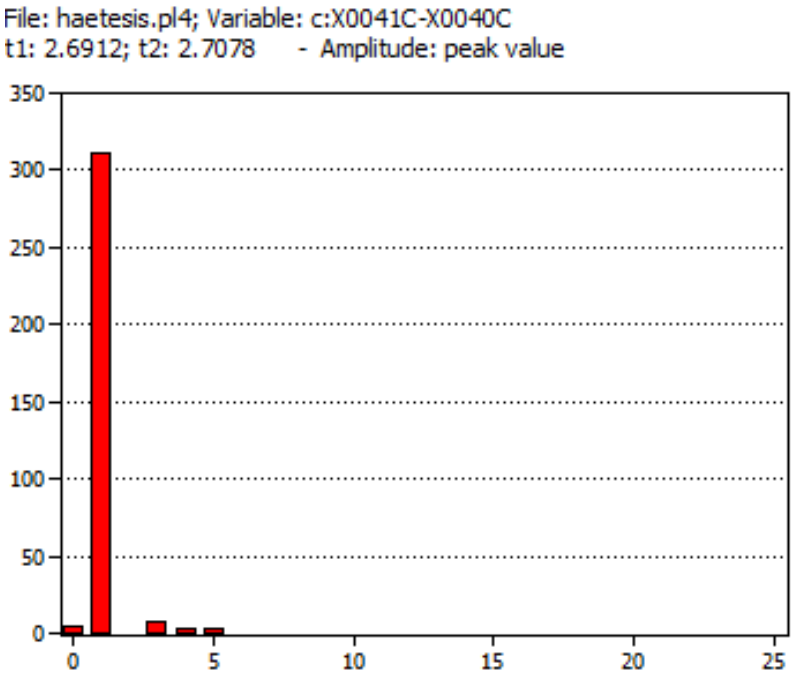
Gráfica 4-38 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía Fase B



Gráfica 4-39 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase B



Gráfica 4-40 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía – Fase C



Gráfica 4-41 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía – Fase C

De la Gráfica 4-36 a la Gráfica 4-41 se observa la forma de onda de corriente y su espectro armónico para cada una de las fases, durante un ciclo en estado estable, en la Tabla 4-17, se realizó la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-7.

Impedancia relativa	Límites para componentes armónicas impares En % de IL				Distorsión armónica total THDC%
	Armónicas < 11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 24	
Icc/IL <50	2.0%	1.0%	0.75%	0.30%	2.5
Fase A	5.ª – 0.77%	13.ª – 0.10%	19.ª – 0.03%	23.ª – 0.02%	1.73%
Fase B	3.ª – 0.71%	11.ª – 0.10%	17.ª – 0.03%	23.ª – 0.03%	1.00%
Fase C	3.ª – 1.90%	13.ª – 0.19%	17.ª – 0.14%	23.ª – 0.09%	2.44%

Tabla 4-17 Comparación de las componentes armónicas de corriente con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3-7

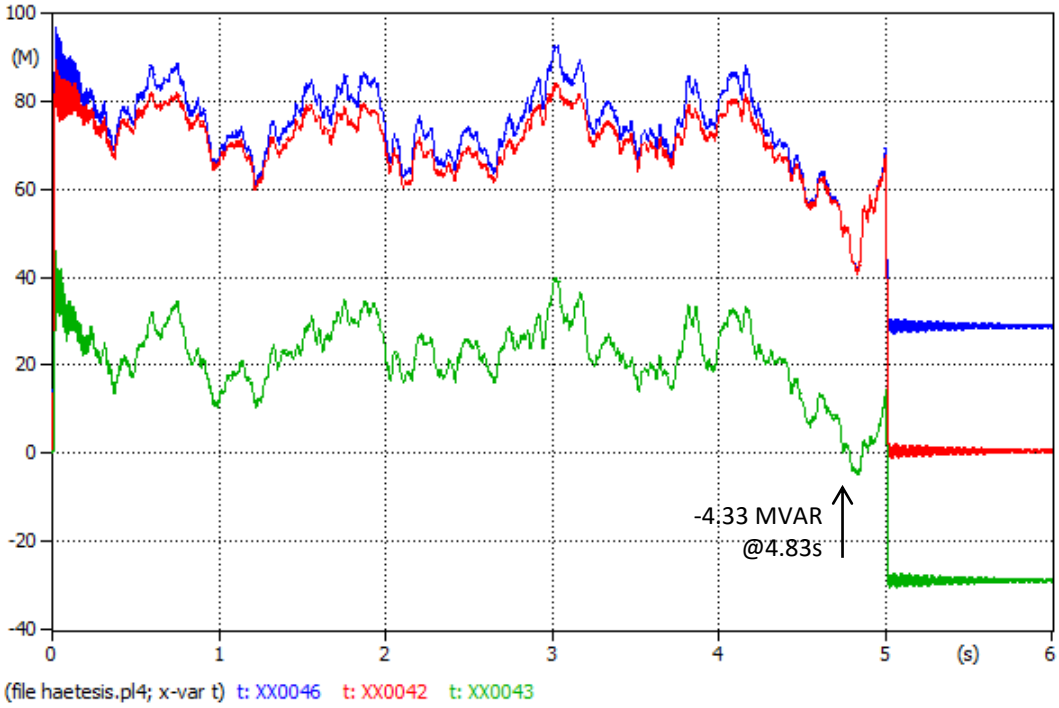
De la Tabla 4-17, se observa que el contenido armónico presente se redujo a valores dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-7. El contenido armónico se detalla en la Tabla 4-18, considerando hasta el armónico 24.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: c:X0041A-X0040A				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0041B-X0040B				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0041C-X0040C			
t1: 3.0298; t2: 3.0465 - Amplitude: peak value				t1: 3.0196; t2: 3.0363 - Amplitude: peak value				t1: 2.6912; t2: 2.7078 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	8.85318	0		0	-0.544502	0		0	4.22145	0	
1	349.935	88.5686	100.00%	1	387.761	-51.0586	100.00%	1	310.257	165.218	100%
2	4.66264	42.3614	1.33%	2	1.14928	174.361	0.30%	2	1.42021	86.6874	0.46%
3	2.24975	-70.9796	0.64%	3	2.74047	-66.6135	0.71%	3	5.88593	122.498	1.90%
4	0.581964	-42.0467	0.17%	4	1.09194	-81.166	0.28%	4	2.64417	-55.2809	0.85%
5	2.67801	80.9668	0.77%	5	1.34349	-167.04	0.35%	5	2.72952	103.185	0.88%
6	0.160993	-12.5935	0.05%	6	0.371862	-174.631	0.10%	6	1.1746	-73.2257	0.38%
7	0.913561	-133.435	0.26%	7	1.54641	81.0002	0.40%	7	1.04134	83.5152	0.34%
8	0.0767006	158.127	0.02%	8	0.254572	106.072	0.07%	8	0.849481	-104.607	0.27%
9	1.07421	50.3742	0.31%	9	0.250639	134.03	0.06%	9	0.395897	44.9957	0.13%
10	0.131604	-44.8036	0.04%	10	0.193315	1.756	0.05%	10	0.660162	-135.136	0.21%
11	0.278666	128.167	0.08%	11	0.405792	16.7188	0.10%	11	0.552743	56.3536	0.18%
12	0.0927042	169.93	0.03%	12	0.146517	-85.6428	0.04%	12	0.54947	-150.936	0.18%
13	0.352254	-58.5015	0.10%	13	0.13406	94.5946	0.03%	13	0.596331	22.4541	0.19%
14	0.0538895	43.3063	0.02%	14	0.124528	173.746	0.03%	14	0.444152	-179.573	0.14%
15	0.288438	72.4093	0.08%	15	0.093105	-162.012	0.02%	15	0.538487	-12.5704	0.17%
16	0.0456786	78.7907	0.01%	16	0.100773	70.2967	0.03%	16	0.433686	155.984	0.14%
17	0.243654	-126.942	0.07%	17	0.296514	21.3779	0.08%	17	0.443684	-45.2634	0.14%
18	0.0425636	18.7284	0.01%	18	0.115005	-27.8195	0.03%	18	0.380585	129.933	0.12%
19	0.0950225	-6.71926	0.03%	19	0.11311	-105.232	0.03%	19	0.3096	-66.9767	0.10%
20	0.0232522	-42.3031	0.01%	20	0.115039	-130.052	0.03%	20	0.333596	104.813	0.11%
21	0.087963	140.37	0.03%	21	0.12539	-129.19	0.03%	21	0.270197	-82.4175	0.09%
22	0.05436	-13.7579	0.02%	22	0.0977517	140.54	0.03%	22	0.298178	79.4496	0.10%
23	0.0557383	-129.791	0.02%	23	0.128568	88.1602	0.03%	23	0.289266	-103.38	0.09%
24	0.0355269	-172.848	0.01%	24	0.0859543	37.2147	0.02%	24	0.261712	56.9284	0.08%
THDC - FASE A			1.73%	**THDC - FASE B**			1.00%	**THDC - FASE C**			2.44%

Tabla 4-18 THD de corriente con filtro una sintonía

4.4.5 MEDICIÓN DE POTENCIA

El comportamiento de la potencia aparente en MVA (Azul), potencia activa en MW (Rojo) y potencia reactiva en MVAR (Verde), se muestran en la Gráfica 4-42, en la Tabla 4-19 se analizan y se obtienen sus valores promedios, las lecturas se tomaron cada 0.5 segundos haciendo un símil a la medición cinco-minutal indicada en 3.2.3. En esta tabla se observa que para los periodos en los que se tomaron las lecturas, el factor de potencia promedio medido es de 0.95 en atraso, valor que se buscó en el diseño del filtro y cumple con los requisitos de 3.2.3, sin embargo, en la Gráfica 4-42, se observa que en aproximadamente 4.83 segundos, cuando la carga del horno baja, la potencia reactiva pasa a ser negativa, lo que provoca que el filtro inyecte reactivos a la red, ocasionando así que el factor de potencia este en adelanto, tal como se muestra en la Gráfica 4-43, siendo así un incumplimiento a 3.2.3.



Gráfica 4-42 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con filtro una sintonía

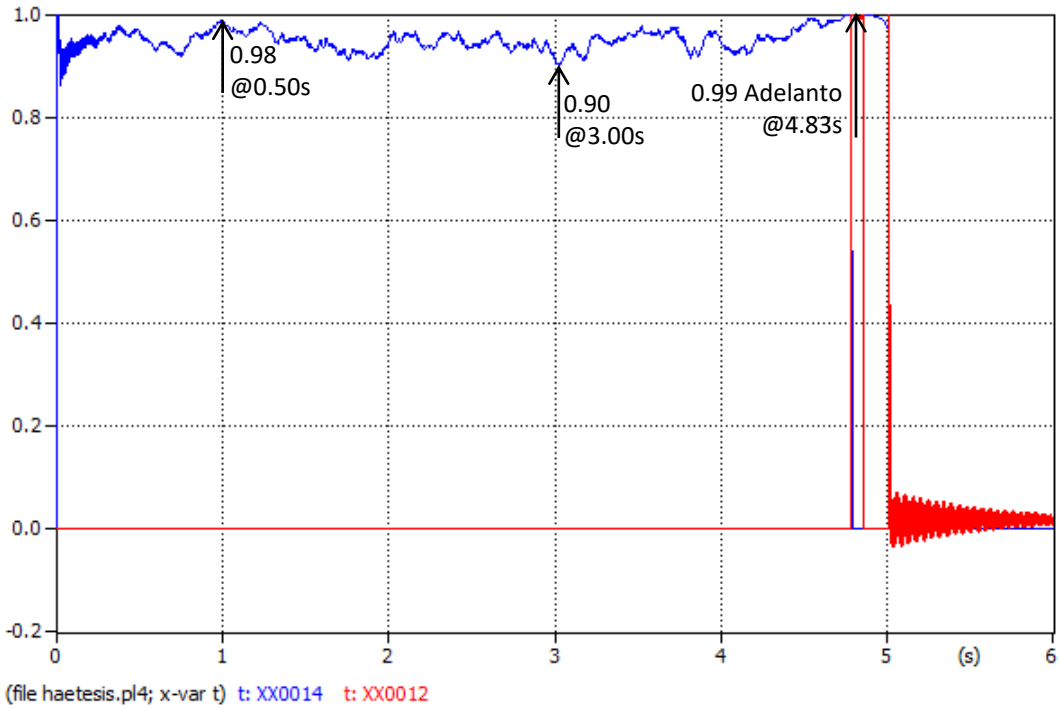
tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
0+	78.98	44.42	90.62	0.87
0.5	77.22	23.28	80.66	0.96
1	67.05	12.88	68.27	0.98
1.5	76.44	24.41	80.24	0.95
2	69.4	23.38	73.23	0.95
2.5	68.65	24.78	72.98	0.94
3	81.32	37.84	89.7	0.91
3.5	67.67	17.75	69.96	0.97
4	76.26	25.85	80.52	0.95
4.5	61.09	11.48	62.16	0.98
5	62.84	13.99	64.38	0.98
Promedio	71.54	23.64	75.70	0.95

Tabla 4-19 Análisis de la Gráfica 4-42 con el horno en operación

En la Gráfica 4-43, se observa que, el factor de potencia máximo medido es de 0.98 en 0.5 segundos y el valor mínimo medido después de la etapa transitoria es de 0.90 en 3.0 segundos

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
5+	18.28	-1.03	20.98	0.87
5.5	3.66	-28.64	28.64	0.13
6	2.52	-28.71	28.71	0.09
Promedio	8.15	-19.46	26.11	0.36

Tabla 4-20 Análisis de la Gráfica 4-42 con el horno fuera de operación



Gráfica 4-43 Medición de factor de potencia con filtro una sintonía

En la Tabla 4-20, se muestran los valores medidos cuando el horno está fuera de operación, pero el filtro se mantiene conectado, en esta tabla se observa que el centro de carga se vuelve prácticamente una carga capacitiva, generando una gran inyección de reactivos a la red. En la Gráfica 4-43 se observa que después de los 5 segundos, el factor de potencia pasa a estar en adelanto, siendo así un incumplimiento a 3.2.3

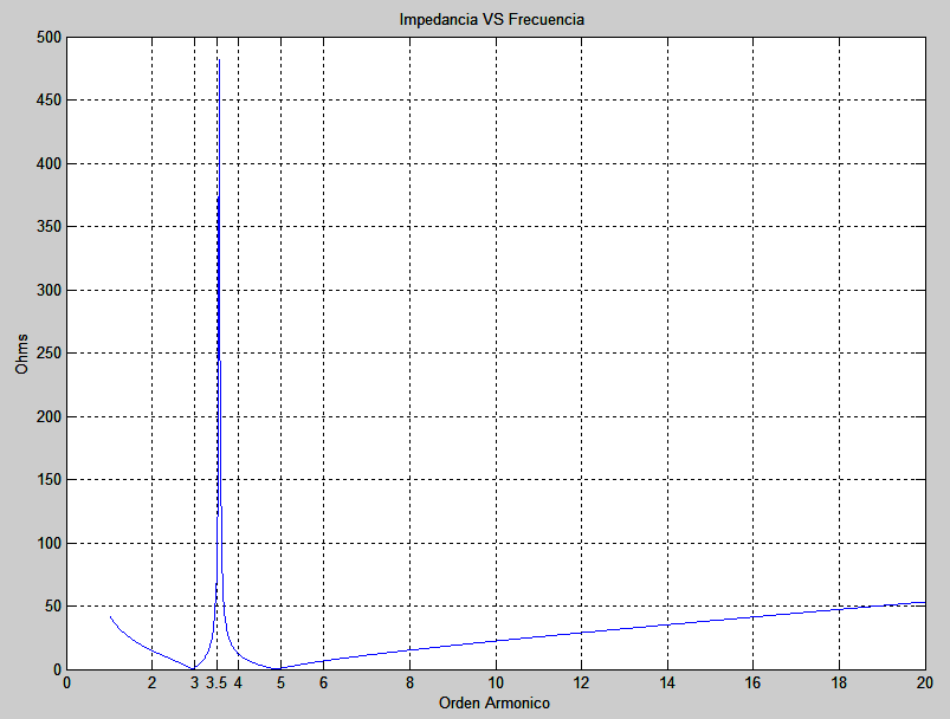
4.5 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO DOBLE SINTONÍA.

4.5.1 CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO DOBLE SINTONÍA

El filtro de armónicas se calculó para filtrar la tercera y quinta armónica, sintonizado al 98%, conforme los resultados obtenidos en la Tabla 4-7 y la Tabla 4-11, y para corregir el factor de potencia de 0.85 a 0.95, conforme a los resultados promedio obtenidos en la Tabla 4-12. La ubicación del filtro es en 34.5 kV como se indica en la Figura 4-1. Para el diseño de los parámetros del filtro de doble sintonía, se utilizó el algoritmo planteado en [33], a través del código de Matlab del Anexo B.3. Los valores de resistencia, inductancia y capacitancia introducidas en ATP se muestran en la Figura 4-12, en la Gráfica 4-44 se muestra el comportamiento de la reactancia del filtro contra las diferentes frecuencias, se observa que la frecuencia de resonancia es en aproximadamente el armónico 3.5.

```
El valor del banco de capacitores calculado es (MVAR)  2.583845e+001

Introduce el tamaño del banco de capacitores comercial propuesto en MVAR:
26

Los parametros del Filtro Doble Sintonia son:

El valor del Capacitor 1 es:

c1 =

    5.794340853307119e-005

El valor del Inductor 1 es:

l1 =

   0.00743759713521

El valor del Inductor 2 es:

l2 =

   0.00211558318513

El valor del Capacitor 2 es:

c2 =

    2.616507041571496e-004

El valor del valor de la resistencia amortiguadora (R) es 537
```

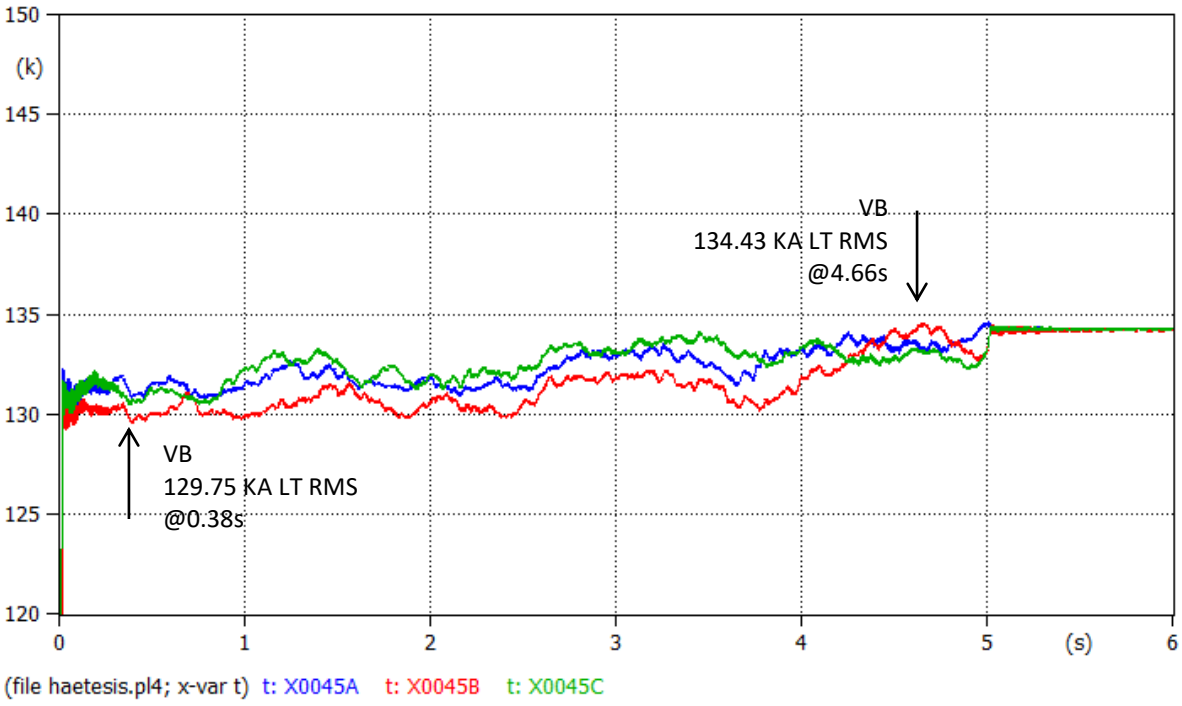
Figura 4-12 Datos de filtro doble sintonía introducidos a ATP



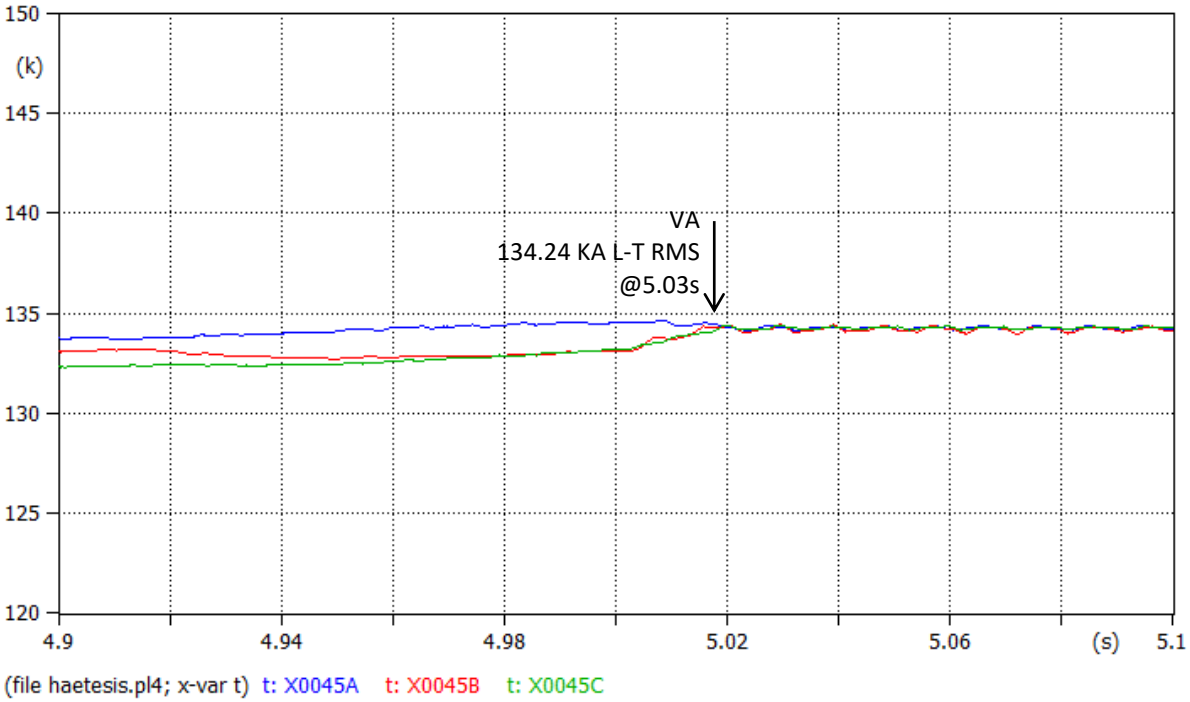
Gráfica 4-44 Reactancia vs frecuencia filtro doble sintonía

4.5.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE

En la Gráfica 4-45 se muestra el voltaje medido para cada una de las fases en el punto de común acoplamiento con el filtro de doble sintonía instalado, el voltaje mínimo medido, antes de la salida del horno, corresponde a la Fase B en 0.38 segundos, con un valor de 129.75 KV L-T RMS, equivalente al 97.71% de la tensión nominal; el valor de tensión máxima medida, antes de la salida del horno, corresponde a la Fase B en 4.66 segundos, con un valor de 134.43 KV L-T RMS, equivalente al 101.24% de la tensión nominal. En la Gráfica 4-60, se observa que desde el segundo 4.5 la carga se reduce a menos de una tercera parte de la potencia nominal, lo que origina que la sobretensión generada por el banco de capacitores, se presente antes de la salida .En la Gráfica 4-46 se observa que una vez que el horno se desconecta, la sobretensión se mantiene, sin embargo, los valores de tensión medidos se encuentran dentro de las variaciones de tensión que un centro de carga debe de soportar en condiciones de operación normal conforme a la Tabla 3-2.



Gráfica 4-45 Medición de voltaje con filtro doble sintonía

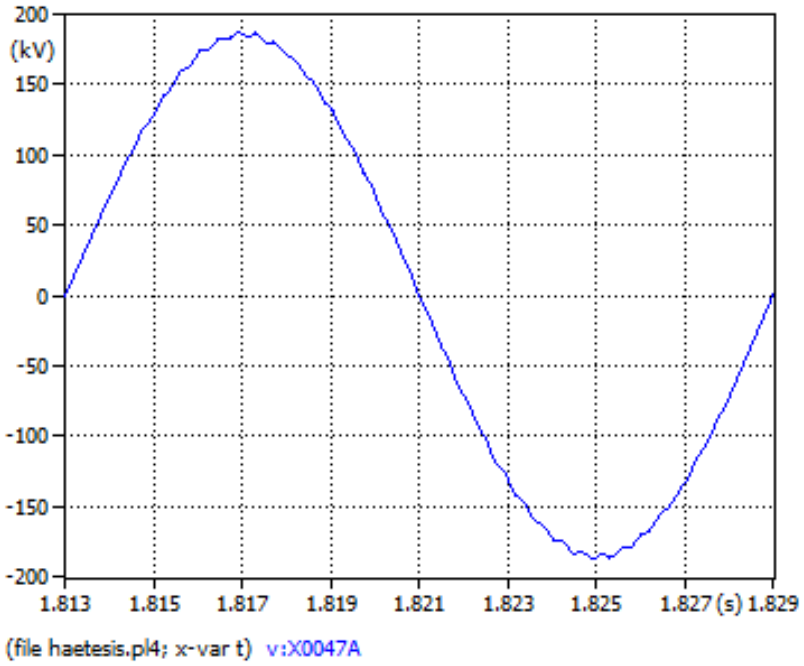


Gráfica 4-46 Medición de sobretensión por salida de horno con filtro doble sintonía

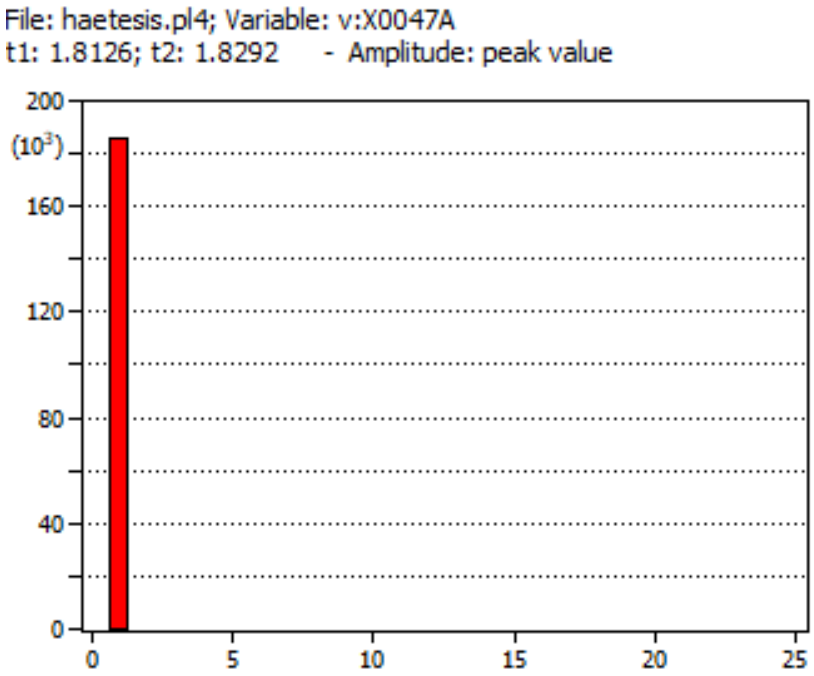
De la Gráfica 4-47 a la Gráfica 4-52 se observa la forma de onda de voltaje y su espectro armónico para cada una de las fases, durante un ciclo en estado estable, en la Tabla 4-21, se realizó la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-8.

Fase	Límite de distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THDV%
	1.0 %	1.5 %
Fase A	7.ª – 0.09%	0.15%
Fase B	3.ª - 0.11%	0.19%
Fase C	3.ª - 0.17%	0.19%

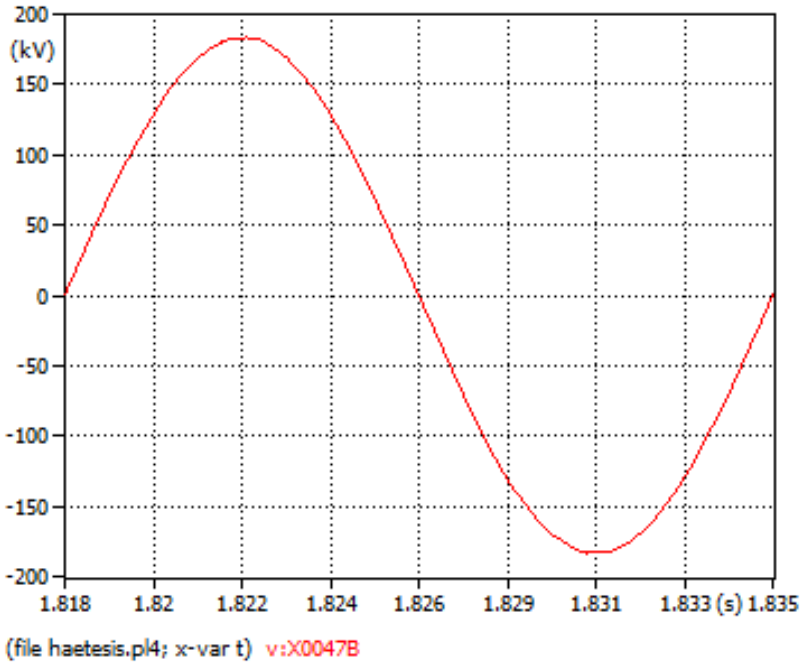
Tabla 4-21 Comparación de las componentes armónicas de voltaje con filtro una sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3 8



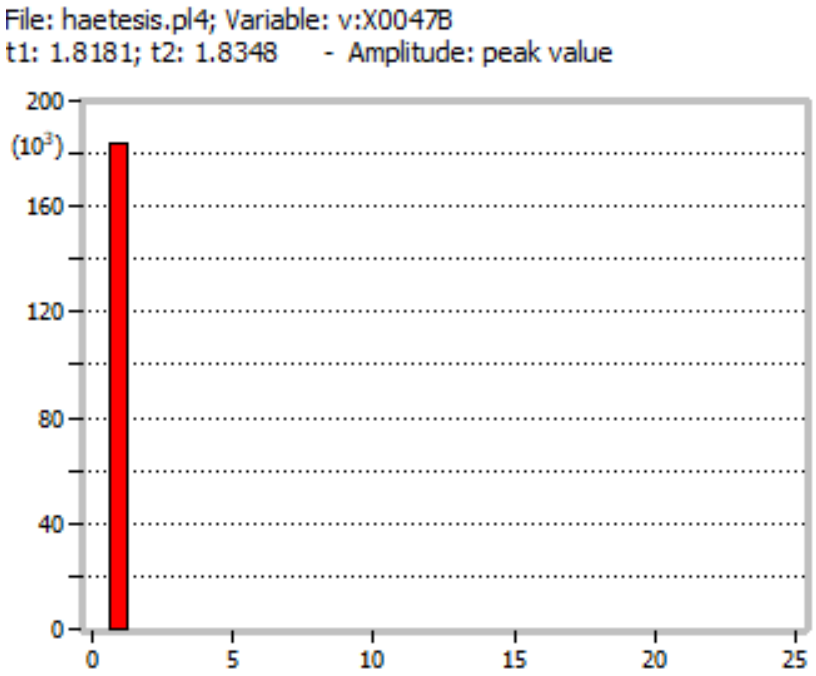
Gráfica 4-47 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase A



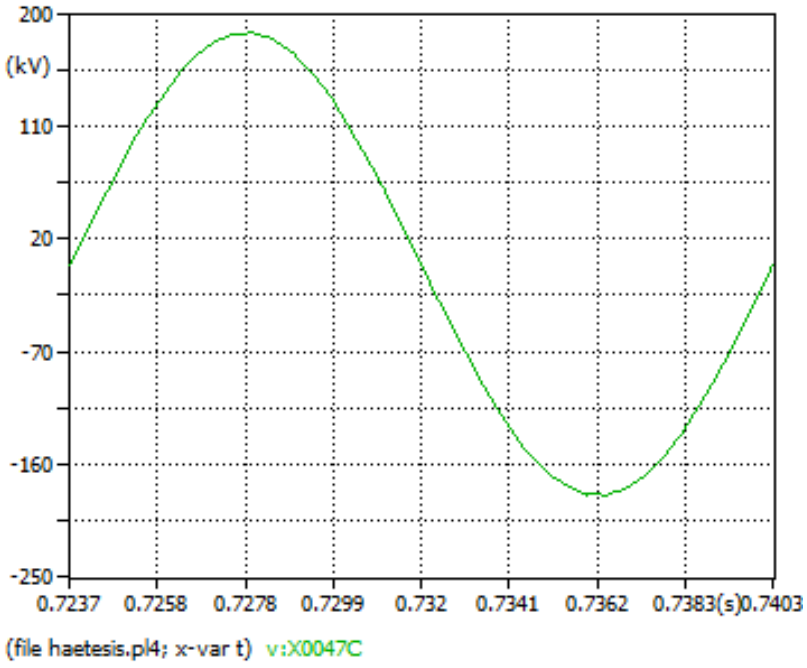
Gráfica 4-48 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase A



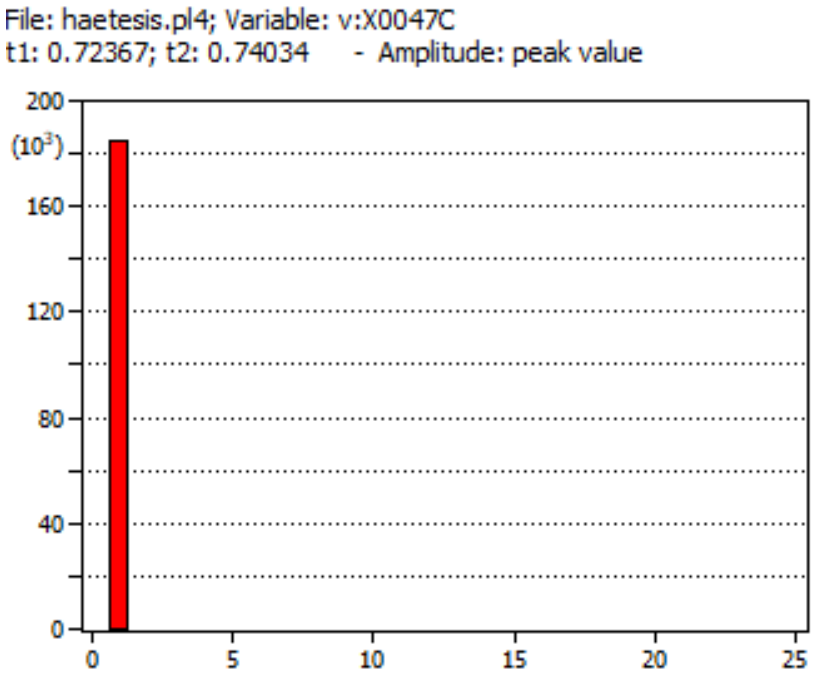
Gráfica 4-49 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase B



Gráfica 4-50 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase B



Gráfica 4-51 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro doble sintonía – Fase C



Gráfica 4-52 Espectro armónico de voltaje con filtro doble sintonía – Fase C

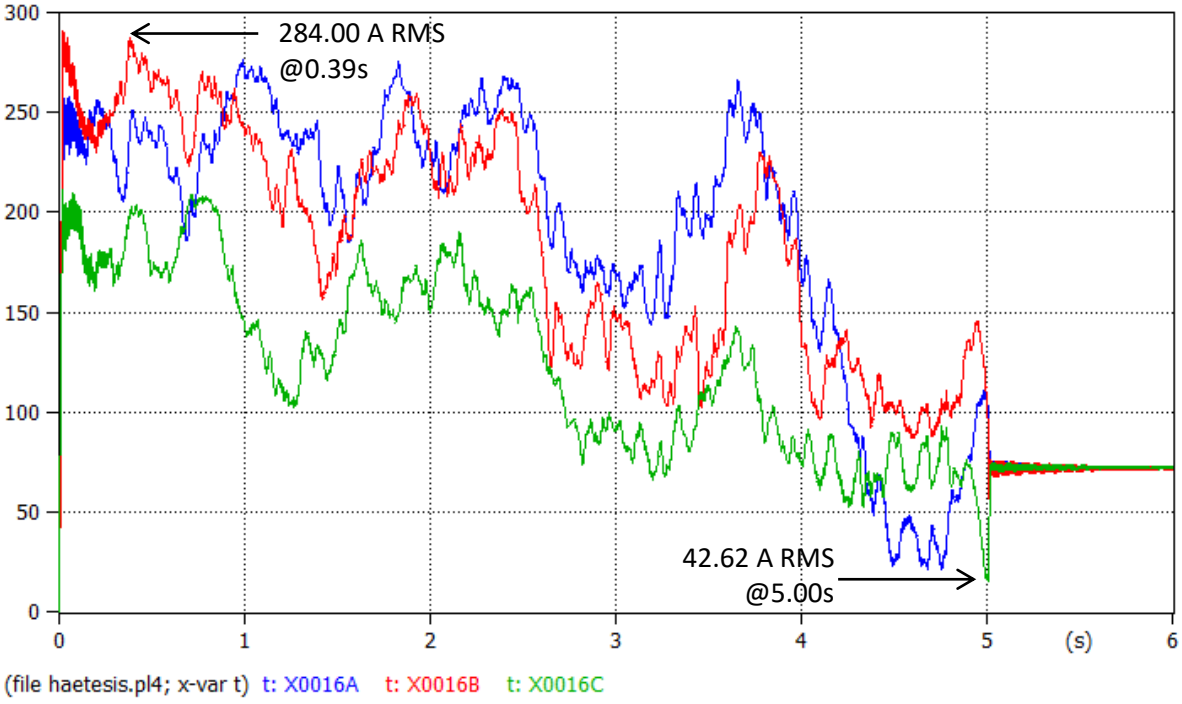
De la Tabla 4-21, se observa, que las componentes armónicas individuales, como la distorsión armónica total presentes en voltaje, se encuentran dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-8 para cada una de las fases, también se observa que el contenido armónico disminuyó respecto a las mediciones realizadas con el filtro de una sintonía. En la Tabla 4-22 se detalla el contenido armónico presente en voltaje hasta el armónico número 24.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: v:X0047A				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0047B				File: haetesis.pl4; Variable: v:X0047C			
t1: 1.8126; t2: 1.8292 - Amplitude: peak value				t1: 1.8181; t2: 1.8348 - Amplitude: peak value				t1: 0.72367; t2: 0.74034- mplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	33.7494	0		0	-39.2322	0		0	16.5043	0	
1	185720	95.7503	100.00%	1	183650	-23.5371	100.00%	1	184806	-148.18	100%
2	128.949	-36.9143	0.07%	2	51.4108	121.756	0.03%	2	80.8712	-74.2972	0.04%
3	65.5388	-53.5785	0.04%	3	194.975	-18.5638	0.11%	3	313.361	17.6737	0.17%
4	62.2088	148.247	0.03%	4	168.038	-67.3026	0.09%	4	69.7128	-121.56	0.04%
5	80.6264	-58.2773	0.04%	5	53.6951	68.4379	0.03%	5	23.0579	139.215	0.01%
6	26.6946	30.5828	0.01%	6	11.7153	112.436	0.01%	6	16.3004	-134.177	0.01%
7	163.777	124.73	0.09%	7	97.9931	-97.9089	0.05%	7	55.2875	55.3094	0.03%
8	24.1454	-125.138	0.01%	8	26.8625	29.1633	0.01%	8	29.7433	34.336	0.02%
9	12.7264	-149.347	0.01%	9	106.54	97.5981	0.06%	9	62.4167	45.1008	0.03%
10	23.0346	41.0394	0.01%	10	21.1211	-84.0289	0.01%	10	9.37402	100.583	0.01%
11	46.6464	-26.6005	0.03%	11	40.7805	26.1193	0.02%	11	14.7533	56.7831	0.01%
12	19.9479	-140	0.01%	12	23.5199	-143.646	0.01%	12	4.62714	33.2729	0.00%
13	32.2692	132.231	0.02%	13	102.655	-95.4117	0.06%	13	75.6295	-29.1093	0.04%
14	16.5749	66.1961	0.01%	14	17.6987	144.863	0.01%	14	2.84185	144.209	0.00%
15	74.919	-132.478	0.04%	15	87.6412	129.257	0.05%	15	22.7367	-1.66789	0.01%
16	12.5929	25.5721	0.01%	16	9.42729	111.429	0.01%	16	8.29002	-124.385	0.00%
17	39.0423	19.4899	0.02%	17	47.9435	83.17	0.03%	17	39.8951	-128.755	0.02%
18	7.21456	-121.541	0.00%	18	11.3724	-31.4256	0.01%	18	7.56004	-45.0195	0.00%
19	29.0261	112.852	0.02%	19	68.7752	-50.0395	0.04%	19	34.4177	-105.107	0.02%
20	11.3675	-82.9858	0.01%	20	11.6682	-156.272	0.01%	20	9.61922	103.576	0.01%
21	57.5157	-114.653	0.03%	21	8.67136	61.4746	0.00%	21	24.4715	-164.403	0.01%
22	13.4934	133.038	0.01%	22	13.4411	64.9575	0.01%	22	11.9722	95.5574	0.01%
23	27.7607	53.8955	0.01%	23	44.0255	164.621	0.02%	23	25.0702	157.783	0.01%
24	3.95047	-22.9373	0.00%	24	22.6235	-49.8724	0.01%	24	10.1571	126.877	0.01%
THDV - FASE A			0.15%	**THDV - FASE B**			0.19%	**THDV - FASE C**			0.19%

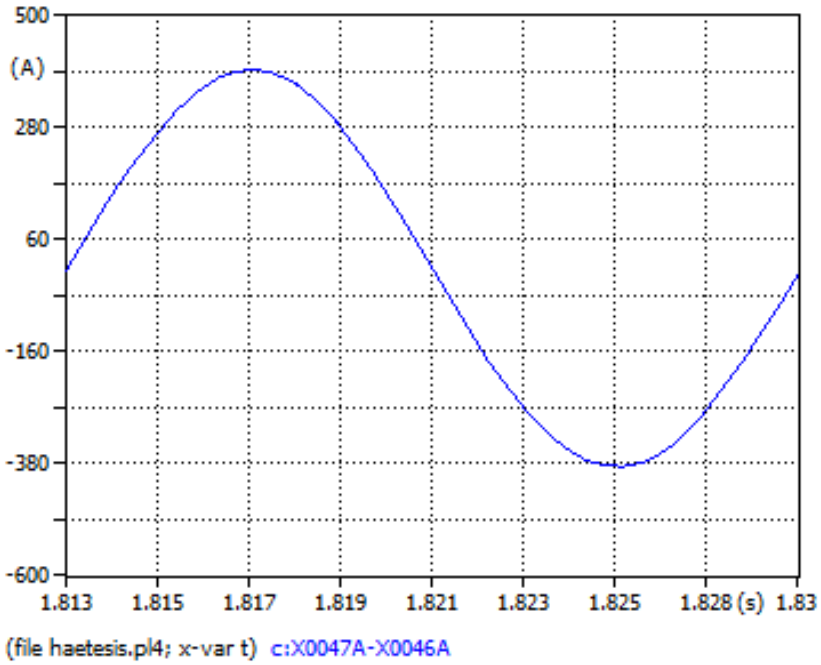
Tabla 4-22 THD de voltaje con filtro doble sintonía

4.5.3 MEDICIÓN DE CORRIENTE

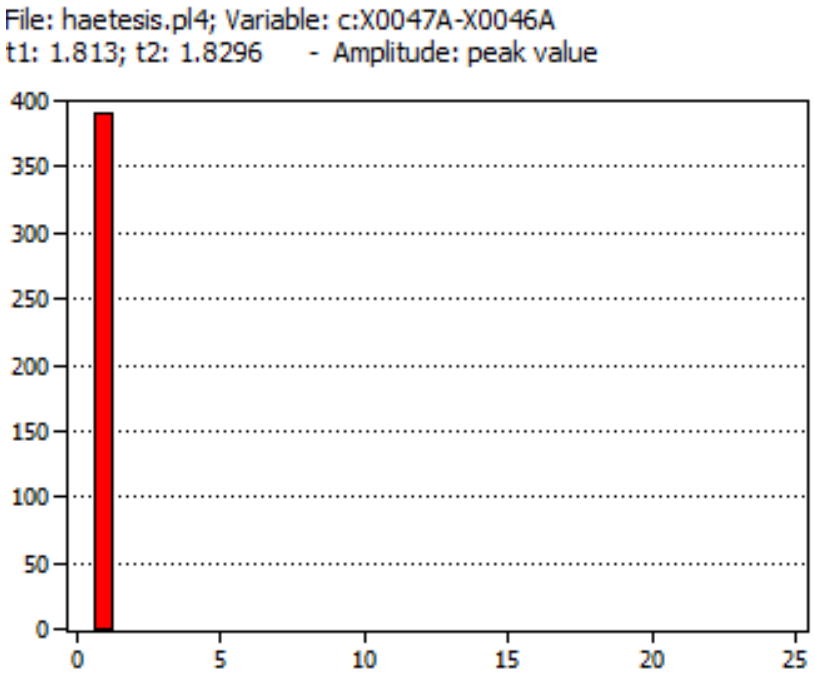
En la Gráfica 4-53 se muestra el comportamiento de la corriente con el filtro de doble sintonía instalado, se observa que la corriente máxima presente se encuentra en la Fase B, en 0.39 segundos, con un valor de 284.00 A RMS y la corriente mínima se encuentra en la Fase C, en 5.00 segundos, con un valor de 41.62 A RMS.



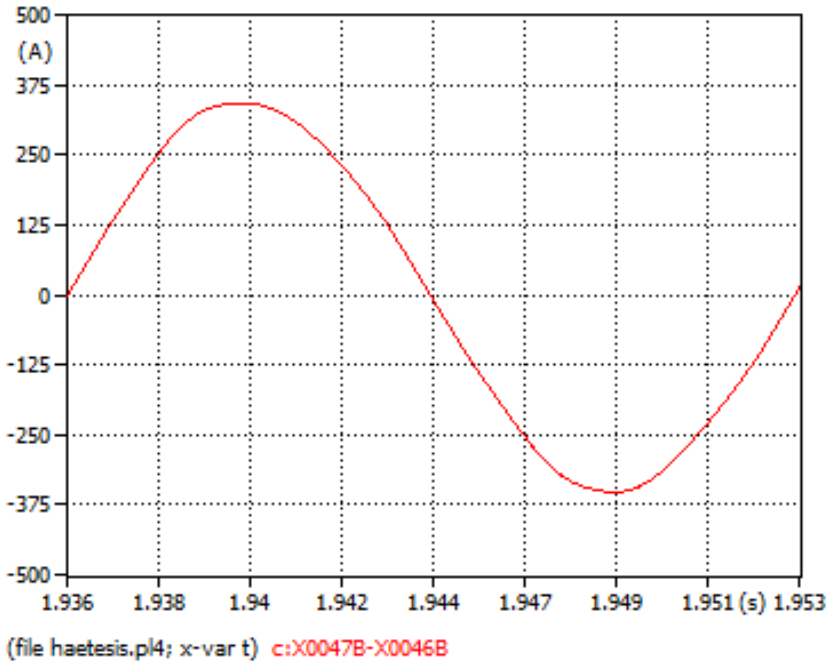
Gráfica 4-53 Medición de corriente con filtro doble sintonía



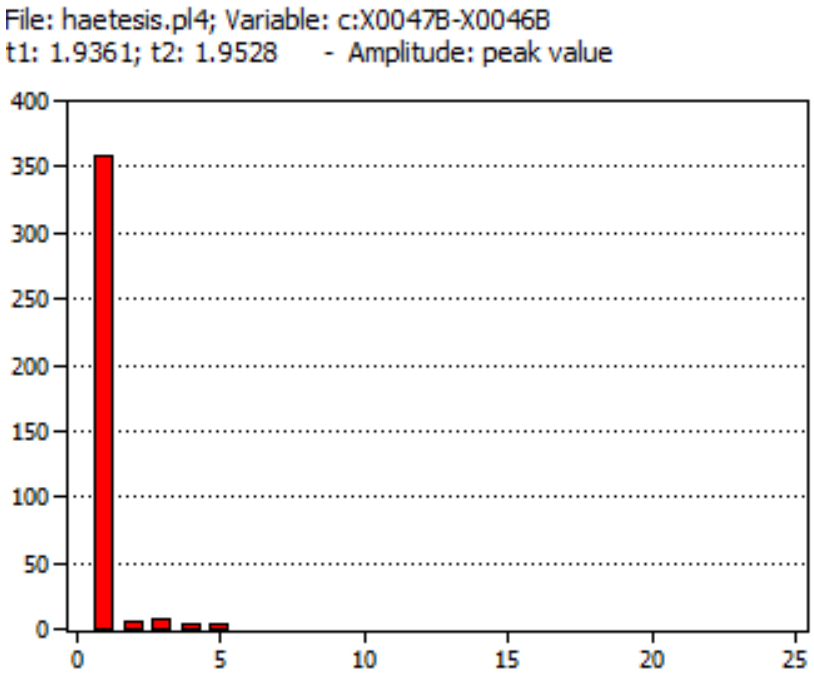
Gráfica 4-54 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía– Fase A



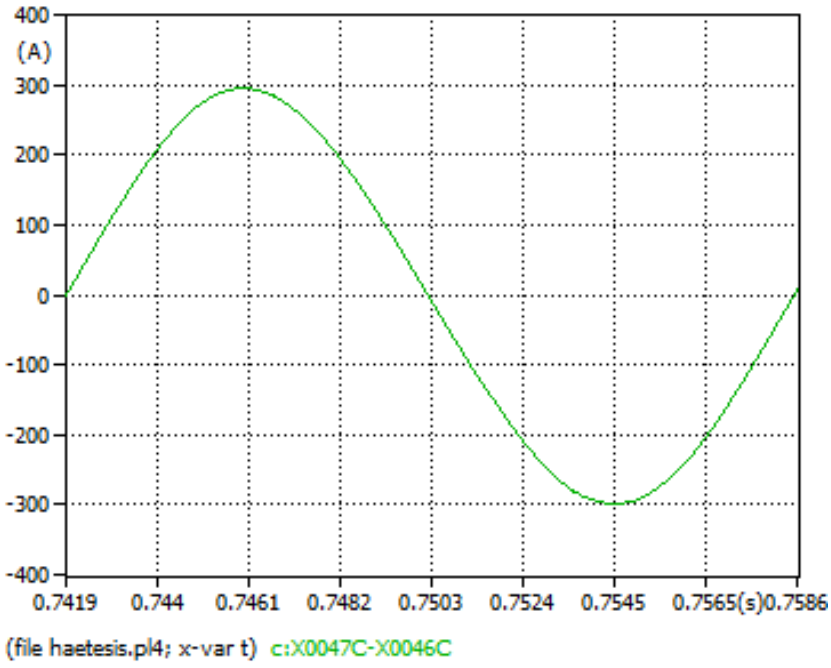
Gráfica 4-55 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía– Fase A



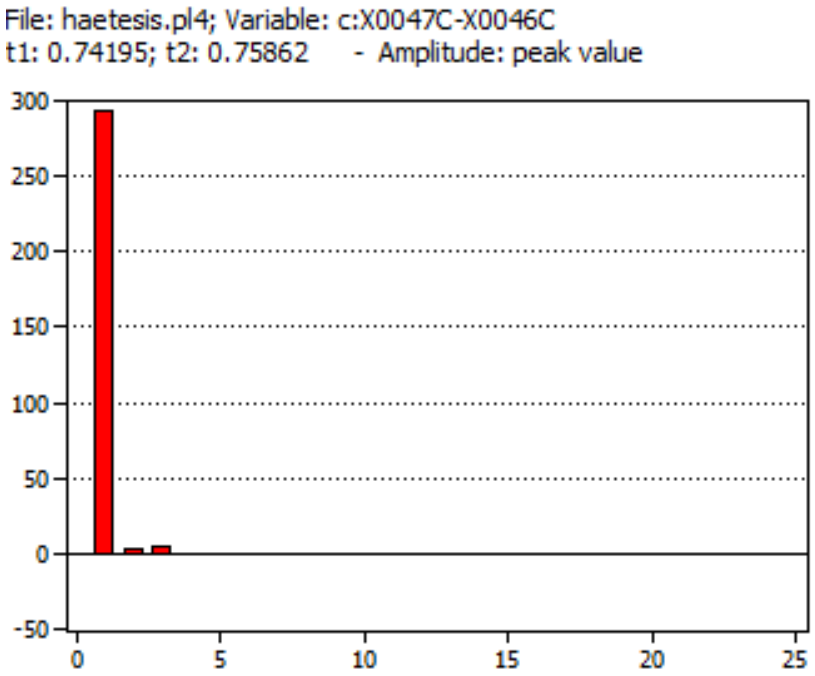
Gráfica 4-56 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía – Fase B



Gráfica 4-57 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía – Fase B



Gráfica 4-58 Análisis de forma de onda de corriente con filtro doble sintonía – Fase C



Gráfica 4-59 Espectro armónico de corriente con filtro doble sintonía – Fase C

De la Gráfica 4-54 a la Gráfica 4-59 se observa la forma de onda de corriente y su espectro armónico para cada una de las fases, durante un ciclo en estado estable; en la Tabla 4-17, se realiza la comparación de las componentes armónicas presentes contra los límites establecidos en la Tabla 3-7.

Impedancia relativa	Límites para componentes armónicas impares En % de IL				Distorsión armónica total THDC%
	Armónicas < 11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 24	
Icc/IL <50	2.0%	1.0%	0.75%	0.30%	2.5
Fase A	7.ª – 0.40%	15.ª – 0.10%	17.ª – 0.07%	23.ª – 0.05%	0.86%
Fase B	3.ª – 1.68%	11.ª – 0.18%	19.ª – 0.10%	23.ª – 0.06%	2.39%
Fase C	3.ª – 1.54%	13.ª – 0.09%	17.ª – 0.08%	23.ª – 0.04%	1.76%

Tabla 4-23 Comparación de las componentes armónicas de corriente con filtro doble sintonía, presentes con los límites de la Tabla 3 7

De la Tabla 4-23, se observa que el contenido armónico total, disminuyó respecto a las mediciones realizadas con el filtro de una sintonía, obteniendo valores que se encuentra dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-7. El contenido armónico se detalla en la Tabla 4-24, considerando hasta el armónico 24.

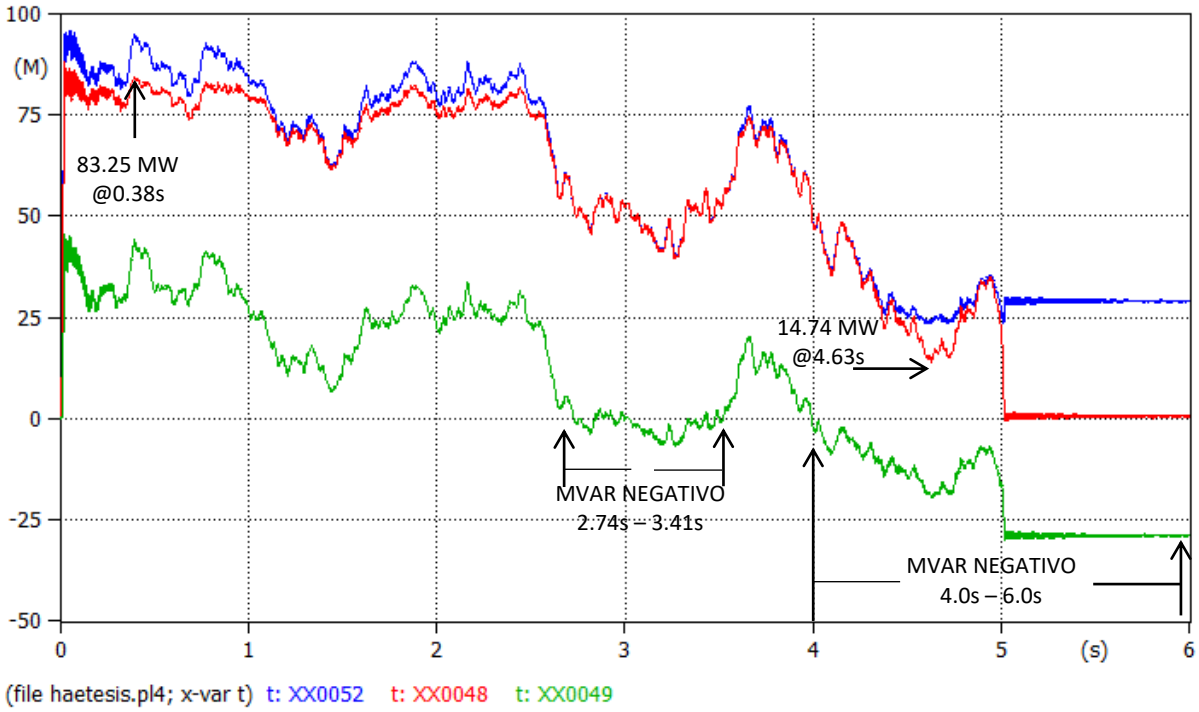
MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).				MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: c:X0047A-X0046A				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0047B-X0046B				File: haetesis.pl4; Variable: c:X0047C-X0046C			
t1: 1.813; t2: 1.8296 - Amplitude: peak value				t1: 1.9361; t2: 1.9528 - Amplitude: peak value				t1: 0.74195; t2: 0.75862-Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund	Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	0.812355	0		0	0.541424	0		0	-1.98463	0	
1	389.989	87.4495	100.00%	1	356.606	-86.1754	100.00%	1	293.003	178.613	100%
2	1.68282	74.5869	0.43%	2	4.0319	-139.179	1.13%	2	1.75438	-10.0677	0.60%
3	1.31935	-22.6467	0.34%	3	5.98436	96.7146	1.68%	3	4.50621	-0.573744	1.54%
4	0.656212	-64.1537	0.17%	4	2.56418	74.002	0.72%	4	1.28552	178.011	0.44%
5	1.31522	58.0435	0.34%	5	1.90254	-98.1012	0.53%	5	0.677292	-31.3742	0.23%
6	0.707753	159.804	0.18%	6	1.18152	-160.114	0.33%	6	0.512992	162.627	0.18%
7	1.57198	-133.088	0.40%	7	1.68575	141.373	0.47%	7	0.100289	64.3759	0.03%
8	0.56491	-18.4068	0.14%	8	0.889069	37.7194	0.25%	8	0.439676	153.728	0.15%
9	0.348373	60.3323	0.09%	9	1.44486	-53.9597	0.41%	9	0.230698	34.6702	0.08%
10	0.441315	153.884	0.11%	10	0.645936	-137.641	0.18%	10	0.235424	147.652	0.08%
11	0.11572	-100.619	0.03%	11	0.645869	162.728	0.18%	11	0.122855	-35.1392	0.04%
12	0.35393	-30.1827	0.09%	12	0.49562	63.5355	0.14%	12	0.242492	134.113	0.08%
13	0.160001	83.1845	0.04%	13	0.81462	-4.23061	0.23%	13	0.272474	5.30827	0.09%
14	0.307531	151.225	0.08%	14	0.441514	-109.738	0.12%	14	0.197743	133.058	0.07%
15	0.396836	-90.9134	0.10%	15	0.522356	166.703	0.15%	15	0.186183	-27.79	0.06%
16	0.196045	-30.1109	0.05%	16	0.376048	85.5765	0.11%	16	0.122862	131.836	0.04%
17	0.278627	69.0875	0.07%	17	0.283944	21.1725	0.08%	17	0.224178	-48.8125	0.08%
18	0.186794	141.615	0.05%	18	0.329284	-83.7021	0.09%	18	0.147708	122.161	0.05%
19	0.255631	-137.006	0.07%	19	0.365119	-153.849	0.10%	19	0.199778	-48.8966	0.07%
20	0.199684	-36.9263	0.05%	20	0.290615	108.239	0.08%	20	0.124966	132.293	0.04%
21	0.231749	21.9874	0.06%	21	0.227623	21.448	0.06%	21	0.130137	-70.1785	0.04%
22	0.172267	140.554	0.04%	22	0.281055	-59.7508	0.08%	22	0.102074	119.82	0.03%
23	0.176404	-150.284	0.05%	23	0.198028	-133.592	0.06%	23	0.123529	-80.9484	0.04%
24	0.155991	-47.6976	0.04%	24	0.244282	128.621	0.07%	24	0.110851	109.369	0.04%
THDC - FASE A			0.86%	**THDC - FASE B**			2.39%	**THDC - FASE C**			1.76%

Tabla 4-24 THD de corriente con filtro doble sintonía

4.5.4 MEDICIÓN DE POTENCIA

El comportamiento de la potencia aparente en MVA (Azul), potencia activa en MW (Rojo) y potencia reactiva en MVAR (Verde), se muestran en la Gráfica 4-60; en la Tabla 4-25, se analizan y se obtienen sus valores promedios, las lecturas se tomaron cada 0.5 segundos, haciendo un símil a la medición cinco-minutal indicada en 3.2.3. En esta tabla se observa que para los periodos en los que se tomaron las lecturas, el factor de potencia en atraso promedio es de 0.95, valor que se buscó en el diseño del filtro y que cumple con los requisitos de 3.2.3.

Sin embargo, en la misma gráfica, se observa que en varios puntos, la potencia activa del horno baja a tal punto, que la potencia reactiva pasa a ser negativa, generando que el filtro inyecte reactivos a la red, ocasionado que el factor de potencia este adelanto, tal como se muestra en la Gráfica 4-61, siendo así un incumplimiento a 3.2.3.



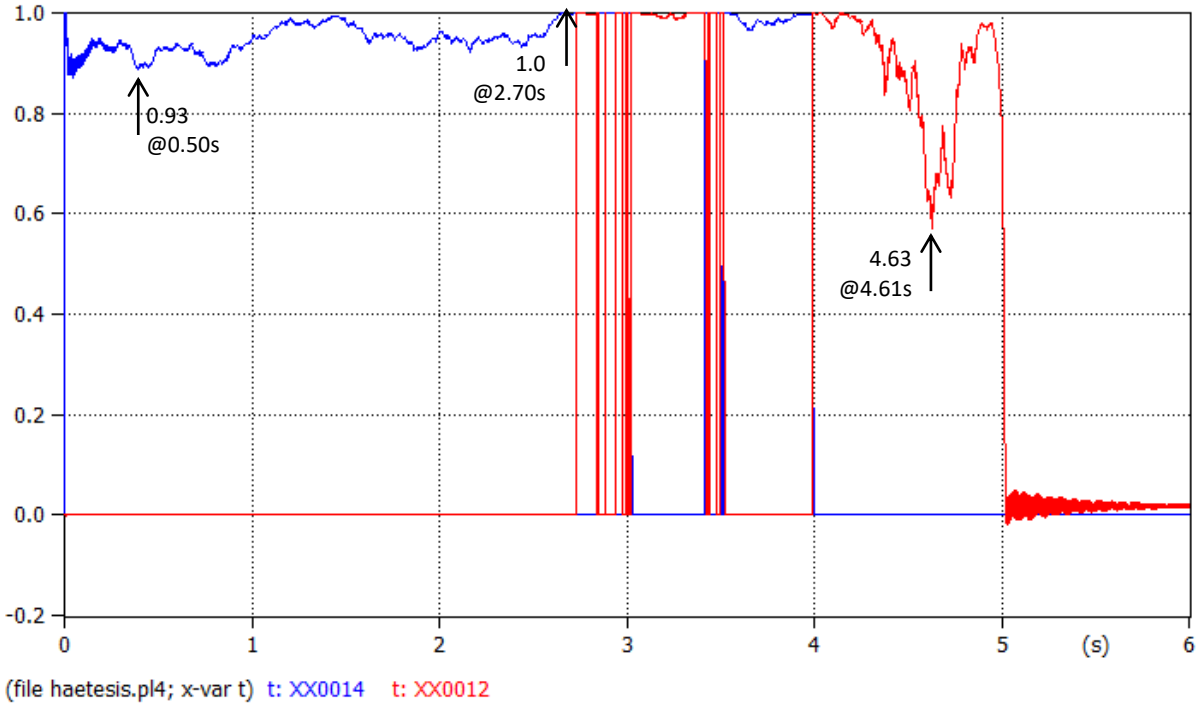
Gráfica 4-60 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con filtro doble sintonía

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
0+	84.89	37.87	92.95	0.91
0.5	81.16	32.82	87.54	0.93
1	79.49	26.97	83.94	0.95
1.5	70.91	15.21	72.52	0.98
2	77.46	25.77	81.66	0.95
2.5	74.87	22.58	78.2	0.96
3	52.67	0.09	52.67	1.00
3.5	53.16	-0.42	53.16	1.00
4	46.82	-3.02	46.92	1.00
4.5	20.99	-14.72	25.64	0.82
5	10.85	-23.54	25.92	0.42
Promedio	59.39	10.87	63.74	
Factor de potencia en atraso			0.95	
Factor de potencia en adelanto			0.81	

Tabla 4-25 Análisis de la Gráfica 4-60 con el horno en operación

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
5+	0.49	-29.95	29.95	0.02
5.5	0.42	-28.68	28.69	0.01
6	0.54	-29.04	29.04	0.02
Promedio	0.48	-29.22	29.23	0.02

Tabla 4-26 Análisis de la Gráfica 4-60 con el horno fuera de operación



Gráfica 4-61 Medición de factor de potencia con filtro doble sintonía

En la Tabla 4-26, se muestran los valores medidos cuando el horno está fuera de operación, pero el filtro se mantiene conectado, en esta tabla se observa que el centro de carga se vuelve prácticamente una carga capacitiva, generando una gran inyección de reactivos a la red.

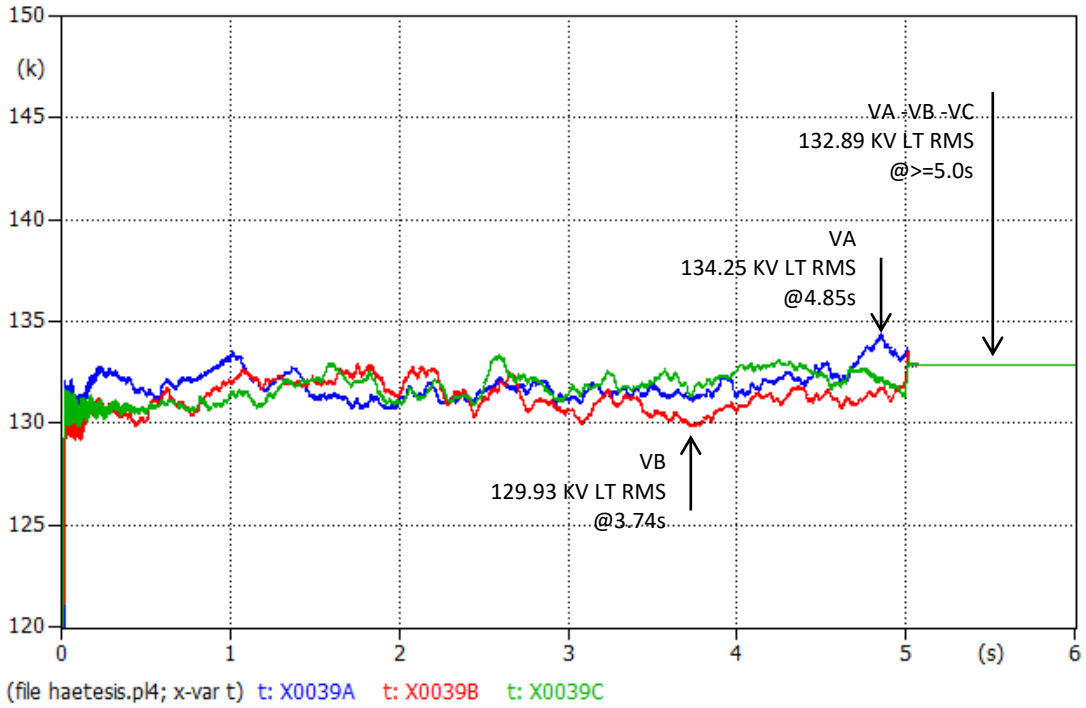
4.6 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA, CON DESCONEXIÓN SIMULTÁNEA DE HORNO Y FILTRO

4.6.1 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Con la finalidad de poder observar el comportamiento de la potencia reactiva, el factor de potencia y el perfil de voltaje en el punto de común acoplamiento, cuando el horno y el filtro se desconectan al mismo tiempo, se simuló, manteniendo el tiempo de simulación de 6 segundos, tal como se indica en la Figura 4-10, permitiendo así que los interruptores HVCB HORNO y HVCB FILTRO, indicados en la Figura 4-1, operen a los 5 segundos de simulación,

dando 1 segundo, para el análisis del comportamiento del sistema con el transformador en vacío. Para esta simulación se utilizó el filtro de una sintonía, tal como se especificó en la Figura 4-9.

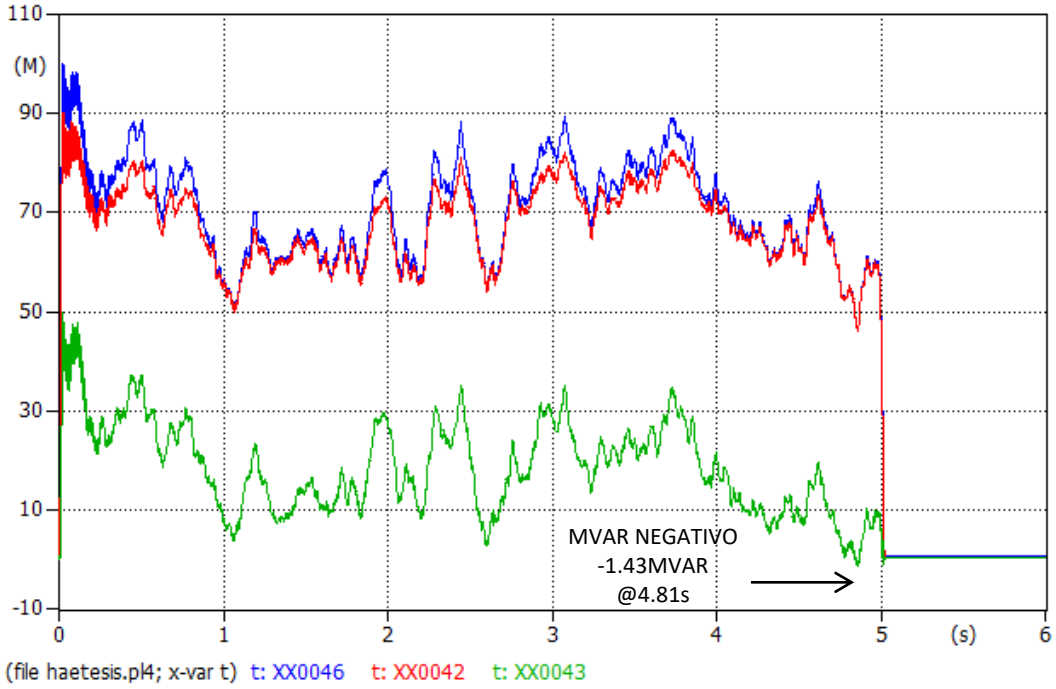
4.6.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE



Gráfica 4-62 Medición de voltaje con horno y filtro de una sintonía desconectados

En la Gráfica 4-62 se observa que una vez que el horno y el filtro se desconectan el nivel de tensión de las tres fases se estabiliza alcanzando un valor de 132.89 kV L-T RMS, que equivale al 100.10% de la tensión nominal. También se observa una sobretensión a los 4.85 segundos, con un valor de 134.25 kV L-T RMS, que equivale al 101.10% de la tensión nominal, ocasionado por la operación en baja carga del horno, tal como se puede apreciar en la Gráfica 4-63.

4.6.3 MEDICIÓN DE POTENCIA



Gráfica 4-63 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con horno y filtro una sintonía desconectados

En el análisis de los datos mostrados en la Tabla 4-27 y en la Tabla 4-28, se observa que, cuando el horno se encuentra en operación en conjunto con el filtro, el factor de potencia cumple con los requisitos de 3.2.3, sin embargo, en el momento en que el horno y el filtro se desconectan, el factor de potencia pasa a ser de 0.72 en atraso, debido a que el trasformador se encuentra conectado en vació y este es una carga plenamente inductiva. Con la desconexión del filtro se evita la inyección excesiva de reactivos a la red, sin embargo, el factor de potencia generado por el transformador en vació no cumple con los requisitos establecidos en 3.2.3

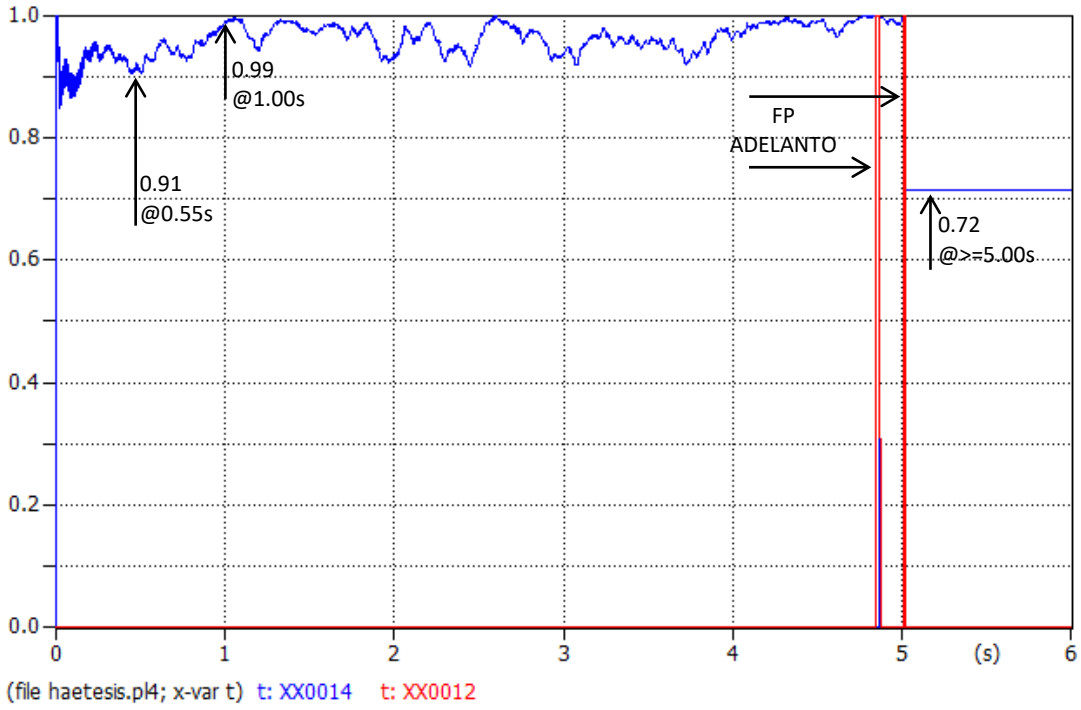
tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
0+	80.55	43.35	91.48	0.88
0.5	79.04	36.74	87.16	0.91
1	55.66	7.27	56.13	0.99
1.5	63.57	14.98	65.31	0.97
2	72.33	27.58	77.41	0.93
2.5	70.52	18.34	72.87	0.97
3	76.9	28.17	81.9	0.94
3.5	75.67	24.12	80.28	0.94
4	70.55	17.59	72.7	0.97
4.5	62.58	7.89	63.08	0.99
5	54.55	7.56	55.07	0.99
Promedio	69.27	21.24	73.04	0.95
Factor de potencia en atraso			0.95	
Factor de potencia en adelanto			---	

Tabla 4-27 Análisis de la Gráfica 4-63 con el horno y el filtro una sintonía en operación

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
5+	0.48	0.47	0.67	0.72
5.5	0.48	0.47	0.67	0.72
6	0.48	0.47	0.67	0.72
Promedio	0.48	0.47	0.67	0.72

Tabla 4-28 Análisis de la Gráfica 4-63 con el horno y el filtro una sintonía desconectados

En la Gráfica 4-64, se observa el comportamiento del factor de potencia, que después de los 5 segundos de simulación, una vez que el horno y el filtro se desconectaron, este se estabiliza en 0.72 en atraso, también se observa que el máximo factor de potencia en atraso presente es de 0.99 en 1 segundo, y el mínimo factor de potencia de potencia en atraso, después del transitorio, es de 0.91 en 0.55 segundos. También se observa que en el punto en que el horno opera en baja carga, el factor de potencia, por un instante, pasa a estar en adelanto.



Gráfica 4-64 Medición de factor de potencia con horno y filtro una sintonía desconectados

4.7 RESULTADOS SIMULACIÓN ATP CON FILTRO UNA SINTONÍA, CON DESCONEXIÓN SIMULTÁNEA DE HORNO Y FILTRO, CON COMPENSACIÓN EN PRIMARIO TRANSFORMADOR STEP DOWN

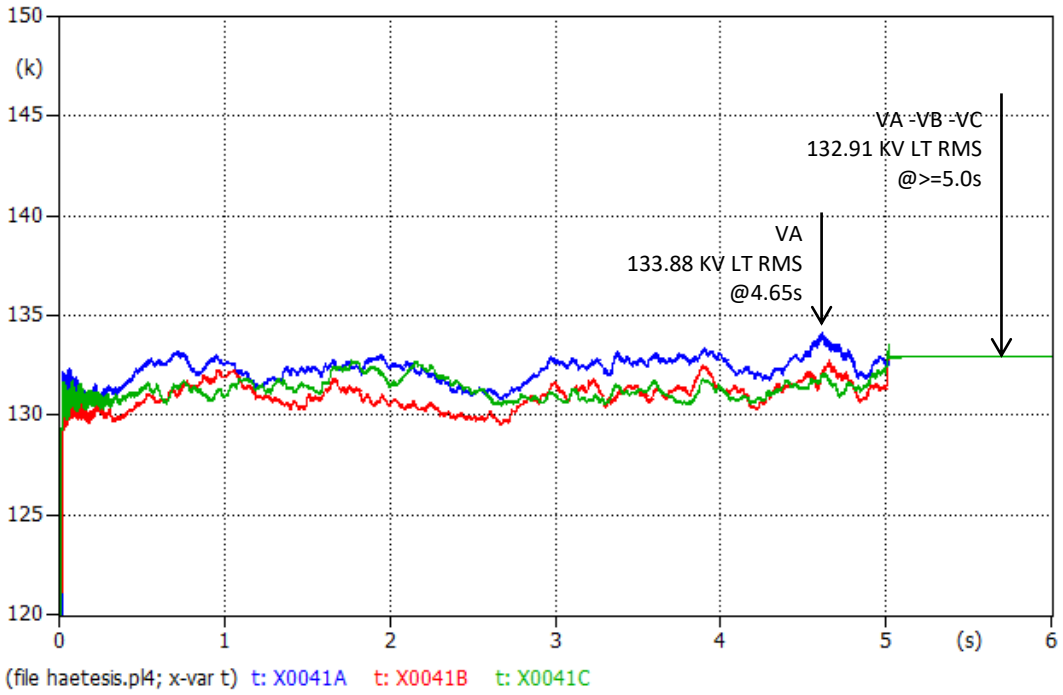
4.7.1 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

En esta corrida se buscó con un banco de capacitores fijo, compensar la potencia reactiva inductiva del transformador STEP DOWN, por lo que con los datos obtenidos de la Tabla 4-28, se dimensionó el tamaño del banco, este se instaló en 230 kV, en el primario del transformador STEP DOWN. La configuración del tiempo de simulación y de la apertura de los interruptores es como se especifica en 4.6.1. Las características del banco de capacitores se muestran en la Tabla 4-29.

Características del Banco	
Q nueva	0.13
Q banco	0.34
Capacitancia	1.69158E-08

Tabla 4-29 Características del banco de capacitores fijo para transformador STEP DOWN

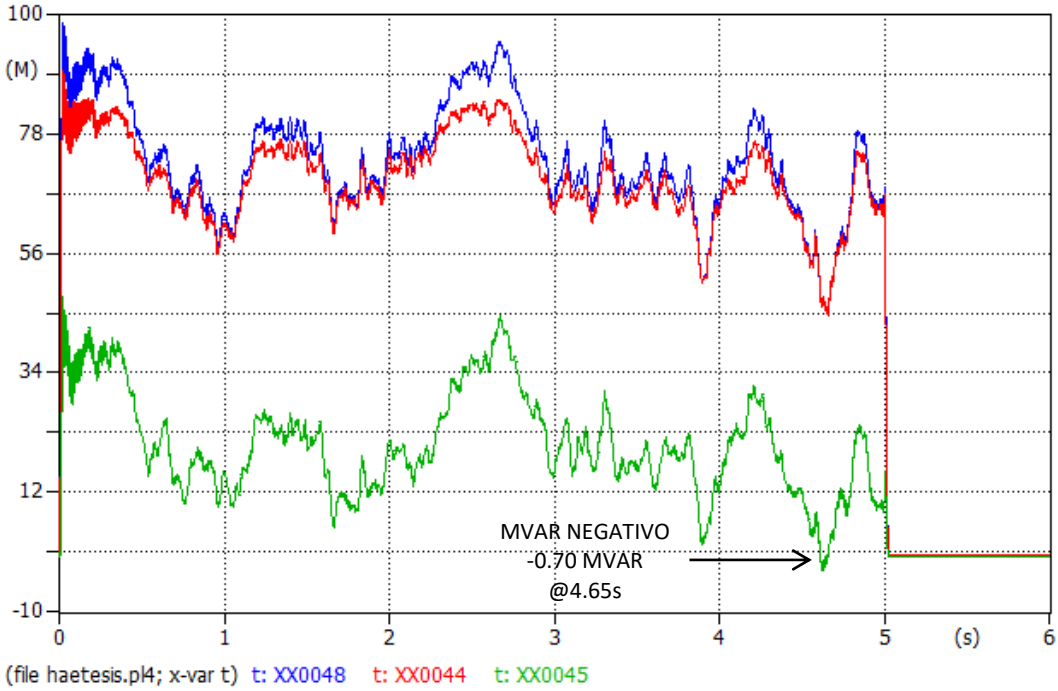
4.7.2 MEDICIÓN DE VOLTAJE



Gráfica 4-65 Medición de voltaje con horno y filtro de una sintonía desconectado, con compensación fija en primario transformador STEP DOWN

En la Gráfica 4-65 se observa que una vez que el horno y el filtro se desconectan el nivel de tensión de las tres fases se estabiliza alcanzando un valor de 132.91 kV L-T RMS, que equivale al 100.10% de la tensión nominal, también se observa una sobretensión a los 4.65 segundos, con un valor de 133.88 kV L-T RMS, que equivale al 100.82% de la tensión nominal, ocasionado por la operación en baja carga del horno, tal como se puede apreciar en la Gráfica 4-66

4.7.3 MEDICIÓN DE POTENCIA



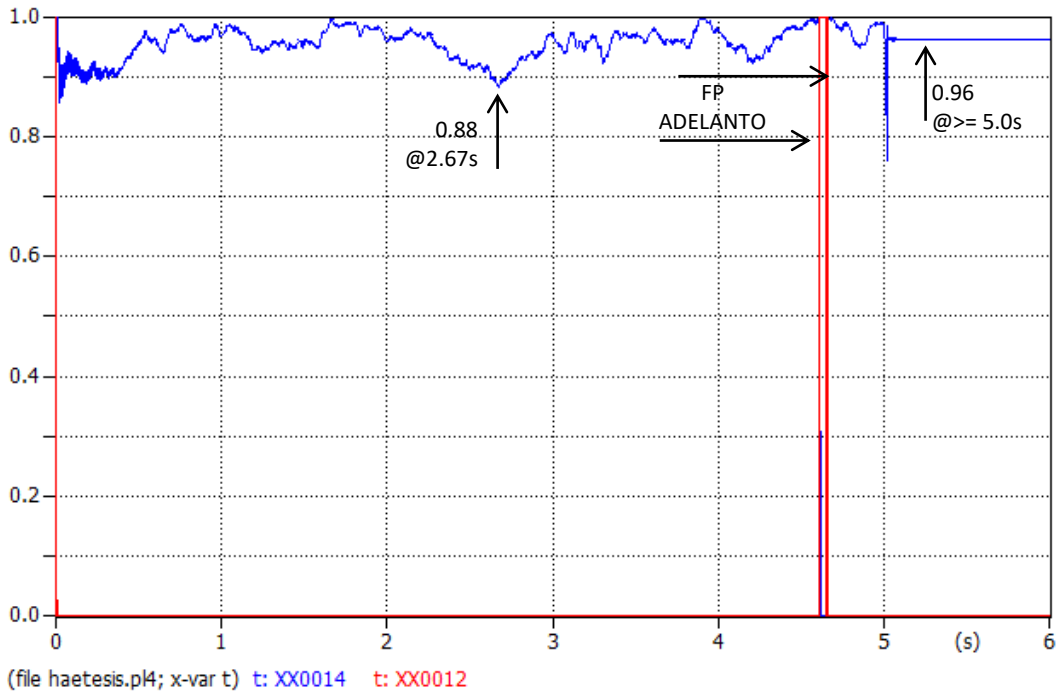
Gráfica 4-66 Medición de potencia activa, aparente y reactiva con horno y filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
0+	80.26	41.83	90.51	0.89
0.5	72.55	21.67	75.12	0.97
1	61.06	15.04	62.88	0.97
1.5	71.14	20.8	74.12	0.96
2	74.83	21.73	77.92	0.96
2.5	83.39	36.42	90.99	0.92
3	64.23	16.01	66.2	0.97
3.5	66.33	16.85	68.44	0.97
4	64.99	14.6	66.61	0.98
4.5	59.63	11.21	60.66	0.98
5	62.21	15.40	64.09	0.97
Promedio	69.15	21.05	72.50	0.96
Factor de potencia en atraso			0.96	
Factor de potencia en adelanto			---	

Tabla 4-30 Análisis de la Gráfica 4-66 con el horno y el filtro una sintonía en operación y compensación en primario transformador STEP DOWN

tiempo	MW	MVAR	MVA	FP
5+	0.48	0.13	0.5	0.96
5.5	0.48	0.13	0.5	0.96
6	0.48	0.13	0.5	0.96
Promedio	0.48	0.13	0.50	0.96

Tabla 4-31 Análisis de la Gráfica 4-66 con el horno y el filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN

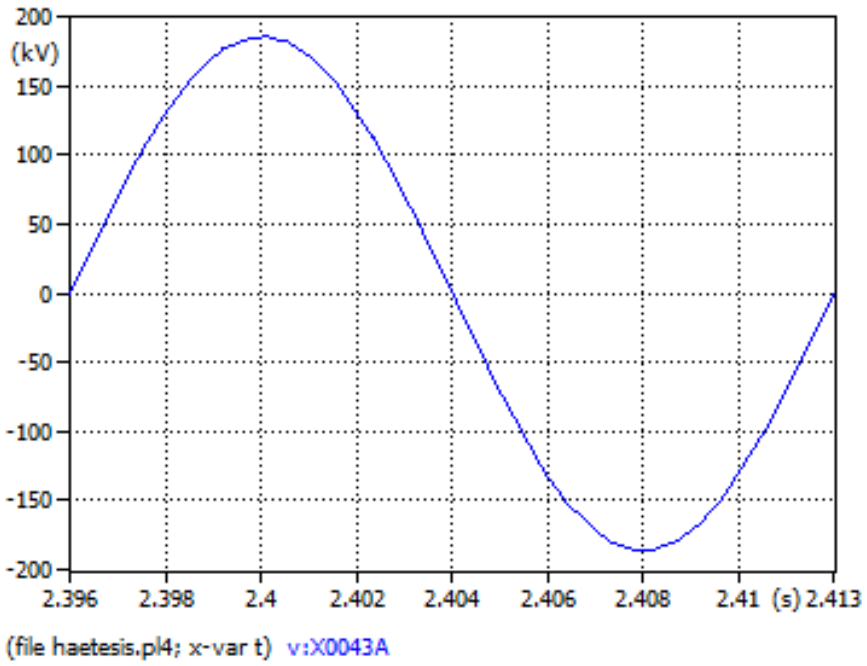


Gráfica 4-67 Medición de factor de potencia con horno y filtro una sintonía desconectados y compensación en primario transformador STEP DOWN

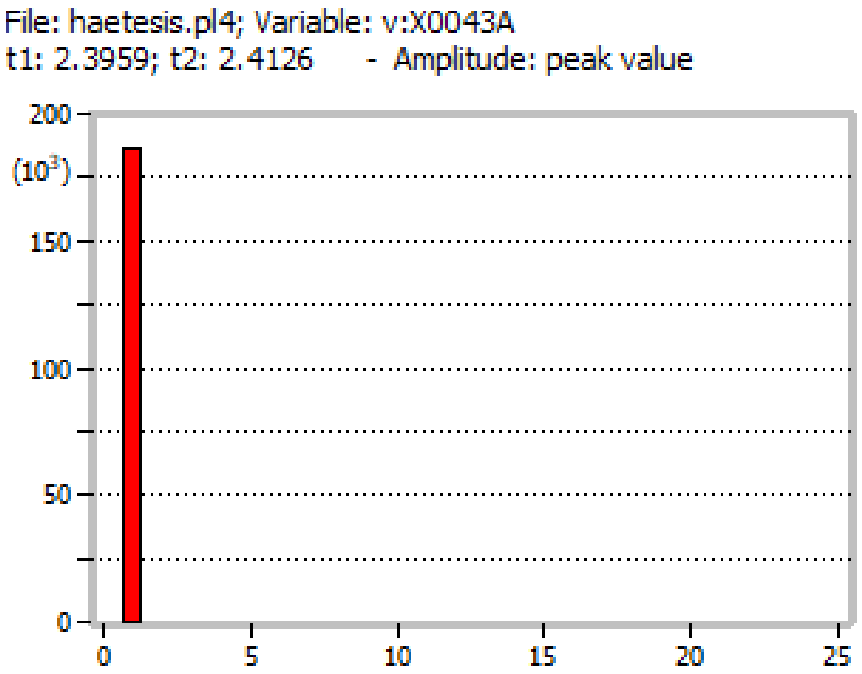
En el análisis de los datos mostrados en la Tabla 4-30 y en la Tabla 4-31, se observa que, cuando el horno se encuentra en operación en conjunto con el filtro, el factor de potencia promedio mejoro respecto 4.6, pasando de 0.95 a 0.96. También se observa que cuando el transformador opera en vacío, el banco de capacitores fijo compensa de forma adecuada la carga reactiva inductiva, obteniendo un factor de potencia de 0.96, un valor que cumple con los requisitos de 3.2.3.

4.7.4 COMPROBACIÓN DEL FILTRADO ARMÓNICO

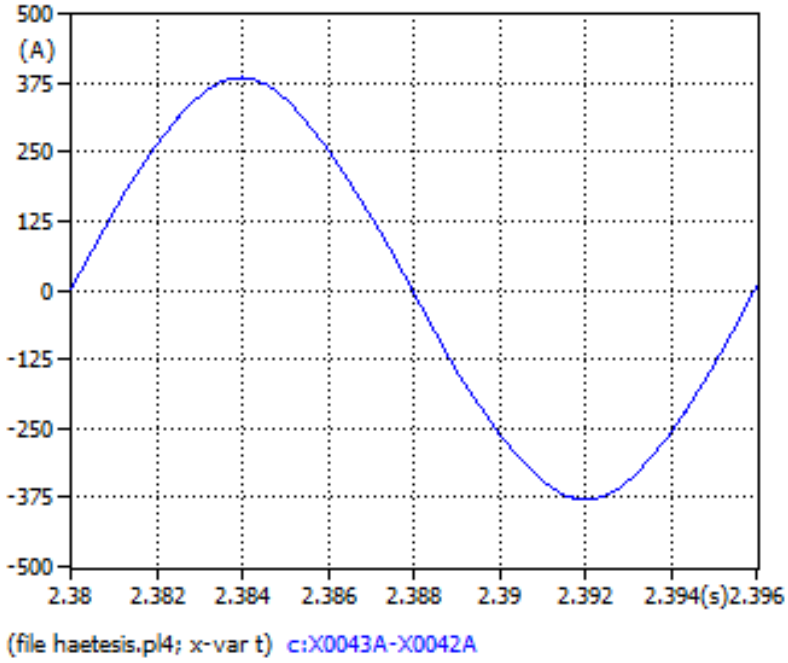
Ya que la configuración del sistema se vio afectada por la conexión del banco de capacitores fijo, se verificó, para la fase A, que el filtro armónico de una sola sintonía continúe filtrando de forma eficiente, el contenido armónico para el que fue calculado.



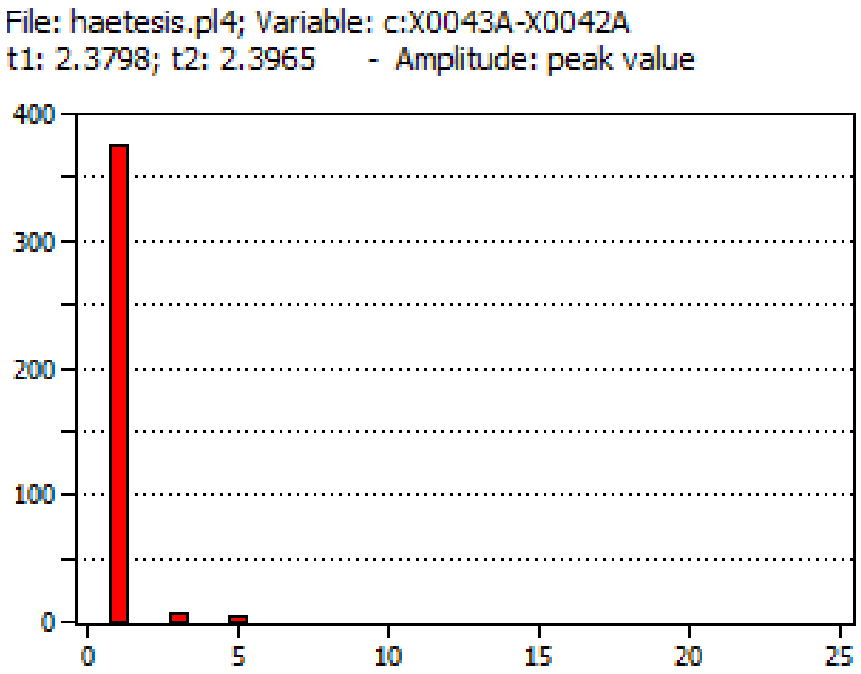
Gráfica 4-68 Análisis de forma de onda de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A



Gráfica 4-69 Espectro armónico de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A



Gráfica 4-70 Análisis de forma de onda de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD - Fase A



Gráfica 4-71 Espectro armónico de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario TR SD – Fase A

En la Tabla 4-32 y en la Tabla 4-33 se observa que, para la distorsión armónica total de voltaje y corriente, el filtro de una sintonía sigue operando de forma eficiente, incluso para el contenido armónico individual.

MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: v:X0043A			
t1: 2.3959; t2: 2.4126 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	-27.651	0	
1	185774	67.2094	100.00%
2	167.889	-110.035	0.09%
3	216.067	138.53	0.12%
4	70.7218	-83.287	0.04%
5	342.597	-162.629	0.18%
6	86.851	43.352	0.05%
7	95.9566	-95.0287	0.05%
8	75.2609	147.143	0.04%
9	112.049	-17.0885	0.06%
10	49.7992	-168.83	0.03%
11	53.9049	43.8168	0.03%
12	23.0146	-110.405	0.01%
13	153.616	95.3671	0.08%
14	32.4356	-62.0539	0.02%
15	81.7983	-146.688	0.04%
16	31.5903	-10.7288	0.02%
17	62.2306	-123.096	0.03%
18	26.9249	51.5089	0.01%
19	40.0625	-41.5807	0.02%
20	32.5598	128.419	0.02%
21	84.2251	-18.2945	0.05%
22	9.70907	146.459	0.01%
23	48.2949	104.713	0.03%
24	14.4823	167.473	0.01%
THDV - FASE A			0.29%

Tabla 4-32 THD de voltaje con filtro una sintonía y compensación en primario transformador STEP DOWN

MC's PlotXY - Fourier chart(s).			
File: haetesis.pl4; Variable: c:X0043A-X0042A			
t1: 2.3798; t2: 2.3965 - Amplitude: peak value			
Harm.	Amplitude	Phase	% Fund
0	1.17271	0	
1	373.715	-179.816	100.00%
2	1.66672	-75.9362	0.45%
3	5.80839	-4.9663	1.55%
4	1.25561	152.08	0.34%
5	2.34358	166.158	0.63%
6	0.945726	153.394	0.25%
7	0.23859	107.487	0.06%
8	0.547026	-179.724	0.15%
9	0.327719	41.7242	0.09%
10	0.32187	165.921	0.09%
11	0.215738	31.0497	0.06%
12	0.316485	155.722	0.08%
13	0.572344	-25.95	0.15%
14	0.219919	166.051	0.06%
15	0.378939	-9.43269	0.10%
16	0.179812	154.63	0.05%
17	0.197999	-30.7033	0.05%
18	0.150864	150.764	0.04%
19	0.17833	-63.1264	0.05%
20	0.168616	156.498	0.05%
21	0.105172	-28.2159	0.03%
22	0.119509	158.614	0.03%
23	0.0550355	-19.926	0.01%
24	0.134322	151.019	0.04%
THDC - FASE A			1.81%

Tabla 4-33 THD de corriente con filtro una sintonía y compensación en primario transformador STEP DOWN

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.

5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS RESPECTO A NORMATIVA VIGENTE

5.1.1 COMPARACIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO DE VOLTAJE

En la Tabla 5-1, se muestra el resumen de los armónicos de voltaje presentes para cada uno de los casos estudiados, se observa que el contenido armónico de voltaje generado por el modelo de simulación en ATP es menor al contenido armónico medido por CFE. También se observa el efecto que tiene el filtro de una sintonía, reduciendo a menos de la mitad el contenido armónico total, respecto a las mediciones realizadas con el filtro de una sintonía y el filtro de doble sintonía, el segundo ofrece una mejora en el desempeño en comparación con el filtro de una sintonía, dando como resultado en ambos casos, valores de contenido armónico dentro de los límites de la Tabla 3-8.

Fase	Límite de distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THDV%
	1.0 %	1.5 %
Mediciones por CFE		
Fase A	**3.ª – 1.68%**	1.36% - **2.35%**
Fase B	**5.ª – 1.31%**	
Fase C	**3.ª – 1.60%**	
Simulación sin filtro		
Fase A	3.ª - 0.50%	0.70%
Fase B	5.ª - 0.40%	0.70%
Fase C	3.ª - 0.34%	0.53%
Simulación con filtro una sintonía		
Fase A	5.ª - 0.14%	0.24%
Fase B	7.ª - 0.11%	0.17%
Fase C	2.ª - 0.19%	0.23%
Simulación con filtro doble sintonía		
Fase A	7.ª – 0.09%	0.15%
Fase B	3.ª - 0.11%	0.19%
Fase C	3.ª - 0.17%	0.19%

Tabla 5-1 Resumen de resultados - Comparación de las componentes armónicas de voltaje presentes con los límites de distorsión armónica de la Tabla 3-8

5.1.2 COMPARACIÓN DE CONTENIDO ARMÓNICO DE CORRIENTE

En la Tabla 5-2, se muestra el resumen de los armónicos de corriente presentes para cada uno de los casos de estudio, se observa que el contenido armónico de corriente generado por el modelo de simulación en ATP se encuentra dentro de los rangos medidos por CFE, lo que da una buena aproximación al comportamiento del horno de arco eléctrico. Se observa que, al introducir el filtro de una sintonía, el contenido armónico se reduce considerablemente, tanto en armónicas impares individuales, como en el contenido armónico total de corriente. Respecto al filtro de doble sintonía se observa una pequeña mejora respecto al filtro de una sintonía, dando como resultado en ambos casos, valores de contenido armónico dentro de los límites establecidos en la Tabla 3-7.

Impedancia relativa	Límites para componentes armónicas impares En % de IL				Distorsión armónica total THDC%
	Armónicas < 11	Armónicas 11 a 16	Armónicas 17 a 22	Armónicas 23 a 24	
Icc/IL <50	2.0%	1.0%	0.75%	0.30%	2.5
Mediciones por CFE					
Fase A	**3.ª – 6.20%**	No se indica	No se indica	No se indica	**2.14% - 6.17%**
Fase B	**3.ª – 9.11%**	No se indica	No se indica	No se indica	
Fase C	**3.ª – 4.61%**	No se indica	No se indica	No se indica	
Simulación sin filtro					
Fase A	**3.ª - 4.33%**	13.ª – 0.12%	19.ª – 0.06%	23.ª – 0.03%	**4.50%**
Fase B	**3.ª – 2.31%**	11.ª – 0.47%	21.ª – 0.21%	23.ª – 0.18%	**3.96%**
Fase C	**3.ª – 4.53%**	13.ª – 0.19%	19.ª – 0.23%	23.ª – 0.13%	**5.56%**
Simulación con filtro una sintonía					
Fase A	5.ª – 0.77%	13.ª – 0.10%	19.ª – 0.03%	23.ª – 0.02%	1.73%
Fase B	3.ª – 0.71%	11.ª – 0.10%	17.ª – 0.03%	23.ª – 0.03%	1.00%
Fase C	3.ª – 1.90%	13.ª – 0.19%	17.ª – 0.14%	23.ª – 0.09%	2.44%
Simulación con filtro doble sintonía					
Fase A	7.ª – 0.40%	15.ª – 0.10%	17.ª – 0.07%	23.ª – 0.05%	0.86%
Fase B	3.ª – 1.68%	11.ª – 0.18%	19.ª – 0.10%	23.ª – 0.06%	2.39%
Fase C	3.ª – 1.54%	13.ª – 0.09%	17.ª – 0.08%	23.ª – 0.04%	1.76%

Tabla 5-2 Resumen de resultados - Comparación de las componentes armónicas de corriente presentes con los límites de la Tabla 3-7

5.1.3 COMPARACIÓN DE FACTOR DE POTENCIA

En la Tabla 5-3, se muestra el resumen del comportamiento del factor de potencia, para cada uno de los casos de estudios. Se observa que el modelo de simulación en ATP genera un factor de potencia más bajo al medido por CFE, estando fuera de los límites indicados 3.2.3. Cuando los filtros entran en operación, y el horno de arco eléctrico opera a su potencia nominal, el factor de potencia se encuentra dentro de los límites establecidos en 3.2.3 , sin embargo, si la potencia nominal del horno baja, el factor de potencia se adelanta, generando así inyección de reactivos a la red y una sobretensión en el punto de común acoplamiento, siendo más crítico cuando el horno sale de operación ya que la carga se vuelve totalmente capacitiva, llevando al factor de potencia a un valor de 0.02 en adelanto. Cuando el filtro se desconecta de forma simultánea al horno, el factor de potencia se mantiene en atraso, evitando así la inyección de reactivos a la red, sin embargo, el factor de potencia medido es de 0.72 en atraso, esto se debe a que el sistema solo ve la carga del transformador, que es una carga inductiva, generando un incumplimiento a 3.2.3, por tal motivo, se instaló un banco de capacitores fijo que compense la carga inductiva del transformador, obteniendo así un factor de potencia que se encuentre, la mayor parte del tiempo, dentro de los límites establecidos en 3.2.3.

Factor de Potencia 0.95 el 95% del tiempo en atraso		
F.P - Atraso	F.P. – Adelanto	F.P. Horno fuera de operación
Medición de CFE		
0.90 – 1.00	No se indica	No se indica
Simulación sin filtro		
0.85	----	No aplica
Simulación con filtro una sintonía		
0.95	**0.99**	**0.36 - Adelanto**

Tabla 5-3 Resumen de resultados – Comparación de medición de factor de potencia con los límites establecidos en 3.2.3

Factor de Potencia 0.95 el 95% del tiempo en atraso		
F.P - Atraso	F.P. – Adelanto	F.P. Horno fuera de operación
Simulación con filtro doble sintonía		
0.95	**0.81**	**0.02 - Adelanto**
Simulación con filtro uno sintonía con desconexión simultánea de horno y filtro		
0.95	**0.99**	**0.72 - Atraso**
Simulación con filtro uno sintonía con desconexión simultánea de horno, con compensación en primario transformador STEP DOWN		
0.96	**0.99**	0.96 - Atraso

Tabla 5-4 Continuación Tabla 5-3

5.2 CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos en este trabajo de tesis se concluye que el modelo de arco de Cassie da una aproximación cercana a los problemas de calidad de la energía que un horno de arco eléctrico provoca en la red, ya que es capaz de dar una aproximación a los parámetros eléctricos reales medidos.

Con la implementación del filtro de una sintonía y el filtro de doble sintonía, se redujo el contenido armónico de voltaje y corriente a valores dentro de los límites establecidos tanto en el IEEE-519 como en el Código de Red, también se corrigió el factor de potencia, a la potencia nominal de diseño (potencia promedio medida), cuando el horno de arco se encuentra en operación, por lo que se concluye que, ambos filtros cumplen el objetivo buscado, Respecto a la eficiencia de los filtros se observó que no existió una gran diferencia en el resultado obtenido entre ambos.

De igual forma se observaron los efectos negativos que la implementación de los filtros trae a la red, cuando estos se mantienen conectados y el horno sale de operación, como es la gran inyección de potencia reactiva a la red, llegando a ser una carga totalmente capacitiva, así como también presenta sobretensiones en el punto de común acoplamiento. La inyección de

potencia reactiva capacitiva a la red resulta en un problema para las compañías generadoras, ya que estas tienen que compensar le generación de reactivos, con el fin de garantizar un perfil de voltaje adecuado y asegurar la operación estable de los generadores.

Los primeros dos casos de estudio, con el filtro de una sintonía y de doble sintonía, que se mantienen conectados cuando el horno sale de operación, describen la problemática que se presenta actualmente, ya que las plantas acereras no desconectan los filtros, inyectando gran cantidad de potencia reactiva a la red.

El tercer caso de estudio, donde el filtro de una sintonía se desconecta simultáneamente que el horno, nos permite dejar de inyectar reactivos a la red, sin embargo, el factor de potencia en atraso se encuentra fuera de los límites establecidos en el Código de Red, pero da los parámetros necesarios para corregir el factor de potencia.

En el último caso de estudio, se implementó un banco de capacitores fijo, el cual permite corregir el factor de potencia cuando el horno y el filtro se desconectan simultáneamente, compensando así la carga reactiva del transformador, dando una medición de factor de potencia dentro de los parámetros establecidos en el Código de Red, tanto en operación como con el horno fuera, también ofrece una correcta filtración del contenido armónico, por lo que se concluye que este modelo cumple con los objetivos planteados al inicio de este trabajo.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

Como se pudo observar en las simulaciones realizadas, el modelo de horno de Cassie, tiene un comportamiento estocástico, por lo que no se pueden predecir los valores de potencia que se consumirán, ocasionando que sea difícil mantener el factor de potencia dentro de los límites establecidos en el Código de Red con una compensación estática, por tal motivo es de interés, analizar el comportamiento del sistema considerando una compensación automática, pudiendo ser un compensador estático de vars o un banco de capacitores automáticos.

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

BUAP / INGENIERÍA FACULTAD

REFERENCIAS

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

REFERENCIAS

[1] Centro Nacional de Control de Energía, Criterios mediante los que se establecen las características específicas de la infraestructura requerida para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga, Diario Oficial de la Federación, 2015.

[2] G. K. Irungo, A. O. Akumu y D. K. Murage, «MODELING INDUSTRIAL LOAD DUE TO SEVERE VOLTAGE SURGES AND SAGS: 'A CASE STUDY OF MAGADI SODA COMPANY',» The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Nairobi Kenya, 2007.

[3] X. Liang, Dynamic Load Models for Industrial Facilities, Edmonton, Alberta: University of Alberta, 2013.

[4] S. Golestani y H. Samet, «Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace,» *The Institution of Engineering and Technology,* vol. 10, p. 10, 2016.

[5] K.-J. Tseng, Y. Wang y M. Vilathgamuwa, «An Experimentally Verified Hybrid Cassie–Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS,* vol. 12, p. 8, 1997.

[6] Comisión Reguladora de Energía, «Guía sobre los requerimientos técnicos del Código de Red aplicables a centros de carga,» Comisión Reguladora de Energía, Ciudad de México, 2019.

[7] H. EDELS, «PROPERTIES AND THEORY OF THE ELECTRIC ARC,» *The Institution of Electrical Engineers,* vol. 3498, p. 15, 1961.

[8] A. Cassie, «Arc rupture and circuit severity: a new theory,» CIGRE, Paris, 1939.

[9] C. Ramírez Pacheco y A. Calva, «SIMULATION OF ELECTRIC POWER CIRCUIT BREAKERS IN THE EMTP INCORPORATING ELECTRIC ARC MODELS APPLICATION TO REACTOR BANK SWITCHING AND SHORT LINE FAULT,» *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena,* p. 5, 2001.

[10] C. Ramírez Pacheco, «Tesis de maestría».

[11] Encyclopaedia Britannica, «Steel,» *Encyclopaedia Britannica, Inc.,* p. 57, 2019.

[12] E. A. Cano Planta, A. J. Ustariz Farfán y H. E. Tacca, Hornos de Arco Eléctrico una visión desde la calidad de la potencia eléctrica,, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, 2011.

[13] V. Sánchez Calvo y B. Rivera Chamorro, «Calidad del suministro eléctrico,» MEGACAL INSTRUMENTS IBÉRICA, Madrid, España.

[14] Copper Development Association, Voltage Disturbances Standard EN 50160 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems, Power Quality Application Guide, Breslavia, Polonia: Copper Development Association, 2004.

[15] International Electrotechnical Commission, IEC 60038 Standard voltages, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2009.

[16] D. J. Warne CEng., FIEE y M. A. Laughton CEng., FIEE, Electrical Engineer's Reference Book, Burlington, MA: Newnes, 2003.

[17] A. Baltasar, M. Barreto, A. Herrera y Z. Garcia , «Utilización de dispositivos FACTS en acerías para mejorar su comportamiento técnico económico,» *Trabajos teoricoexperimentales ,* p. 9, 2018.

[18] International Electrotechnical Commission, IEC 60071-1 Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules, Ginebra, Suiza: International Electrotechnical Commission, 2019.

[19] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso y H. W. Beaty, Electrical Power Systems, McGraw-Hill, 2004.

[20] B. Witte, «EDN Network,» EDN Network, 18 Marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.edn.com/find-a-signals-bandwidth-from-its-harmonics/. [Último acceso: 2020 Mayo 30].

[21] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., «IEEE STD 519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2014.

[22] Fluke Corporation, «www.fluke.com,» 3 Marzo 2021. [En línea]. Available: https://www.fluke.com/es-mx/informacion/blog/motores-sistemas-de-impulsion-bombas-compresores/desequilibrio-de-tension. [Último acceso: 28 Marzo 2021].

[23] J. J. Grainger y W. D. Stevenson Jr, Análisis de sistemas de potencia, Mexico D.F.: McGraw-Hill Inc. , 2002.

[24] Facultad de Ingenierí Universidad Nacional de Mar de Plata, «Guía sobre la calidad de la onda en las redes eléctricas,» Facultad de Ingenierí Universidad Nacional de Mar de Plata, [En línea]. Available: http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion_calidad_energia.pdf. [Último acceso: 2020 Mayo 30].

[25] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, «Herramienta para el ajuste del factor de potencia,» Gobierno de México, 2016 Mayo 2016. [En línea]. Available: https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/herramienta-para-el-ajuste-del-factor-de-potencia?state=published. [Último acceso: 30 Mayo 2020].

[26] Comisión Reguladora de Energía, Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional: Código de Red, Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2016.

[27] R. Mendoza, «Código de Red - México - Curso "ABB",» Colegio de Ingenieros Mecánicos Eléctricos del Estado de Puebla, Puebla, 2019.

[28] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, «Ley de la Industría Eléctrica,» Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, 2014.

[29] Secretaría de Energía , *Manual para la interconexión de centrales eléctricas y conexión de centros de carga,* Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación, 2018.

[30] Power Quality World, «http://www.powerqualityworld.com/,» http://www.powerqualityworld.com/, 4 Abril 2011. [En línea]. Available: http://www.powerqualityworld.com/2011/04/itic-power-acceptability-curve.html. [Último acceso: 29 Mayo 2020].

[31] C. Ramírez Pacheco, «Diagnóstico de Calidad de la energía en "Empresa Acerera",» 2015.

[32] J. L. Carbajal Cardoso, Estudio de Calidad de la Energía en el Punto de Acoplamiento Común al Sistema Eléctrico de Potencia en 230 kV, para una Planta de Horno de Arco Eléctrico de Corriente Alterna, Puebla: BUAP, 2018.

[33] H. Y. Pradika Napitupulu, «A New Algorithm for Designing the Parameter of Damped-Type Double Tuned Filter,» *EECSI,* pp. 193-197, 2018.

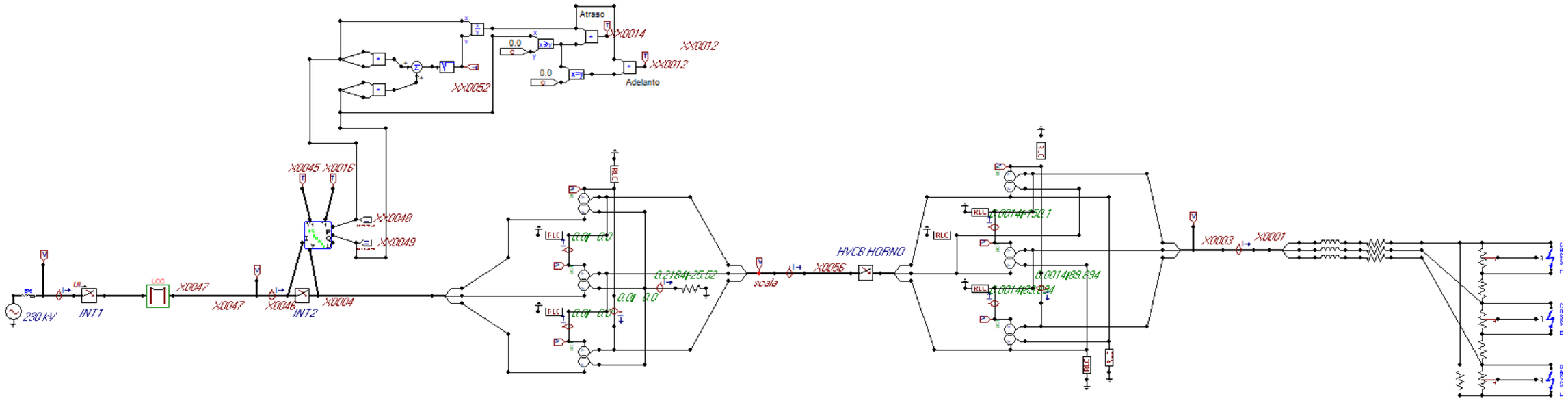
PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

BUAP / INGENIERÍA FACULTAD

ANEXO A

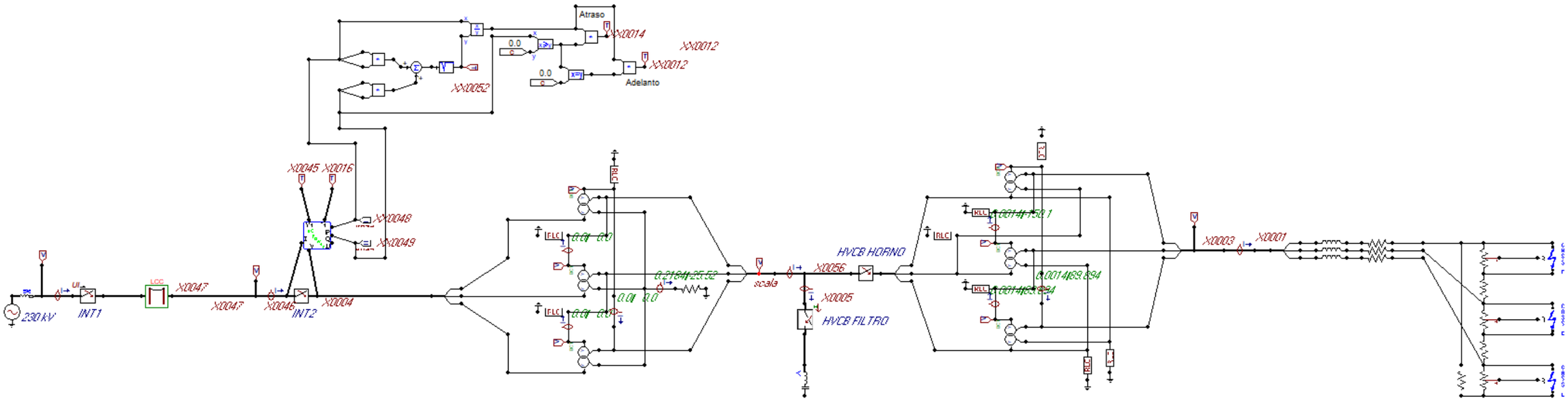
PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ANEXO A.1 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN SIN FILTRO



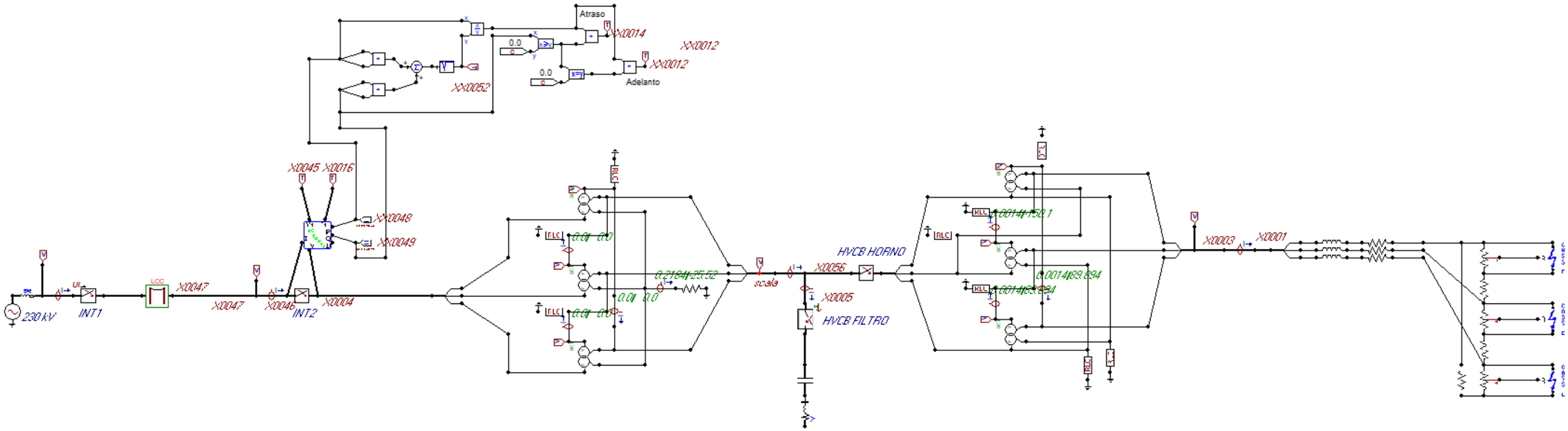
PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ANEXO A.2 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO UNA SINTONÍA



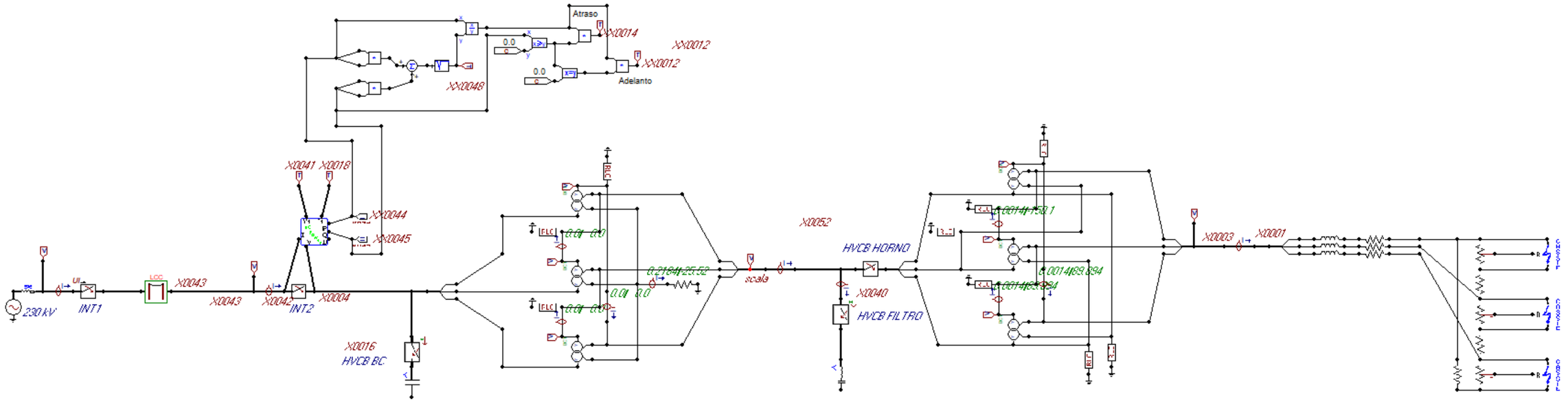
PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ANEXO A.3 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO DOBLE SINTINÍA



PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ANEXO A.3 DIAGRAMA EN ATP DE MODELO DE SIMULACIÓN CON FILTRO UNA SINTONÍA Y COMPENSACIÓN EN PRIMARIO TRANSFORMADOR STEP DOWN



PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

BUAP / INGENIERÍA FACULTAD

ANEXO B

PÁGINA INTENCIONAL EN BLANCO

ANEXO B CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN MATLAB

ANEXO B.1 CÓDIGO DE CÁLCULO DE CORRIENTE DE CORTO EN PCC

```
clear all
clc
fprintf('BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA\n')
fprintf('NATURALEZA TRANSITORIA DE LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO\n')
fprintf('\n')
%%%%%% DATOS DEL SISTEMA %%%%%
kv=230;
z=0.78964+18.128j; %Impedancia equivalente
vrms=(kv*1000)/3^.5; %Voltaje RMS del sistema
f=60; % Frecuencia
w=2*pi*f; %Velocidad Angular
vo=66895; %Voltaje al momento de la falla
r=real(z); % Valor de la resistencia
L=imag(z)/w; %Calculo de la inductancia
%%%%%% FACTORES DE INTEGRACION %%%%%
dt=0.0001;
t=0:dt:0.3;
%%%%%% CALCULO DE LA IMPEDANCIA DEL SISTEMA %%%%%
xL=w*L*j;
Zrec=r+xL;
Zpol=abs(Zrec);
Zang=angle(Zrec);
Zangdeg=Zang*180/pi;
%%%%%% CALCULO DEL ANGULO DEL VOLTAJE %%%%%
vmax=vrms;
a=asin(vo/vmax);
adeg=a*180/pi;
%%%%%% CALCULO DEL ANGULO DEL VOLTAJE %%%%%
Icc=(vmax/Zpol)*(sin((w*t)+a-Zang)-(exp((-r*t)/L)*sin(a-Zang)));
Isim=(vmax/Zpol)*(sin((w*t)+a-Zang));
Idc=(vmax/Zpol)*(-exp((-r*t)/L)*sin(a-Zang));
Iccsim=(vmax/Zpol);
Iccasim=max(Icc);
mvacc=(kv^2)/abs(z);
xr=imag(z)/real(z);
tao=L/r;
dtao=5*tao;
```

ANEXO B.2 CÓDIGO GRÁFICA IMPEDANCIA VS FRECUENCIA FILTRO UNA SINTONÍA

```
clear all
clc
fprintf('BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA\n')
fprintf('VALORES DE REACTANCIA VS FRECUENCIA \n')
fprintf('\n')

%%%%%%%%%% --- LECTURA DE DATOS --- %%%%%%%%%%

XLS=2.6795; %Xl del sistema
XCF=61.30; %XC del filtro
XLF=7.09; %XL del Filtro

h=(1:0.01:24);

for k=1:length(h)
   Zeq(k)=abs(XCF/h(k))-(XLF*h(k));
   Xeq(k)=((XLS*h(k))*(-Zeq(k)))/((XLS*h(k))+(-Zeq(k)));
end

plot(h,Xeq)
grid
title('Reactanca VS Frecuencia ');
xlabel('Orden Armonico');
ylabel('Ohms');
```

ANEXO B.3 CÓDIGO DE CÁLCULO FILTRO DOBLE SINTONÍA

```
clear all
clc
fprintf('BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA\n')
fprintf(DISEÑO DE FILTRO AMORTIGUADO DE DOBLE SINTONIA\n')
fprintf('\n')

format long

%%%%% DATOS DEL SISTEMA %%%%%
U=34.5; %kV de Alimentacion
F=60; %Frecuencia
MW=70; %Potencia activa en MW
PFE=0.85; %Factor de potencia Existente
PFT=0.95; %Factor de potencia Objetivo
w=2*pi*F;

%%%%% CARACTERISTICAS DEL FILTRO %%%%%
ha=3; %Primer armonico a filtrar
hb=5; %Segundo armonico a filtrar
fre1=ha*F; %Frecuencia del primer armonico
fre2=hb*F; %Frecuencia del segundo armonico
tha=.98; %Tolerancia de Filtrado
thb=.98; %Tolerancia de Filtrado
wa=2*pi*F*ha*tha; %Velocidad Angular de primer armonico a filtrar
wb=2*pi*F*hb*thb; %Velocidad Angular de primer armonico a filtrar

%%%% CALCULO DE POTENCIA REACTIVA %%%%%
ANGLEE=acos(PFE); %Angulo existente
ANGLET=acos(PFT); %Angulo objetivo
MVARE=MW*tan(ANGLEE); %Calculo de potencia reactiva existente
MVART=MW*tan(ANGLET); %Calculo de potencia reactiva objetivo
MVARBC=MVARE-MVART; %Determinacion de la potencia del banco de capacitores

fprintf('\n')
fprintf('El valor del banco de capacitores calculado es (MVAR)  %d \n',MVARBC);%Se imprime
el valor calculado del banco de capacitores
fprintf('\n')
MVARB=input('Introduce el tamaño del banco de capacitores comercial propuesto en MVAR:
\n');%El usuario introduce el valor comercial mas cercano.
fprintf('\n')
```

```
fprintf('Los parametros del Filtro Doble Sintonia son: \n');
fprintf('\n')

%%%% CALCULO DE PARAMETROS DEL FILTRO %%%%%
fprintf('El valor del Capacitor 1 es: \n');
c1=MVARB/(U^2*w) %Capacitor 1
fprintf('El valor del Inductor 1 es: \n');
l1=1/((c1*(wa^2+wb^2))/2) %Inductor 1
ws=1/sqrt(l1*c1); %Velocidad angular cicuito serie del filtro
wp=(wa*wb)/ws; %Velocidad angular circuito paralelo del filtro
fprintf('El valor del Inductor 2 es: \n');
l2=((1-(wa^2/ws^2))*(1-(wa^2/wp^2)))/(c1*wa^2) %Inductor 2
fprintf('El valor del Capacitor 2 es: \n');
c2=1/(l2*wp^2) %Capacitor 2

for r=1:1000000

zwa=sqrt((((l2^2*r/(c2^2))/((l2^2/(c2^2))+(((wa*l2*r)-(r/(wa*c2)))*((wa*l2*r)-
(r/(wa*c2))))))*((l2^2*r/(c2^2))/((l2^2/(c2^2))+(((wa*l2*r)-(r/(wa*c2)))*((wa*l2*r)-
(r/(wa*c2)))))))+(((wa*l1)-(1/(wa*c1))-((((l2*r)/c2)*(wa*l2*r-
(r/(wa*c2))))/((l2^2/(c2^2))+((wa*l2*r-(r/(wa*c2)))*(wa*l2*r-(r/(wa*c2)))))))*((wa*l1)-
(1/(wa*c1))-((((l2*r)/c2)*(wa*l2*r-(r/(wa*c2))))/((l2^2/(c2^2))+((wa*l2*r-
(r/(wa*c2)))*(wa*l2*r-(r/(wa*c2)))))))));

zwb=sqrt((((l2^2*r/(c2^2))/((l2^2/(c2^2))+(((wb*l2*r)-(r/(wb*c2)))*((wb*l2*r)-
(r/(wb*c2))))))*((l2^2*r/(c2^2))/((l2^2/(c2^2))+(((wb*l2*r)-(r/(wb*c2)))*((wb*l2*r)-
(r/(wb*c2)))))))+(((wb*l1)-(1/(wb*c1))-((((l2*r)/c2)*(wb*l2*r-
(r/(wb*c2))))/((l2^2/(c2^2))+((wb*l2*r-(r/(wb*c2)))*(wb*l2*r-(r/(wb*c2)))))))*((wb*l1)-
(1/(wb*c1))-((((l2*r)/c2)*(wb*l2*r-(r/(wb*c2))))/((l2^2/(c2^2))+((wb*l2*r-
(r/(wb*c2)))*(wb*l2*r-(r/(wb*c2)))))))));

if (zwa <= 0.1 & zwb <= 0.1)
fprintf('El valor del valor de la resistencia amortiguadora (R) es %d \n',r);
break

end
end
```