ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EFECTO FLICKER, EN EL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN, CAUSADOS POR LA CONEXIÓN DE HORNOS DE ARCO, APLICADO AL CASO DE NOVACERO S.A.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

RAÚL SANTIAGO VILLAFUERTE NOVOA
raulsan2000@yahoo.com

DIRECTOR: ING. LUIS RUALES CORRALES
lruales@transelectric.com.ec

Quito, julio 2008

DECLARACIÓN

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

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

_____

Raúl Santiago Villafuerte Novoa

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Raúl Santiago Villafuerte Novoa, bajo mi supervisión.

ING. LUIS RUALES CORRALES
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Luis Ruales Corrales, mi director de tesis, Vicepresidente Técnico de TRANSELECTRIC S.A., por la oportunidad de realizar mi proyecto de titulación en la Gerencia de Planificación y Desarrollo.de TRANSELECTRIC S.A. Por el respaldo y preocupación para que toda la información y contingente sea facilitado en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Hugo Arcos, mi codirector por el tiempo y asesoramiento brindado, que fueron fundamentales para la realización de esta tesis.

Al Ing. Javier Guevara por su colaboración espontánea, sus conocimientos y experiencia ayudaron a superar varias dificultades que se presentaron en la realización de este trabajo.

A la Escuela Politécnica Nacional por acogerme bajo su emblema, permitiéndome así; ser parte de su prestigio, que me llena de orgullo y responsabilidad.

A mi amigo Daniel Correa por compartir su experiencia y conocimiento, que ayudaron al desarrollo de esta tesis.

A mi amigo Daniel Tates por su ayuda en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A MI DIOS

A MIS PADRES

CONTENIDO

DECLARACIÓN ..... **II**

CERTIFICACIÓN ..... **III**

AGRADECIMIENTOS ..... **IV**

DEDICATORIA ..... **V**

CONTENIDO ..... **VI**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XI**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **XV**

OBJETIVOS ..... **XVII**

ALCANCE ..... **XVIII**

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO ..... **XIX**

RESUMEN ..... **XX**

PRESENTACIÓN ..... **XXI**

CAPÍTULO 1 ..... **1**

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE HORNOS DE ARCO Y EFECTO SOBRE SISTEMAS DE POTENCIA **1**

1.1 EL ARCO ELÉCTRICO **1**

1.1.1 MODELO DE AYRTON 2

1.2 HORNOS DE ARCO **3**

1.2.1 EQUIPAMIENTO BÁSICO Y OPERACIÓN 3

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN HORNO DE ARCO 7
1.2.2.1 Etapa de Fundición 7
1.2.2.2 Etapa de Refinado 8
1.2.3 ESTABILIDAD DEL ARCO 8
1.2.4 FACTOR DE POTENCIA DEL HORNO DE ARCO 9
1.2.5 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE Y DESBALANCES DE CARGA 11
1.2.5.1 Desbalances de Carga 11
1.2.5.2 Fluctuaciones de Voltaje 11

1.3 ARMÓNICOS 12
1.3.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS 13
1.3.2 DISTORSIÓN ARMÓNICA 14
1.3.2.1 Índices de Distorsión Armónica 16
1.3.3 PRINCIPALES PERTURBACIONES CAUSADAS POR ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE 17
1.3.4 ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR HORNOS DE ARCO 18
1.3.5 FILTROS DE ARMÓNICOS 19
1.3.5.1 Filtros Pasivos 20
1.3.5.1.1 Filtros Series 20
1.3.5.1.2 Filtros Shunt 20
1.3.5.1.2.1 Filtro Sintonizado Simple 21
1.3.5.1.2.2 Filtros Pasa Altos 22
1.3.5.1.2.2.1 Ventajas 23
1.3.5.1.2.2.2 Desventajas 23
1.3.5.1.3 Problemas de los Filtros 23
1.3.5.2 Filtros Activos 24

1.4 FLICKER O PARPADEO DE FUENTES LUMINOSAS 24
1.4.1 DEFINICIÓN DEL FLICKER 24
1.4.2 DETERMINACIÓN DEL FLICKER EN UNA INSTALACIÓN 26
1.4.2.1 Método Cualitativo 26
1.4.2.2 Método para los Hornos de Arco 27
1.4.2.2.1 Método de la Dosis de Flicker 27
1.4.2.2.2 Método de Cálculo del Pst 30
1.4.3 SOLUCIONES 31
1.4.3.1 Elección del Sistema de Iluminación 31
1.4.3.2 Ondulador 31
1.4.3.3 Modificación del Perturbador 31
1.4.3.4 Inclusión de un Volante de Inercia 32
1.4.3.5 Conversor Rotativo 32
1.4.3.6 Modificación de la Red 32
1.4.3.6.1 Capacidad Serie 33
1.4.3.6.2 Reactancia Serie 33
1.4.3.6.3 Compensador Estático (SVC) 34

CAPÍTULO 2 37

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS 37

2.1 GENERALIDADES 37

2.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL HORNO DE ARCO..... 38
2.2.1 MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO DEL HORNO DE ARCO 39
2.2.1.1 Modelo del Arco Eléctrico..... 39
2.2.2 MODELO EN ESTADO DINÁMICO DEL HORNO DE ARCO 42
2.2.2.1 Dinámica del Arco Eléctrico 43

2.3 POWER FACTORY DE DIGSILENT[41]..... 48
2.3.1 LENGUAJE DE SIMULACIÓN DE DIGSILENT (DSL)[43]..... 49
2.3.2 MODULÓ DE ESTABILIDAD [44]..... 50
2.3.2.1 Transitorios 50
2.3.2.1.1 Función Básica 51
2.3.2.1.2 Función de Transitorios Electromagnéticos 51
2.3.2.2 Cálculo de Transitorios..... 51
2.3.2.2.1 Edición de Variables de Resultado 53
2.3.2.2.2 Edición de Eventos de Simulación..... 53
2.3.2.2.3 Análisis de resultados 53
2.3.3 MÓDULO DE ANÁLISIS ARMÓNICO DE DIgSILENT POWER FACTORY [44]..... 53
2.3.3.1 Flujo de Carga Armónico..... 54
2.3.3.2 Barrido de Frecuencia..... 56
2.3.3.3 Modelación de Fuentes de Armónicos 57

CAPÍTULO 3 62

IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS Y APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO REAL DEL SNT 62

3.1 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY 62
3.1.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY..... 63
3.1.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN ESTADO DINÁMICO DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY..... 66

3.2 APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO REAL DEL SNT 70
3.2.1 NOVACERO S.A. 70
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA A INSTALARSE..... 72
3.2.2.1 Horno de Arco 74
3.2.2.2 Laminadora 74
3.2.2.3 Planta de Humos..... 76
3.2.2.4 Planta de Agua..... 77
3.2.3 REPRESENTACIÓN DE LA RED DE NOVACERO S.A..... 77
3.2.4 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN 79

CAPÍTULO 4 83

SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 83

4.1 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO 84
4.1.1 VOLTAJES DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO 84
4.1.2 CORRIENTES DEL HORNO DE ARCO 86
4.1.3 CARACTERÍSTICA NO LINEAL VOLTAJE-CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO 89
4.1.4 VOLTAJES EN LA RED DE NOVACERO S.A. 91
4.1.5 CORRIENTES EN LA RED DE NOVACERO 94

4.2 DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN EL PCC 97
4.2.1 ESPECTRO DE FRECUENCIAS DEL HORNO DE ARCO 98
4.2.1.1 Espectro de Frecuencias del Voltaje 102
4.2.1.2 Espectro de Frecuencias de Corriente 105
4.2.2 FLUJO DE CARGA ARMÓNICO 108

4.3 COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA CON LÍMITES ESTABLECIDOS EN NORMAS 116
4.3.1 NORMA IEEE 519 116
4.3.1.1 Límites Permitidos 117
4.3.1.1.1 Límites del Contenido Armónico de Voltaje 117
4.3.1.1.2 Límites del Contenido Armónico de Corriente 120

4.4 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO DINÁMICO 125
4.4.1 VOLTAJES DEL HORNO DE ARCO 125
4.4.2 CORRIENTES DEL HORNO DE ARCO 128
4.4.3 VOLTAJES Y CORRIENTES EN LA RED DE NOVACERO S.A. 130

4.5 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE FLICKER (Pst) 131
4.5.1 DETERMINACIÓN DEL PST UTILIZANDO EL FLICKERMETER 131
4.5.1.1 El Flickermeter (Flickérmetro) 131
4.5.1.1.1 Cálculo del Pst en el PCC 137
4.5.1.2.1 Cálculo de la Potencia de Cortocircuito a Nivel del Horno de Arco de Novacero S.A. 139

4.6 COMPARACIÓN DEL PST CON EL LÍMITE ESTABLECIDO EN LA NORMA 144
4.6.1 NORMA IEC 61000-4-15 144
4.6.1.1 Límites Permitidos 144

4.7 MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LOS ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EFECTO FLICKER 145

CAPÍTULO 5 146

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 146

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 149

ANEXOS 154

ANEXO Nº 1..... 155

ANEXO Nº 2..... 157

ANEXO Nº 3..... 160

ANEXO Nº 4..... 165

ANEXO Nº 5..... 167

ANEXO Nº 6..... 169

ANEXO Nº 7..... 171

ANEXO Nº 8..... 173

ANEXO Nº 9..... 175

ANEXO Nº 10..... 177

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 DISPOSICIÓN DEL HORNO DE ARCO [37]..... 4
FIGURA 1.2 VISTA SUPERIOR DEL HORNO DE ARCO [37] 5
FIGURA 1.3 QUEMADORES UTILIZADOS EN HORNOS DE ARCO [37]..... 6
FIGURA 1.4 SIMPLIFICACIÓN DEL CIRCUITO DEL HORNO DE ARCO [1] 9
FIGURA 1.5 DIAGRAMA FASORIAL DEL CIRCUITO SIMPLIFICADO DEL HORNO DE ARCO 10
FIGURA 1.6 ONDA DISTORSIONADA [30]..... 12
FIGURA 1.7 FILTRO PASIVO SERIE..... 20
FIGURA 1.8 FILTRO SINTONIZADO SIMPLE 21
FIGURA 1.9 FILTRO PASA ALTOS..... 22
FIGURA 1.10 LÍMITE DE SENSIBILIDAD DEL OJO A LAS VARIACIONES DE ILUMINACIÓN CAUSADAS POR FLUCTUACIONES DE VOLTAJE, EN LÁMPARAS DE INCANDESCENCIA [16]..... 28
FIGURA 1.11 ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE UN EAF [16]..... 30
FIGURA 1.12 MODIFICACIONES DE LA INSTALACIÓN QUE PERMITEN REDUCIR EL FLICKER [16] 33
FIGURA 1.13 ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO [16] 34
FIGURA 1.14 ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO [16] 35
FIGURA 2.1 ONDAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE DEL ARCO ELÉCTRICO [35] 40
FIGURA 2.2 ONDA DE VOLTAJE DEL ARCO ELÉCTRICO [32]..... 40
FIGURA 2.3 CARACTERÍSTICA VOLTAJE-CORRIENTE DEL ARCO ELÉCTRICO [32]..... 42
FIGURA 2.4 CONTROL DE ASENSO Y DESCENSO DE LOS ELECTRODOS [34] 43
FIGURA 2.5 FORMA DE ONDA DEL RUIDO BLANCO 45
FIGURA 2.6 SECUENCIA DE ECUACIONES DEL MODELO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO DINÁMICO 47
FIGURA 2.7 VENTANA DE DIÁLOGO DEL CÁLCULO DE CONDICIONES INICIALES..... 52
FIGURA 2.8 VENTANA DE DIÁLOGO DE LA EJECUCIÓN DE LA SIMULACIÓN 52
FIGURA 2.9 VENTANA DE DIÁLOGO DEL FLUJO DE CARGA ARMÓNICO [45] 55
FIGURA 2.10 VENTANA DE DIÁLOGO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS [45] 56
FIGURA 2.11 GRÁFICA DE LA IMPEDANCIA EN FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA..... 57
FIGURA 2.12 VENTANA DE DIÁLOGO DE UNA CARGA GENERAL 58
FIGURA 2.13 VENTANA DE DIÁLOGO DEL TIPO DE UNA CARGA GENERAL 58
FIGURA 2.14 VENTANA DE DIÁLOGO DE LA SECCIÓN ARMÓNICOS DE UNA CARGA GENERAL 59
FIGURA 2.15 ESPECTRO DE ARMÓNICOS EXISTENTE EN LA BIBLIOTECA 59

FIGURA 2.16 TIPO DE FUENTE DE ARMÓNICOS BALANCEADA [45] 60
FIGURA 2.17 TIPO DE FUENTE DE ARMÓNICOS DESBALANCEADA [45]..... 60
FIGURA 3.1 REPRESENTACIÓN DEL HORNO DE ARCO COMO FUENTE DE VOLTAJE CONTROLADO 62
FIGURA 3.2 BARRA DE HERRAMIENTAS DE LOS ELEMENTOS DE RED DE POWER FACTORY..... 63
FIGURA 3.3 VENTANA DE DIÁLOGO DEL BLOQUE MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO EAF 63
FIGURA 3.4 HORNO DE ARCO MODELADO COMO FUENTE DE VOLTAJE .. 64
FIGURA 3.5 COMUNICACIÓN ENTRE BLOQUES DEL MODELO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO 65
FIGURA 3.6 MODELO COMPUESTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO 66
FIGURA 3.7 VENTANA DE DIÁLOGO DEL BLOQUE MODELO EN ESTADO DINÁMICO EAF 67
FIGURA 3.8 COMUNICACIÓN ENTRE BLOQUES DEL MODELO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO DINÁMICO 68
FIGURA 3.9 MODELO COMPUESTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO DINÁMICO 69
FIGURA 3.10 VENTANA DE DIÁLOGO DEL GENERADOR DE RUIDO BLANCO FASE A 70
FIGURA 3.11 DIAGRAMA UNIFILAR FUTURO DE LA PLANTA DE NOVACERO LASSO [38] 73
FIGURA 3.12 TREN DE LAMINACIÓN [38]..... 75
FIGURA 3.13 BARRAS LAMINADAS [38] 76
FIGURA 3.14 PLANTA DE HUMOS [38] 77
FIGURA 3.15 VENTANA DE DIÁLOGO DE LA RED EXTERNA QUE REPRESENTA AL SNT EL EL PCC 81
FIGURA 3.16 RED DE NOVACERO S.A. EN POWER FACTORY 82
FIGURA 4.1 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE A 84
FIGURA 4.2 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE B 85
FIGURA 4.3 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE C 85
FIGURA 4.4 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LAS FASES A, B Y C 86
FIGURA 4.5 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE A 87
FIGURA 4.6 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE B 87
FIGURA 4.7 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE C..... 88
FIGURA 4.8 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LAS FASES A, B Y C ... 88
FIGURA 4.9 RELACIÓN VOLTAJE-CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE A 89
FIGURA 4.10 RELACIÓN VOLTAJE-CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE B 90
FIGURA 4.11 RELACIÓN VOLTAJE-CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE C 90
FIGURA 4.12 VOLTAJES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA SUBESTACIÓN MULALÓ 138 KV..... 91
FIGURA 4.13 VOLTAJES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA S/E NOVACERO.. 92
FIGURA 4.14 VOLTAJES EN LA BARRA DE 138 KV (2) DE LA S/E NOVACERO 92
FIGURA 4.15 VOLTAJES EN LA BARRA DE 18 KV DE LA S/E NOVACERO.... 93

FIGURA 4.16 VOLTAJES EN LA BARRA DE 13,8 KV (CARGAS) DE LA S/E NOVACERO..... 93
FIGURA 4.17 CORRIENTES EN EL LADO DE ALTO VOLTAJE DEL AUTO TRANSFORMADOR DE LA S/E NOVACERO..... 94
FIGURA 4.18 CORRIENTES EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE DEL AUTO TRANSFORMADOR DE LA..... 94
S/E NOVACERO..... 94
FIGURA 4.19 CORRIENTES EN EL LADO DE ALTO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR REDUCTOR DE LA..... 95
S/E NOVACERO..... 95
FIGURA 4.20 CORRIENTES EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR REDUCTOR DE LA..... 95
S/E NOVACERO..... 95
FIGURA 4.21 CORRIENTES EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO DE LA..... 96
S/E NOVACERO..... 96
FIGURA 4.22 CORRIENTES EN EL LADO DE ALTO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR DE LA CARGAS DE LA..... 96
S/E NOVACERO..... 96
FIGURA 4.23 CORRIENTES EN EL LADO DE BAJO VOLTAJE DEL TRANSFORMADOR DE LA CARGAS DE LA..... 97
S/E NOVACERO..... 97
FIGURA 4.24 INSTRUMENTO VIRTUAL TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)..... 100
FIGURA 4.25 VENTANA DE DIÁLOGO DEL INSTRUMENTO VIRTUAL FFT.. 100
FIGURA 4.26 ESPECTRO DE FRECUENCIAS (MAGNITUD) DEL VOLTAJE DE LA FASE A DEL HORNO DE ARCO..... 103
FIGURA 4.27 ESPECTRO DE FRECUENCIAS (MAGNITUD) DE LA CORRIENTE DE LA FASE B DEL HORNO DE ARCO..... 105
FIGURA 4.28 ESPECTRO DE FRECUENCIAS (ÁNGULO) DE LA CORRIENTE DE LA FASE A DEL HORNO DE ARCO..... 107
FIGURA 4.29 CARGA GENERAL COMO FUENTE DE CORRIENTE ARMÓNICA 108
FIGURA 4.30 EL HORNO DE ARCO COMO CARGA GENERAL EN EL SNT PARA EL FLUJO DE CARGA ARMÓNICO..... 109
FIGURA 4.31 INGRESO DEL ESPECTRO ARMÓNICO DE LA CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO..... 110
FIGURA 4.32 ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE LAS CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO (MAGNITUD Y ÁNGULO)..... 111
FIGURA 4.33 DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC..... 112
FIGURA 4.34 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC..... 113
FIGURA 4.35 DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC..... 114
FIGURA 4.36 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE DE LAS FASES A, B Y C EN PCC..... 115
FIGURA 4.37 DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE DE LA NORMA EN POWER FACTORY..... 119

FIGURA 4.38 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LOS VALORES DE VHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE DE LA NORMA IEEE 519..... 119
FIGURA 4.39 DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE LA NORMA EN POWER FACTORY..... 123
FIGURA 4.40 COMPARACIÓN GRÁFICA ENTRE LOS VALORES DE IHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE LA NORMA IEEE 519 124
FIGURA 4.41 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE A 126
FIGURA 4.42 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE B 126
FIGURA 4.43 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LA FASE C..... 127
FIGURA 4.44 VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO DE LAS FASES A, B Y C 127
FIGURA 4.45 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE A..... 128
FIGURA 4.46 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE 128
FIGURA 4.47 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LA FASE C..... 129
FIGURA 4.48 CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO EN LAS FASES A, B Y C 129
FIGURA 4.49 VOLTAJES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA SUBESTACIÓN MULALÓ (PCC) 130
FIGURA 4.50 CORRIENTES EN LA BARRA DE 138 KV DE LA SUBESTACIÓN MULALÓ (PCC) 130
FIGURA 4.51 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL FLICKÉRMETRO (IEC 61000-4-15) 132
FIGURA 4.52 VENTANA DE PRESENTACIÓN DE POWER QUALITY ANALYSIS TOOLS..... 132
FIGURA 4.53 LIBRERÍA EXTRA DE POWER QUALITY ANALYSIS TOOLS ... 133
FIGURA 4.54 UTILIZACIÓN DEL FLICKERMETER EN LA VENTANA DE SIMULINK 134
FIGURA 4.55 VENTANA DE DIÁLOGO DEL FLICKERMETER..... 134
FIGURA 4.56 VALOR DE PST CALCULADO EN LA VENTANA DE DIÁLOGO DE MATLAB..... 135
FIGURA 4.57 INTERFAZ GRÁFICA PARA EL CÁLCULO DEL PST 135
FIGURA 4.58 BÚSQUEDA DEL ARCHIVO . ASC DE LA SEÑAL DE VOLTAJE 136
FIGURA 4.59 INGRESO DEL ARCHIVO . ASC DE LA SEÑAL DE VOLTAJE EN EL FLICKERMETER..... 136
FIGURA 4.60 CÁLCULO DEL VALOR DE PST DE LA SEÑAL DE VOLTAJE EN EL FLICKERMETER..... 137
FIGURA 4.61 ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL HORNO DE ARCO DE NOVACERO S.A. 138

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 ARMÓNICOS DE VOLTAJE MEDIDOS EN UN HORNO DE ARCO [1] 19
TABLA 2.1 VALORES TÍPICOS DE C, D Y VARCO[32]..... 42
TABLA 2.2 VALORES TÍPICOS DE LOS PARÁMETROS A Y B [32], [34]..... 47
TABLA 2.3 RELACIÓN ENTRE ARMÓNICOS Y COMPONENTES DE SECUENCIA [41] 54
TABLA 2.4 ARMÓNICOS CARACTERÍSTICOS DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA [41]..... 54
TABLA 3.1 VALORES DE CORRIENTE Y VOLTAJE DE LOS TAPS DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO [38]..... 74
TABLA 3.2 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LA LÍNEA MULALÓ – NOVACERO [38]..... 78
TABLA 3.3 PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE TRANSFORMADORES DE LA RED DE NOVACERO S.A. [38] 78
TABLA 3.4 TAPS DE TRANSFORMADORES DE LA RED DE NOVACERO S.A. [38]..... 79
TABLA 3.5 CORRIDA DE CORTOCIRCUITO A MÁXIMAS CORRIENTES 80
TABLA 3.6 CORRIDA DE CORTOCIRCUITO A MÍNIMAS CORRIENTES 80
TABLA 4.1 ESPECTRO DE ARMÓNICOS DE VOLTAJE DE LA FASE A DEL HORNO DE ARCO 104
TABLA 4.2 COMPARACIÓN ENTRE EL ESPECTRO DE UNA ONDA CUADRADA Y EL ESPECTRO DEL VOLTAJE DEL HORNO DE ARCO .. 104
TABLA 4.3 ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE CORRIENTE DE LA FASE B DEL HORNO DE ARCO..... 106
TABLA 4.4 ESPECTRO DE FRECUENCIAS (ÁNGULO) DE LA CORRIENTE DE LA FASE A DEL HORNO DE ARCO..... 107
TABLA 4.5 DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC 112
TABLA 4.6 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC 113
TABLA 4.7 DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC 114
TABLA 4.8 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE CORRIENTE DE LAS FASES A, B Y C EN EL PCC..... 115
TABLA 4.9 LÍMITES PARA CONTENIDO ARMÓNICO DE VOLTAJE [36,37]... 118
TABLA 4.10 LÍMITES APLICABLES PARA CONTENIDO ARMÓNICO DE VOLTAJE 118
TABLA 4.11 COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE VHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE VOLTAJE DE LA NORMA IEEE 519..... 120
TABLA 4.12 COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE VTHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE DE LA NORMA IEEE 519 120
TABLA 4.13 LÍMITES PARA CONTENIDO ARMÓNICO DE CORRIENTES [36,37] 121

TABLA 4.14 LÍMITES APLICABLES PARA EL CONTENIDO ARMÓNICO DE CORRIENTE 123
TABLA 4.15 COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE IHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE DE LA NORMA IEEE 519 124
TABLA 4.16 COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE ITHD CALCULADOS CON LOS LÍMITES DE ITHD DE LA NORMA IEEE 519 125
TABLA 4.17 CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DEL HORNO DE ARCO DE NOVACERO S.A. 139
TABLA 4.18 VALOR DE PST EXCEDIDO POR EL HORNO DE ARCO DE NOVACERO S.A. EN EL PCC 145

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Modelar y simular el comportamiento en estado estacionario y dinámico del horno de arco, aplicado al caso de Novacero S.A., para determinar los índices de distorsión armónica y efecto flicker en el Sistema Nacional de Transmisión -SNT debido a la conexión del horno de arco de NOVACERO S.A.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar modelos para estado estacionario y dinámico de hornos de arco y aplicarlos al horno de arco de Novacero S.A.

- Simular el comportamiento en estado estacionario y dinámico del horno de arco de Novacero S.A. conectado a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló del SNT.

- Determinar el espectro del contenido armónico del horno de arco de Novacero S.A.

- Determinar los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados por la conexión del horno de arco de Novacero S.A. al SNT.

- Verificar si los índices de distorsión armónica y efecto flicker provocados por la conexión del horno de arco de NOVACERO S.A. al SNT se enmarcan en las Regulaciones establecidas por parte del CONELEC o normativas internacionales.

- Establecer medidas correctivas para reducir los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados por la conexión del horno de arco de NOVACERO S.A. al sistema nacional de transmisión.

ALCANCE

Se desarrollarán modelos de estado estacionario y dinámico de hornos de arco.

Los modelos se implementarán en el software Power Factory de DIgSILENT para el caso del horno de arco de NOVACERO S.A., y se aplicarán al modelo de red del SNT, con la finalidad de realizar simulaciones de la operación del horno de arco de Novacero S.A. en estado estable y dinámico que permitan determinar los índices de distorsión armónica y efecto flicker en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (Punto Común de Conexión).

Los índices de distorsión armónica se determinarán utilizando el módulo de armónicos de Power Factory.

El índice de flicker se calculará utilizando el flickermeter de la librería de Simulink de MATLAB.

Se verificará que los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados por el horno de arco, en el Punto Común de Conexión del SNT se encuentren dentro de los límites establecidos por el CONELEC o normativas internacionales aplicables.

Se establecerán medidas correctivas que podría realizar Novacero S.A. para disminuir los índices de distorsión armónica y el efecto flicker causados por la conexión de su horno de arco al SNT.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente en el país operan industrias siderúrgicas, de pequeña capacidad, que son abastecidas desde los sistemas de subtransmisión de las Empresas Distribuidoras, sin embargo, varios agentes están incrementando su capacidad de producción, por lo cual, han presentado solicitudes de acceso para conectarse al Sistema Nacional de Transmisión, sin que se cuenten con estudios detallados de los efectos causados por la conexión de sus hornos de arco al SNT.

De conformidad a lo establecido en el "Reglamento para el Libre Acceso a los Sistemas de Transmisión y Distribución", el 14 de diciembre de 2007 NOVACERO S.A. presento a TRANSELECTRIC S.A. la solicitud de acceso a la capacidad de transmisión existente o remanente del Sistema Nacional de Transmisión, en la subestación Mulaló de 138 kV

TRANSELECTRIC S.A. y el CENACE evaluaron la factibilidad técnica de conceder este acceso con la siguiente observación al estudio presentado: "La información del estudio de armónicos y flicker es limitada, por lo que se requiere se presente al menos la siguiente información":

- El espectro del contenido armónico del horno de arco.
- Los niveles de flicker presentados para condiciones de potencia mínima de cortocircuito del sistema.

Bajo estos y otros requerimientos se desarrollará la presente tesis de conformidad al Convenio de Prácticas y Pasantías Preprofesionales y Acuerdos de Cooperación entre la Escuela Politécnica Nacional y TRANSELECTRIC S.A.

RESUMEN

El desarrollo de la tesis “Modelación, simulación y determinación de índices de distorsión armónica y efecto flicker, en el Sistema Nacional de Transmisión, causados por la conexión de hornos de arco, aplicado al caso de Novacero S.A.” se realiza en cinco capítulos que se resumen a continuación:

En el capítulo uno se describe el principio de funcionamiento de los hornos de arco y el efecto que causa su conexión a los sistemas de potencia.

En el capítulo dos se realiza la modelación matemática del horno de arco en estado estacionario y dinámico. Se resume las características y funciones principales que contiene el software Power Factory de DIgSILENT.

En el capítulo tres se implementan los modelos en Power Factory y se aplican al horno de arco e instalaciones propiedad de Novacero S.A.

En el capítulo cuatro se realiza simulaciones del comportamiento en estado estacionario y dinámico del horno de arco, se determina los índices de armónicos y flicker en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (Punto Común de Conexión). Se realiza un breve análisis de las normas IEEE 519 e IEC 61000-4-15 que permitirá establecer si los índices de distorsión armónica y efecto flicker se encuentran dentro de límites establecidos por las normas.

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas al culminar el estudio.

PRESENTACIÓN

Las industrias han sido base fundamental de la economía de los países a nivel mundial, entre ellas se encuentra la industria siderúrgica que utiliza hornos de arco para la producción de acero de alta calidad.

Las industrias siderúrgicas ecuatorianas con el propósito de incrementar su producción, han realizado considerables inversiones para adquirir hornos de arco y equipos que permitan cumplir con sus metas de producción.

Para la operación de sus equipos requieren conectarse al Sistema Nacional de Transmisión -SNT, y de conformidad a lo establecido en el “Reglamento para el Libre Acceso a los Sistemas de Transmisión y Distribución” deben presentar la solicitud de acceso junto a estudios técnicos, necesarios para verificar la factibilidad técnica de la solicitud. NOVACERO S.A. ha presentado la solicitud de acceso al SNT y se encuentra tramitando los permisos correspondientes.

Los hornos de arco utilizados para la producción de acero consumen gran cantidad de energía eléctrica y causan varios problemas al sistema de potencia en el cual se conectan debido al comportamiento no lineal y aleatorio del arco eléctrico en el proceso de fundición.

En este estudio se realiza la modelación de hornos de arco, en el software Power Factory de DIgSILENT, aplicado a Novacero S.A. con la finalidad de establecer el grado de afectación a las instalaciones del SNT causado por su conexión a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló, mediante la determinación de los índices de distorsión armónica y efecto flicker.

CAPÍTULO 1

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE HORNOS DE ARCO Y EFECTO SOBRE SISTEMAS DE POTENCIA

1.1 EL ARCO ELÉCTRICO

El arco eléctrico, también llamado arco voltaico, es un tipo de descarga eléctrica continua que genera luz y calor intensos, se forma entre dos electrodos dentro de una atmósfera de gas a baja presión o al aire libre, es caracterizada por una alta corriente y bajo voltaje. La forma cuasi sinusoidal de la corriente del arco permite que en cada cruce por cero el arco se extinga.

El arco aparece en un medio gaseoso:

- Por perforación dieléctrica entre dos electrodos.
- Después de un contorneo sobre un material aislante con la degeneración del gas ambiente.

La descarga se produce por electrones que van desde el electrodo negativo al positivo, pero también, por iones positivos que se mueven en sentido opuesto, el impacto de los iones genera un intenso calor en los electrodos, el electrodo positivo se calienta más que el electrodo negativo debido a que los electrones que golpean contra él tienen mayor energía total.

El arco se forma por la ionización del gas y la creación del plasma permite el paso de la corriente eléctrica.

El gas ambiente se ionizará debido a:

- La presencia de electrones libres.
- La creación de iones positivos que se desplazan hacia el cátodo y mantienen su calentamiento.
- La creación de iones negativos que bombardeando el ánodo, provocan también su calentamiento.

El conjunto de toda esta agitación se produce en el seno de una columna de plasma a alta temperatura (3726 a 19727 ºC) que depende del valor de la corriente [1].

1.1.1 MODELO DE AYRTON

El estudio del arco eléctrico es inherente a la ingeniería eléctrica desde sus comienzos, a principios del siglo XX Hermitan Ayrton [3] planteó su ecuación de acuerdo al siguiente análisis: pensando en que la resistencia de arco es positiva, pero la resistencia incremental es negativa, se presenta una reducción del voltaje del arco al incrementarse la corriente del mismo. Si la longitud del arco permanece constante y se aumenta la corriente, entonces el voltaje del arco tiende a disminuir, esto se debe a que la conductividad de una columna de gas ionizado disminuye con la temperatura, que es más alta entre mayor sea la intensidad del arco y al aumentar la corriente de arco la temperatura crece, entonces el proceso de ionización se hace más activo disminuyendo el voltaje del arco [1] [3] [4].

Así, se puede decir que el voltaje del arco depende fundamentalmente de la longitud, si el arco es muy corto el voltaje será bajo, y por lo tanto, la corriente debe ser alta para mantener una potencia de entrada.

El voltaje del arco está caracterizado por formas de onda cuadrada, como una primera aproximación [1].

1.2 HORNOS DE ARCO

1.2.1 EQUIPAMIENTO BÁSICO Y OPERACIÓN

La instalación básica de un horno de arco consiste de una carcasa con techo, la carcasa está revestida con ladrillos cerámicos (normalmente con ladrillos refractarios de magnesita) que actúan como aislante entre el horno y el material fundido. En la parte superior de las paredes del crisol y las paredes interiores del techo se utilizan elementos de enfriamiento de agua en lugar de aislantes cerámicos, estos paneles enfriados por agua se ubican de tal manera que no exista un contacto directo con el acero líquido.

Previo al comienzo de las operaciones de fusión y calentamiento, el horno es cargado con material de acero reciclado utilizando una canasta que ha sido cuidadosamente cargada en el patio de carga, luego de la carga del material se cierra el techo y tres electrodos de grafito descienden hasta la chatarra, la energía eléctrica se enciende y al contacto se transforma en calor cuando se produce el arco eléctrico entre los electrodos y la chatarra. A medida que la material se funde, comienza a formarse un baño de acero líquido en el fondo del horno (figura 1.1).

Se hacen descender los electrodos a medida que la chatarra se funde y se hunde dentro de la misma, el movimiento vertical de los electrodos se obtiene mediante el ajuste de la posición de los brazos de los electrodos que son controlados por la realimentación del sistema eléctrico, regulando constantemente el rendimiento eléctrico para alcanzar un consumo óptimo de energía eléctrica en un punto específico predefinido.

A medida que la chatarra se funde, se dispone de mayor volumen dentro del horno y en un momento determinado la energía eléctrica se corta, se abre el techo del horno y se carga otra canasta de chatarra en el horno, nuevamente se energizan los electrodos y comienza la fusión de la segunda canasta. Cuando

todas las canastas de chatarra (normalmente 2 o 3) se han fundido, el calentamiento continúa por cierto tiempo a fin de sobrecalentar el acero hasta la temperatura final de la colada, durante este período normalmente denominado período de afino, pueden realizarse algunas operaciones metalúrgicas tales como la desulfuración, la defosforación y la decarburación.

Cuando el acero ha logrado la composición y la temperatura adecuadas, se corta el suministro de energía eléctrica del horno y se procede al colado del mismo [37].

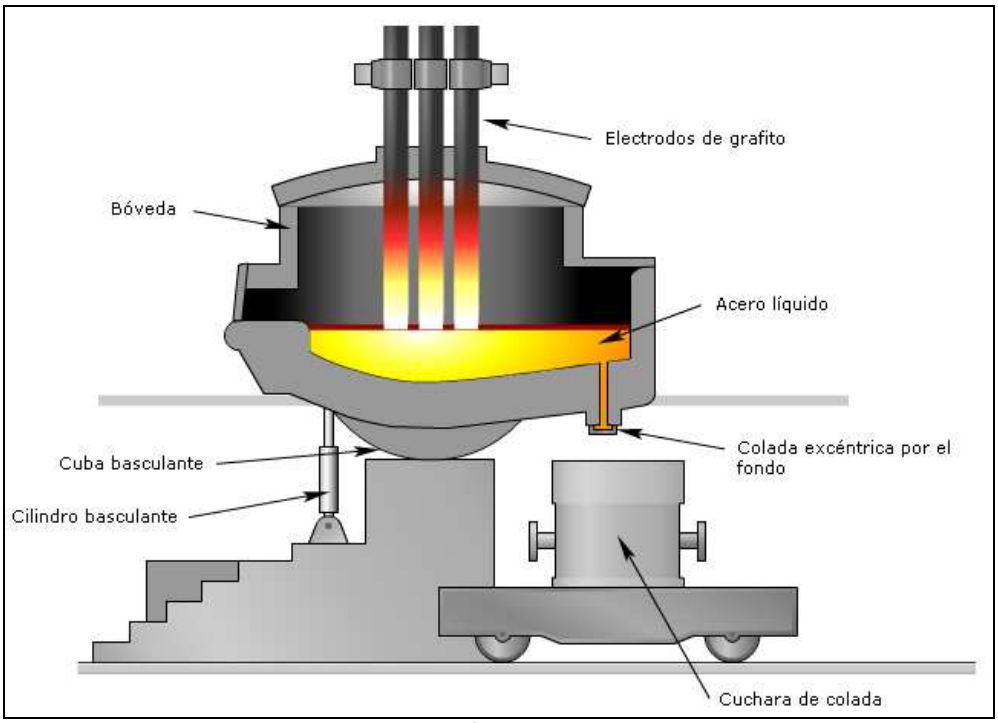


Figura 1.1 Disposición del Horno de Arco [37]

Los electrodos del horno de arco de corriente alterna tienen una disposición triangular desde una vista superior (figura 1.2), en el que la distancia irregular entre los electrodos en las diferentes posiciones a lo largo del perímetro de la pared del horno provoca una carga térmica asimétrica.

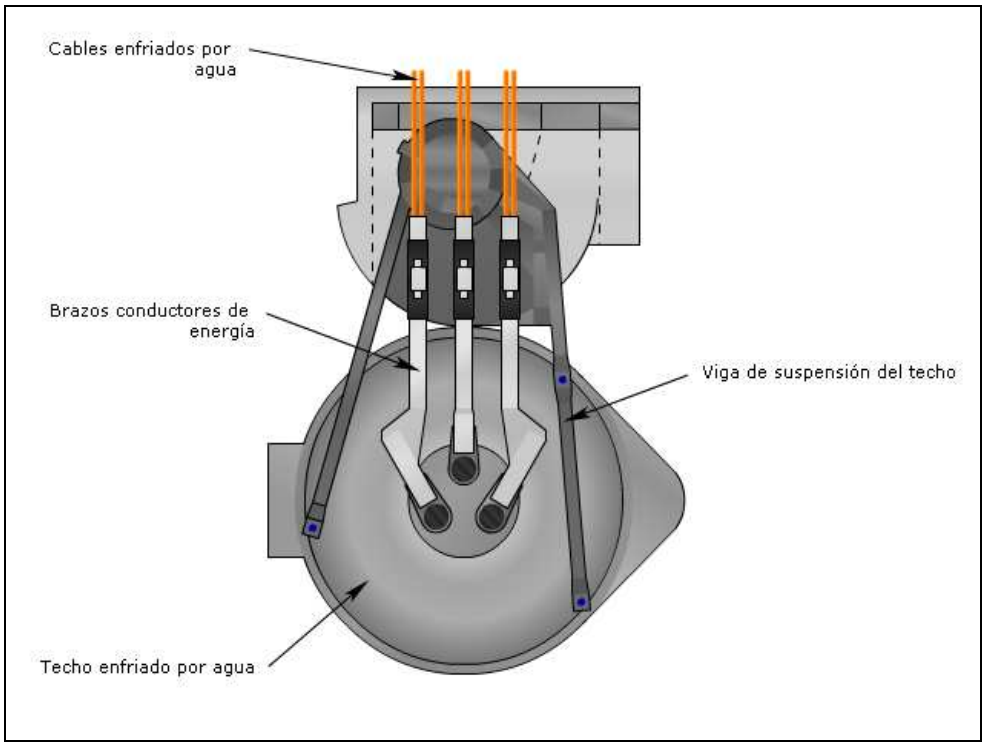


Figura 1.2 Vista Superior del Horno de Arco [37]

Además, las fuerzas electromagnéticas presentes en los arcos eléctricos hacen que estos se desvíen desde el centro hacia afuera, esto da como resultado una carga térmica desbalanceada sobre las paredes del horno, es decir, algunas áreas “puntos calientes” quedan fuertemente expuestas a la radiación del arco.

Para nivelar el desequilibrio térmico en el horno, se pueden introducir quemadores (figura 1.3) en las áreas de baja carga térmica "puntos fríos", los quemadores aumentan la energía total en el horno emitiendo calor en los puntos fríos así como también nivelando las diferencias de temperatura por medio de la convección.

Un quemador típico de horno de arco utiliza combustible gaseoso o aceite y será efectivo siempre que las llamas impacten en la chatarra, si bien esto da un resultado relativamente corto en el tiempo, la adición de energía es suficiente para nivelar en gran parte el desequilibrio térmico [37].

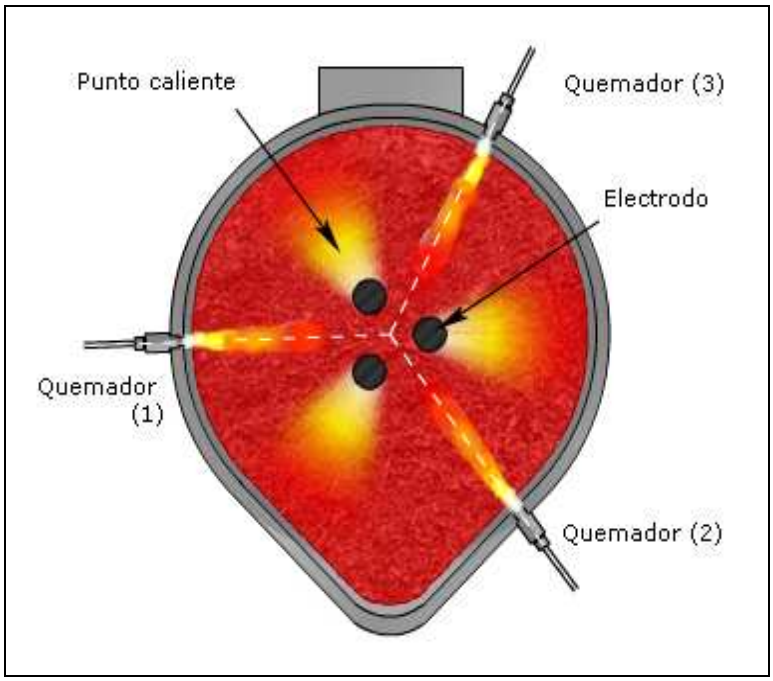


Figura 1.3 Quemadores Utilizados en Hornos de Arco [37]

Individualmente el horno de arco es quizás la carga más difícil para un sistema de potencia debido a su naturaleza no lineal y altamente aleatoria, este tipo de cargas ocasionan:

- Fluctuaciones de voltaje.
- Armónicos.
- Desbalances entre fases.
- Su operación demanda un bajo factor de potencia.

Al contrario de otras cargas no lineales basadas en elementos de electrónica de potencia, los hornos de arco son menos predecibles en su operación, por lo general cada instalación con horno de arco requiere de medidas de campo para caracterizar su funcionamiento. Debido a la complejidad en la operación del horno, hasta el momento no se cuenta con un modelo que pueda simular el funcionamiento dinámico de éste, la relación voltaje-corriente ha sido usada frecuentemente para caracterizar el horno bajo ciertas condiciones de operación. Afortunadamente, para la calidad de servicio en los sistemas de potencia, estas

cargas son mucho menos frecuentes si se compara con otros tipos de cargas no lineales. [1]

1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN HORNO DE ARCO

Los hornos de arco son equipos trifásicos que operan a frecuencia industrial conectados a un transformador reductor. El transformador del horno por lo general está conectado en estrella-delta con el fin de eliminar armónicos triples provenientes del horno. Se pueden conectar reactores en serie al primario para limitar los cambios bruscos de la corriente durante la operación del horno. Los requerimientos más importantes para el transformador del horno de arco son:

- Altas corrientes en el secundario.
- Bajo voltaje en el secundario.
- Amplio rango de regulación de voltaje (Taps).
- Alta impedancia de corto circuito.
- Capacidad de sobrecarga del 20% durante el proceso inicial de fundición.

El horno es energizado y desenergizado frecuentemente durante su operación, ocasionando condiciones severas a los interruptores que operan el horno, generalmente se utilizan interruptores de vacío para la operación de hornos de arco debido a su bajo mantenimiento y larga vida útil.

El ciclo de trabajo del horno dura entre 2 y 3 horas en el cual se distinguen básicamente dos etapas [1]:

- Fundición.
- Refinado.

1.2.2.1 Etapa de Fundición

Para poder iniciar el arco eléctrico se descienden los electrodos del horno hasta que tengan contacto con la chatarra, lo que provoca un cortocircuito a tierra

debido a que la chatarra está conectada a tierra. Posteriormente se elevan los electrodos, estableciéndose un arco eléctrico que dura hasta que el proceso de fundición termine, durante esta etapa el horno se recarga de una a tres veces, el arco voltaico es muy inestable y su longitud varía considerablemente debido al movimiento de la chatarra, por lo que se debe ejercer un control de arco con los brazos porta electrodos.

Al inicio de esta etapa se producen las mayores fluctuaciones de potencia activa y reactiva, fácilmente se puede pasar de una condición de corto circuito a una de circuito abierto, por lo cual puede ser necesario reiniciar varias veces el arco. También se presentan fuertes desbalances entre fases, debido a que una fase puede estar en cortocircuito y otra en circuito abierto.

Las grandes variaciones de potencia reactiva ocasionan severas fluctuaciones de voltaje en la red, por ello, el horno debe ser conectado en un punto con alto nivel de corto circuito, que por lo general sólo es posible en sistemas de alto voltaje. Para ayudar a mantener la estabilidad del arco durante esta etapa, el consumo de potencia activa es del mismo orden de la reactiva, a un factor de potencia de 0,7 [1].

1.2.2.2 Etapa de Refinado

Su duración depende de la calidad del acero que se quiere obtener, durante esta etapa respecto a la etapa de fundición el consumo de potencia activa es menor y el factor de potencia alcanza valores de hasta 0,9. Esta es una fase mucho más estable, donde las fluctuaciones de potencia activa y reactiva son menores y se deben fundamentalmente al burbujeo del material fundido [1].

1.2.3 ESTABILIDAD DEL ARCO

Para la fusión de chatarra, especialmente en el período inicial, el arco tiende a ser inestable y está caracterizado por factores de potencia elevados, en este período para estabilizar el arco es necesario que haya un desfasaje entre el voltaje de la

fuente y la corriente del arco eléctrico, de esa forma, cada vez que la corriente del arco se extingue el voltaje ya posee un valor elevado que permite la inmediata reignición del arco [2].

1.2.4 FACTOR DE POTENCIA DEL HORNO DE ARCO

Durante la etapa de fundición, el consumo de potencia activa y reactiva es del mismo orden a un bajo factor de potencia, el bajo factor de potencia permite un mayor aprovechamiento del horno reduciendo costos de operación, y se logra un arco mucho más estable.

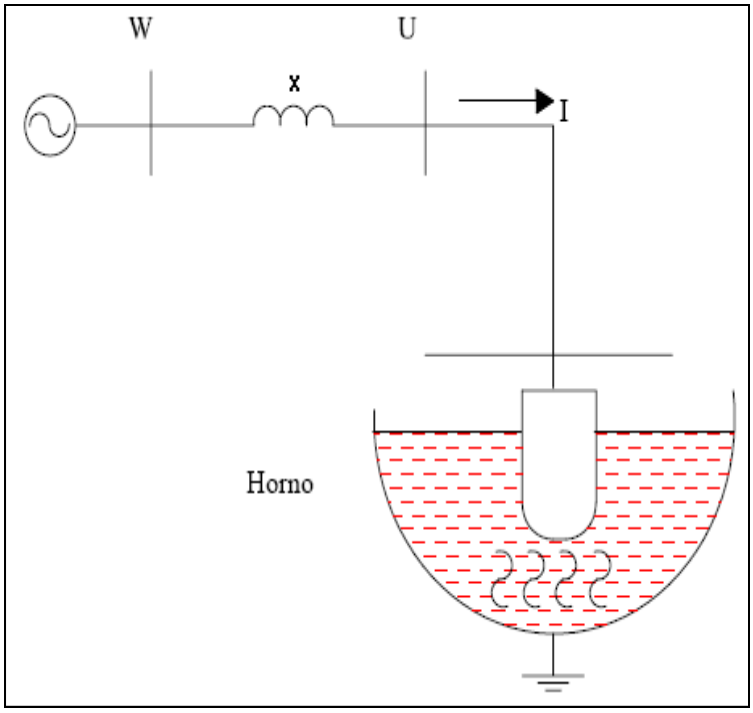


Figura 1.4 Simplificación del Circuito del Horno de Arco [1]

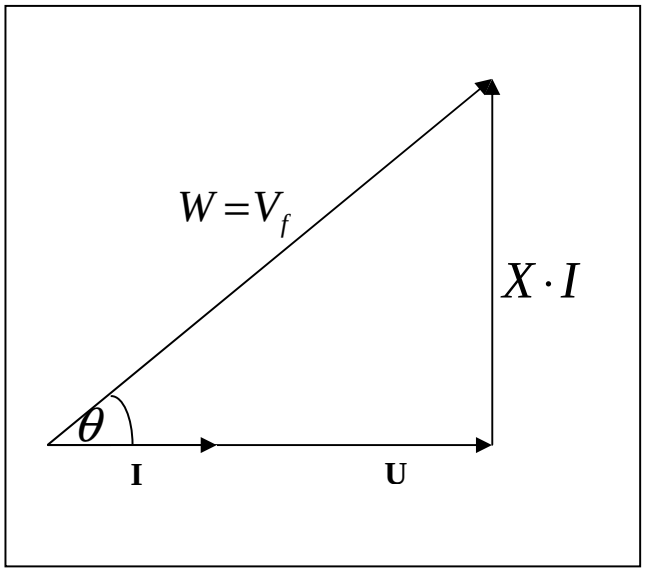


Figura 1.5 Diagrama Fasorial del Circuito Simplificado del Horno de Arco

Si se desprecian las componentes resistivas en el circuito del horno, como se muestra en las figuras 1.4 y 1.5, se tiene:

$$U = Vf \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(1.1)}$$

$$P = Vf \cdot I \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(1.2)}$$

$$X \cdot I = Vf \cdot sen(\theta) \quad \textbf{(1.3)}$$

De donde se obtiene:

$$P = \frac{Vf^2}{2 \cdot X} \cdot sen(2\theta) \quad \textbf{(1.4)}$$

La potencia transmitida al horno es máxima cuando $\theta = 45^{o}$ grados, que corresponde a un factor de potencia de 0,707. El desplazamiento angular entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico es casi cero debido a la naturaleza puramente resistiva del arco. Para una potencia nominal dada durante la etapa de fundición, el factor de potencia deseado se consigue seleccionando el voltaje apropiado en el secundario. Por ello, los transformadores usados en hornos de arco cuentan con un amplio margen de regulación de voltaje en el secundario.

1.2.5 FLUCTUACIONES DE VOLTAJE Y DESBALANCES DE CARGA

Durante la operación del horno, especialmente en la etapa de fundición, se presentan continuos desbalances de carga entre fases y fluctuaciones de voltaje debidas fundamentalmente a:

- Movimientos de la chatarra.
- Burbujeo del material fundido.
- Repulsión magnética entre los arcos.
- Movimiento de los conductores flexibles.

1.2.5.1 Desbalances de Carga

Los mayores desbalances se presentan cuando una o dos fases están en cortocircuito y la otra se encuentra en circuito abierto. En antiguas instalaciones, los conductores estaban dispuestos en el mismo plano, esto ocasiona desbalances en las reactancias ya que las impedancias mutuas no son iguales; pequeñas diferencias entre las reactancias de fase adquieren una importancia relevante en los desbalances de voltaje debido a las altas corrientes que circulan a través de los electrodos del horno de arco.

Los desbalances de voltaje conllevan a que el voltaje aplicado a los electrodos no sea el mismo, desarrollándose diferentes potencias en cada uno de ellos. El horno de arco es una carga no balanceada para el sistema de potencia [1].

1.2.5.2 Fluctuaciones de Voltaje

Las fluctuaciones de voltaje se deben principalmente al consumo variable de potencia reactiva, la severidad de estas fluctuaciones es mayor entre más débil sea la red; la fortaleza del sistema se mide en términos de su capacidad de cortocircuito en el Punto Común de Conexión (PCC) con la red.

Investigaciones sobre hornos de arco han mostrado que la potencia de cortocircuito subtransitoria del sistema de potencia en el PCC debe ser por lo menos de 80 a 100 veces la potencia nominal del horno para que los disturbios producidos por el horno sean tolerables, en un horno que utiliza equipos para la reducción de fluctuaciones de voltaje, este requisito puede ser reducido a la mitad, es decir 40 veces de la potencia nominal del horno [5-10].

1.3 ARMÓNICOS

En un sistema de potencia, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa suministradora del servicio como por los clientes, están diseñados para operar a frecuencia industrial (50 ó 60 ciclos), con un voltaje y corriente sinusoidal. Por diferentes razones se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias sobre algunas partes del sistema de potencia o dentro de la instalación de un usuario. La forma de onda existente está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental.

En la figura 1.6 se observa la descomposición de una onda distorsionada en una onda sinusoidal a la frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz) más una onda de frecuencia distinta.

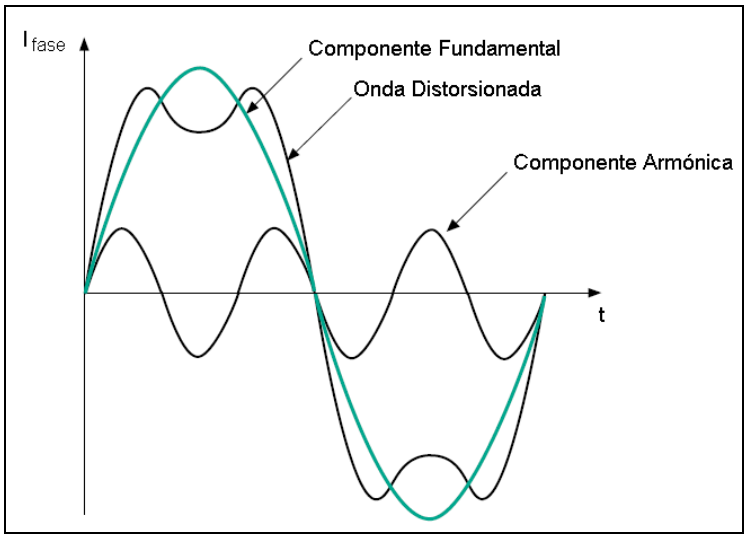


Figura 1.6 Onda Distorsionada [30]

1.3.1 DEFINICIÓN DE ARMÓNICOS

El término componente armónico o simplemente armónico, se refiere a cualquiera de las componentes sinusoidales que conforman la señal, cuya frecuencia es múltiplo de la frecuencia fundamental. La amplitud de los armónicos es generalmente expresada en porcentaje de la fundamental.

Los armónicos se definen habitualmente con los dos datos más importantes que les caracterizan, que son:

- Amplitud: hace referencia al valor del voltaje o corriente del armónico.
- Orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz).

El orden del armónico (ecuación 1.5), llamado también como el rango del armónico, es la relación entre su frecuencia f_n y la frecuencia fundamental f_1.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \qquad \textbf{(1.5)}$$

Por principio, la frecuencia fundamental f_1 tiene orden o rango 1.

Cualquier fenómeno periódico puede ser representado por una serie de Fourier:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(nwt - \varphi_n) \qquad \textbf{(1.6)}$$

donde:

Y_0 = Es la componente de corriente continua, la cual es generalmente cero en sistemas eléctricos de potencia.

Y_n = Valor rms de la componente (nth) armónica.

φ_n = Ángulo de fase de la componente (nth) armónica cuando t =0.

En la norma IEEE 519, se considera que los armónicos por encima del orden 40 son despreciables.

El valor del armónico es generalmente expresado en términos de su valor rms debido a que el efecto calorífico generado depende de este valor de la onda distorsionada. Para una onda sinusoidal su valor eficaz es el valor pico dividido por raíz cuadrada de 2.

Para una onda distorsionada, bajo condiciones de estado estable, la energía disipada por el efecto Joule es la suma de las energías disipadas por cada una de las componentes armónicas:

$$RI^2t = RI_1^2t + RI_2^2t + ... + RI_n^2t \qquad \textbf{(1.7)}$$

donde:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + ... + I_n^2 \qquad \textbf{(1.8)}$$

o también:

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_n^2} \qquad \textbf{(1.9)}$$

Este cálculo permite intuir uno de los principales efectos de los armónicos que es el aumento de la corriente eficaz que atraviesa una instalación debido a las componentes armónicas que lleva asociada una onda distorsionada [30].

1.3.2 DISTORSIÓN ARMÓNICA

Los armónicos se pueden definir como los infinitos términos de la descomposición de Fourier de una onda de voltaje o corriente no sinusoidal. En realidad, esta descomposición es solo una herramienta matemática para poder cuantificar

fácilmente el nivel de distorsión de una onda. Los armónicos perjudiciales son los de orden mayor que la unidad (2, 3, etc.).

El fenómeno de los armónicos se puede explicar del siguiente modo: las cargas no lineales producen una distorsión en la onda de corriente debido a que su consumo no es proporcional al voltaje aplicado, esta corriente no sinusoidal provoca caídas de voltaje no sinusoidales en todas las cargas lineales de la instalación, incluyendo las impedancias de la línea. Por eso, el voltaje resultante se ve distorsionado y afecta la alimentación de las demás cargas conectadas a la red, además de afectar a la propia carga generadora de armónicos.

En la actualidad, el problema de la distorsión armónica es cada vez mayor debido a que, actualmente, una cantidad importante de las cargas conectadas a la red eléctrica son no lineales. Ocasionado, en su mayor parte, por la enorme proliferación de la electrónica de potencia y su uso generalizado en todos los ámbitos de la electricidad. Así por ejemplo, a nivel doméstico casi todos los aparatos disponen de rectificadores (videos, ordenadores, modernas lavadoras, hornos microondas, etc.) y la iluminación se realiza en muchos casos con lámparas fluorescentes de bajo consumo sin reactancia que utilizan dispositivos electrónicos de control de voltaje.

En el apartado industrial cada vez se instalan más variadores de velocidad electrónicos para motores asíncronos de jaula de ardilla, ya que son motores que requieren de un bajo mantenimiento y son muy robustos. Además existen acerías que utilizan hornos de inducción de corriente alterna de alta frecuencia (generada a partir de una corriente continua rectificada de la red) y hornos eléctricos de arco (debido a la naturaleza del arco eléctrico y del proceso de fusión).

La polución eléctrica resultante se produce por grandes cargas aisladas, ó por el efecto acumulativo de gran cantidad de pequeñas cargas. Dicho efecto se debe principalmente a que este tipo de contaminación se suele propagar grandes distancias a lo largo de las líneas de distribución. Además del efecto acumulativo ya mencionado, se debe tener en cuenta el efecto de las resonancias, que se

producen en sistemas que cuentan con bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia. Estas resonancias hacen que la distorsión armónica pueda ser amplificada en puntos alejados de las fuentes de armónicos.

Frecuentemente, la presencia de la contaminación armónica se detecta a posteriori, como consecuencia de, por ejemplo, la destrucción de bancos de condensadores. Así resulta muy importante eliminar dicho problema en el origen antes de que lleguen a producirse efectos perjudiciales. Esto se puede conseguir mediante la instalación de filtros, con la instalación de estos equipos se trata de evitar que otros usuarios conectados a la red eléctrica sufran problemas en sus instalaciones y que la propia red presente un nivel excesivo de armónicos [28].

1.3.2.1 Índices de Distorsión Armónica

Los límites permitidos dependen del nivel de voltaje al cual está conectado el usuario, del tamaño relativo de la carga respecto al sistema, y del orden de los armónicos. La distorsión armónica se mide con los siguientes índices:

- Distorsión armónica individual (HD):

$$V_{HD} = \frac{V_h}{V_1} \qquad \textbf{(1.10)}$$

$$I_{HD} = \frac{I_h}{I_1} \qquad \textbf{(1.11)}$$

donde:

I_h = Corriente armónica.

I_1 = Corriente fundamental.

V_h = Voltaje armónico.

V_1 = Voltaje fundamental.

- Distorsión armónica total (THD):

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{40} V_h^{\,2}}}{V_1} \qquad \textbf{(1.12)}$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{2}^{40} I_h^{\,2}}}{I_1} \qquad \textbf{(1.13)}$$

Por definición el THD sólo es válido para ondas periódicas representadas por series de Fourier [1], [37].

1.3.3 PRINCIPALES PERTURBACIONES CAUSADAS POR ARMÓNICOS DE CORRIENTE Y VOLTAJE

Los armónicos de corriente y voltaje sobrepuestos a la onda fundamental tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes eléctricas.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no sinusoidales en diferentes puntos del sistema. Ellos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas, la circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que hacen que a los nodos del sistema no lleguen voltajes perfectamente sinusoidales.

Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico de potencia, más distorsionados serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

Los voltajes no sinusoidales son causantes de numerosos efectos que perjudican los equipos conectados al sistema [30].

La razón para el estudio de estos sistemas, que requiere herramientas y algoritmos complejos, estriba en los efectos negativos que produce la distorsión de la forma de onda. Estos efectos son de tres tipos [31]:

- Deterioro del aislamiento, por efecto de los armónicos de voltaje, especialmente en los condensadores.
- Efectos térmicos, debido a la circulación de corrientes armónicas. Estas corrientes armónicas producen pérdidas en el cobre de los circuitos eléctricos, o en el hierro de los circuitos magnéticos.
- Disrupción de la carga, que se puede definir como una operación anormal, o fallo, debido a la distorsión del voltaje. Estos efectos se manifiestan en el mal funcionamiento de los relés, o de los aparatos electrónicos conectados en las redes.

1.3.4 ARMÓNICOS PRODUCIDOS POR HORNOS DE ARCO

El comportamiento no lineal del arco eléctrico, y la variación de los valores de los parámetros del horno, resulta en una generación de armónicos cuya magnitud y orden no se puede predeterminar fácilmente.

El espectro de frecuencias del voltaje un horno de arco es continuo, los armónicos predominantes son el 3, 5, 7, 9, 11, etc., decrecientes en magnitud a medida que aumentan en orden, incluso, el horno de arco puede producir niveles DC y armónicos pares. La mayor dificultad en la predicción del espectro armónico es su carácter estocástico, especialmente en la etapa de fundición, en la cual se incrementa la producción de armónicos.

La corriente en un horno de arco es mucho más sinusoidal que el voltaje, el cual está caracterizado por ondas cuadradas (modelo de arco simplificado), en este sentido el horno de arco se puede considerar como una fuente de armónicos de voltaje.

En la Tabla 1.1 se presentan algunos valores que son el resultado de varias mediciones en instalaciones de horno de arco [1].

Tabla 1.1 Armónicos de Voltaje Medidos en un Horno de Arco [1]

ARMÓNICO	PEOR CASO % FUNDAMENTAL	TÍPICO % FUNDAMENTAL
2	17,0	5,0
3	29,0	20,0
4	7,5	3,0
5	10,0	10,0
6	3,5	1,5
7	8,0	6,0
8	2,5	1,0
9	5,0	3,0

1.3.5 FILTROS DE ARMÓNICOS

Es sin duda la solución más evidente para controlar las componentes armónicas, un filtro en general puede actuar de una de las siguientes formas:

- Introducir una alta impedancia en serie para bloquear el paso de las corrientes armónicas.
- Derivar a tierra las corrientes armónicas a través de caminos de baja impedancia.
- Inyectar armónicos en oposición de fase a los presentes en la red para cancelarlos.

Existen dos tipos de filtros que utilizan los sistemas de potencia [1]:

- Filtros pasivos.
- Filtros activos.

1.3.5.1 Filtros Pasivos

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para armónicos de voltaje o corriente; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita. Los filtros pasivos pueden ser de dos tipos:

- Filtros Series.
- Filtros Shunt o paralelo.

1.3.5.1.1 Filtros Series

Los Filtros Series evitan el paso de una componente de frecuencia particular, desde el contaminante hacia alguna componente de la planta o parte del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada. Estos constan de un inductor y un capacitor en paralelo que se colocan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

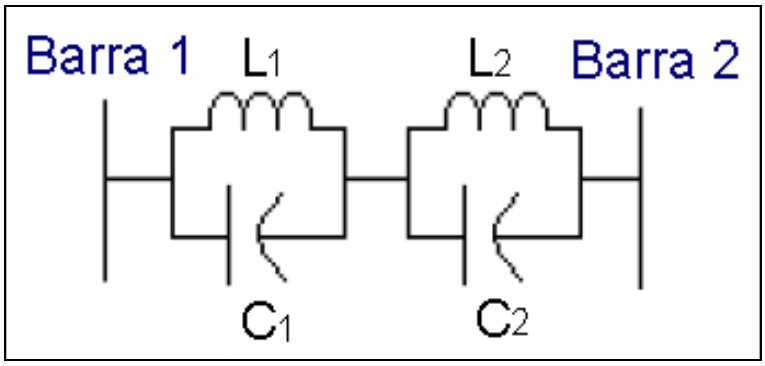


Figura 1.7 Filtro Pasivo Serie

1.3.5.1.2 Filtros Shunt

Los Filtros Shunt o paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y consisten en una rama resonante serie (baja impedancia al paso de corriente), compuesta por elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación, entre otros.

El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie porque es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado, proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema.

Existe una gran variedad de configuraciones de filtros, pero las más utilizadas son los Filtros Sintonizados Simples y los Pasa Altos.

1.3.5.1.2.1 Filtro Sintonizado Simple

Elimina una armónica determinada; consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor (figura 1.8).

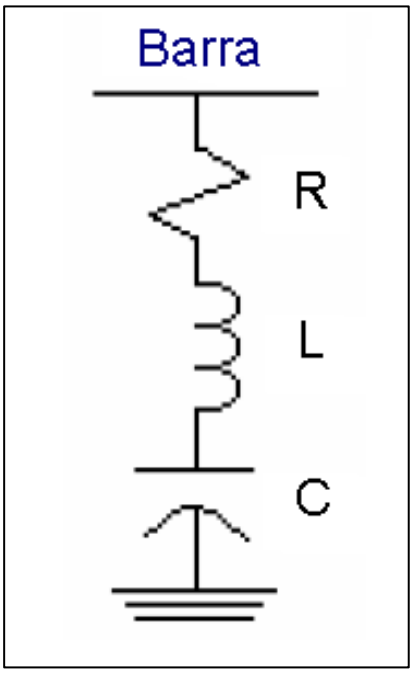


Figura 1.8 Filtro Sintonizado Simple

donde:

R = Resistencia interna de la inductancia.

L = Inductancia.

C = Capacitancia.

Este filtro se sintoniza a la frecuencia armónica h que se desea eliminar, para esta frecuencia, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales y por lo tanto se anulan, entonces la impedancia que presentará el filtro para esta frecuencia es mínima (valor igual a la resistencia), y absorberá gran parte de la corriente armónica contaminante.

1.3.5.1.2.2 Filtros Pasa Altos

Son utilizados para eliminar un amplio rango de frecuencias, y se emplean cuando las armónicas no tienen frecuencia fija.

Este filtro, al igual que el sintonizado simple, se sintoniza a alguna frecuencia específica; pero debido a que posee una característica amortiguada producto de la resistencia en paralelo con la inductancia (figura 1.9), presenta una baja impedancia para la frecuencia de sintonía y superiores a ésta. Absorbe corrientes armónicas, si existen, frecuencias desde la de sintonía en adelante. Para frecuencias menores a la sintonía, el filtro presenta impedancias altas.

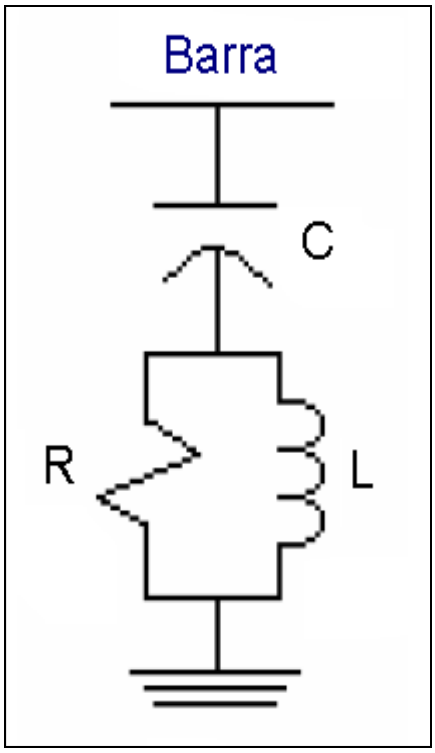


Figura 1.9 Filtro Pasa Altos

1.3.5.1.2.2.1 Ventajas

- Atenúa un amplio espectro de frecuencias armónicas de acuerdo a la elección del valor de las ramas paralelas.
- Es muy robusto frente a problemas de pérdida de sintonía comparado con el filtro sintonizado simple.

1.3.5.1.2.2.2 Desventajas

- Origina una frecuencia de resonancia paralela (baja admitancia al voltaje de alimentación) al interactuar con la red.
- Las pérdidas en la resistencia y en el inductor son generalmente altas.
- Para alcanzar un nivel similar de filtrado (de una armónica específica), que el sintonizado simple, el filtro pasa altos necesita ser diseñado para una mayor potencia reactiva.

1.3.5.1.3 Problemas de los Filtros

Uno de los mayores problemas de los filtros es que se produzca la desintonía de estos. Los cuatro eventos más comunes que pueden dar como resultado una desintonización del filtro son:

- Deterioro de los condensadores, lo cual disminuye la capacitancia total y con esto aumenta la frecuencia a la cual el filtro fue sintonizado.
- Tolerancia de fabricación tanto en el reactor como en los condensadores.
- Variación de temperatura.
- Variación en el sistema.

Típicamente, los filtros se sintonizan aproximadamente entre un 3% y un 10% por debajo de la frecuencia deseada. Esto para tener la opción de una buena operación del filtro en un rango mayor de tiempo de vida útil.
De los cuatro eventos mencionados anteriormente los tres primeros tienen relación con variaciones propias de los elementos constitutivos de los filtros,

mientras que el último depende de las variaciones del equivalente del sistema [46].

1.3.5.2 Filtros Activos

Son elementos de electrónica de potencia, los cuales trabajan usando un convertidor de potencia conectado en paralelo para producir corrientes armónicas iguales a las que se encuentran en la corriente de carga, asegurando que su trayectoria sea la de sacar las corrientes armónicas fuera de la trayectoria del sistema de potencia. La reducción de las armónicas depende sólo de la medición armónica correcta que se está generando en la carga.

Estos filtros han tenido una mayor aplicación, teniendo la desventaja de ser más caros y de que consumen potencia en cantidades significativas, creando además niveles altos de interferencia electromagnética [1].

1.4 FLICKER O PARPADEO DE FUENTES LUMINOSAS

1.4.1 DEFINICIÓN DEL FLICKER

El flicker es el efecto de luminosidad resultante de pequeñas fluctuaciones de voltaje provocadas por el funcionamiento de cargas variables importantes como hornos de arco, equipos de soldadura, motores, etc.

Provoca una fatiga física y psíquica a los usuarios de iluminación conectada cerca de la carga perturbadora.

El flicker o parpadeo de la luz (del inglés: to flicker = parpadear, titilar) se define como “impresión subjetiva de fluctuación de la luminancia” (IEC 555-1). Es un fenómeno de origen fisiológico visual que acusan los usuarios de lámparas alimentadas por una fuente común a una iluminación y a una carga perturbadora.

La cuantificación y la medida del fenómeno del flicker resultan bastante complejas, puesto que al mismo tiempo intervienen factores técnicos, fisiológicos y psicológicos.

En bajo voltaje, los valores límite aceptables tienen un significado físico. Están basados en sensaciones de molestia real: El valor de Pst (flicker de corto término) = 1 corresponde a un umbral de molestia experimentada por un observador promedio, por el contrario en medio y alto voltaje los valores límite no tienen significado directo, no hay iluminación conectada a estos niveles de voltaje y, por tanto, no se puede experimentar ninguna sensación de molestia, la molestia del parpadeo se pone de manifiesto en las lámparas de bajo voltaje. Pero, las cargas perturbadoras pueden encontrarse conectadas a cualquier nivel de voltaje [16].

El nivel de flicker es un número que indica cuanto por arriba del umbral de perceptibilidad se presenta la sensación visual correspondiente [27]. En teoría, se considera que la relación de transmisión de la tasa de flicker de un nivel superior de voltaje hacia un nivel inferior es igual a 1, todo flicker presente en medio o alto voltaje se transfiere al nivel de bajo voltaje. En la práctica, el flicker se atenúa por efecto estabilizador del voltaje debido a los motores y generadores conectados a todos los niveles de voltaje aguas abajo de la red alto voltaje considerada [16].

Los hornos de arco son una fuente de fluctuaciones tipo flicker en el rango de 0,5 a 30Hz, aunque este tipo de carga es la que provoca mayores problemas de flicker existen otras cargas o condiciones que lo pueden ocasionar, tales como [1]:

- Cortocircuitos.
- Operación de pararrayos.
- Transitorios debido a maniobras.
- Motores con cargas variables (compresores, bombas), que ocasionan fluctuaciones cíclicas.
- Soldadores eléctricos.
- Hornos de inducción.

En el caso de los hornos de arco, las variaciones de la longitud del arco provocan fluctuaciones de voltaje que se propagan por el circuito de alimentación hasta llegar a los usuarios de bajo voltaje. La frecuencia de esas fluctuaciones coincide con la frecuencia de fluctuación de la iluminación que es detectada por el ojo humano (1 a 15 Hz, aproximadamente), provocando una cierta incomodidad a los consumidores residenciales. Actualmente, el nivel de flicker es medido por instrumentos calibrados de acuerdo con los estudios de la Unión Internacional de Electrotermia (UIE) realizados a partir de 1980 y posteriormente adoptados por la norma IEC 868 (Flickermeter: Functional and design specifications).

Los niveles de flicker son proporcionales a la relación entre la potencia del horno y la potencia de cortocircuito del PCC con los otros consumidores [17].

1.4.2 DETERMINACIÓN DEL FLICKER EN UNA INSTALACIÓN

Antes de instalar un equipo generador de fluctuaciones de voltaje en una red, hay que conocer la tasa de flicker que aporta a la red. Esta tasa de flicker depende a su vez de las características del equipo y de la red a la cual estará conectado. La determinación previa del flicker se realiza mediante un análisis teórico de la red y del perturbador, que permite la estimación de la tasa de flicker.

El análisis del flicker se realiza en el PCC, o punto de la instalación común al perturbador y al alumbrado [16].

1.4.2.1 Método Cualitativo

La primera y más sencilla determinación previa de flicker se realiza analizando la relación entre la potencia de la carga perturbadora y la potencia de cortocircuito de la red.

- Como norma general, el flicker no provoca ninguna molestia si la potencia aparente del conjunto de cargas perturbadoras es inferior al 1 % de la potencia de cortocircuito de la red en el punto común de conexión.

- Entre el 1 y el 2 % hay una zona de incertidumbre donde la molestia admisible depende en gran parte del tipo de carga, de la proximidad a las redes de alumbrado, etc.
- Por encima del 2 % hay que tomar medidas para reducir el flicker al nivel admisible.

En la zona de incertidumbre y más arriba, es necesario conocer la tasa de flicker de la carga a instalar a fin de evaluar la necesidad de reducción del flicker. Se han propuesto varios métodos aproximados basados principalmente en la extrapolación de medidas de flicker tomadas de instalaciones semejantes o en un método analítico que calcula el parámetro Pst de una instalación a partir de las características de la variación de tensión [16]. El parámetro Pst (flicker de corto término) evalúa la severidad del flicker a corto plazo, con intervalos de observación de 10 minutos. El valor del Pst se expresa en unidades de perceptibilidad (p.u.), de modo que, para valores de Pst superiores a 1, se considera que el flicker es perceptible y afecta por lo tanto la visión.

1.4.2.2 Método para los Hornos de Arco

Se proponen dos métodos para la estimación del flicker:

- El primero se basa en la dosis de flicker antiguamente utilizada en Francia [26].
- El segundo método calcula el valor de Pst.

1.4.2.2.1 Método de la Dosis de Flicker

La dosis de flicker, primer parámetro de cuantificación del flicker, utilizado en Francia, se ha establecido a partir de experimentaciones:

- La sensación de molestia es función del cuadrado de la amplitud de la fluctuación de voltaje y de su duración.

- La sensibilidad del observador medio a las fluctuaciones de iluminación es máxima alrededor de 10 Hz (8,8 Hz).
- El límite mínimo de percepción para esta frecuencia de 8,8 Hz es 0,25% (figura 1.10).

Estos resultados permiten definir un parámetro de cuantificación de la molestia percibida sobre un periodo de observación determinado (normalmente 1 minuto), se llama dosis de flicker y se expresa en $\%^2 \cdot mn$ (por ciento al cuadrado minuto). La dosis de flicker proporciona una valoración de la cantidad de molestia a lo largo de una duración determinada. La definición de la dosis de flicker se basa en experimentos realizados con una lámpara de incandescencia de 60 W, 50 Hz, 220 V.

En Francia ya no se acostumbra a usar la Dosis de flicker. Para expresar la severidad del flicker ahora se usan otras magnitudes (Pst) [16].

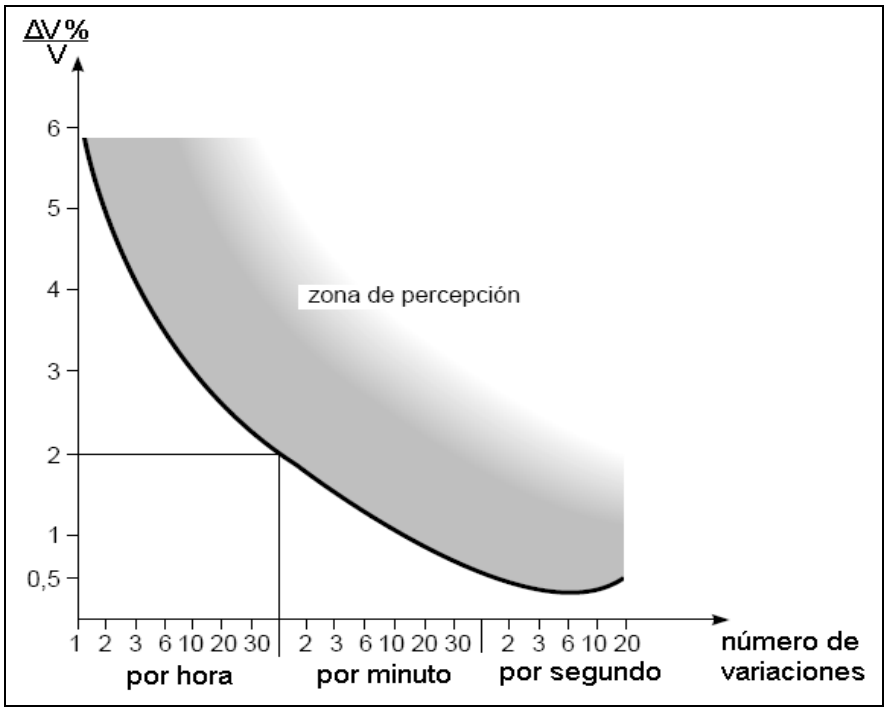


Figura 1.10 Límite de Sensibilidad del Ojo a las Variaciones de Iluminación causadas por Fluctuaciones de Voltaje, en Lámparas de Incandescencia [16]

La dosis de flicker generada por un horno de arco de corriente alterna (figura 1.11) se obtiene por la ecuación 1.14.

$$G = k^2 \cdot \left(\frac{X_n}{X_n + X_f} \right)^2 \cdot t \qquad \textbf{(1.14)}$$

donde:

X_n = Reactancia de cortocircuito aguas arriba de la red de alimentación, vista desde el PCC.

X_f = Conjunto de reactancias de toda la conexión eléctrica desde el PCC hasta el horno (transformador reductor, cables de medio voltaje, posible reactancia en serie, transformador del horno y todas las conexiones de bajo voltaje del horno).

k = Coeficiente experimental (determinado a partir de varias instalaciones: $k = 11{,}25$).

t = Duración de la observación; por ejemplo 1 minuto.

El límite máximo de la dosis de flicker estimada considerada habitualmente como admisible es [16]: $G = 0{,}09(\%)^2 \cdot \min$

De aquí proviene la siguiente regla: el riesgo de perturbaciones molestas debidas a un horno de arco de corriente alterna se estima como casi nulo [16]:

- Si la reactancia de cortocircuito de la red X_n y la reactancia de cortocircuito del horno X_f están en una relación tal que $X_f / X_n > 36$ [16].
- Si la potencia de cortocircuito ($Scc = V^2/X$) de la red ($Sccn$) y la potencia de cortocircuito del horno ($Sccf$) están en una relación tal que $Sccn/Sccf > 36$ [16].

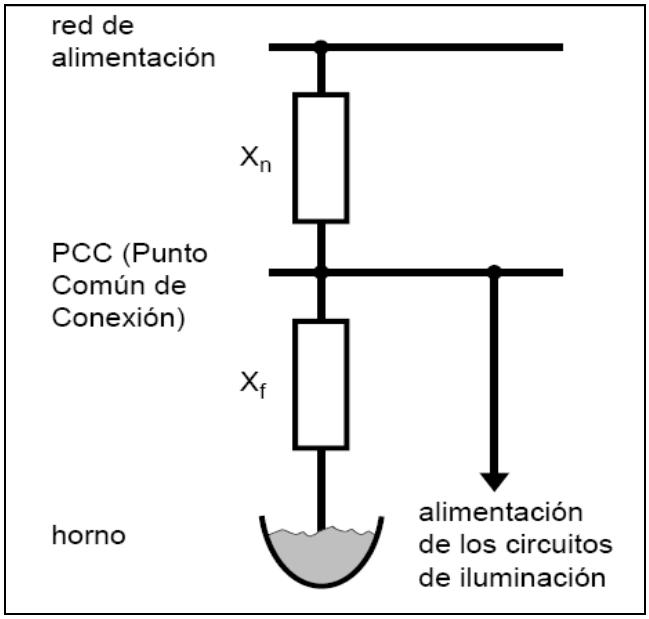


Figura 1.11 Esquema Eléctrico Equivalente de la Alimentación Eléctrica de un EAF [16]

1.4.2.2.2 Método de Cálculo del Pst

Se obtiene una estimación del valor de Pst para un horno de arco de corriente alterna con la fórmula experimental [21]:

$$Pst = Kst \cdot \frac{Sccf}{Sccn} \cdot \frac{1}{R_{SVC}} \cdot C_{AV/BV} \qquad \textbf{(1.15)}$$

donde:

Kst = Coeficiente experimental (comprendido entre 48 y 85, con un valor medio igual a 61, y un valor aconsejado igual a 75).

$Sccf$ = Potencia de cortocircuito del horno, electrodos dentro del baño.

$Sccn$ = Potencia de cortocircuito de la red a nivel del PCC.

R_{SVC} = Factor de reducción aportado por una instalación de compensación estática.

$C_{AV/BV}$ = Coeficiente de atenuación para la transmisión del flicker de alto voltaje hacia bajo voltaje (entre 0,5 y 1).

El nivel de flicker generado por un horno de arco de corriente continua es aproximadamente la mitad del emitido por un horno comparable de corriente alterna [21].

1.4.3 SOLUCIONES

Se pueden considerar diversas soluciones que se presentan en los párrafos siguientes comenzando por las más fáciles de implementar.

1.4.3.1 Elección del Sistema de Iluminación

Ya que existen fuentes luminosas más o menos sensibles al flicker (Anexo 1), la solución evidente y la primera que hay que considerar es elegir adecuadamente estas fuentes.

La tabla del Anexo 1 indica que las lámparas fluorescentes tienen una sensibilidad a las variaciones de voltaje dos o tres veces menor que las lámparas de incandescencia. Así pues se presentan como la mejor elección [16].

1.4.3.2 Ondulador

Es el caso en que la molestia debida al flicker se limita a un grupo de usuarios bien identificado, se puede considerar “limpiar” la línea de salida para la iluminación por medio de la instalación de un regulador de voltaje o de un ondulador. La inversión de una instalación como ésta puede ser relativamente pequeña, pero esta solución sólo es un remedio local [16].

1.4.3.3 Modificación del Perturbador

El flicker puede atenuarse modificando el ciclo de funcionamiento de la carga perturbadora: ritmo de soldadura, rapidez de rellenado del horno, cuando el arranque directo y frecuente de un motor es la causa del flicker, puede adoptarse un modo que reduzca la sobrecorriente [16].

1.4.3.4 Inclusión de un Volante de Inercia

En ciertos casos particulares, una carga giratoria puede provocar fluctuaciones de voltaje; un volante de inercia sobre su árbol motor las reduce [16].

1.4.3.5 Conversor Rotativo

Un grupo motor-generador reservado para la alimentación de la carga fluctuante es una solución válida si la potencia activa de esta carga es relativamente constante, pero su precio es elevado [16].

1.4.3.6 Modificación de la Red

Según la estructura de la red, se pueden considerar dos métodos:

- Aislar la carga perturbadora de los circuitos de iluminación.
- Aumentar la potencia de cortocircuito de la red disminuyendo su impedancia (en el Punto de Conexión Común, PCC).

Para esto son posibles diversos esquemas:

- Conexión de los circuitos de iluminación lo más cerca posible de la fuente de alimentación (transformador).
- Aumento de la potencia del transformador común (con el voltaje de cortocircuito (Vcc %) constante).
- Disminución del Vcc del transformador común (a potencia constante).
- Puesta en paralelo de transformadores suplementarios.
- En bajo voltaje, el aumento de la sección de los conductores.
- Conexión de la carga perturbadora a una red de voltaje más elevado.
- Alimentación de la carga por un transformador independiente.

1.4.3.6.1 Capacidad Serie

La introducción de un capacitor en serie en la red (figura 1.12a) aguas arriba del PCC de la carga perturbadora y de los circuitos sensibles al flicker, puede reducir a la mitad las fluctuaciones de voltaje. Esta solución presenta una ventaja suplementaria, pero también un inconveniente [16]:

- La ventaje es que asegura, además, una producción de energía reactiva;
- El inconveniente es que hay que proteger los condensadores contra cortocircuitos aguas abajo.

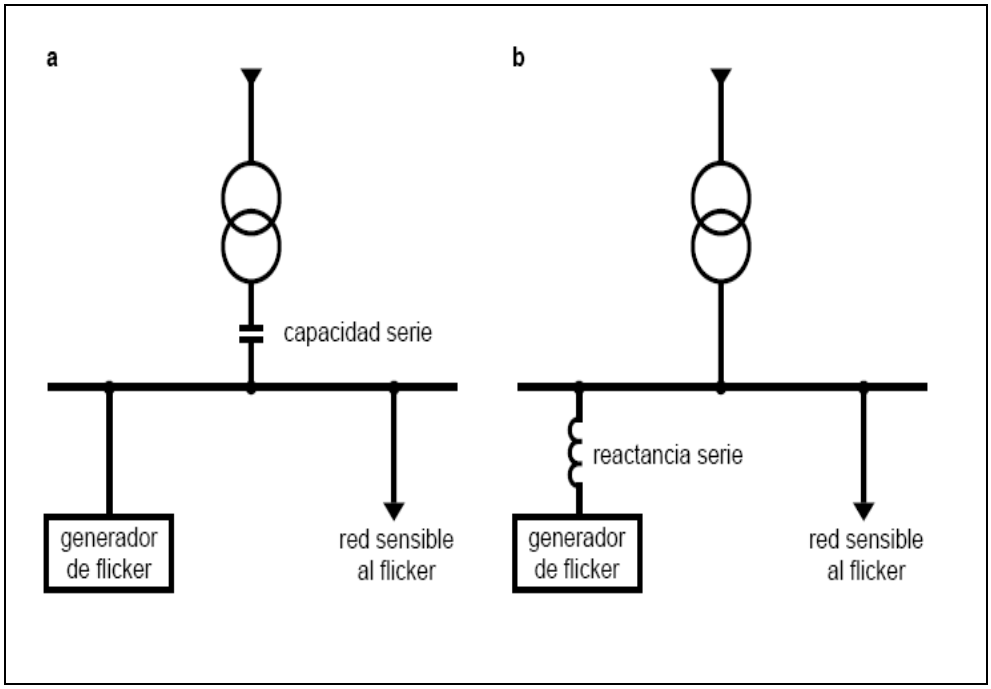


Figura 1.12 Modificaciones de la Instalación que Permiten Reducir el Flicker [16]

a.- Capacidad en serie en la red.

b.- Reactancia en serie.

1.4.3.6.2 Reactancia Serie

Utilizada en combinación con hornos de arco, esta solución puede reducir en un 30 % la tasa del flicker.

La reactancia se inserta en serie con la alimentación de alto voltaje del horno aguas abajo del PCC (figura 1.12b), puede incluirse en el transformador del horno. Con frecuencia contiene un dispositivo de reglaje sin voltaje (tomas atornilladas) y una posibilidad de cortocircuitado.

Su principal efecto positivo sobre las variaciones de voltaje es que reduce la potencia de cortocircuito demandada por el horno. Además, estabiliza el arco del horno. Así las fluctuaciones de voltaje son menos bruscas y el funcionamiento aleatorio del arco se reduce. La influencia de la reactancia sobre la emisión del flicker del horno puede estimarse por la modificación de la reactancia X_f o S_{ccf} .

Su inconveniente es que la reactancia es atravesada por la corriente de carga del horno y consume energía reactiva [16].

1.4.3.6.3 Compensador Estático (SVC)

El equipo SVC (Static Var Compensator) sirve para compensar automáticamente la energía reactiva (figura 1.13). Su uso también permite reducir el flicker entre un 25 % y un 50 %.

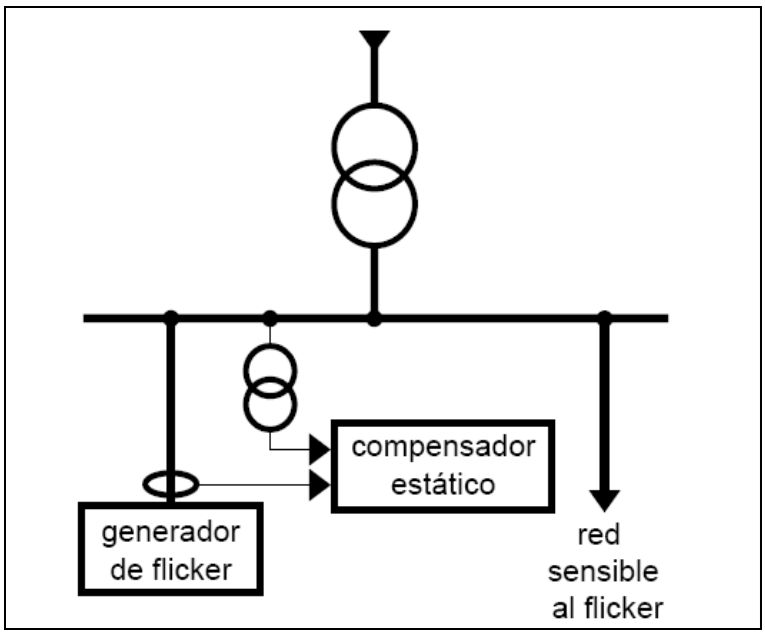


Figura 1.13 Esquema de la Instalación de un Compensador Estático [16]

La ecuación 1.16 da un valor estimado del coeficiente de reducción del flicker que se obtiene con un SVC:

$$R_{SVC} \approx 1 + 0{,}75 \cdot \frac{S_{SVC}}{S_f} \qquad \textbf{(1.16)}$$

donde:

R_{SVC} = Factor de reducción de Pst.

S_{SVC} = Potencia del compensador (VAr).

S_f = Potencia del horno (VA).

Su esquema de principio es el de la figura 1.14.

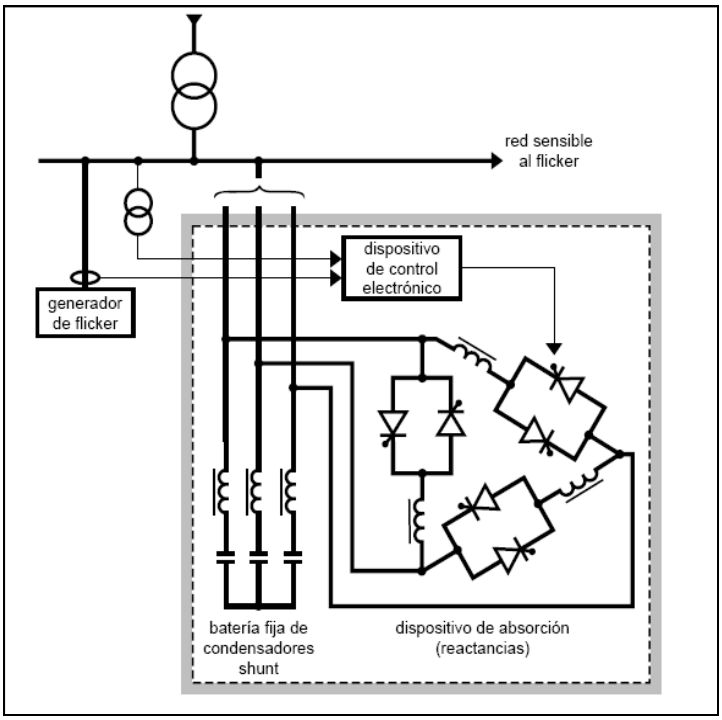


Figura 1.14 Esquema Simplificado de un Compensador Estático [16]

Incorpora unas inductancias de compensación, una batería fija de compensadores shunt con un filtro y un dispositivo electrónico a base de tiristores. El dispositivo

electrónico sirve para variar el consumo de energía reactiva de las inductancias para mantener prácticamente constante la potencia reactiva absorbida por el conjunto generador de flicker, batería fija de compensadores e inductancias de compensación.

Esta compensación fase por fase es de un interés evidente con los hornos de arco cuyos regímenes de funcionamiento son esencialmente desequilibrados. Los resultados de este tipo de compensadores son notables [16].

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

2.1 GENERALIDADES

Los estudios sobre sistemas eléctricos de potencia se basan en simulaciones de fenómenos reales usando modelos matemáticos para representar el comportamiento del sistema real. En la práctica, en el sistema eléctrico se presentan fenómenos en régimen permanente y transitorio simultáneamente, y dadas sus diferentes características no es posible definir un único modelo capaz de emular el comportamiento real para todo el rango de tiempo.

Para modelar un sistema eléctrico, se debe tener un adecuado conocimiento de las características de funcionamiento y de los parámetros que definen cada uno de los equipos que integran el sistema a simular. Por tanto se deben considerar los siguientes aspectos:

- ¿Cómo se puede representar cada componente del sistema eléctrico para facilitar los análisis y estudios eléctricos?
- ¿Qué modelos son los que describen mejor el sistema para realizar un estudio determinado?
- ¿Qué expresiones matemáticas describen las características de cada elemento del sistema para que puedan ser incluidas en la herramienta de simulación?

Al diseñar un modelo se debe decidir que parámetros es necesario incluir en el mismo, para disponer de información suficientemente simplificada, y que parámetros se pueden obviar. Una vez que el modelo está desarrollado, su ajuste se realiza comparando los resultados obtenidos con datos reales medidos sobre

el sistema real, únicamente de esta forma es posible garantizar que el modelo diseñado es el adecuado [28].

2.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL HORNO DE ARCO

La operación normal de los hornos de arco conectados al sistema de transmisión causa disturbios en las redes eléctricas que afectan significativamente la calidad de voltaje proporcionada por las empresas de transmisión.

El horno de arco eléctrico es un elemento no lineal, en el que su carga varia en el tiempo generando armónicos y fluctuaciones de voltaje. La generación de armónicos está principalmente relacionada con la no linealidad de la característica voltaje-corriente del arco eléctrico, mientras que las fluctuaciones de voltaje que causan el fenómeno flicker se producen por los cambios de la longitud del arco eléctrico que ocurren durante la fundición de la chatarra.

La distorsión armónica de voltaje y corriente causa varios problemas en los sistemas de potencia como: operación incorrecta de dispositivos, envejecimiento prematuro de equipos, pérdidas adicionales en los sistemas de transmisión y distribución, sobrevoltajes y sobrecorrientes.

El fenómeno flicker no afecta en gran medida a los equipos eléctricos, pero causa malestar fisiológico visual a los usuarios de iluminación debido a las fluctuaciones del flujo luminoso especialmente en lámparas incandescentes.

Por estas razones es de crucial importancia predecir los efectos que causa la conexión o repotenciación de hornos de arco a los sistemas eléctricos de potencia.

La mayor dificultad en la modelación del horno de arco es caracterizar con precisión el comportamiento del arco eléctrico. Incluso en la misma etapa del ciclo

de fundición, el voltaje y la resistencia del arco eléctrico pueden cambiar significativamente.

Para caracterizar la operación del horno de arco se desarrollan dos modelos:

- Modelo en Estado Estacionario: Representa el comportamiento altamente no lineal del arco eléctrico en cada semiciclo, que es causa principal de la generación de armónicos.
- Modelo en Estado Dinámico: Simula las variaciones de la longitud del arco eléctrico debido a los cambios ocurridos en el proceso de fundición, que causan fluctuaciones de voltaje que originan el fenómeno flicker.

2.2.1 MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO DEL HORNO DE ARCO

El modelo de operación del horno de arco en estado estacionario se utiliza para el estudio de armónicos debido a que este estudio se lo realiza en condiciones de régimen permanente [28], [33].

2.2.1.1 Modelo del Arco Eléctrico

Para representar el comportamiento del arco eléctrico, que se produce entre los electrodos del horno de arco y la chatarra, mediante un modelo matemático se debe considerar sus principales características:

- La variación de las ondas de voltaje y corriente del arco eléctrico (figura 2.1) muestra que después de la ignición del arco eléctrico el voltaje del arco es prácticamente constante y que la corriente continúa variando, definiéndose la no linealidad entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico, característica en una carga no lineal como el horno de arco [32], [33].
- Las ondas de voltaje y corriente del arco eléctrico (figura 2.1) se encuentran en fase lo que significa que el arco eléctrico tiene un comportamiento resistivo [35], [32], [33].

- El valor promedio al que tiende el voltaje del arco eléctrico , $V_{arc}(t)$, (figura 2.2) cuando la corriente se incrementa es 200 V, considerando que el voltaje del arco eléctrico tiene una forma de onda cuadrada [32].

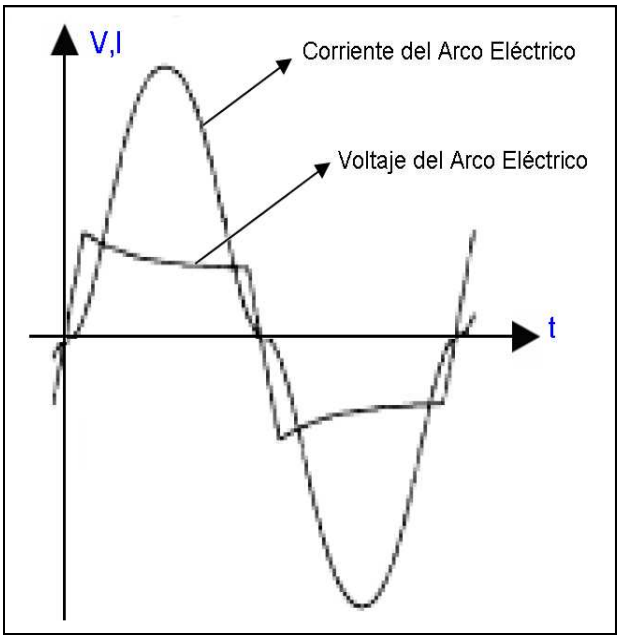


Figura 2.1 Ondas de Voltaje y Corriente del Arco Eléctrico [35]

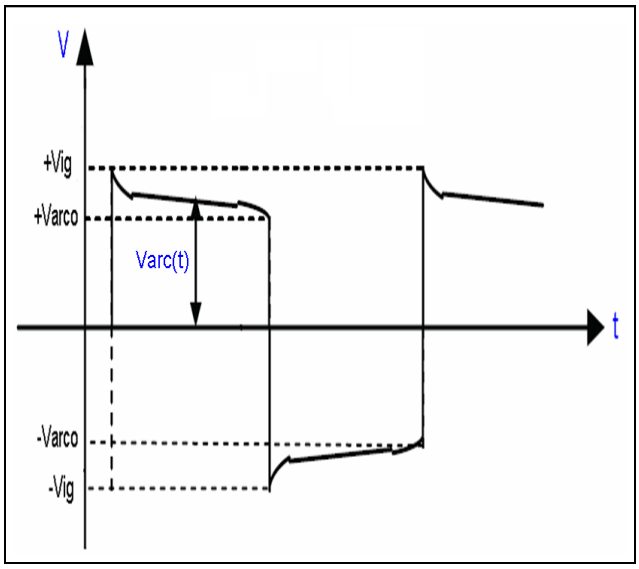


Figura 2.2 Onda de Voltaje del Arco Eléctrico [32]

La causa principal de variación de la onda de voltaje del arco está asociada con los cruces por cero de la corriente del arco (figura 2.1), el modelo desarrollado

considera la característica no lineal voltaje-corriente (figura 2.3) para representar los cruces por cero de la corriente del arco.

Considerando la longitud del arco eléctrico constante, el voltaje del arco $V_{arc}(t)$ cambia con la magnitud de la corriente instantánea del arco ($I_{arc}(t)$). Para el semiciclo positivo de la corriente del arco, el voltaje del arco se expresa por la ecuación 2.1 [32], [34].

$$V_{arc}(t) = V_{arco} + \frac{C}{(D + I_{arc}(t))} \qquad \textbf{(2.1)}$$

donde:

$V_{arc}(t)$ = Voltaje del arco eléctrico.

$I_{arc}(t)$ = Corriente del arco eléctrico.

V_{arco} = Valor al que tiende el voltaje del arco cuando la corriente del arco se incrementa.

C , D = Constantes.

La forma de onda del voltaje del arco eléctrico para el semiciclo negativo es simétrica a la forma de onda del semiciclo positivo con respecto al origen.

El valor del voltaje de ignición del arco eléctrico (figura 2.2) se obtiene de la ecuación 2.1 cuando la corriente del arco pasa por cero ($I_{arc}(t) = 0$).

$$V_{ig} = V_{arc}(t)_{I=0} = V_{arco} + \frac{C}{D} \qquad \textbf{(2.2)}$$

Las constantes C , D dependen del incremento y decremento de la magnitud de la corriente instantánea del arco eléctrico y definen la no linealidad voltaje-corriente característica del arco eléctrico (figura 2.3).

En la figura 2.3 se muestra la característica voltaje-corriente para valores típicos de V_{arco}, C y D (tabla 2.1).

Tabla 2.1 Valores Típicos de C, D y Varco[32]

	C [kW]	D [kA]	arco [V]
arc ( ) 0 >	190	5	200
arc ( ) 0 <	39	5	200

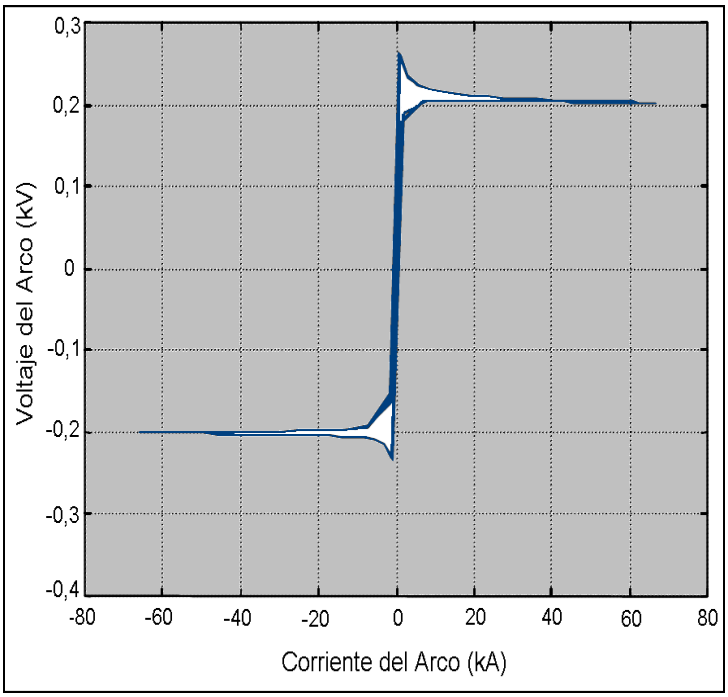


Figura 2.3 Característica Voltaje-Corriente del Arco Eléctrico [32]

2.2.2 MODELO EN ESTADO DINÁMICO DEL HORNO DE ARCO

El modelo de operación del horno de arco en estado dinámico se utiliza para el análisis del efecto flicker causado por la operación del horno de arco [28], [33].

2.2.2.1 Dinámica del Arco Eléctrico

Para representar la variación del arco eléctrico en un modelo, se debe considerar sus principales características:

La longitud del arco eléctrico depende del sistema de control de ascenso y descenso de los electrodos [34] y la variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico depende del tipo de material que se está fundiendo, distancia física entre los electrodos y la chatarra, gases producidos en la fundición, etapa de fundición, fuerzas electrodinámicas y cualquier otro factor relacionado al diseño y condiciones de operación del horno de arco. Como resultado los cambios aleatorios de la longitud del arco eléctrico pueden ser dramáticos y se pueden representar mediante el método de variación de ruido blanco [33], [34].

En el sistema de control de ascenso y descenso de los electrodos el voltaje del arco ($V_{arc_{RMS}}$) deseado se ajusta por el valor de la longitud del arco eléctrico (L_0). El voltaje de operación apropiado se obtiene por el ascenso o descenso del electrodo positivo móvil respecto al electrodo negativo fijo (chatarra), como resultado la distancia entre los electrodos y la chatarra cambia, regulando el voltaje del arco eléctrico. El principio de la regulación se muestra en la figura 2.4.

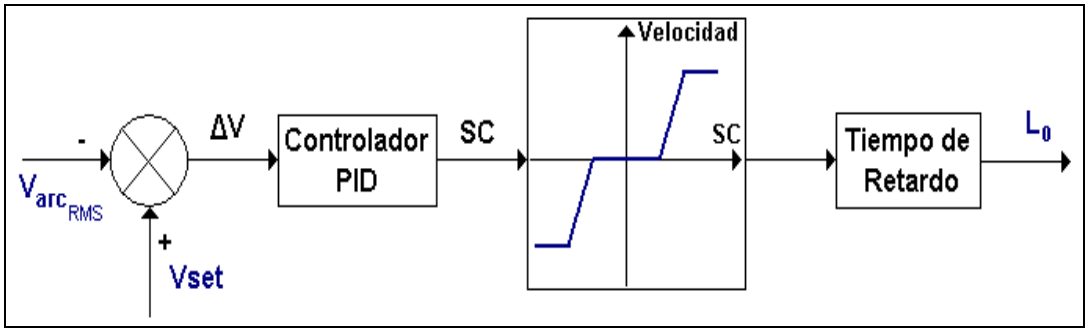


Figura 2.4 Control de Asenso y Descenso de los Electrodos [34]

En el control de ascenso y descenso de los electrodos, el valor RMS del voltaje del arco ($V_{arc_{RMS}}$) es directamente monitoreado en los electrodos y se compara con

el voltaje de referencia seleccionado (V_{set}). Cuando el voltaje del arco eléctrico es mayor que el voltaje de referencia la diferencia ΔV es negativa, si la magnitud de la señal de control del PID (SC) excede el valor fijado en la banda muerta (figura 2.4) el electrodo desciende con una velocidad específica reduciendo la longitud del arco a fin de que el voltaje del arco se reduzca. Cuando el voltaje del arco es menor que el voltaje de referencia la diferencia ΔV es positiva, si la magnitud de la señal de control del PID (SC) excede el valor fijado en la banda muerta (figura 2.4), el electrodo asciende con una velocidad específica aumentando la longitud del arco a fin de que el voltaje del arco se incremente. La banda muerta está fijada para evitar movimientos innecesarios de los electrodos en respuesta a pequeñas fluctuaciones del voltaje del arco eléctrico, la máxima velocidad de ascenso y descenso de los electrodos está impuesta por el límite mecánico del sistema de válvulas.

El tiempo de retardo en el diagrama del sistema de control (figura 2.4) refleja la respuesta de tiempo del sistema mecánico, un sistema mecánico de estas características puede tener una respuesta de tiempo de 1 segundo. El sistema de control de ascenso y descenso de los electrodos se lo describe de forma teórica y no intervendrá en las simulaciones debido a que las constantes de tiempo del fenómeno mecánico son mucho mayores que las constantes de tiempo del fenómeno eléctrico (fenómeno flicker).

En hornos de arco, para cualquier voltaje de referencia y distancia entre los electrodos y la chatarra la longitud del arco eléctrico cambia aleatoriamente con el tiempo, la variación de la longitud del arco eléctrico se representa mediante el método de variación de ruido blanco. El ruido blanco es una señal aleatoria (proceso estocástico) que se caracteriza porque sus valores en dos instantes de tiempo diferentes no guardan correlación estadística, como consecuencia de ello su densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density) es constante, esto significa que la señal contiene todas las frecuencias y todas ellas tienen la misma potencia (figura 2.5).

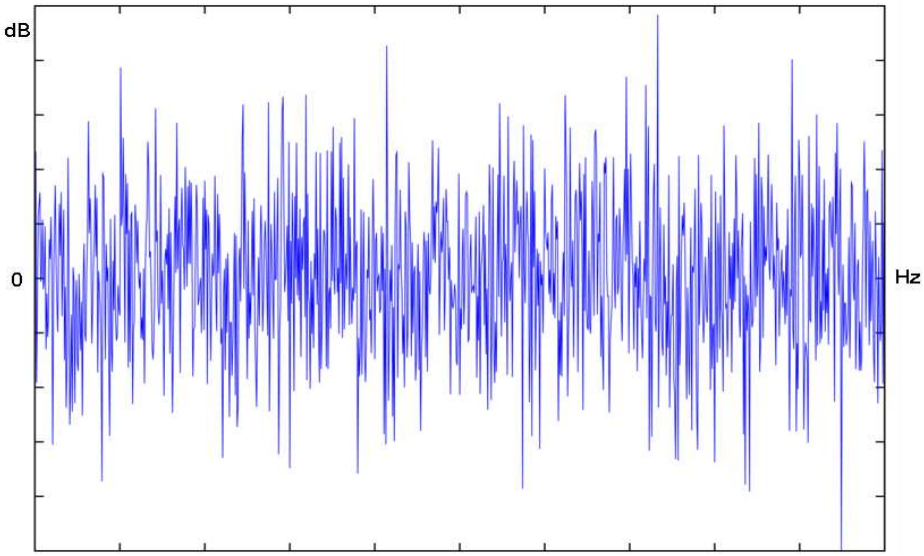


Figura 2.5 Forma de Onda del Ruido Blanco

La longitud efectiva del arco eléctrico se obtiene por la ecuación 2.3 [34].

$$L(t) = L_0 \cdot [1 - \Delta L(t)] \quad \textbf{(2.3)}$$

donde:

L_0 = Longitud del arco eléctrico deseada, calculada por la regulación de voltaje de los electrodos para el voltaje de referencia seleccionado.

$\Delta L(t)$ = Variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico obtenida por el método de ruido blanco.

El voltaje del arco eléctrico en estado dinámico se obtiene por la ecuación 2.4 [34].

$$V_{arc}(t) = k \cdot V_{arc_{L0}}(t) \quad \textbf{(2.4)}$$

donde:

$V_{arc_{L0}}(t)$ = Voltaje del arco correspondiente a la longitud de referencia L_0, $V_{arc_{L0}}(t)$ de acuerdo a la ecuación 2.1 se expresa por la ecuación 2.5 [34].

$$V_{arc_{L0}}(t) = V_{arco}(L_0) + \frac{C}{(D + I_{arc}(t))} \quad \textbf{(2.5)}$$

k = Relación entre el valor al que tiende el voltaje del arco eléctrico cuando la corriente se incrementa ($V_{arco}(L)$) correspondiente a una longitud L y el valor al que tiende el voltaje del arco eléctrico cuando la corriente se incrementa ($V_{arco}(L_0)$) correspondiente a la longitud de referencia L_0.

$V_{arco}(L)$ = Valor al que tiende el voltaje del arco cuando la corriente se incrementa en función de la longitud.

$$V_{arco}(L) = A + B \cdot L \quad \textbf{(2.6)}$$

Entonces el coeficiente k se expresa por la ecuación 2.7 [34].

$$k(t) = \frac{V_{arco}(L)}{V_{arco}(L_0)} = \frac{[A + B \cdot L(t)]}{[A + B \cdot L_0(t)]} \quad \textbf{(2.7)}$$

donde:

L = Longitud del arco eléctrico en cm.

A = Constante que considera la suma de las caídas de voltaje en el ánodo y cátodo.

B = Voltaje por unidad de longitud del arco eléctrico.

Tabla 2.2 Valores Típicos de los Parámetros A y B [32], [34]

A [V]	B [V/cm]
40	10

En la figura 2.6 se presenta un cuadro resumen con la secuencia de las ecuaciones que se utilizan para calcular el voltaje del arco eléctrico en estado dinámico.

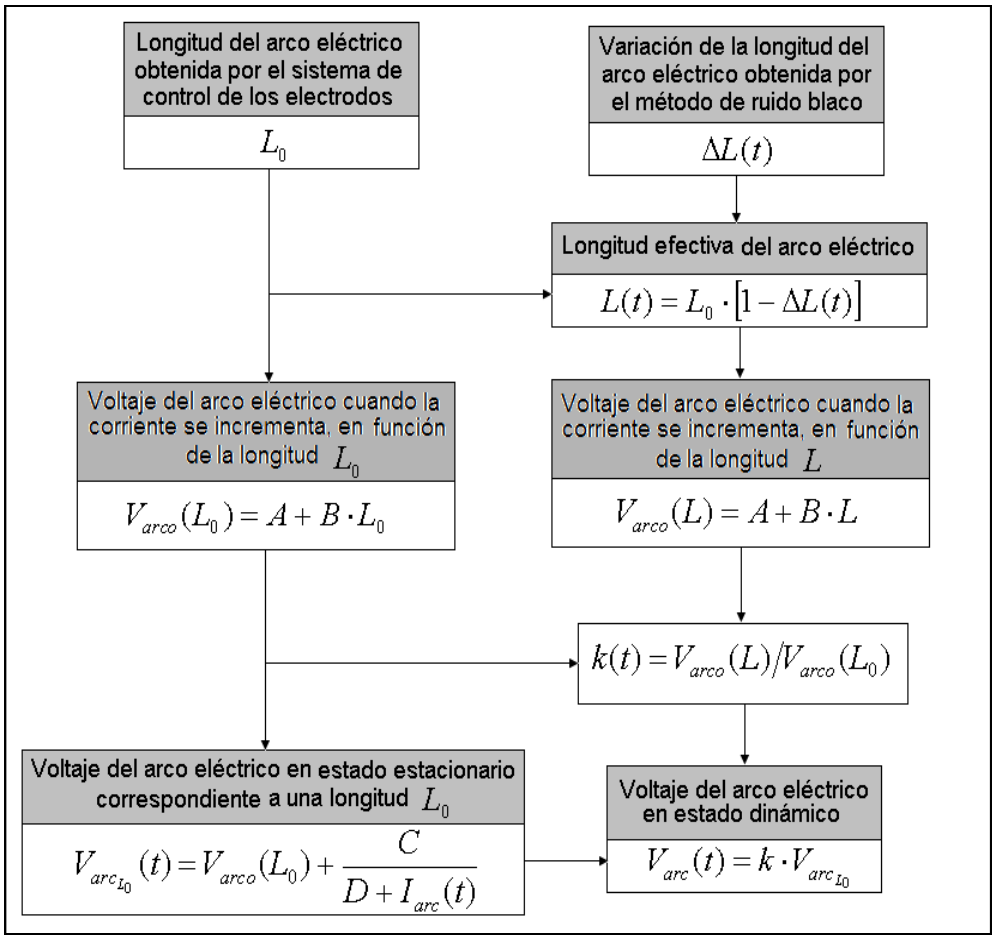


Figura 2.6 Secuencia de Ecuaciones del Modelo del Horno de Arco en Estado Dinámico

Las ecuaciones 2.1 y 2.4 representan matemáticamente el comportamiento del horno de arco en estado estacionario y dinámico respectivamente.

Culminada la modelación matemática de la operación del horno de arco en estado estacionario y dinámico se implementan los modelos con ayuda del software Power Factory.de DIgSILENT

A continuación se hace una breve descripción de las características y funciones que posee el programa, que servirá para la implementación y análisis de los modelos desarrollados.

2.3 POWER FACTORY DE DIGSILENT[41]

Power Factory de DIgSILENT (DIgital SImuLator for Electrical NeTwork) es una herramienta integrada para el análisis de sistemas eléctricos de potencia caracterizado por técnicas confiables y flexibles de modelación y algoritmos. Ha sido desarrollado con la nueva tecnología de programación orientada a objetos y lenguaje de programación C++, completamente compatible con Windows 95/98/NT/2000/XP y Vista.

Las funciones de Power Pactory son:

- Flujo de potencia AC/DC.
- Análisis de Corto Circuito VDE/IEC.
- Fallas generales/Análisis de Eventos.
- Simulación dinámica (RMS).
- Simulación de Transitorios Electromagnéticos EMT.
- Reducción de redes.
- Coordinación de Relés de protección.
- Chequeo de la respuesta de unidades de Protección.
- Análisis Armónico.
- Cálculo de Confiabilidad.
- Despacho Económico.
- Interfases SCADA / GIS.
- Lenguajes DSL ++ y DPL.
- Diagramas unifilares del sistema modelado.

- Diagrama de configuración de subestaciones.
- Instrumentos virtuales para visualizar resultados.

Todas las funciones tienen acceso a una base de datos rápida y común, con un sistema integrado de manejo de casos de estudio y escenarios de sistemas.

La función DSL de Power Factory se utilizará para implementar los modelos del horno de arco desarrollados.

A continuación se realiza una breve descripción del lenguaje de simulación DSL.

2.3.1 LENGUAJE DE SIMULACIÓN DE DIGSILENT (DSL)[43]

El lenguaje DSL se usa para programar modelos de control eléctricos y otros componentes usados en sistemas eléctricos de potencia. Como cualquier otro lenguaje de simulación o programación, emplea una sintaxis especial para la formulación de éstos modelos.

Todos los modelos DSL se componen de tres partes:

- Interfase: Establece el nombre del modelo, el título, la clasificación y el conjunto de variables. Esta parte se define en la primera página de la ventana de diálogo del diagrama de bloques.
- Definición del Código: Define las propiedades de los parámetros y las condiciones iniciales.
- Ecuaciones del Código: Incluyen todas las ecuaciones necesarias para definir el modelo de simulación, es el conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas que describen las funciones de transferencia entre las señales de entrada y las señales de salida. Estas funciones de transferencia pueden ser desde simples funciones lineales (funciones de una entrada y una salida), hasta funciones no lineales altamente complejas (funciones no continuas de múltiples entradas y múltiples salidas).

El lenguaje DSL se emplea para describir relaciones directas entre señales y otras variables.

El lenguaje de simulación DSL provee la posibilidad de interactuar con el programa fuente durante la simulación del sistema, a través de elementos modelados y codificados por el usuario, los cuales buscan reflejar un comportamiento determinado del sistema.

Las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado estacionario y dinámico se las realizan con ayuda del módulo de estabilidad de Power Factory, a continuación se describe sus principales características.

2.3.2 MODULÓ DE ESTABILIDAD [44]

Un sistema de potencia está en una condición de operación de estado estable si todas la cantidades físicas que se miden (o calculan) y que describen la condición de operación del sistema se pueden considerar constantes para propósitos de análisis. Si cuando se está en una condición de estado estable, ocurre un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o más parámetros del sistema, o en una o más de sus cantidades de operación, se dice que el sistema experimenta un disturbio de su condición de operación de estado estable.

2.3.2.1 Transitorios

La función de simulación de transitorios de Power Factory analiza el comportamiento dinámico de un sistema de potencia en el dominio del tiempo.

Los transitorios en un sistema eléctrico de potencia pueden ser de:

- Término corto (short-term), o transitorios electromagnéticos.
- Término medio (Mid-term), o transitorios electromecánicos.
- Termino largo (Long-term).

Power Factory cubre todo el rango de fenómenos de transitorios en sistemas eléctricos de potencia, por lo tanto existen tres funciones para simulaciones disponibles:

2.3.2.1.1 Función Básica

Esta función básica utiliza un modelo RMS de red simétrica de estado estable para transitorios término medio y termino largo bajo condiciones balanceadas.
Esta función usa una representación simétrica de estado estable de la red eléctrica pasiva y usa en esta representación solamente las componentes fundamentales de voltaje y de corriente son consideradas.

2.3.2.1.2 Función de Transitorios Electromagnéticos

La función de transitorios electromagnéticos (EMT) utiliza los valores instantáneos de los voltajes y corrientes, esta habilidad es necesaria para aplicaciones como:

- Componentes DC y armónicas de corrientes y voltajes.
- Conducta exacta de inversores de máquinas.
- Conducta exacta de HVDC en sistemas de transmisión.
- Fenómeno de sobretensiones en dispositivos de interrupción.

2.3.2.2 Cálculo de Transitorios

Basados en el cálculo de resolución del flujo de carga, la función de simulación del Power Factory determina las condiciones iniciales de todos los elementos del sistema de potencia. El proceso completo para realizar una simulación de transitorios comprende los siguientes pasos:

- Cálculo de flujo de carga.
- Cálculo de valores iniciales (figura 2.7), el cual puede incluir la creación de una nueva definición de resultados o una nueva definición de eventos para la simulación.

- Ejecutar la simulación (figura 2.8).
- Creación de graficas para visualizar gráficamente el resultado de las variables seleccionadas.

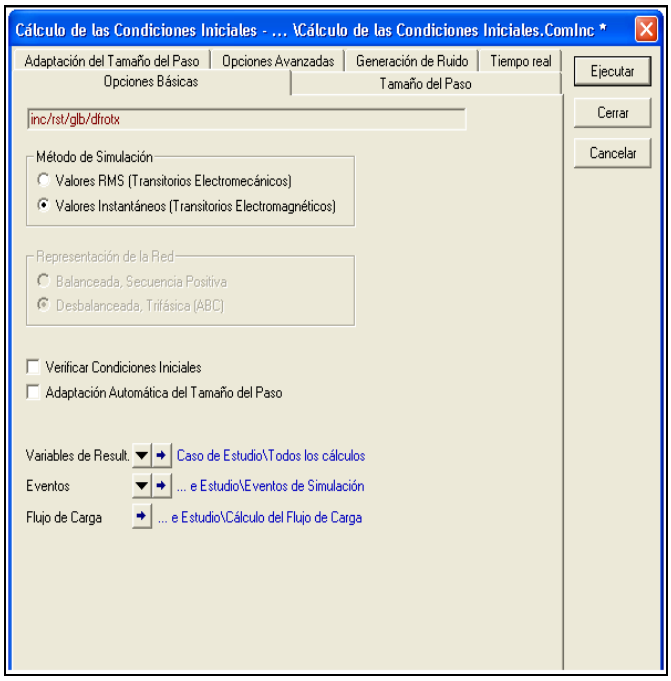


Figura 2.7 Ventana de Diálogo del Cálculo de Condiciones Iniciales

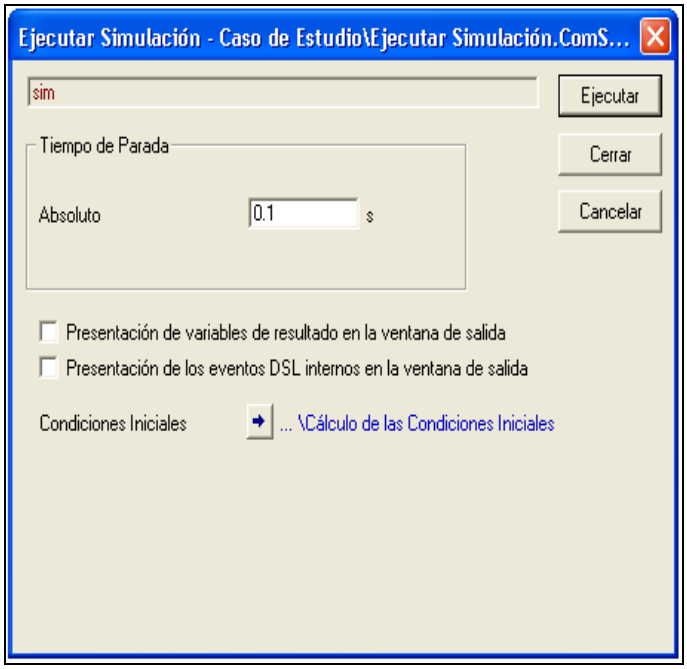


Figura 2.8 Ventana de Diálogo de la Ejecución de la Simulación

2.3.2.2.1 Edición de Variables de Resultado

Para realizar la simulación se requiere definir los elementos del sistema de potencia que contienen las variables que se desea monitorear.

2.3.2.2.2 Edición de Eventos de Simulación

Define los eventos que se desea simular, eventos sobre la carga, salida de un elemento, ajuste de parámetros, ajuste del tamaño de los pasos de integración, control sobre los interruptores, eventos de máquinas sincrónicas.

2.3.2.2.3 Análisis de resultados

Los resultados se pueden observar en las cajas de resultados del diagrama unifilar en la ventana gráfica, en la ventana de salida y la representación gráfica de las distintas variables en el tiempo (empleando la herramienta Panel de Instrumentos Virtuales que posee Power Factory).

La determinación de los índices de distorsión armónica causados por la conexión de hornos de arcos se realizará con ayuda del módulo de armónicos de Power Factory. A continuación se describe sus principales características.

2.3.3 MÓDULO DE ANÁLISIS ARMÓNICO DE DIgSILENT POWER FACTORY [44]

Power Factory posee herramientas para realizar estudios del comportamiento y desempeño del sistema de potencia en presencia de armónicos y de la variación de la impedancia del sistema en función de la frecuencia, algunos índices que el programa posee para cuantificar la distorsión armónica son la distorsión desagregada (HD) y total (THD). El análisis armónico estudia las desviaciones presentes en las formas de onda sinusoidales ideales de voltaje y corriente en sistemas eléctricos de potencia, la inyección de armónicos de voltaje o corriente a los sistemas de potencia produce distorsión de la onda de voltaje en otras barras del sistema, sobrecargas y pérdidas. El análisis armónico se desarrolla por

descomposición de la señal en series de Fourier y debido a que la señal bajo estudio es periódica, únicamente aparecen armónicos enteros.

En la tabla 2.3 se observa que los armónicos múltiplos de tres, aparecen con la secuencia cero, que es normalmente suprimida con la conexión delta de los transformadores y las señales con formas de onda simétricas presentan armónicos impares y formas de onda asimétricas presentan armónicos pares, razón por la cual en sistemas de potencia los aportes de armónicos pares son pequeños.

Tabla 2.3 Relación entre Armónicos y Componentes de Secuencia [41]

Componente Armónica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	…	…
Secuencia	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	…	…

Con este análisis, los armónicos característicos de los sistemas de potencia se resumen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Armónicos Característicos de los Sistemas de Potencia [41]

Componente Armónica	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37	…	…

Las funciones de Power Factory para el análisis de armónicos son:

- Flujo de Carga Armónico.
- Característica Impedancia-Frecuencia (Barrido de frecuencia).

2.3.3.1 Flujo de Carga Armónico

El flujo de carga armónico calcula los índices de distorsión armónica de voltaje o corriente, las fuentes de armónicos se definen por un espectro de armónicos de voltaje o corriente. Cuando inicia el flujo de carga armónico, Power Factory realiza

un constante análisis del estado de la red en cada frecuencia a la que se definen las fuentes de armónicos. La figura 2.9 muestra la ventana de diálogo del flujo de carga armónico.

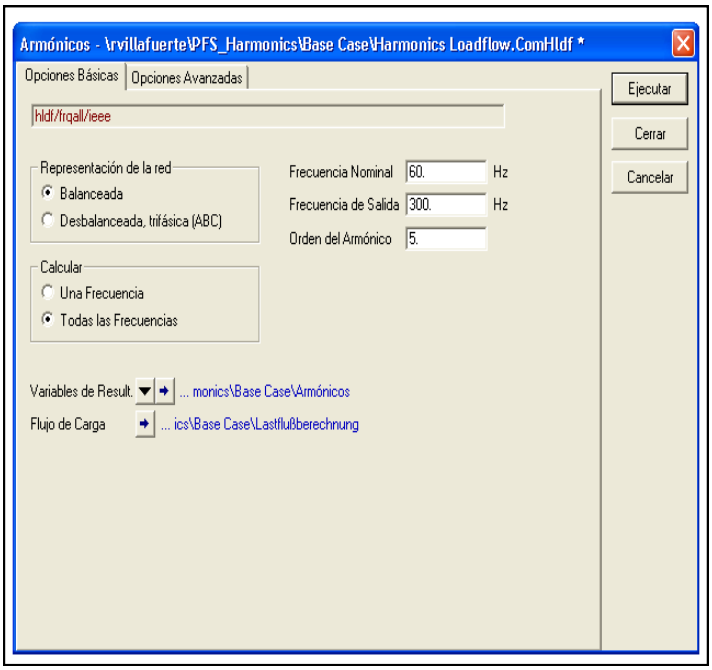


Figura 2.9 Ventana de Diálogo del Flujo de Carga Armónico [45]

Para ejecutar el Flujo de Carga Armónico existen dos opciones de cálculo:

- Única Frecuencia, se realiza un único cálculo de flujo de carga armónico a la frecuencia o al orden del armónico definido. Los resultados del cálculo se muestran en el diagrama unifilar, similar al flujo de carga a frecuencia fundamental.
- Rango de Frecuencias, se realiza el cálculo de flujo de carga armónico para todas las frecuencias con las que se definieron las fuentes de armónicos. Estas frecuencias se reúnen automáticamente antes del cálculo. Los resultados se almacenan en un archivo de resultado, que luego puede ser utilizado para crear gráficos.

2.3.3.2 Barrido de Frecuencia

La aplicación típica del barrido de frecuencia es el cálculo de las impedancias de la red, que permite la identificación de las resonancias serie y paralelo en la red, para el diseño de filtros las impedancias de la red son especialmente importantes. El cálculo de la característica impedancia-frecuencia se realiza para un determinado rango de frecuencias. La figura 2.10 muestra la ventana de diálogo del comando de barrido de frecuencia.

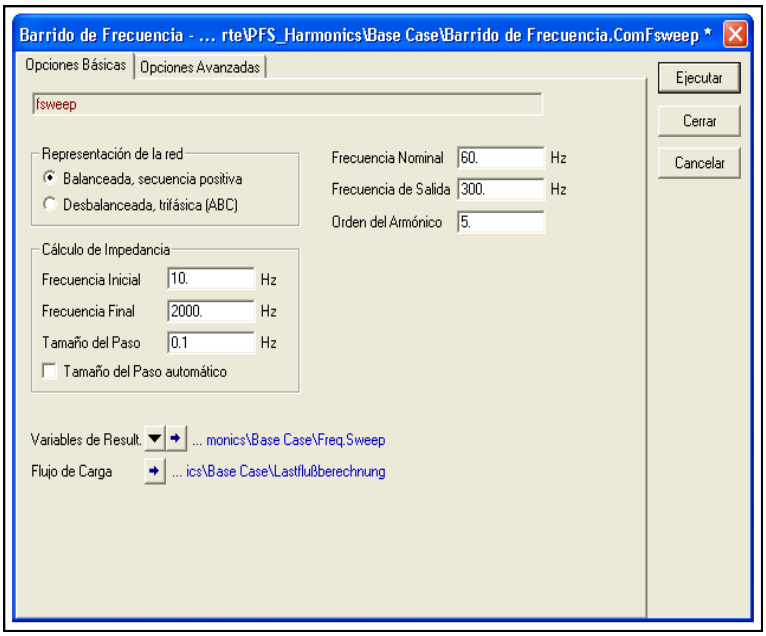


Figura 2.10 Ventana de Diálogo de Barrido de Frecuencias [45]

Una resonancia serie indica que las reactancia capacitiva e inductiva son iguales pero con signo contrario y se encuentran en serie; por lo tanto se cancelan, quedando solamente el valor de la resistencia, en la grafica de la impedancia en función de la frecuencia (figura 2.11) se localizan con los valores mínimos.

La resonancia paralelo indica que las reactancias capacitiva e inductiva son iguales pero con signo contrario y se encuentran en paralelo; representando un valor elevado de impedancia, en la gráfica de la impedancia en función de la frecuencia (figura 2.11) se localizan con los picos o valores máximos.

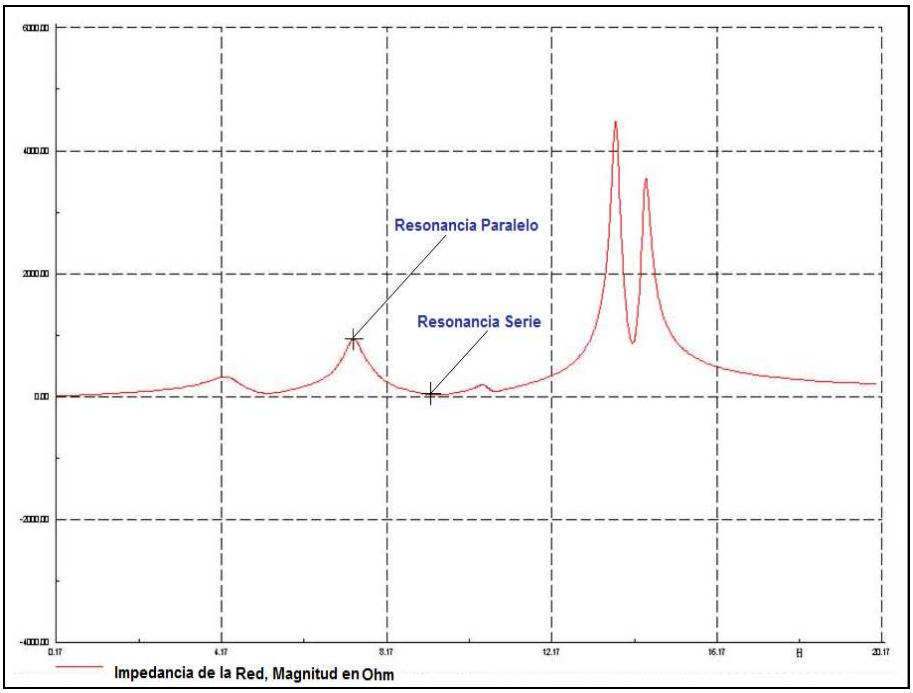


Figura 2.11 Gráfica de la Impedancia en Función de la Frecuencia

2.3.3.3 Modelación de Fuentes de Armónicos

Varios dispositivos producen armónicos y se modelan como fuentes de armónicos, en Power Factory las fuentes de armónicos pueden ser fuentes de voltaje o corriente.

Los siguientes modelos pueden generar armónicos:

- Cargas generales, en la medida en que se modelan como una fuente de corriente (se define en el tipo de carga).
- Rectificadores de tiristores.
- Conversores basados en PWM (Phase Wide Modulate) que generalmente son modelados como fuentes de voltaje armónico.
- Fuentes de voltaje.
- Fuentes de corriente, el usuario define el espectro de inyección de armónicos generado.

Por ejemplo para cargas generales (figura 2.12), en el tipo de carga (figura 2.13) se debe seleccionar Fuente de Corriente en la sección de armónicos.

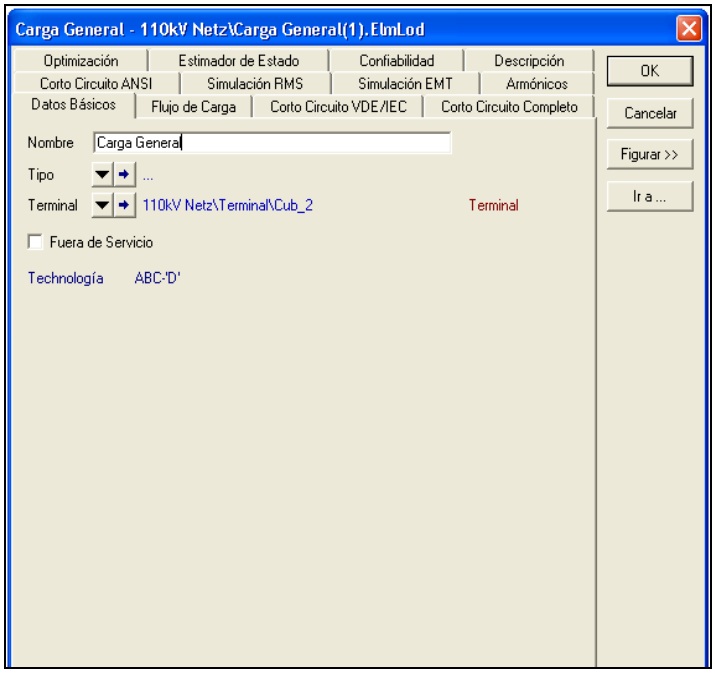


Figura 2.12 Ventana de Diálogo de una Carga General

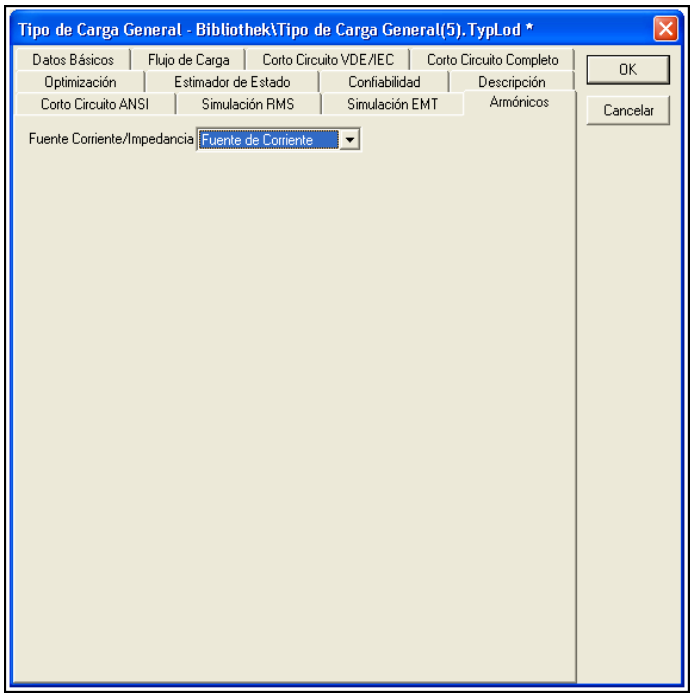


Figura 2.13 Ventana de Diálogo del Tipo de una Carga General

En la ventana de diálogo de la carga general en la sección de armónicos (figura 2.14) se introduce el espectro de armónicos, creando un nuevo espectro o se seleccionando un espectro ya existente en la biblioteca (figura 2.15).

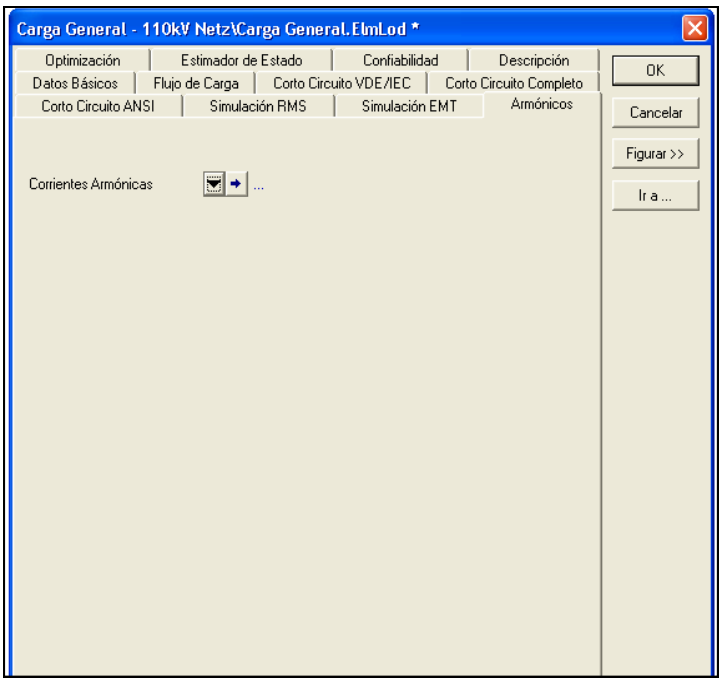


Figura 2.14 Ventana de Diálogo de la Sección Armónicos de una Carga General

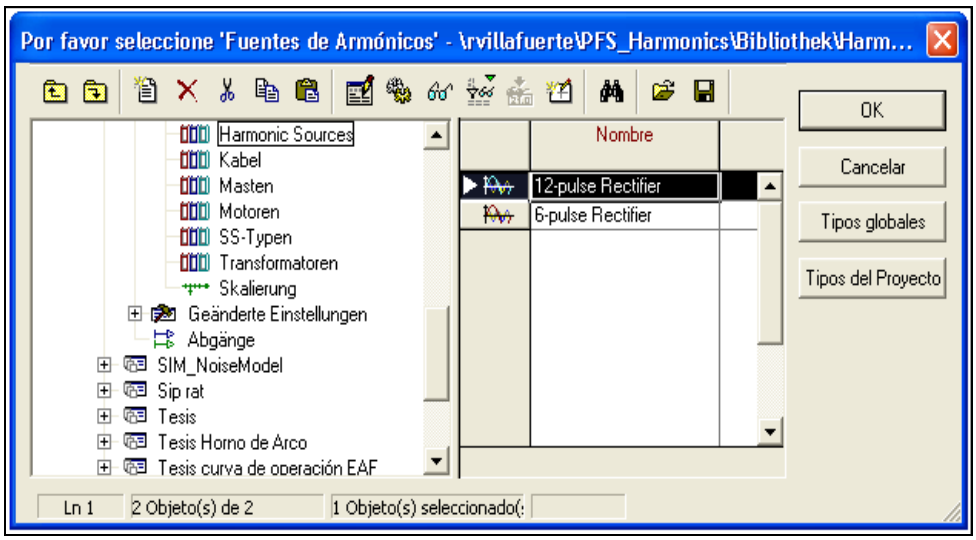


Figura 2.15 Espectro de Armónicos Existente en la Biblioteca

Para crear un nuevo espectro de armónicos se ingresa el valor de cada armónico como un espectro balanceado o desbalanceado (figuras 2.16 y 2.17). En el

espectro balanceado únicamente se puede ingresar el valor de las componentes armónicas características en sistemas eléctricos de potencia, mientras que el espectro desbalanceado permite ingresar cualquier componente armónica para cada una de las fases.

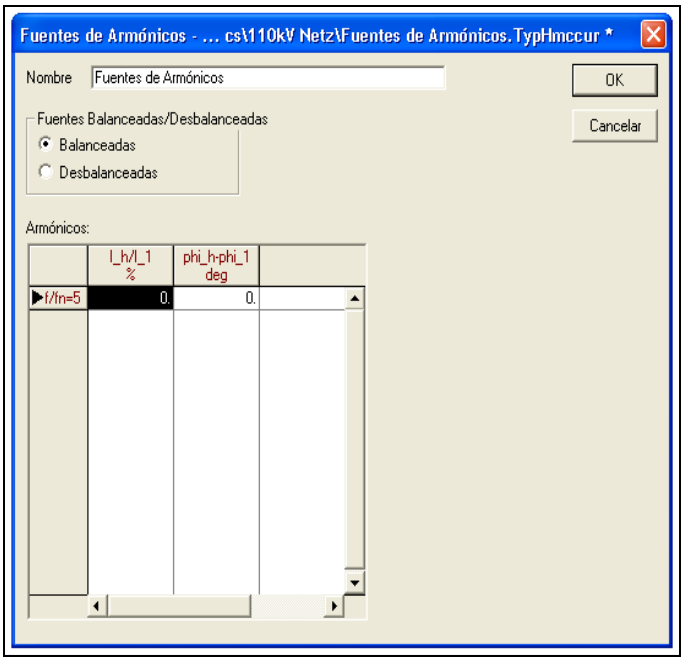


Figura 2.16 Tipo de Fuente de Armónicos Balanceada [45]

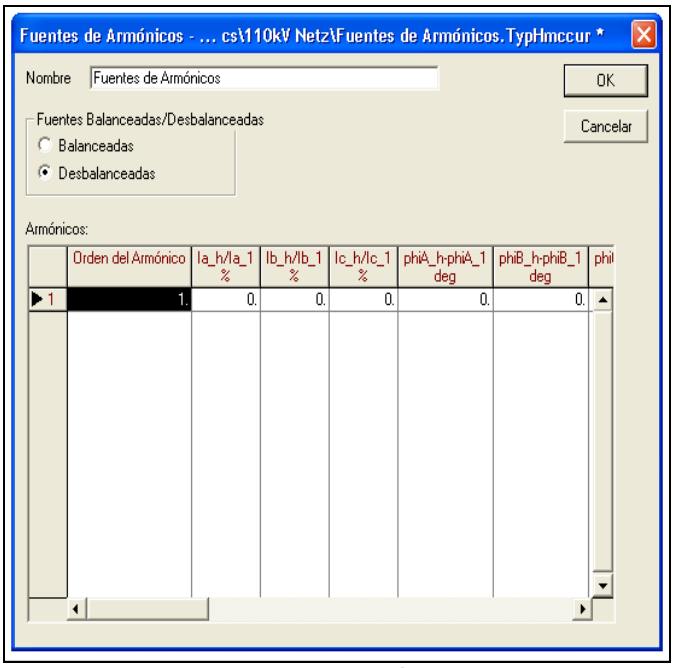


Figura 2.17 Tipo de Fuente de Armónicos Desbalanceada [45]

El espectro utilizado es independiente del tipo de fuente armónica, puede ser una fuente de voltaje o una fuente de corriente, la decisión de si las fuentes de armónicos alimentan al sistema como armónicos de voltaje o armónicos de corriente depende exclusivamente del elemento al que el tipo de espectro está asociado.

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS Y APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO REAL DEL SNT

3.1 IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY

La modelación matemática del horno de arco en estado estacionario y dinámico desarrollada en el capítulo 2, se implementa en el Lenguaje de Simulación de DIgSILENT (DSL) para posteriormente realizar simulaciones del comportamiento del horno de arco, aplicados a un caso de estudio real del SNT.

Para permitir que los modelos del horno de arco desarrollados interactúen con el sistema de potencia es necesario relacionarlos con un elemento existente en la barra de herramientas de los elementos de red de Power Factory (figura 3.2). El Horno de Arco será representado como una fuente de voltaje debido a que equipos de arco eléctrico como el horno de arco se representan como una fuente de voltaje [1], modelar al horno de arco como una fuente de voltaje controlado permite caracterizar la variación del voltaje del arco eléctrico (ecuación 2.1 y 2.4) en el nodo de conexión (figura 3.1).

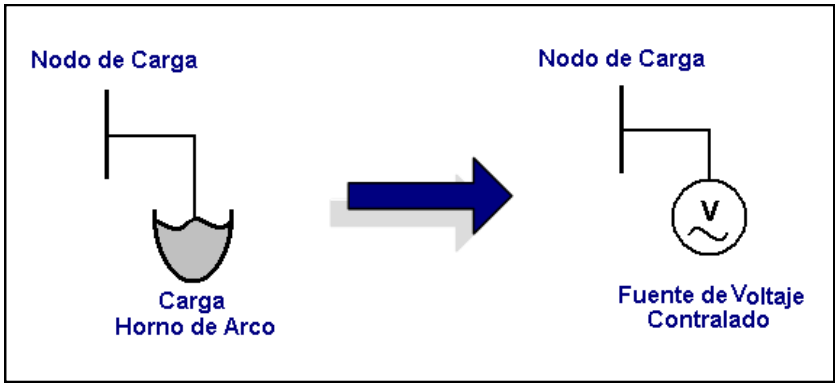


Figura 3.1 Representación del Horno de Arco como Fuente de Voltaje Controlado

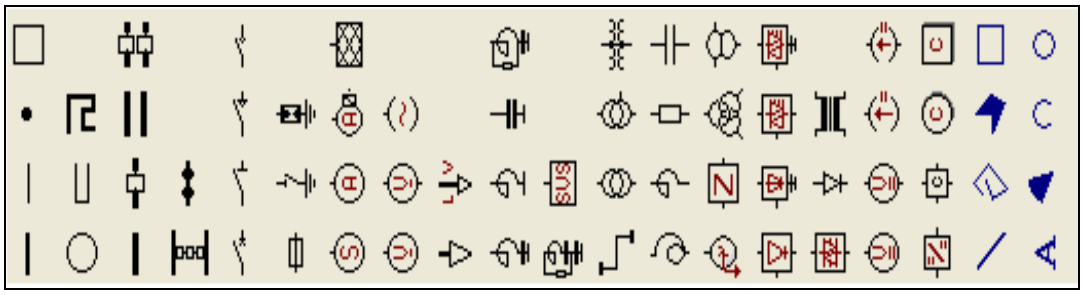


Figura 3.2 Barra de Herramientas de los Elementos de Red de Power Factory

3.1.1 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN ESTADO ESTACIONARIO DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY

La formulación matemática del modelo del horno de arco en estado estacionario (ecuación 2.1) se ingresa en la ventana de diálogo del diagrama de bloques Modelo en Estado Estacionario EAF (figura 3.3), en la cual se definen las señales de salida, señales de entrada, variables de estado, parámetros y variables internas necesarias para la implementación del modelo.

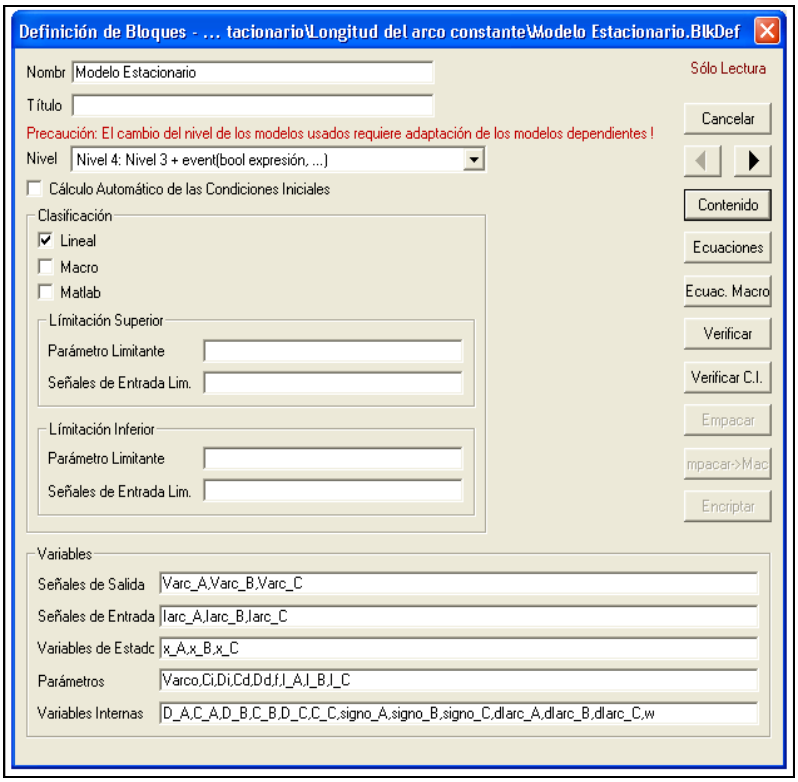


Figura 3.3 Ventana de Diálogo del Bloque Modelo en Estado Estacionario EAF

Al bloque Modelo en Estado Estacionario EAF (figura 3.4) ingresan como señales de entrada las corrientes del arco eléctrico (I_{arc_A}, I_{arc_B}, I_{arc_C}), que se utilizan en el bloque para calcular los voltajes del arco eléctrico ($V_{arc_A}, V_{arc_B}, V_{arc_C}$) aplicando la ecuación 2.1 $\left(V_{arc}(t) = V_{arco} + \frac{C}{(D + I_{arc}(t))}\right)$. El valor de los parámetros V_{arco} y D es constante, el valor del parámetro C varía si la magnitud de la corriente instantánea del arco eléctrico crece $\left(\frac{dI_{arc}(t)}{dt} > 0\right)$ o decrece $\left(\frac{dI_{arc}(t)}{dt} < 0\right)$ (ver tabla 2.1).

El significado y utilización de las señales de salida, señales de entrada, variables de estado, parámetros y variables internas se encuentra detallado en la referencia [43]. El bloque Modelo en Estado Estacionario EAF interactúa con la red mediante sus señales de entrada y de salida, las señales de entrada (I_{arc_A}, I_{arc_B}, I_{arc_C}) son las corrientes del arco eléctrico que se tomarán del secundario del transformador del horno de arco y las señales de salida ($V_{arc_A}, V_{arc_B}, V_{arc_C}$) son los voltajes del arco eléctrico que la fuente de voltaje debe generar (figura 3.4).

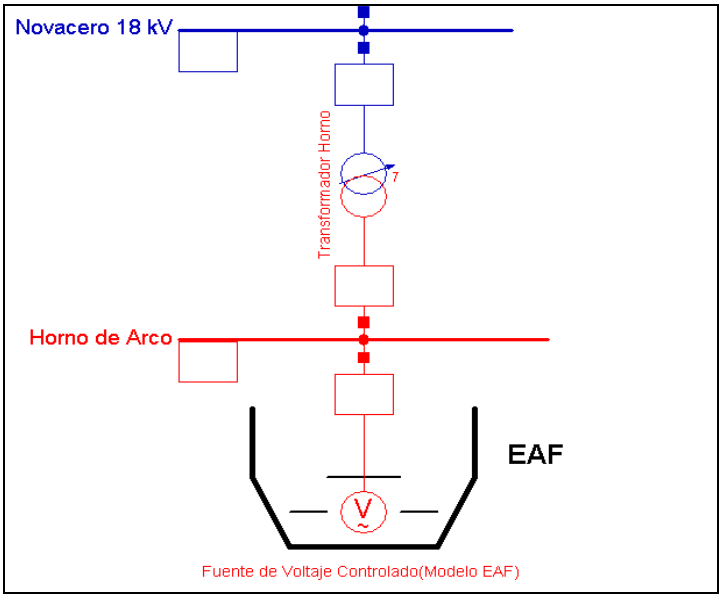


Figura 3.4 Horno de Arco Modelado como Fuente de Voltaje

La comunicación de las señales entre el transformador del horno de arco con el bloque Modelo en Estado Estacionario y este último con las señales de la fuente de voltaje se realiza a través del marco del Modelo Compuesto representado en la figura 3.5.

El marco del Modelo Compuesto del Horno de Arco en Estado Estacionario está formado por tres bloques (figura 3.5), el primero representa al transformador del horno, del secundario de este transformador se toman las corrientes del arco eléctrico por cada fase y se ingresan al segundo bloque que representa al bloque Modelo en Estado Estacionario EAF, el cual contiene las ecuaciones del voltaje del arco eléctrico en estado estacionario (figura 3.3), las salidas de este bloque son los voltajes por fase del horno de arco que ingresan al tercer bloque que representa la fuente de voltaje a la cual se va a controlar que forma parte de la red.

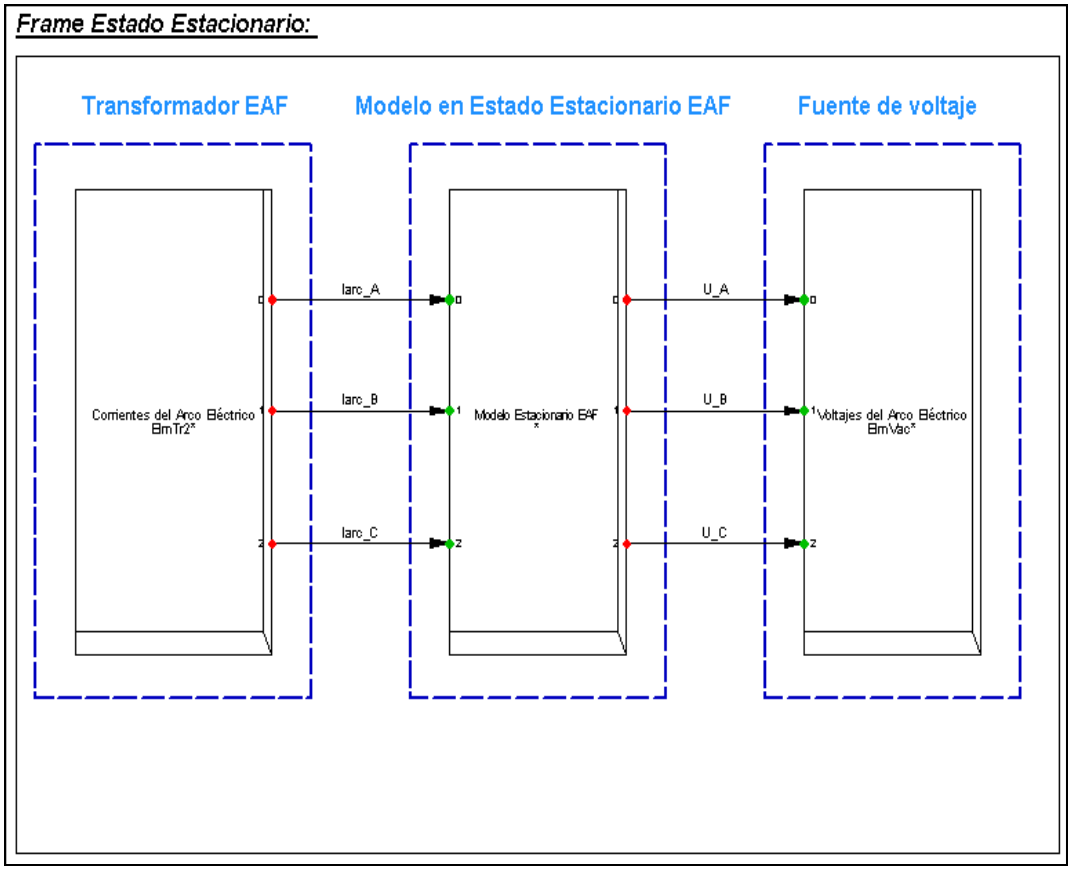


Figura 3.5 Comunicación entre Bloques del Modelo del Horno de Arco en Estado Estacionario

El Modelo Compuesto permite relacionar los sistemas de control con los elementos de red. El modelo Compuesto del horno de arco (figura 3.6) relaciona el bloque Modelo en Estado Estacionario EAF con el Transformador del Horno y la Fuente de Voltaje.

La estructura del programa permite fácilmente modificar los parámetros del modelo creado en el Modelo Compuesto del horno de arco (figura 3.6).

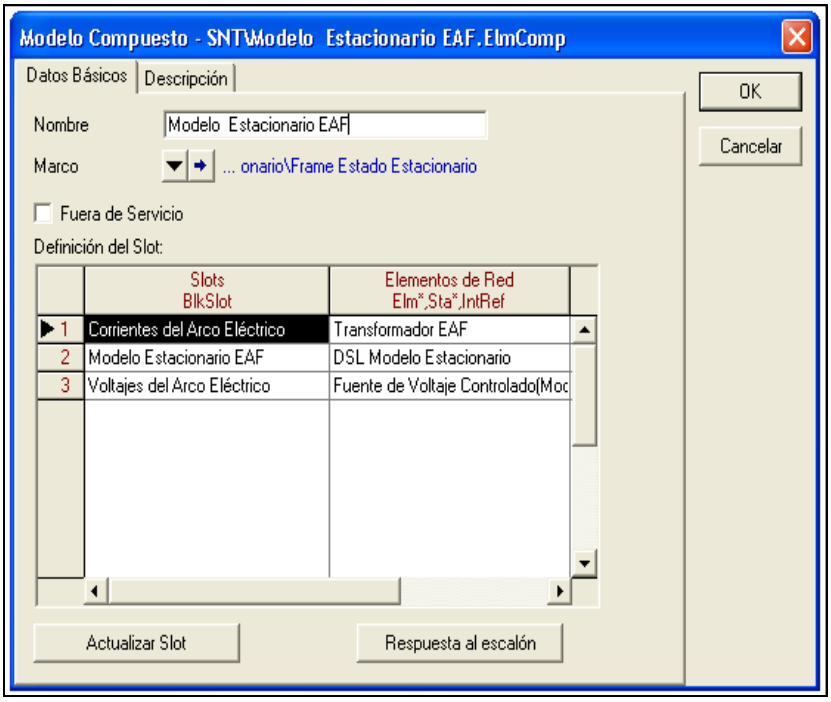


Figura 3.6 Modelo Compuesto del Horno de Arco en Estado Estacionario

3.1.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO EN ESTADO DINÁMICO DEL HORNO DE ARCO EN POWER FACTORY

La formulación matemática del modelo del horno de arco en estado dinámico (ecuaciones 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7) se ingresa en la ventana de diálogo del diagrama de bloques Modelo en Estado Dinámico EAF (figura 3.7), En el cual se definen las señales de salida, señales de entrada, variables de estado, parámetros y variables internas necesarias para la implementación del modelo.

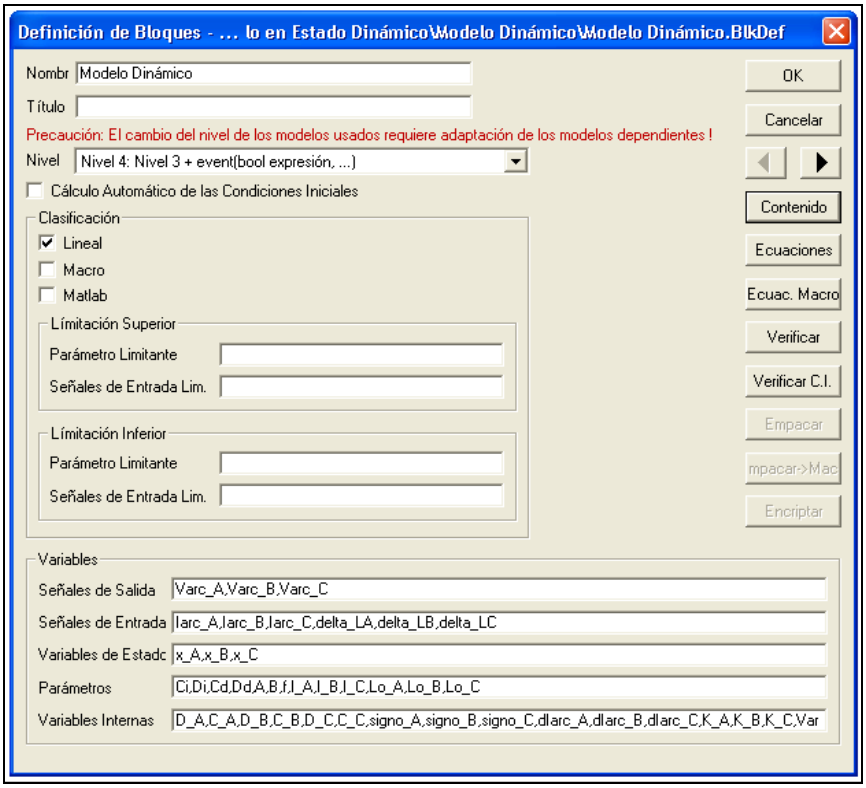


Figura 3.7 Ventana de Diálogo del Bloque Modelo en Estado Dinámico EAF

Al bloque Modelo en Estado Dinámico EAF (figura 3.7) ingresan como señales de entrada las corrientes del arco eléctrico (I_{arc}_A, I_{arc}_B, I_{arc}_C) y la variación de la longitud del arco eléctrico de cada fase (ΔL_A, ΔL_B, ΔL_C) obtenida por el método de ruido blanco. Las corrientes del arco eléctrico (I_{arc}_A, I_{arc}_B, I_{arc}_C), se utilizan para calcular los voltajes del arco eléctrico a longitud L_0 utilizando la ecuación 2.5 $\left(V_{arc_{L_0}}(t) = V_{arco}(L_0) + \frac{C}{(D + I_{arc}(t))}\right)$, en la cual el valor del parámetro C varía si la magnitud de la corriente instantánea del arco eléctrico crece $\left(\frac{dI_{arc}(t)}{dt} > 0\right)$ o decrece $\left(\frac{dI_{arc}(t)}{dt} < 0\right)$ (ver tabla 2.1), el valor del parámetro D permanece constante. La variación de la longitud del arco eléctrico (ΔL_A, ΔL_B, ΔL_C) se utiliza para calcular la longitud efectiva del arco eléctrico de cada fase aplicando la ecuación 2.3 ($L(t) = L_0 \cdot [1 - \Delta L(t)]$), el valor de L_0 se considera constante (parámetro de entrada) debido a que las constantes tiempo

del sistema de control de los electrodos son muy altas comparadas con el fenómeno flicker. Finalmente se calcula los voltajes del arco eléctrico ($V_{arc_A}, V_{arc_B}, V_{arc_C}$) aplicando la ecuación 2.4 ($V_{arc}(t) = k \cdot V_{arc_{L0}}(t)$).

El marco del Modelo Compuesto del Horno de Arco en Estado Dinámico está formado está por seis bloques (figura 3.8), el primer bloque representa al transformador del horno, del secundario de este transformador se toman las corrientes del arco eléctrico por cada fase y se ingresan al segundo bloque que representa al bloque Modelo en Estado Dinámico EAF. Adicionalmente ingresan tres bloques que representan a los generadores de ruido blanco de cada fase. Las salidas del bloque Modelo en Estado Dinámico son los voltajes del horno de arco por fase que ingresan al sexto bloque que representa la fuente de voltaje a la cual se va a controlar que forma parte de la red (figura 3.4).

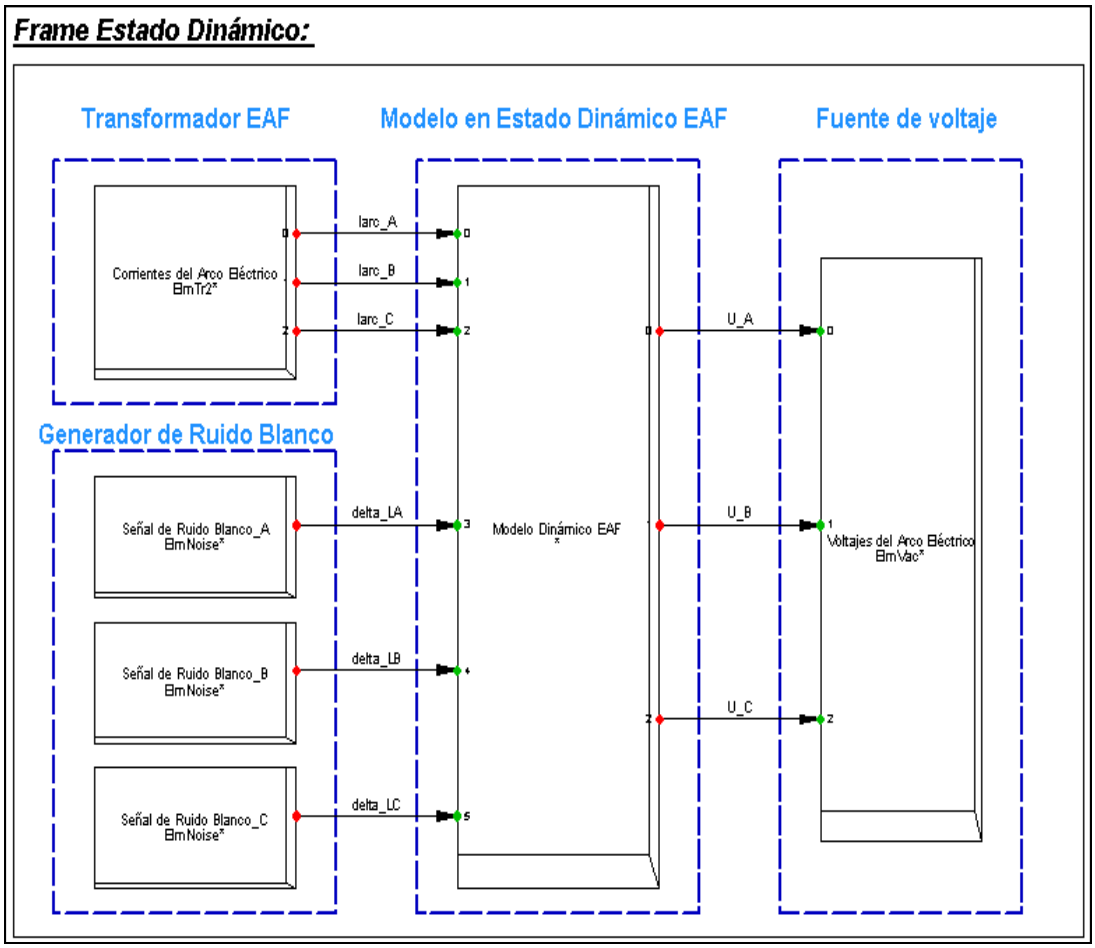


Figura 3.8 Comunicación entre Bloques del Modelo del Horno de Arco en Estado Dinámico

El transformador del horno y la fuente de voltaje son los mismos elementos utilizados en la implementación del modelo en estado estacionario, la corriente del horno de arco se la sigue tomando del transformador del horno de arco y el voltaje obtenido por el modelo se lo seguirá desplegando en la red por la fuente de voltaje. Los elementos adicionales son los generadores de ruido blanco, y el bloque Modelo en Estado Estacionario EAF será remplazado por el bloque Modelo en Estado Dinámico EAF.

La figura 3.9 muestra el Modelo Compuesto del Horno de Arco en Estado Dinámico en el cual se pueden realizar los ajustes al modelo del horno de arco en estado estacionario.

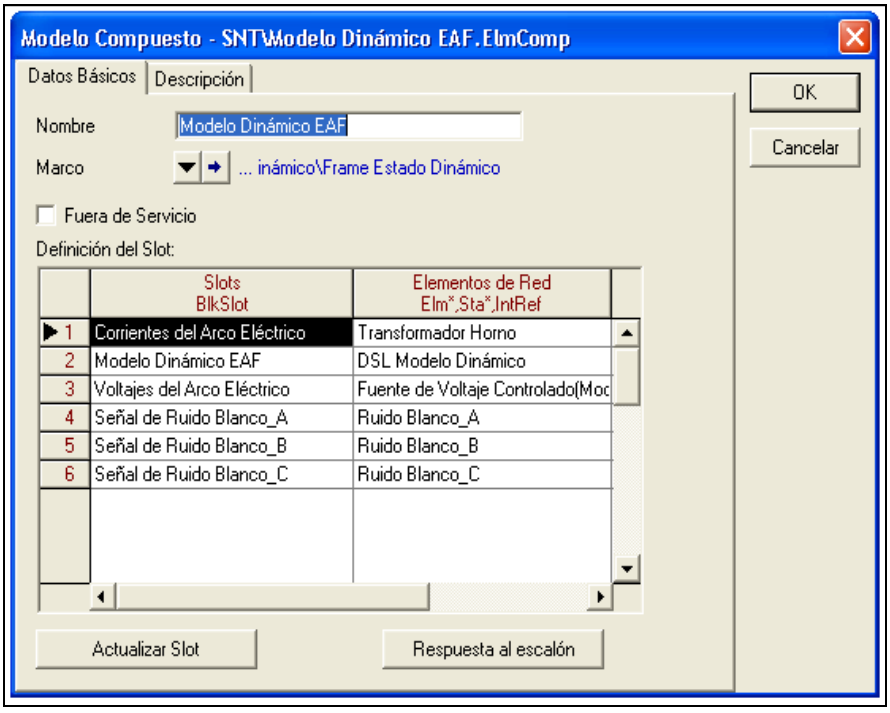


Figura 3.9 Modelo Compuesto del Horno de Arco en Estado Dinámico

La figura 3.10 muestra la ventana de diálogo del generador de ruido blanco que se utiliza para representar la variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico $\Delta L(t)$ de cada fase. Se ajusta el rango de frecuencias en 30 Hz debido a que los hornos

de arco son una fuente de flicker en rango de 0,5 a 30 Hz, la potencia del generador de ruido blanco se coloca en 0,01 (valor típico) pero su valor puede ser ajustado con mediciones del voltaje del horno de arco realizadas en las instalaciones.

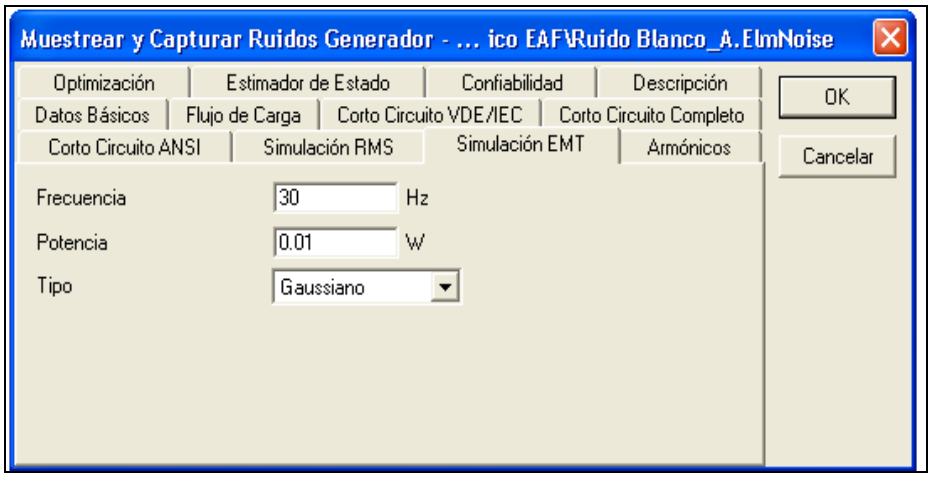


Figura 3.10 Ventana de Diálogo del Generador de Ruido Blanco Fase A

La variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico $\Delta L(t)$ se modela por cada fase para representar el desbalance de voltaje característico en los hornos de arco.

3.2 APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO REAL DEL SNT

Los modelos del horno de arco se aplicarán al horno de arco y a la red propiedad de NOVACERO S.A.

3.2.1 NOVACERO S.A.

NOVACERO S.A. es una empresa ecuatoriana, presente en el mercado desde 1973, con experiencia en la creación, desarrollo e implementación de soluciones de acero para la construcción.

NOVACERO S.A. Planta Lasso, se encuentra ubicada en la provincia de Cotopaxi en el kilómetro 15 de la Panamericana Norte en el sector de Mulaló. NOVACERO S.A. se encarga de producir varilla corrugada para la construcción y perfiles estructurales laminados en caliente.

NOVACERO S.A. al momento recibe el suministro de energía eléctrica por parte de la Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A. a un nivel de voltaje de 13,8 kV mediante una línea cuya longitud aproximada es de 1000 m.

NOVACERO S.A. dentro de su expansión ha considerado la incorporación de un horno de arco para su planta, el mismo que de acuerdo a la información presentada en la solicitud de acceso de Novacero S.A. a la capacidad de transmisión existente o remanente del Sistema Nacional de Transmisión -SNT, en la subestación Mulaló entraría en funcionamiento a partir de junio del 2008, con lo cual la demanda futura de la planta será de 30 MVA, carga que por sus características requiere de un nuevo nivel de voltaje para su alimentación.

Por este motivo NOVACERO S.A. solicita conectarse a un voltaje de 138 kV mediante una línea de transmisión conectada a la barra de 138 kV en la subestación Mulaló de propiedad de TRANSELECTRIC S.A., de aproximadamente 1000 m de longitud, además de la implementación de una subestación de 138kV/18kV–13,8kV en la planta de NOVACERO Lasso.
La subestación NOVACERO estará constituida por un autotransformador de 60 MVA y dos transformadores de potencia de 20 MVA cada uno (figura 3.11).

Además del horno de arco cuya demanda será de 18 MVA la planta contará con otras cargas: una laminadora, una planta de agua, bombas de agua y otras cargas cuya potencia en total será de 12 MVA completando la demanda solicitada por NOVACERO S.A. de 30 MVA [38].

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA CARGA A INSTALARSE

La potencia y factor de potencia de las cargas a instalarse en NOVACERO S.A. Planta Lasso son:

Horno de Arco: 18 MVA, fp de 0,80.
Laminadora: 5 MVA, fp de 0,95.
Planta de Agua y Bombas: 2 MVA, fp de 0,95.
Planta de Humos: 3 MVA, fp de 0,95.
Puentes Grúa y Otros: 2 MVA, fp de 0,95.

Con la instalación de todas las cargas la demanda de potencia de la planta de NOVACERO Lasso será de 30 MVA, el cronograma y plan de construcciones de la planta, de acuerdo a la información presentada en solicitud de acceso de Novacero S.A. a la capacidad de transmisión existente o remanente del SNT, en la subestación Mulaló dan como fecha de ingreso en operación de toda la carga al mes de junio del año 2008 [38].

En la figura 3.9 se muestra el diagrama unifilar futuro de planta NOVACERO Lasso.

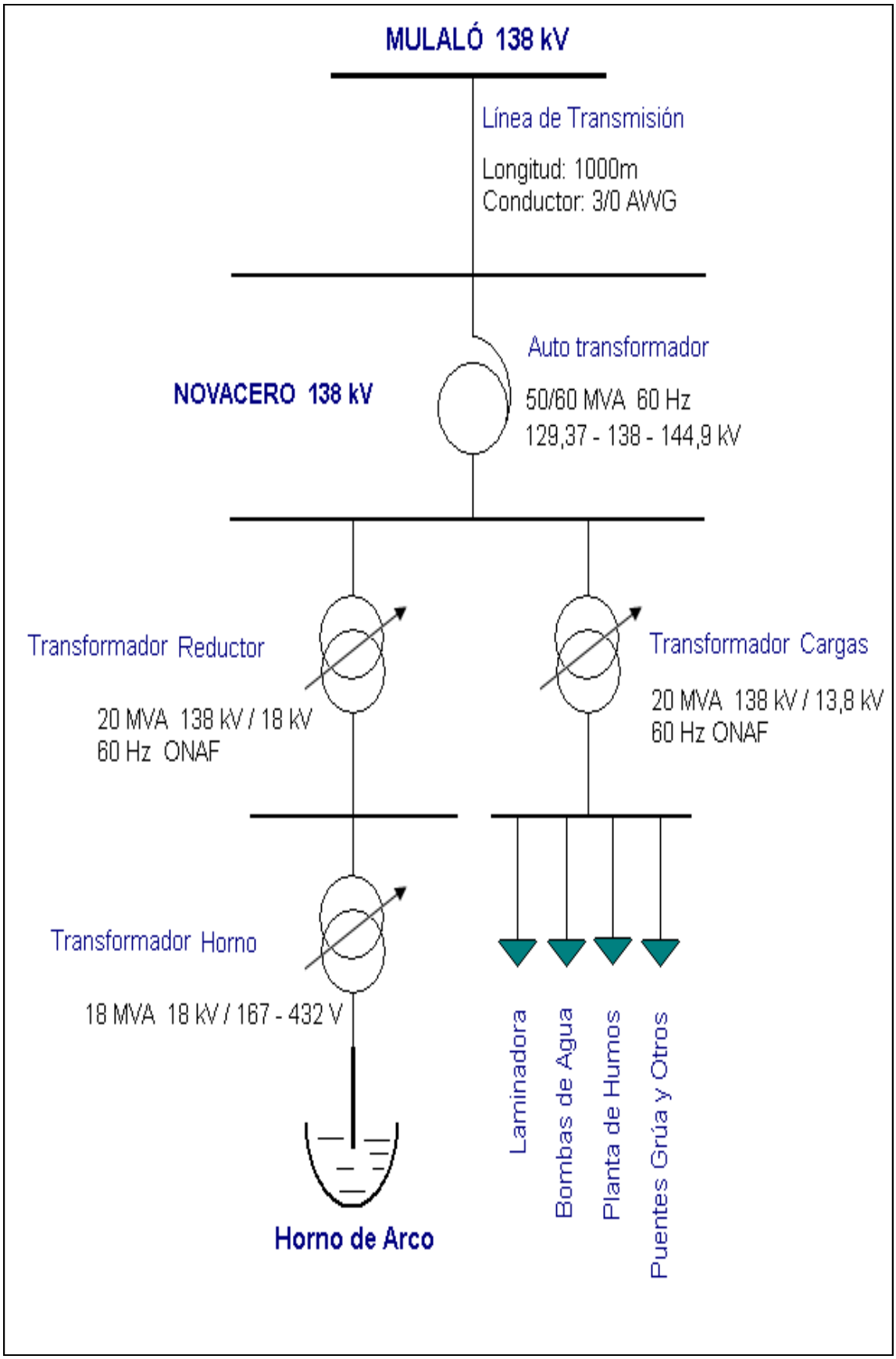


Figura 3.11 Diagrama Unifilar Futuro de la Planta de Novacero Lasso [38]

3.2.2.1 Horno de Arco

El Horno de Arco a ser instalado, presenta un comportamiento cíclico entre las 22h00 y las 17h00, mientras que en la banda de demanda máxima comprendida entre las 17h00 y las 22h00 éste no operará por restricciones en el acceso otorgado.

El Transformador Reductor del horno de arco tiene en su lado secundario un cambiador de taps automático, este cambiador de taps posee 15 posiciones que van desde 166,8 V hasta 432 V, el cambio entre taps se realiza en un tiempo menor a 30 segundos. En la tabla 3.1 se muestra los valores de corriente y voltaje de los taps del transformador del horno [38].

Tabla 3.1 Valores de Corriente y Voltaje de los Taps del Transformador del Horno [38]

Tap	Tensión Primario [V]	Tensión Secundario [V]	I1n [A]	I2n [A]	Vsc-Sw [%]	Vsc-Sn [%]
1	18000	167,0	256	28870	16,9	38,1
2	18000	188,4	290	28870	15,3	30,46
3	18000	210,0	323	28870	14	24,96
4	18000	232,8	358	28870	12,8	20,66
5	18000	254,4	391	28870	11,9	17,57
6	18000	277,2	426	28870	11,1	15,02
7	18000	298,8	459	28870	10,4	13,1
8	18000	321,6	494	28870	9,8	11,45
9	18000	343,2	528	28870	9,3	10,17
10	18000	366,0	563	28870	8,8	9,05
11	18000	387,6	596	28870	8,4	8,15
12	18000	410,4	631	28870	8	7,35
13	18000	432,0	664	28870	7,7	6,7

3.2.2.2 Laminadora

El tren de laminación (figura 3.12) está formado por parejas de cilindros que reducen la sección de la palanquilla (materia prima de las barras laminadas).

Inicialmente de forma cuadrada a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma circular. A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren se controla de forma automática, la velocidad de las distintas cajas que lo componen aumenta en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior.

Los trenes de laminación se dividen en tres partes:

- Tren de desbaste: La palanquilla sufre una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la posible capa de cascarilla formada durante su permanencia en el horno.
- Tren intermedio: Formado por varias cajas en las que se obtiene la sección deseada por sucesivas pasadas.
- Tren acabador: El producto experimenta su última pasada y obtiene su geometría de corrugado.

NOVACERO S.A. cuenta con un tren de laminación cuyo proceso es 100 % automático, controlado desde un cuarto de control en el que el operador ingresa los datos de velocidad de cada una de las cajas [38].

Figura 3.12 Tren de Laminación [38]

Las barras ya laminadas (figura 3.13) se depositan en una gran placa o lecho de enfriamiento, de donde se trasladan a las líneas de corte, medida y empaquetado, de donde pasa a la zona de almacenamiento y expedición.

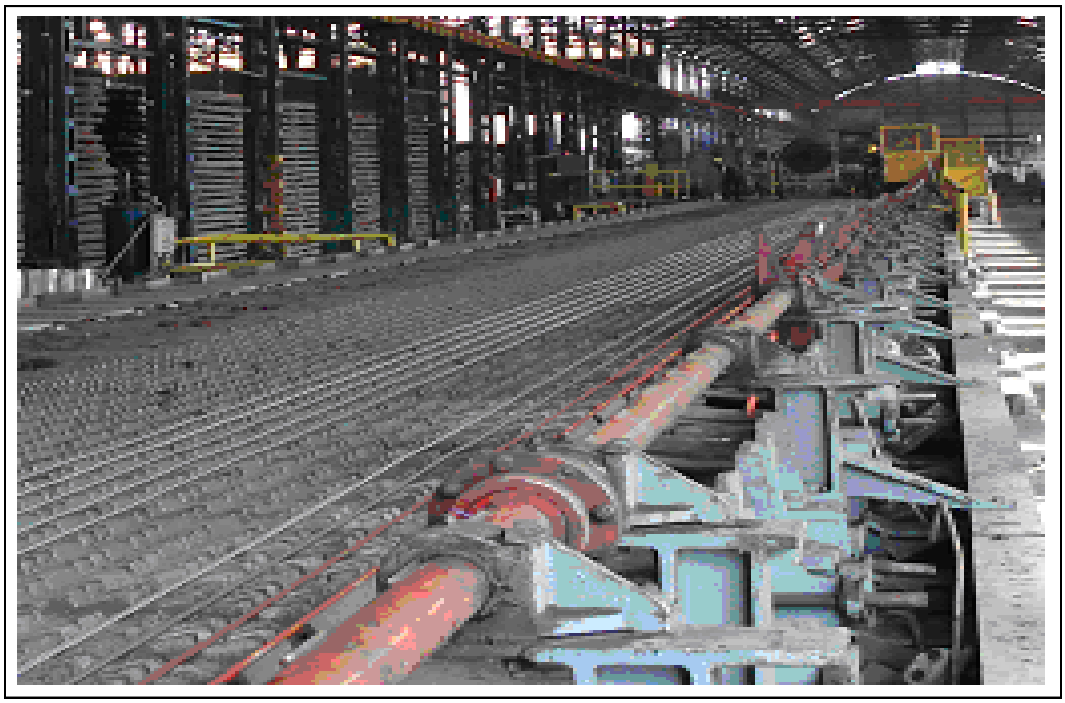


Figura 3.13 Barras Laminadas [38]

3.2.2.3 Planta de Humos

Es la sección donde se realiza el control de la contaminación, aquí se realiza el proceso de depuración de aire contaminado, el proceso es mediante filtros de mangas que tienen una longitud de 6000 mm con un diámetro de 150 mm, recibirá el humo que se desprenderá en el proceso de fundición desde el horno de arco y será conducido por grandes conductos hasta las turbinas que permiten emanar el humo, pero antes de que salga a la atmósfera se tratarán a los gases contaminantes que contienen gran cantidad de tóxicos emanados durante la fundición. El humo lleva partículas sólidas que contienen óxidos minerales y metálicos, compuestos orgánicos gaseosos, como Zn, Cr, Ni, Cd, CO_2, CO; estos desechos pasarán por tuberías hacia los filtros encapsulados con mangas [38].

Figura 3.14 Planta de Humos [38]

3.2.2.4 Planta de Agua

La planta de tratamiento de agua preserva la calidad de agua que se utiliza para refrigerar los sistemas de la planta de laminación y fundición. El agua se utiliza para refrigerar los cilindros de laminación, guías, elementos rodantes como también al horno de arco, conservándolos a una temperatura adecuada que evite su desgaste prematuro o destrucción.

El agua se somete a tratamiento para eliminar los contaminantes que adquirió en el proceso como: escoria, polvo metálico, limalla, grasa y aceite.

3.2.3 REPRESENTACIÓN DE LA RED DE NOVACERO S.A.

Los elementos de la red de Novacero S.A. (figura 3.11) se modelan con sus parámetros eléctricos. En la tabla 3.2 se resume las características técnicas de la línea Mulaló-Novacero.

Tabla 3.2 Parámetros Eléctricos de la Línea Mulaló – Novacero [38]

Línea	Mulaló - Novacero	
Longitud	1	km
R(1)	0,240478	Ω/km
X(1)	0,490918	Ω/km
C(1)	0,00887066	$\mu F/km$
B(1)	3,344	$\mu S/km$
R(0)	0,496098	Ω/km
X(0)	168,175	Ω/km
C(0)	0,00519407	$\mu F/km$
B(0)	1,958	$\mu S/km$
Irmáx	240	A
Desde	Mulaló 138 kV	
Hasta	Novacero 138 kV	

En las tablas 3.3 y 3.4 se resume las características técnicas de los transformadores de la red de NOVACERO S.A.

Tabla 3.3 Parámetros Eléctricos de Transformadores de la Red de Novacero S.A. [38]

	Auto Transformador	**Transformador Reductor 138/18 kV**	**Transformador Horno 18000/432 V**	**Transformador Cargas 138/13,8 kV**
Vector-Grupo	Dd0	Dyn11	Yd1	Dyn11
Sn [MVA]	50-60	20-22	18-22	20-22
Vr1 [kV]	138	138	18	138
Vr2 [kV]	138	18	0,2988	13,8
Zcc(1) [%]	4	10	7,7	10
R(1) [%]	0	0	0	0
Zcc(0) [%]	4	10	7,7	10
R(0) [%]	0	0	0	0
Io [%]	0	0	0	0
Pfe [kW]	20	17,3	0	17,3

Tabla 3.4 Taps de Transformadores de la Red de Novacero S.A. [38]

	Auto Transformador	**Transformador Reductor 138/18 kV**	**Transformador Horno 18000/432 V**	**Transformador Cargas 138/13,8 kV**
Lado del Tap	Primario	Primario	Primario	Primario
Nodo Controlado	Primario	Secundario	Secundario	Secundario
Tap de Operación	11	3	7	3
Tap Mínimo	1	1	1	1
Tap Nominal	11	3	7	3
Tap Máximo	21	5	13	5
ΔV **[%]**	1,25	2,5	7,5	2,5

3.2.4 REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN

El SNT se representa con el equivalente Thevenin desde la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC), punto de conexión con la red de NOVACERO S.A.

Para obtener los datos necesarios que se deben ingresar en la red externa (figura 3.15) que representará al SNT en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló se realiza corridas de cortocircuito al SNT en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (Anexos 6, 7, 8, 9).

Los resultados se resumen en las tablas 3.5 y 3.6, adicionalmente se calcula otros parámetros necesarios que se deben ingresar en la ventana de diálogo de la red externa, los valores en color negro son los obtenidos en la corrida de cortocircuito, los valores en color azul son las impedancias de secuencia positiva y negativa calculadas a partir de las resistencias y reactancias de secuencia positiva y negativa, los datos en color rojo son los datos que se debe ingresar en la red externa (figura 3.15).

Tabla 3.5 Corrida de Cortocircuito a Máximas Corrientes

Máximas Corrientes			
Monofásico		**Trifásico**	
Skss [MVA]	310.308	Skss [MVA]	1014.63
Ikss [kA]	3.895	Ikss [kA]	4.24
ip [kA]	8.579	ip [kA]	9.35
R0 [Ohm]	4.029	R [Ohm]	3.90
X0 [Ohm]	25.956	X [Ohm]	20.27
R1 [Ohm]	3.903	R/X	0.192403
X1 [Ohm]	20.274		
R2 [Ohm]	3.909		
X2 [Ohm]	20.231		
Z1 [Ohm]	20.646270		
Z2 [Ohm]	20.605185		
Z2/Z1	0.99801002		
X0/X1	1.28026043		
R0/X0	0.15522423		

Tabla 3.6 Corrida de Cortocircuito a Mínimas Corrientes

Mínimas Corrientes			
Monofásico		**Trifásico**	
Skss [MVA]	244.439	Skss [MVA]	741.36
Ikss [kA]	3.068	Ikss [kA]	3.10
ip [kA]	6.517	ip [kA]	6.59
R0 [Ohm]	4.954	R [Ohm]	5.76
X0 [Ohm]	26.239	X [Ohm]	25.03
R1 [Ohm]	5.760	R/X	0.23012385
X1 [Ohm]	25.034		
R2 [Ohm]	5.758		
X2 [Ohm]	24.875		
Z1 [Ohm]	25.688105		
Z2 [Ohm]	25.532728		
Z2/Z1	0.99395138		
X0/X1	1.04813454		
R0/X0	0.18880293		

Para ingresar los valores mínimos se toman los resultados de las corridas de cortocircuito a mínimas corrientes, mientras que los valores máximos se toman los resultados de las corridas de cortocircuito a máximas corrientes, la corrida de

cortocircuito trifásico proporciona los valores de potencia y corriente de cortocircuito y la corrida de cortocircuito monofásico proporciona los parámetros de secuencia de la red.

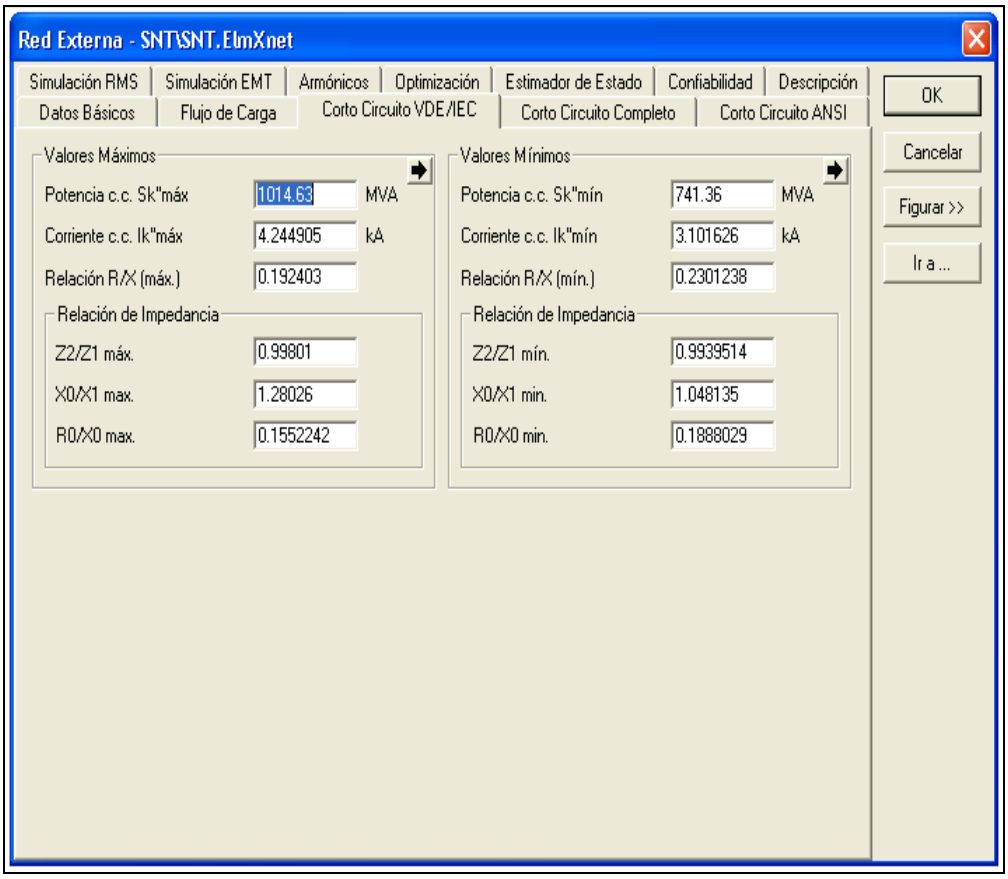


Figura 3.15 Ventana de Diálogo de la Red Externa que Representa al SNT el el PCC

La figura 3.16 muestra a la red de Novacero S.A. conectada a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló modelada con todos los elementos y cargas descritas anteriormente, el horno de arco está modelado como una fuente de voltaje.

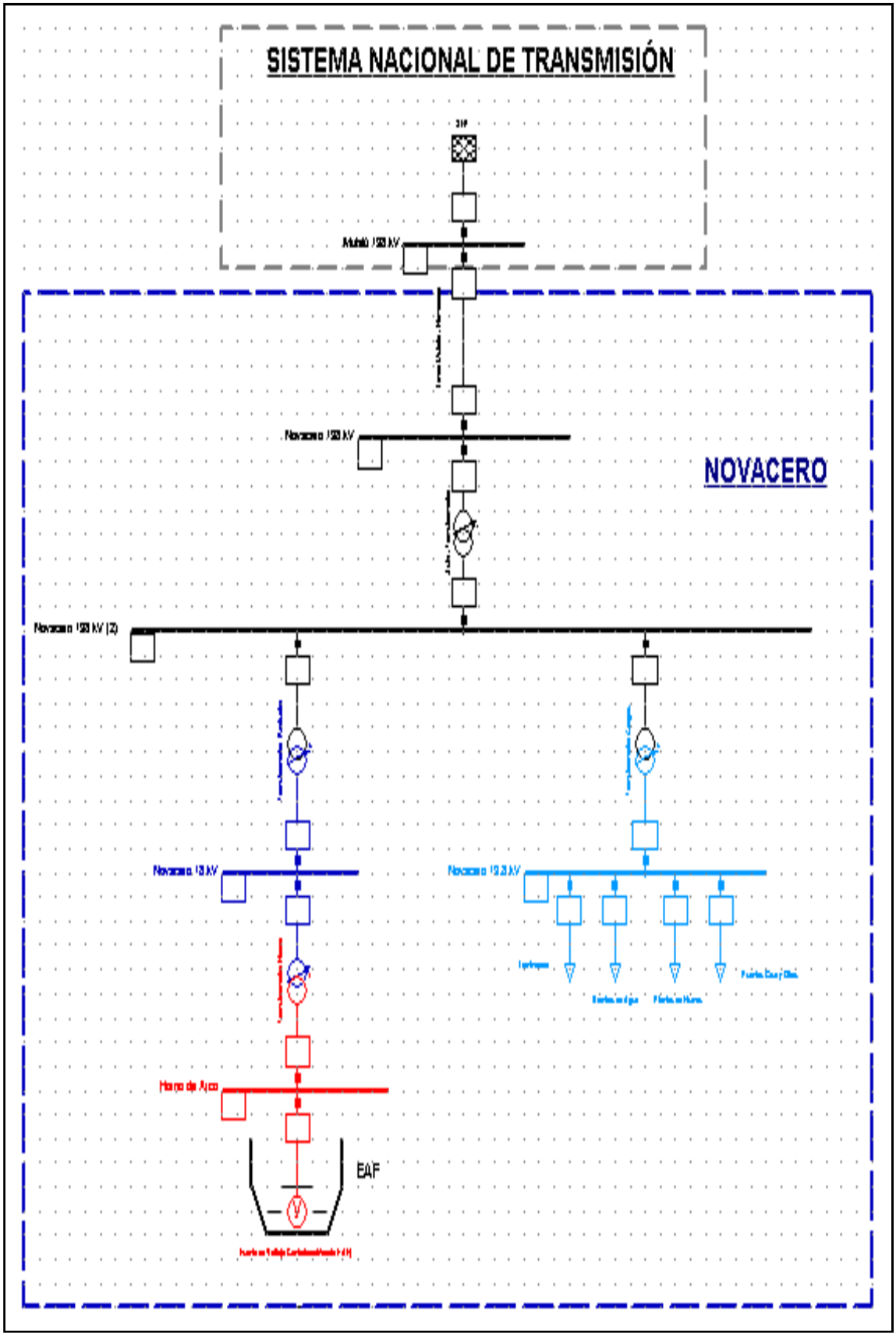


Figura 3.16 Red de Novacero S.A. en Power Factory

CAPÍTULO 4

SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para determinar el impacto producido por la conexión del horno de arco de NOVACERO S.A. al Sistema Nacional de Transmisión se calculan los índices de distorsión armónica y efecto flicker en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (Punto Común de Conexión) y se verifica que los índices se encuentren dentro de los límites establecidos por las normas.

La relación no lineal entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico que causa la distorsión armónica se representa en el modelo del horno de arco en estado estacionario, las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado estacionario permiten calcular los índices de distorsión armónica. La variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico que causa fluctuaciones de voltaje, que originan el fenómeno flicker, se representa en el modelo del horno de arco en estado dinámico, las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado dinámico permiten calcular el índice de flicker.

Los índices de distorsión armónica se calculan utilizando el módulo de armónicos de Power Factory y el índice de flicker se calcula utilizando el Flickermeter, librería de Power Quality Analysis Tools de Simulink/Matlab, desarrollada por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Texas. Los índices de armónicos se comparan con los límites establecidos en la Recomendación Práctica y Requerimientos para el control de armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia IEEE Std 519-1992 y con los límites establecidos en la Regulación CONELEC 003/08 y el índice de flicker se compara con el límite establecido en la Norma Internacional IEC 61000-4-15.

A continuación se realizan simulaciones del comportamiento del horno de arco que permitirán calcular los índices de distorsión armónica y efecto flicker.

4.1 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO

Utilizando el módulo de estabilidad de Power Factory se realiza simulaciones del comportamiento del horno de arco que permiten visualizar las formas de onda de voltaje y corriente del horno de arco, la característica no lineal entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico, así como los voltajes y corrientes presentes en la red de Novacero S.A. y en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló.

4.1.1 VOLTAJES DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO ESTACIONARIO

Considerando la longitud del arco eléctrico constante ($V_{arco} = 200V$), el voltaje del arco eléctrico cambia con la magnitud de la corriente instantánea del arco eléctrico, los voltajes por fase que se presentan en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 permiten apreciar la forma característica del voltaje del horno de arco descrita en el capítulo 2, ondas cuasi cuadradas, distorsionadas respecto la forma sinusoidal proporcionada desde el suministro. El voltaje luego de la ignición del arco eléctrico permanece en un valor casi constante de 200 V, valor característico del voltaje del arco eléctrico.

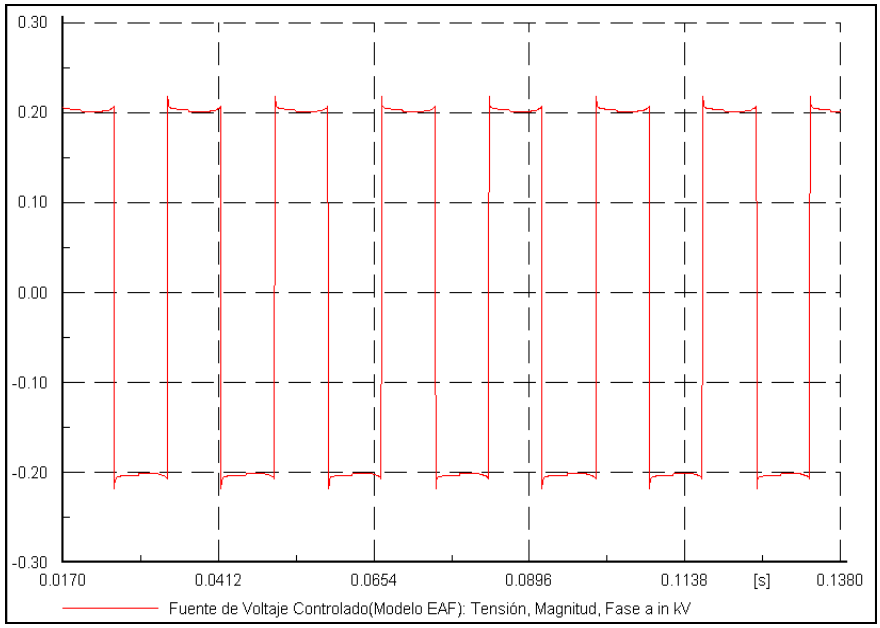


Figura 4.1 Voltaje del Horno de Arco de la Fase A

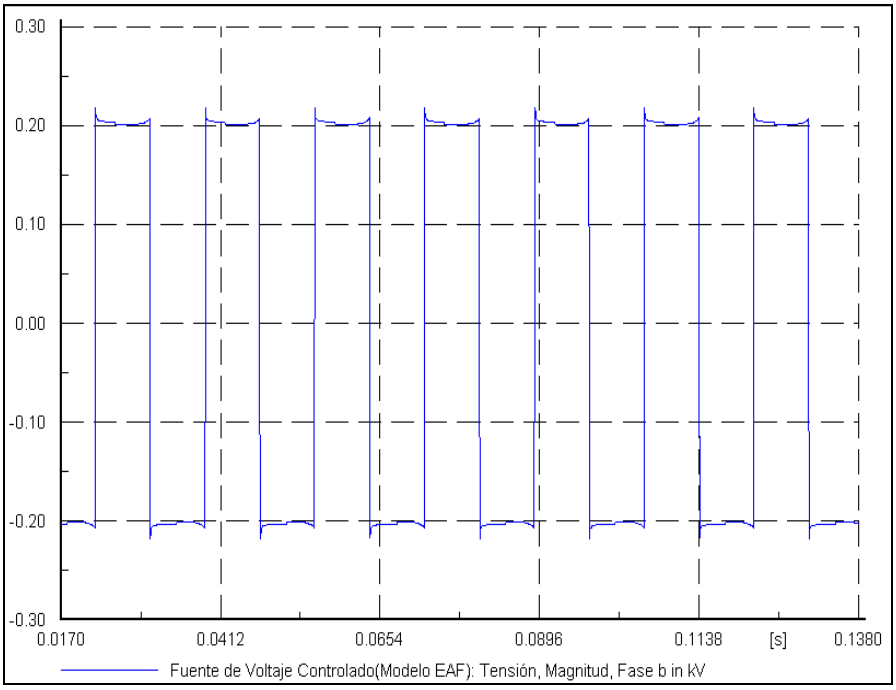


Figura 4.2 Voltaje del Horno de Arco de la Fase B

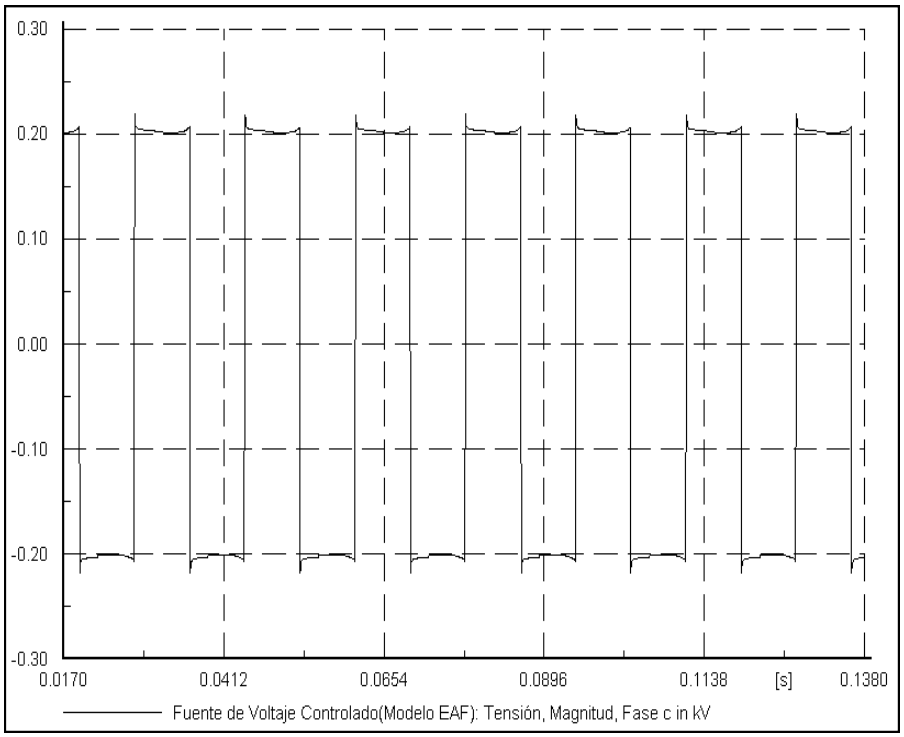


Figura 4.3 Voltaje del Horno de Arco de la Fase C

La figura 4.4 muestra el desfasamiento de 120 grados entre las señales de voltaje de las fases A, B y C del horno de arco, conservan el desfasamiento del voltaje de la alimentación, debido a que los hornos de arco no producen desfasamiento del voltaje.

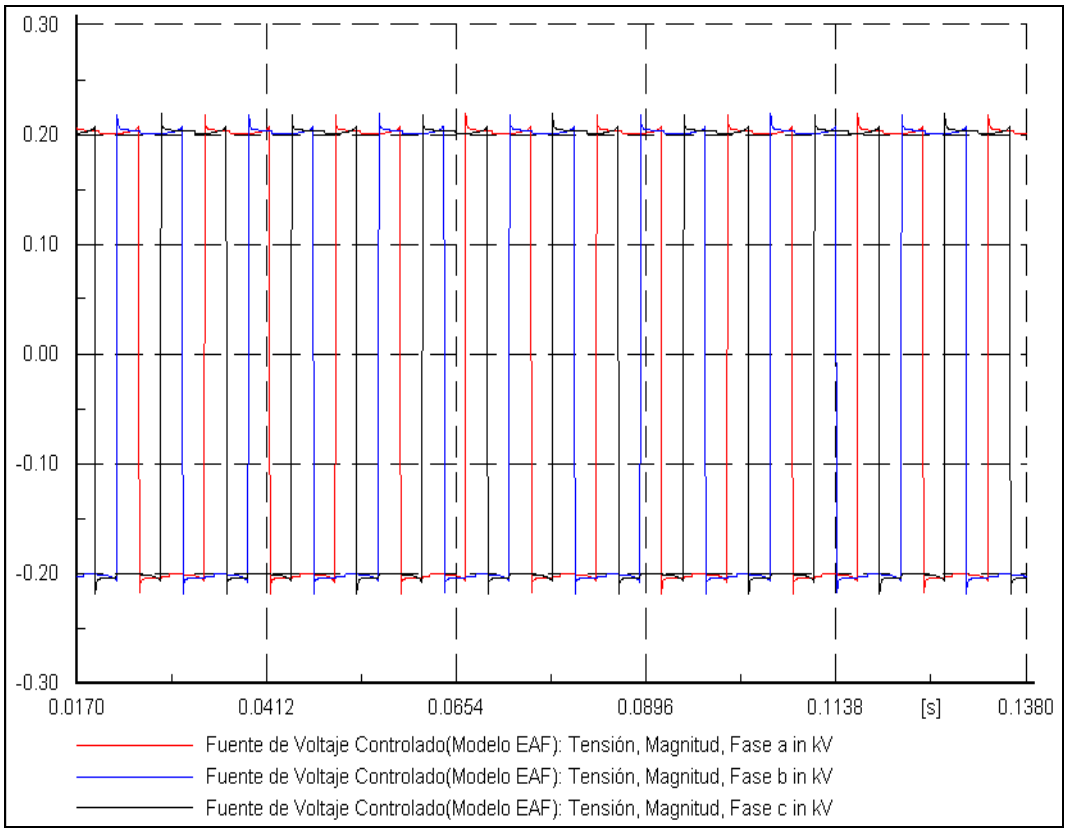


Figura 4.4 Voltaje del Horno de Arco de las Fases A, B y C

4.1.2 CORRIENTES DEL HORNO DE ARCO

Las corrientes por fase que se presentan en las figuras 4.5, 4.6 y 4,7 permiten apreciar la distorsión de las formas de onda de la corriente, las cuales conservan una forma de onda cuasi sinusoidal con un valor pico de 60 kA.

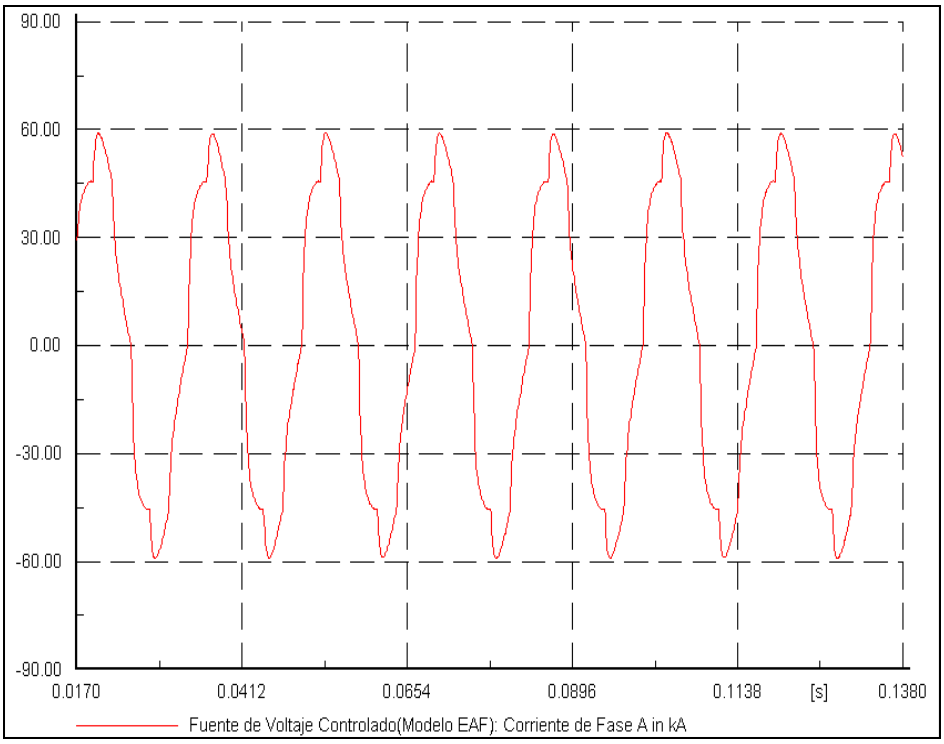


Figura 4.5 Corriente del Horno de Arco en la Fase A

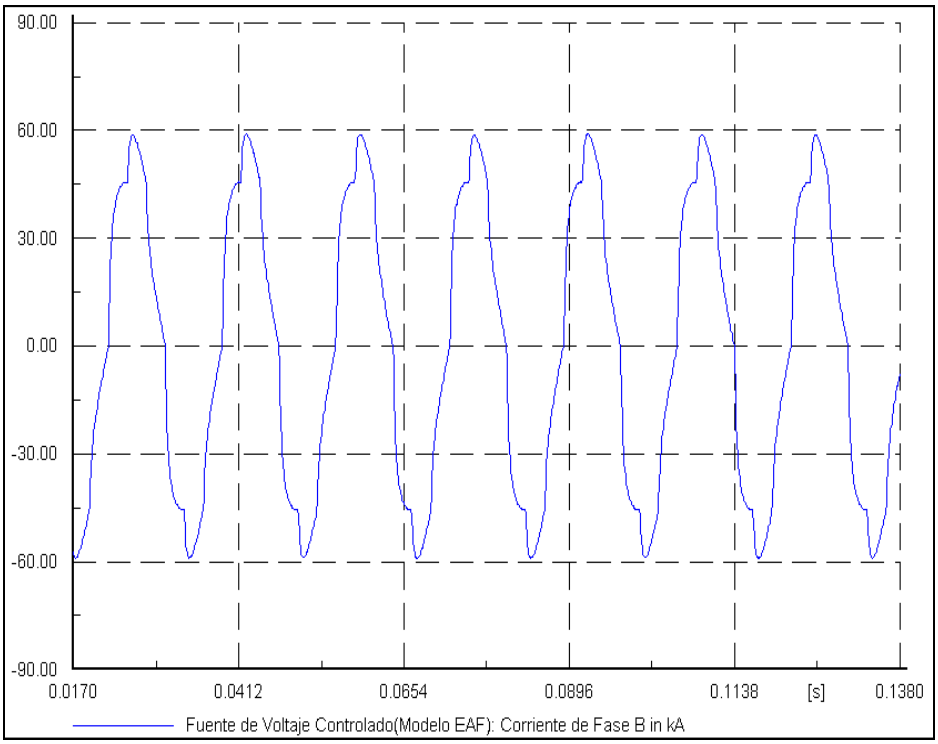


Figura 4.6 Corriente del Horno de Arco en la Fase B

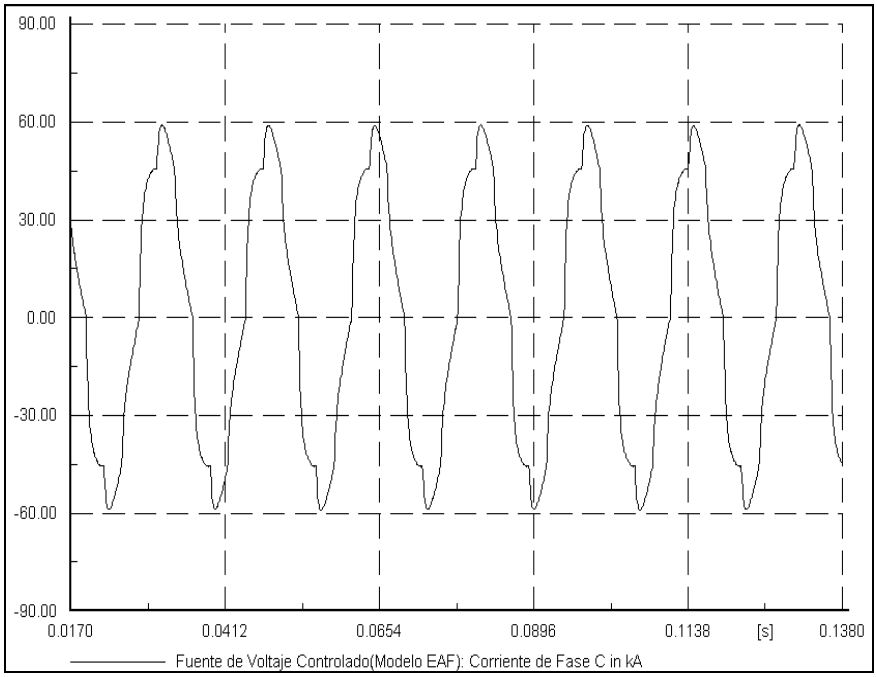


Figura 4.7 Corriente del Horno de Arco en la Fase C

La figura 4.8 muestra a las señales de corriente en fase con las señales de voltaje del horno de arco, comportamiento resistivo característico del arco eléctrico.

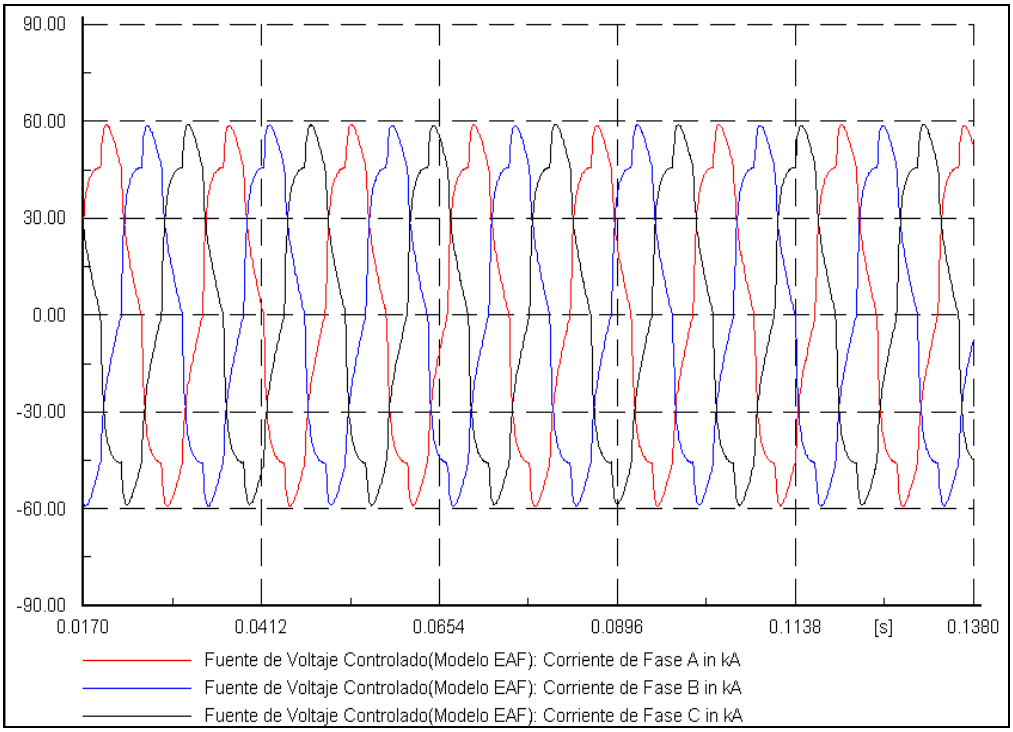


Figura 4.8 Corriente del Horno de Arco en las Fases A, B y C

4.1.3 CARACTERÍSTICA NO LINEAL VOLTAJE-CORRIENTE DEL HORNO DE ARCO

La característica no lineal voltaje-corriente por fase que se presenta en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 describe el comportamiento del voltaje en función de la corriente del horno de arco.

Después de la ignición del arco eléctrico el voltaje permanece casi constante alrededor de 200 V, al incrementarse el valor de la corriente el valor del voltaje del arco eléctrico se acerca más a 200 V. La relación no lineal entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico es la causa principal de la generación de armónicos del horno de arco.

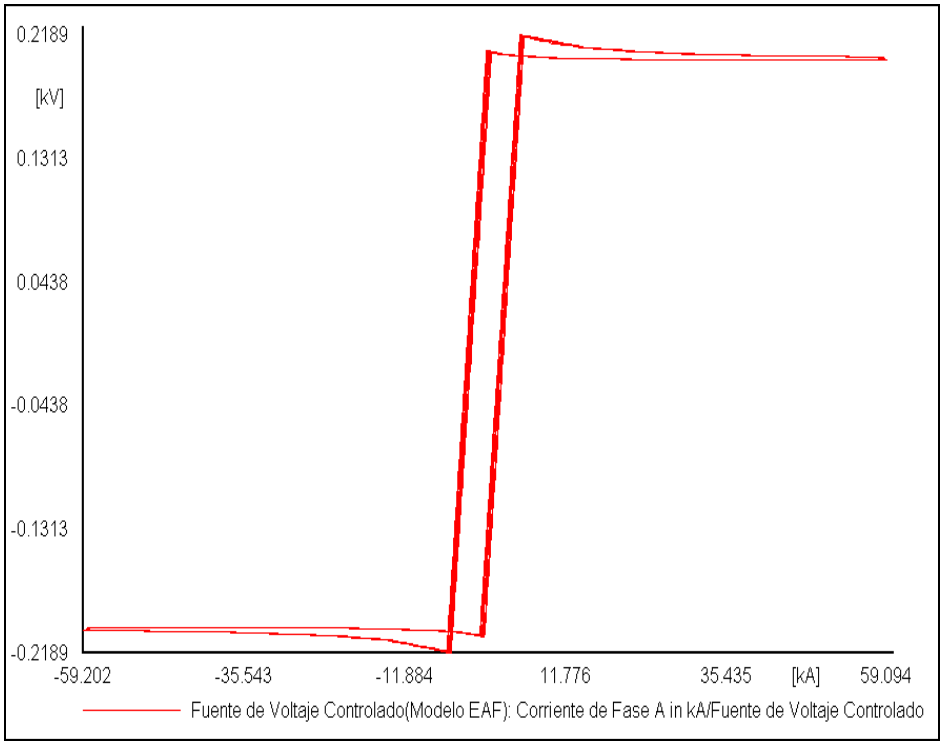


Figura 4.9 Relación Voltaje-Corriente del Horno de Arco en la Fase A

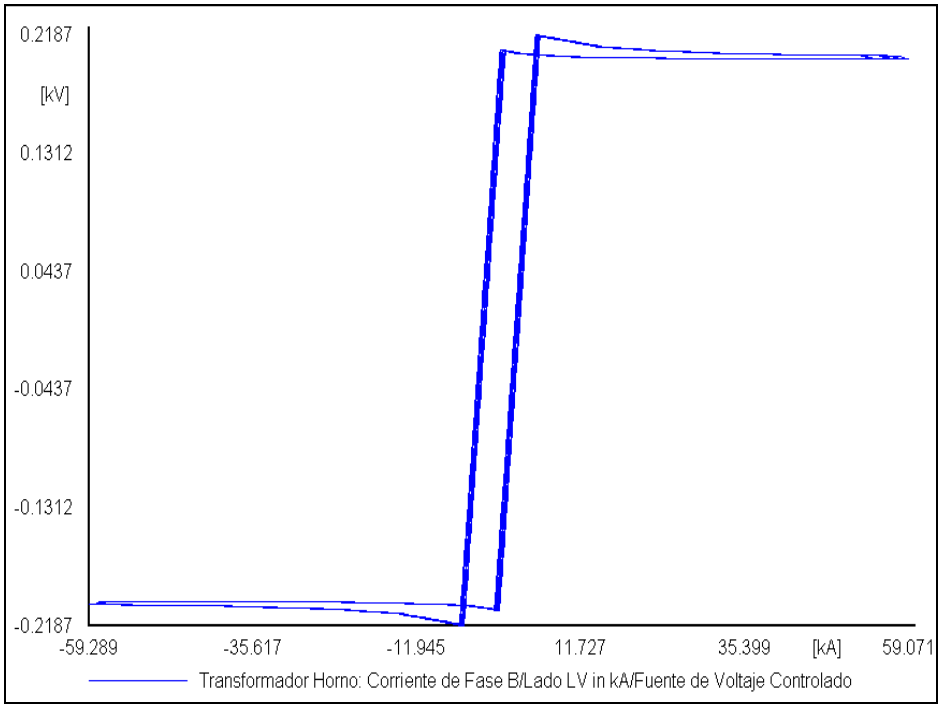


Figura 4.10 Relación Voltaje-Corriente del Horno de Arco en la Fase B

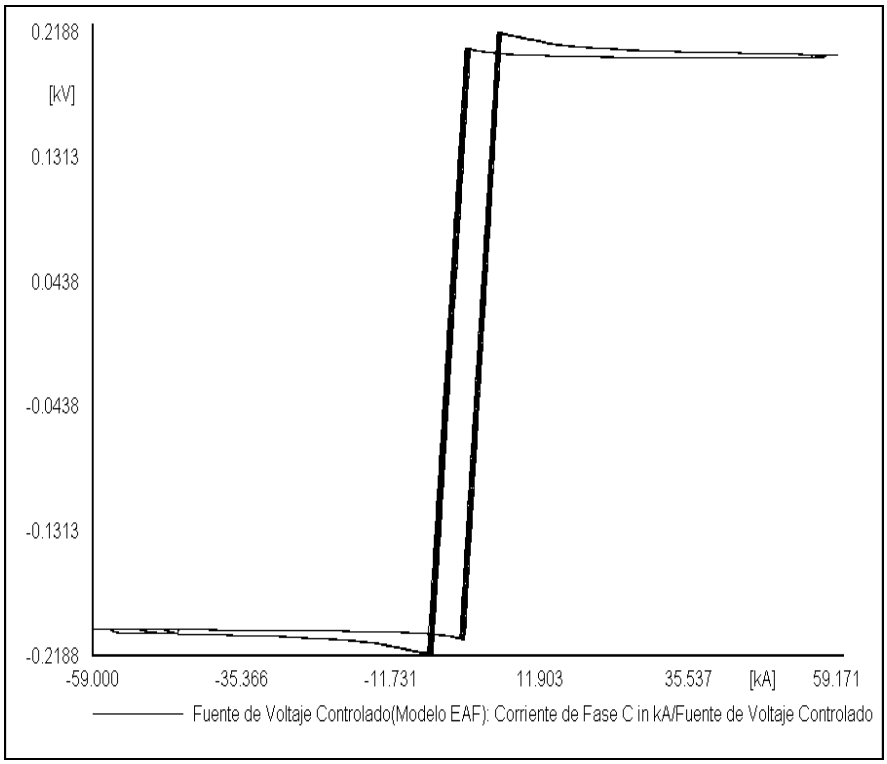


Figura 4.11 Relación Voltaje-Corriente del Horno de Arco en la Fase C

4.1.4 VOLTAJES EN LA RED DE NOVACERO S.A.

En la figura 4.12 se aprecia la distorsión del voltaje en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló así como en los diferentes puntos de la red de Novacero S.A. que se produce por la operación del horno.

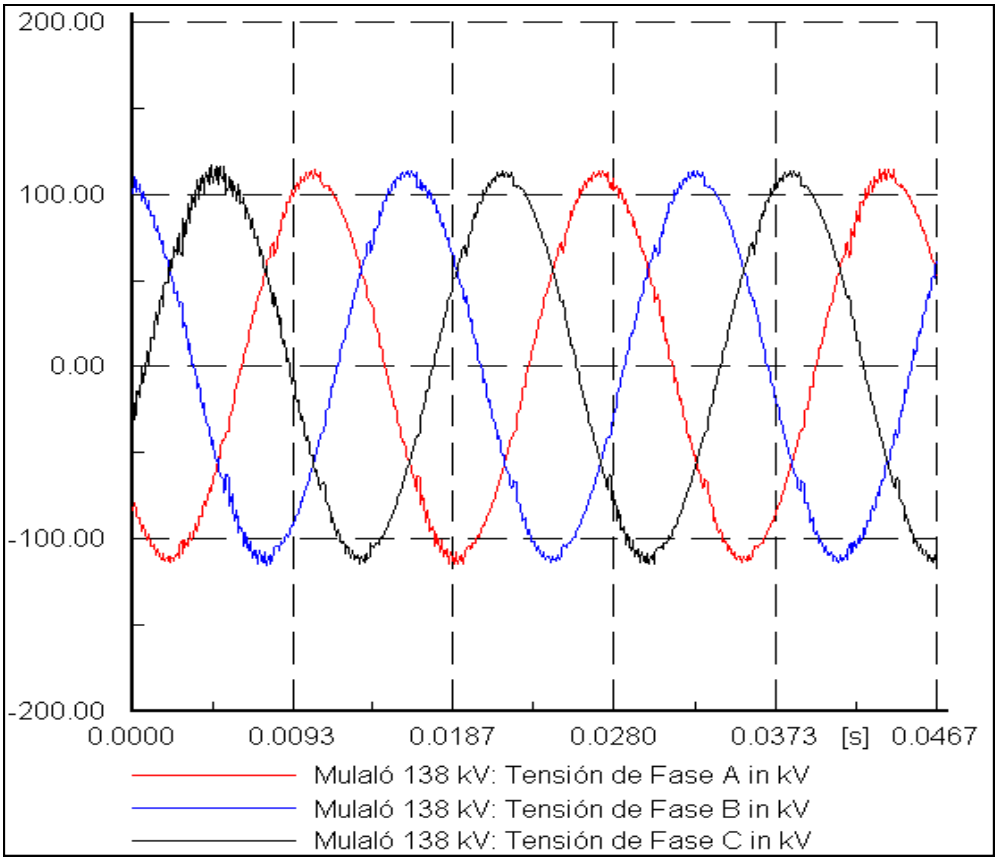


Figura 4.12 Voltajes en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló 138 kV

El voltaje en la Barra de 138 kV (2) de la S/E Novacero (figura 4.14) respecto al voltaje en la Barra de 138 kV de la S/E Novacero (figura 4.13) no cambia significativamente, pero se aprecia mayor distorsión debido a que la Barra de 138 kV (2) se encuentra más próxima al horno de arco.

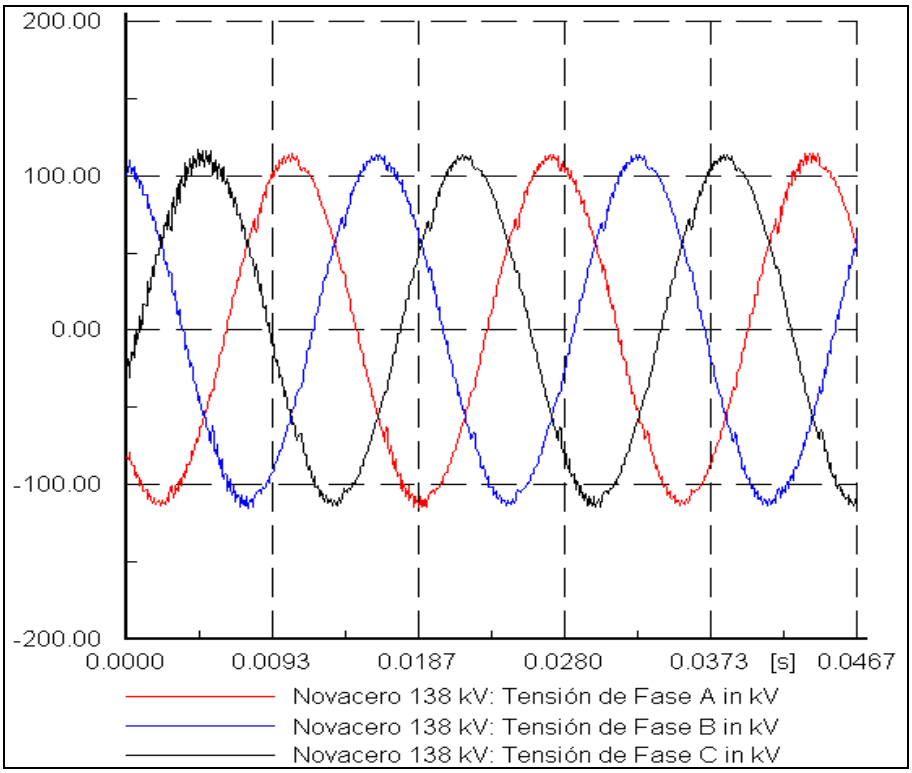


Figura 4.13 Voltajes en la Barra de 138 kV de la S/E Novacero

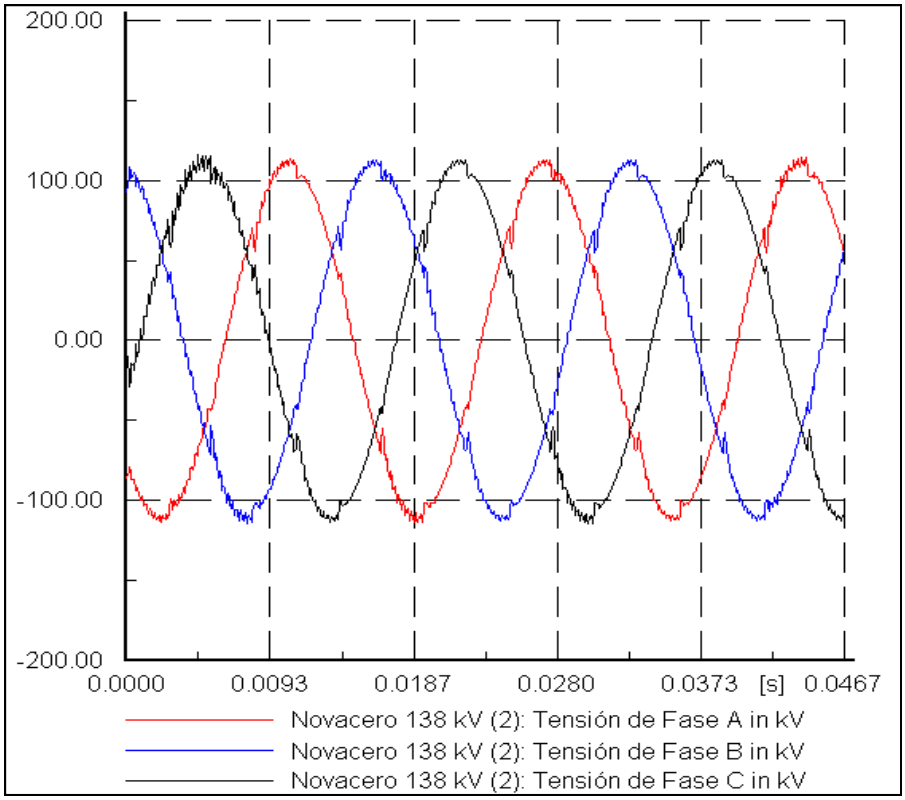


Figura 4.14 Voltajes en la Barra de 138 kV (2) de la S/E Novacero

En las figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se aprecia que la distorsión del voltaje en las barras de la red de Novecero S.A. es más significativa a medida que las barras se aproximan al horno.

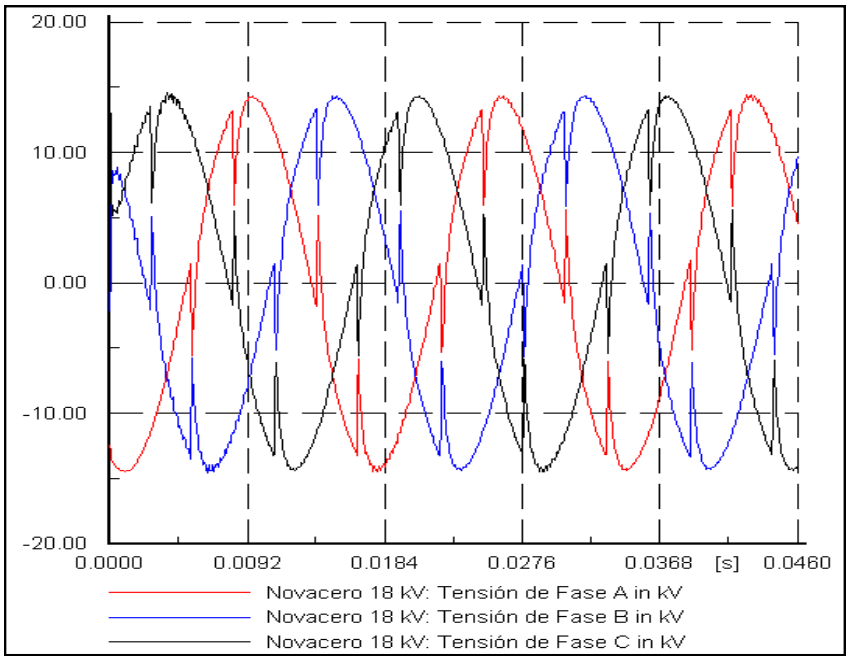


Figura 4.15 Voltajes en la Barra de 18 kV de la S/E Novacero

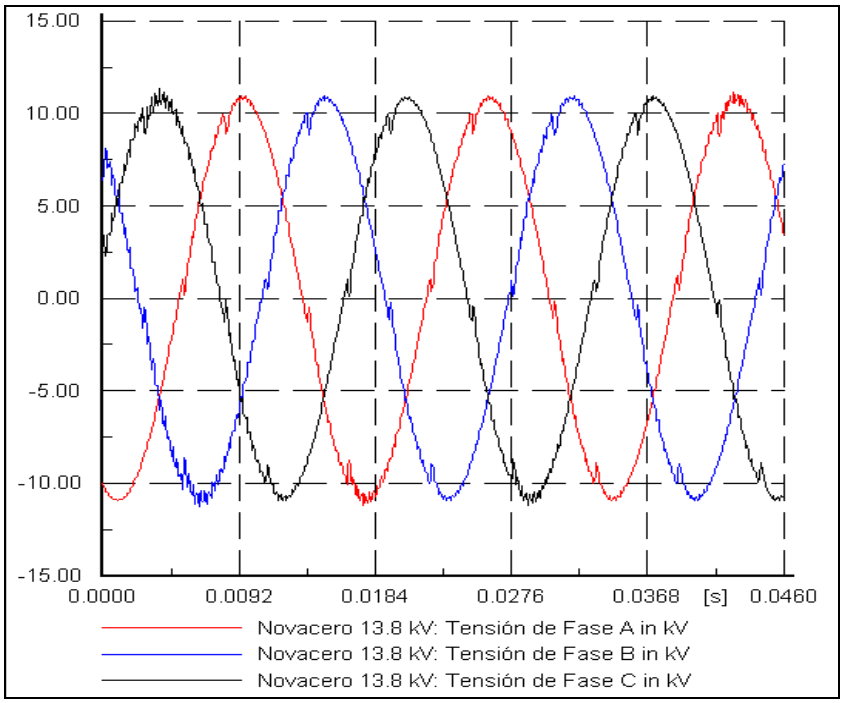


Figura 4.16 Voltajes en la Barra de 13,8 kV (Cargas) de la S/E Novacero

4.1.5 CORRIENTES EN LA RED DE NOVACERO

La distorsión de corriente en las ramas de la red de Novacero S.A. que se presentan en las figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 y 4.23 permiten apreciar que la distorsión es más significativa a medida que se aproximan a horno de arco.

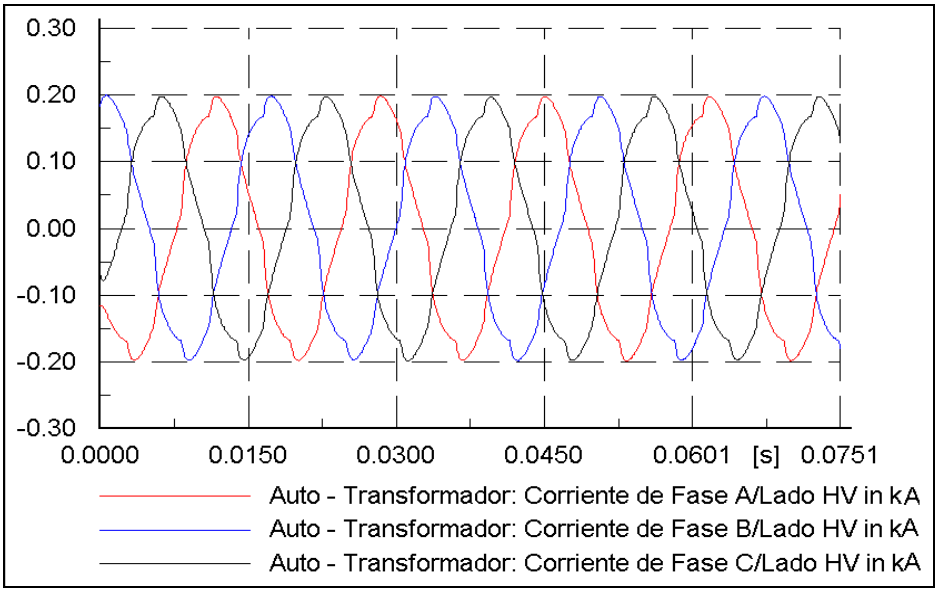


Figura 4.17 Corrientes en el lado de Alto Voltaje del Auto Transformador de la S/E Novacero

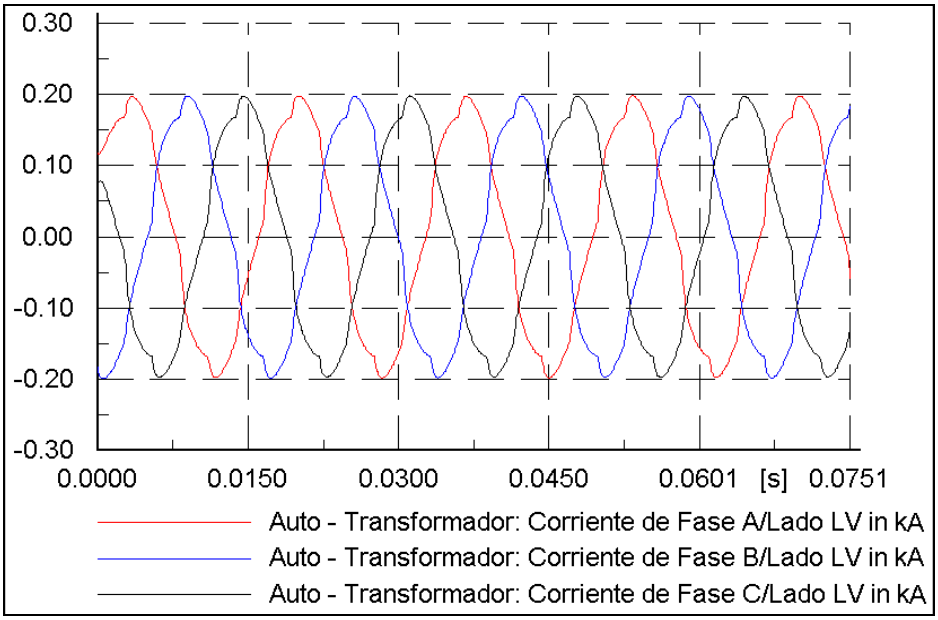


Figura 4.18 Corrientes en el lado de Bajo Voltaje del Auto Transformador de la S/E Novacero

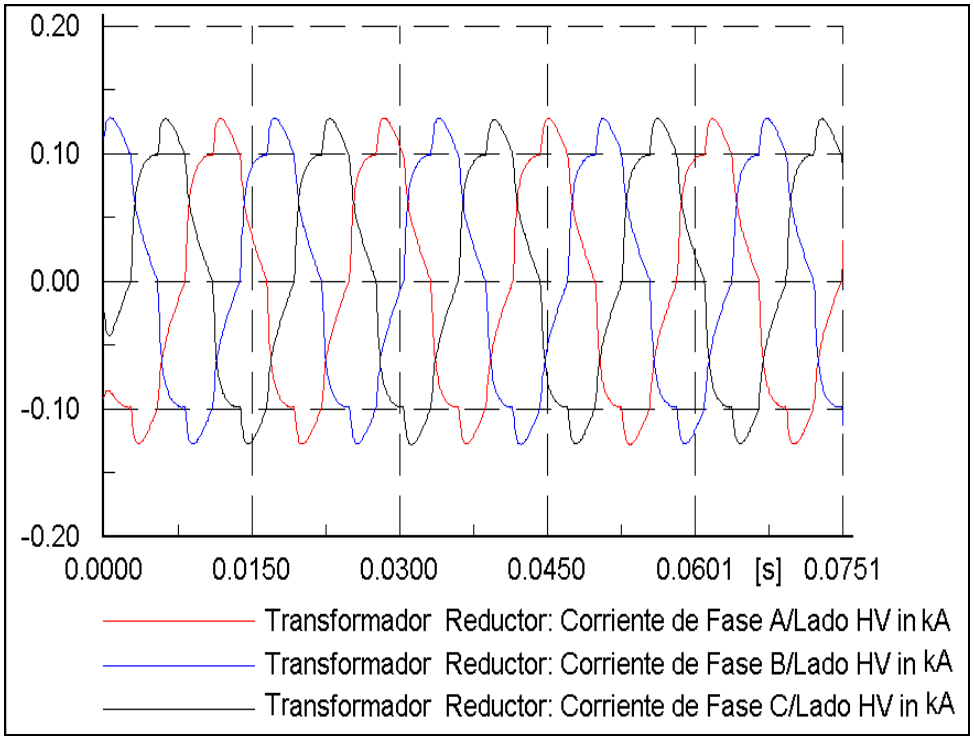


Figura 4.19 Corrientes en el lado de Alto Voltaje del Transformador Reductor de la S/E Novacero

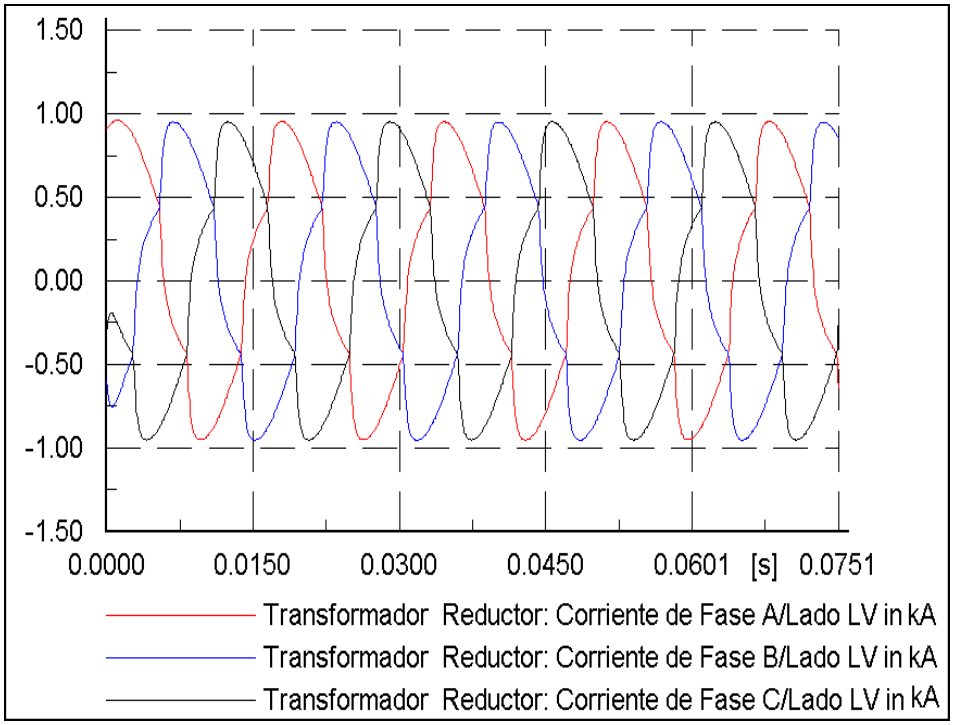


Figura 4.20 Corrientes en el lado de Bajo Voltaje del Transformador Reductor de la S/E Novacero

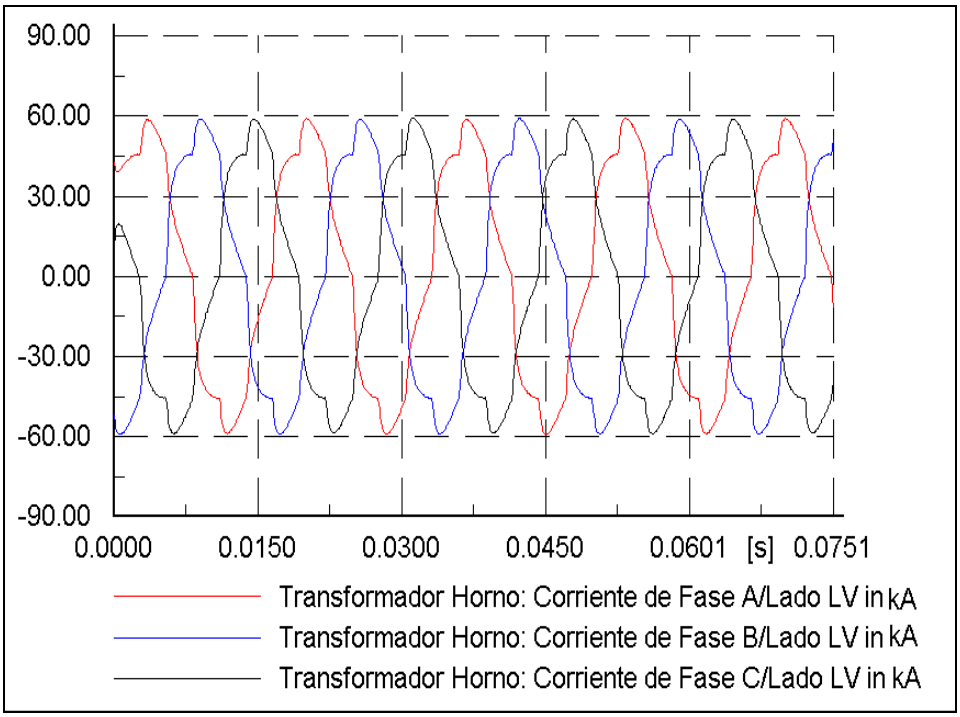


Figura 4.21 Corrientes en el lado de Bajo Voltaje del Transformador del Horno de la S/E Novacero

La corriente en el lado de alto voltaje (figura 4.22) y bajo voltaje (figura 4.23) del Transformador de las Cargas de Novacero S.A. tiene menor distorsión debido al consumo de corriente de las cargas lineales.

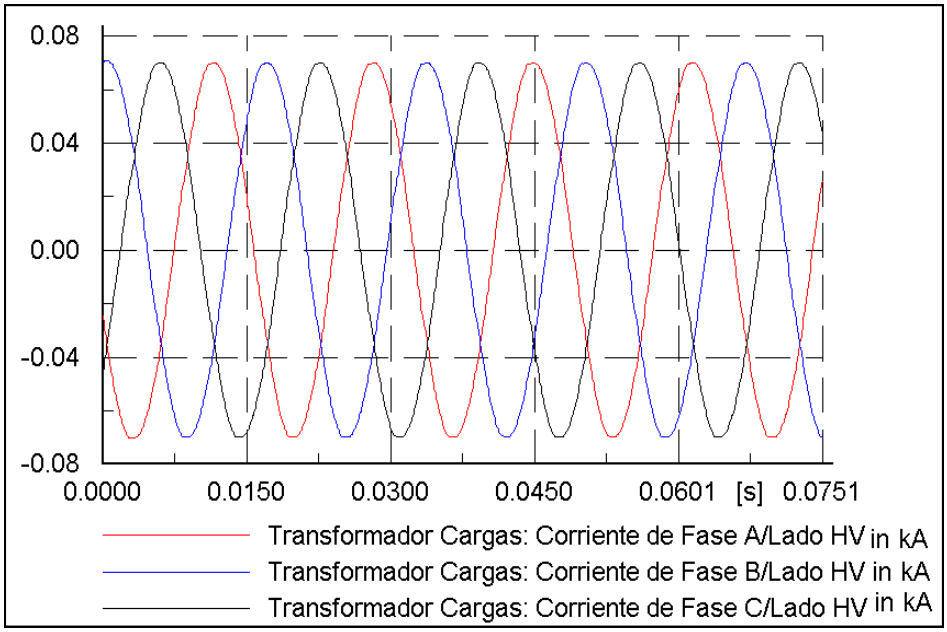


Figura 4.22 Corrientes en el lado de Alto Voltaje del Transformador de la Cargas de la S/E Novacero

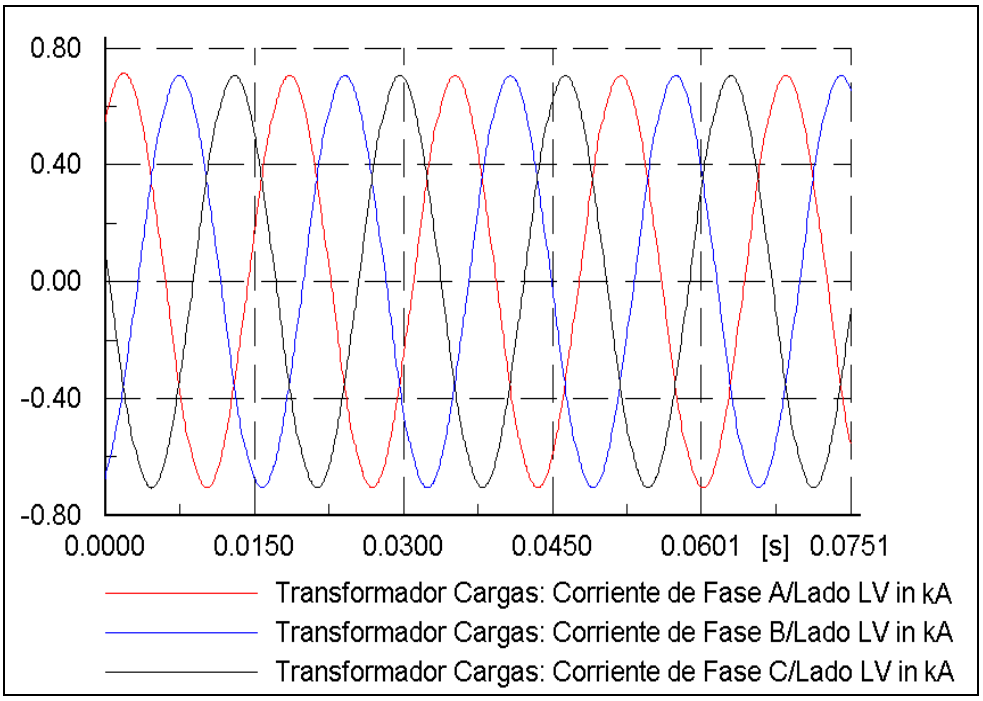


Figura 4.23 Corrientes en el lado de Bajo Voltaje del Transformador de la Cargas de la S/E Novacero

4.2 DETERMINACIÓN DE ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN EL PCC

Para determinar los índices de distorsión armónica producidos por la operación del horno de arco de Novacero S.A. se utiliza las simulaciones del comportamiento del horno en estado estacionario. Se descompone en el espectro de frecuencias (espectro armónico) las señales de corriente del horno de arco con ayuda del instrumento virtual Trasformada Rápida de Fourier (FFT) de Power Factory.

El espectro armónico de la corriente obtenido en la FFT se ingresa a una fuente de armónicos de Power Factory que representará la inyección de armónicos de corriente del horno de arco a la red en el flujo de carga armónico, el cual calculará los índices de distorsión armónica en el Punto Común de Conexión (PCC).

4.2.1 ESPECTRO DE FRECUENCIAS DEL HORNO DE ARCO

Una señal periódica cualquiera f(t) en el periodo τ puede ser representada por señales más sencillas que faciliten su análisis siempre que la señal f(t) cumpla con las siguientes condiciones:

- f(t) tiene un número finito de discontinuidad en un período.
- f(t) tiene un número finito de máximos y mínimos en un período.
- La integral del valor absoluto de f(t) en un período es finita.

La representación de la señal se realiza a través de una serie de senos y cosenos, llamada serie de FOURIER (ecuación 4.1)

$$f(t) = \sum_{h=1}^{N} (a_h \cdot \cos(h\omega t) + b_h \cdot \sin(h\omega t)) \qquad \textbf{(4.1)}$$

donde:

h = Orden del armónico.

ω = Frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$), con $f = 60Hz$.

t = Tiempo.

a_h y b_h = Coeficientes.

Los coeficientes a_h y b_h se calculan con las ecuaciones 4.2 y 4.3 respectivamente.

$$a_h = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} f(t) \cdot \cos(h\omega t) dt \qquad \textbf{(4.2)}$$

$$b_h = \frac{2}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} f(t) \cdot \sin(h\omega t) dt \qquad \textbf{(4.3)}$$

La ecuación 4.1 se puede expresar como la ecuación 4.4 para obtener la magnitud y el ángulo de cada armónico que forma la señal.

$$f(t) = \sum_{h=1}^{N} (c_h \cdot \cos(h\omega t + \varphi_h)) \quad \textbf{(4.4)}$$

El valor de la magnitud de cada armónico c_h y su ángulo φ_h se calculan en función de los coeficientes a_h y b_h, desarrollando la ecuación 4.4 e igualándola a la ecuación 4.1.

$$c_h \cdot \cos(h\omega t + \varphi_h) = c_h \cdot \cos(\varphi_h) \cdot \cos(h\omega t) - c_h \cdot \sin(\varphi_h) \cdot \sin(h\omega t)$$

$$a_h \cdot \cos(h\omega t) + b_h \cdot \sin(h\omega t) = c_h \cdot \cos(\varphi_h) \cdot \cos(h\omega t) - c_h \cdot \sin(\varphi_h) \cdot \sin(h\omega t)$$

Con lo cual:

$$a_h = c_h \cdot \cos(\varphi_h) \quad \textbf{(4.5)}$$

$$b_h = -c_h \cdot \sin(\varphi_h) \quad \textbf{(4.6)}$$

De las ecuaciones 4.5 y 4.6 se obtienen la magnitud y el ángulo de cada armónico:

$$c_h = \sqrt{a_h{}^2 + b_h{}^2} \quad \textbf{(4.7)}$$

$$\varphi_h = \arctan\left(\frac{-b_h}{a_h}\right) \quad \textbf{(4.8)}$$

El espectro de frecuencias permite representar los armónicos que componen una señal periódica, es un histograma que indica la amplitud de cada armónico en función de su orden. La Transformada Discreta de Fourier (TDF) es el método utilizado convencionalmente para calcular el espectro de frecuencia de una señal y es el método propuesto en los estándares de medida de armónicos e interarmónicos, permite convertir una secuencia de valores en el dominio del

tiempo a una secuencia de valores equivalente en el dominio de la frecuencia. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) es un algoritmo que permite calcular la TDF de forma rápida y eficaz.

Power Factory contiene dentro de sus instrumentos virtuales al instrumento virtual FFT (VisFft) (figura 4.24).

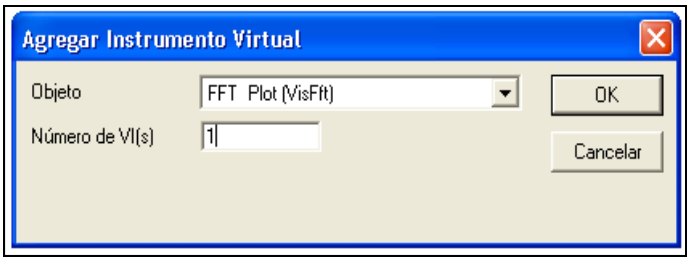


Figura 4.24 Instrumento Virtual Transformada Rápida de Fourier (FFT)

En la ventana de diálogo del instrumento virtual FFT (figura 4.25) se escoge a la señal que se requiere descomponer en el espectro de frecuencias.

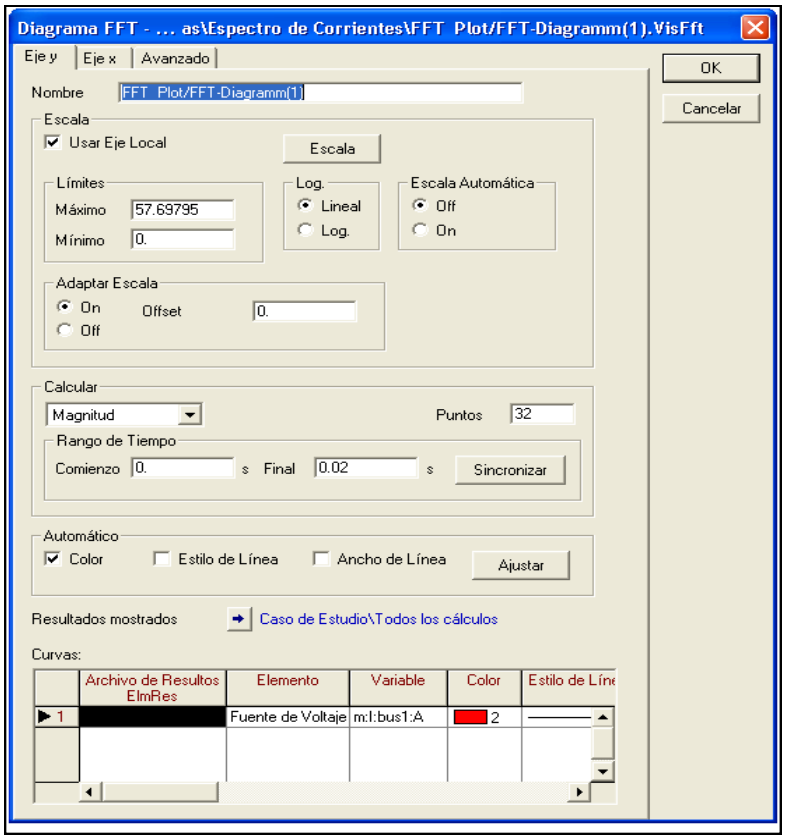


Figura 4.25 Ventana de Diálogo del Instrumento Virtual FFT

La FFT de Power Factory calcula el valor de los parámetros a_h, b_h, el valor de la magnitud c_h y el ángulo φ_h de armónico que forma la señal f(t).

Para introducir el valor de la magnitud c_h y el ángulo φ_h de cada armónico, obtenido en la FFT, en la fuente de armónicos de Power Factory se expresa la magnitud de cada componente armónico (c_h) en porcentaje de la magnitud del primer armónico c_1 y el ángulo de cada componente armónico (φ_h) se expresa en referencia al ángulo del primer armónico φ_1.

La conversión de la magnitud de cada armónico se la realiza utilizando la ecuación 4.9.

$$c_h[\%] = 100 \cdot \frac{c_h}{c_1} \qquad \textbf{(4.9)}$$

El cambio de referencia del ángulo de cada componente armónico corresponde a un nuevo valor del origen del tiempo $(\varphi_1 = 0)$:

$$\cos(\omega t + \varphi_1) = \cos(\omega t') \qquad \textbf{(4.10)}$$

$$t = t' - \frac{\varphi_1}{\omega} \qquad \textbf{(4.11)}$$

Reemplazando la ecuación 4.11 en 4.4:

$$c_h \cdot \cos(h\omega t' - h\varphi_1 + \varphi_h) \qquad \textbf{(4.12)}$$

Agrupando las expresiones en la ecuación 4.14, la ecuación 4.12 se transforma en la ecuación 4.13.

$$c_h \cdot \cos(h\omega t' + \varphi'_h) \qquad \textbf{(4.13)}$$

El ángulo de cada armónico referenciado al ángulo del primer armónico se obtiene con la ecuación 4.14.

$$\varphi'_h\,[\mathrm{deg}] = \varphi_h - h\varphi_1 \qquad \textbf{(4.14)}$$

El valor del ángulo φ'_h debe estar en el rango de -180 a +180 grados.

Las ecuaciones 4.9 y 4.14 se utilizan para ingresar la magnitud y el ángulo de cada armónico en la fuente de armónicos de Power Factory.

4.2.1.1 Espectro de Frecuencias del Voltaje

El espectro de frecuencias del voltaje se obtiene de las señales de voltaje del horno de arco obtenidas en las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado estacionario, en la figura 4.26 se presenta el espectro de frecuencias del voltaje de la fase A del horno de arco, igual para las fases B y C debido a que son voltajes simétricos, se observa que la componente armónica que tiene mayor amplitud es el armónico a frecuencia fundamental o primer armónico, las siguientes componentes armónicas llamadas también frecuencias armónicas (frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental) disminuyen su amplitud conforme la frecuencia del componente armónico se incrementa, este comportamiento es característico del espectro de frecuencias del voltaje de hornos de arco.

El espectro de frecuencias del voltaje del horno está compuesto por armónicos pares e impares, el valor de los armónicos pares es relativamente bajo y se puede considerar que la señal de voltaje está compuesta sólo por armónicos impares.

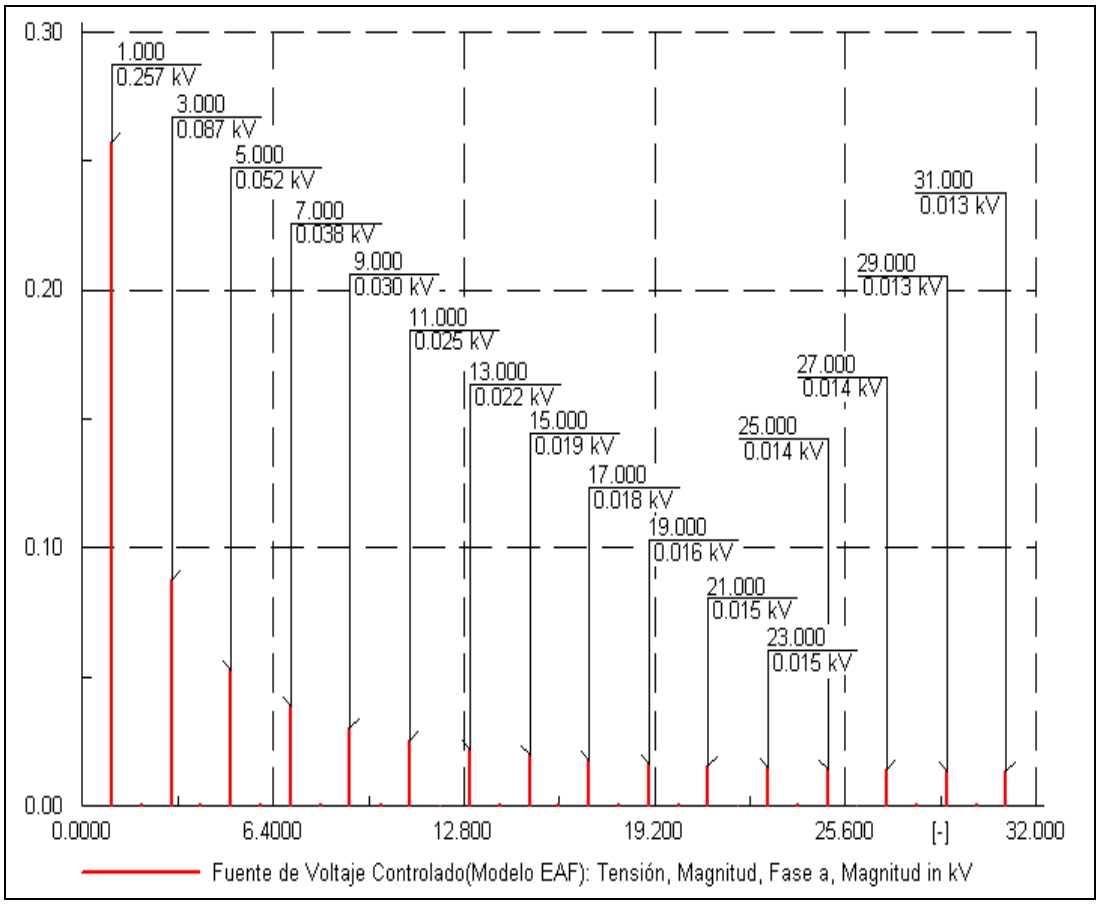


Figura 4.26 Espectro de Frecuencias (Magnitud) del Voltaje de la Fase A del Horno de Arco

El espectro de frecuencias permite conocer de manera rápida como se comportan las componentes armónicas de una señal.

En la tabla 4.1 se resume la magnitud y el orden de los armónicos que componen la señal del voltaje de la fase A del horno de arco, donde h es el orden del armónico, VA_h [kV] es la magnitud de cada armónico en kV, VA [kV] es la magnitud del primer armónico en kV, VA_h [%] es la magnitud de cada armónico en porcentaje de la magnitud del primer armónico calculado con la ecuación 4.9.

Tabla 4.1 Espectro de Armónicos de Voltaje de la Fase A del Horno de Arco

Voltaje Fase A			
h	***VA_h [kV]***	***VA [kV]***	***VA_h [%]***
1,00	0,257	0,257	100,000
3,00	0,087	0,257	33,852
5,00	0,052	0,257	20,233
7,00	0,038	0,257	14,786
9,00	0,030	0,257	11,673
11,00	0,025	0,257	9,728
13,00	0,022	0,257	8,560
15,00	0,019	0,257	7,393
17,00	0,018	0,257	7,004
19,00	0,016	0,257	6,226
21,00	0,015	0,257	5,837
23,00	0,015	0,257	5,837
25,00	0,014	0,257	5,447
27,00	0,014	0,257	5,447
29,00	0,013	0,257	5,058
31,00	0,013	0,257	5,058

La magnitud de cada armónico que forma el espectro de frecuencias de una onda cuadrada es igual al inverso del orden del armónico (1/h). En la tabla 4.2 se compara el espectro de frecuencias de una onda cuadrada y el espectro de frecuencias de la onda de voltaje del horno de arco, se observa que la magnitud de los armónicos son similares hasta el armónico 11 debido a que la onda de voltaje del horno de arco se asemeja a una onda cuadrada y a partir del armónico 13 su valor difiere debido a los picos que se forman en la onda de voltaje del horno.

Tabla 4.2 Comparación entre el Espectro de una Onda Cuadrada y el Espectro del Voltaje del Horno de Arco

h	***Onda Cuadrada [%]***	***Onda de Voltaje Horno [%]***
1,00	100,000	100,000
3,00	33,333	33,852
5,00	20,000	20,233
7,00	14,286	14,786
9,00	11,111	11,673
11,00	9,091	9,728
13,00	7,692	8,560
15,00	6,667	7,393
17,00	5,882	7,004
19,00	5,263	6,226
21,00	4,762	5,837
23,00	4,348	5,837
25,00	4,000	5,447
27,00	3,704	5,447
29,00	3,448	5,058
31,00	3,226	5,058

4.2.1.2 Espectro de Frecuencias de Corriente

En la figura 4.27 se presenta el espectro de frecuencias de la corriente de la fase B del horno de arco, igual al de las fases A y C por tratarse de corrientes simétricas, el cual está compuesto principalmente por armónicos impares, siendo los predominantes el primero, quinto, séptimo, décimo primero y décimo tercero, en orden de importancia.

La magnitud de cada armónico que compone el espectro de frecuencias de la corriente (figura 4.27) a diferencia de la magnitud de cada armónico que forma el espectro de frecuencias del voltaje (figura 4.26) no disminuye conforme aumenta el orden del armónico, se observa la presencia de armónicos predominantes que forman la señal. La distorsión de la onda de corriente del horno de arco respecto a la onda sinusoidal no es tan significativa como en el caso del voltaje y está formada por un menor número de armónicos de bajo valor.

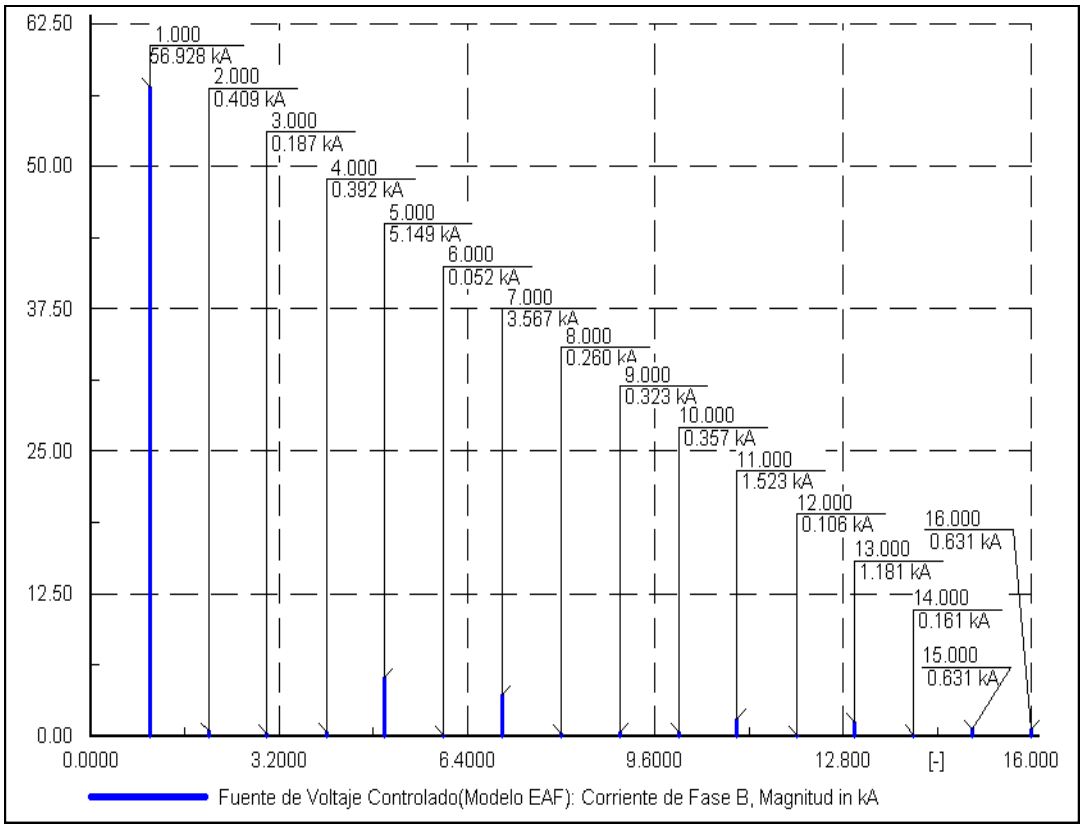


Figura 4.27 Espectro de Frecuencias (Magnitud) de la Corriente de la Fase B del Horno de Arco

En la tabla 4.3 se resume la magnitud y el orden de cada armónico que forma el espectro de frecuencias de la corriente del horno, donde h es el orden del armónico, IB_h [kA] es la magnitud de cada armónico en kA, IB [kA] es la magnitud del primer armónico en kA, IB_h [%] es la magnitud de cada componente armónico de corriente en porcentaje de la magnitud del primer armónico calculado ecuación 4.9.

Tabla 4.3 Espectro de Frecuencias de Corriente de la Fase B del Horno de Arco

Corriente Fase B			
h	***IB_h [kA]***	***IB [kA]***	***IB_h [%]***
1,00	56,928	56,928	100,000
2,00	0,409	56,928	0,718
3,00	0,187	56,928	0,328
4,00	0,392	56,928	0,689
5,00	5,149	56,928	9,045
6,00	0,052	56,928	0,091
7,00	3,567	56,928	6,266
8,00	0,260	56,928	0,457
9,00	0,323	56,928	0,567
10,00	0,357	56,928	0,627
11,00	1,523	56,928	2,675
12,00	0,106	56,928	0,186
13,00	1,181	56,928	2,075
14,00	0,161	56,928	0,283
15,00	0,631	56,928	1,108
16,00	0,631	56,928	1,108

El valor del ángulo de cada armónico que forma el espectro de frecuencias de la corriente de la fase A del horno de arco que se presenta en la figura 4.28 se ingresa en la fuente de armónicos de Power Factory

En la fuente de armónicos se ingresa únicamente el ángulo de cada armónico que forma el espectro de frecuencias de la corriente de la fase A debido a que Power Factory internamente realiza el defasamiento de 120 grados entre las fases.

En la siguiente sección se detalla el procedimiento para ingresar el espectro de frecuencias de la corriente en la fuente de armónicos de Power Factory.

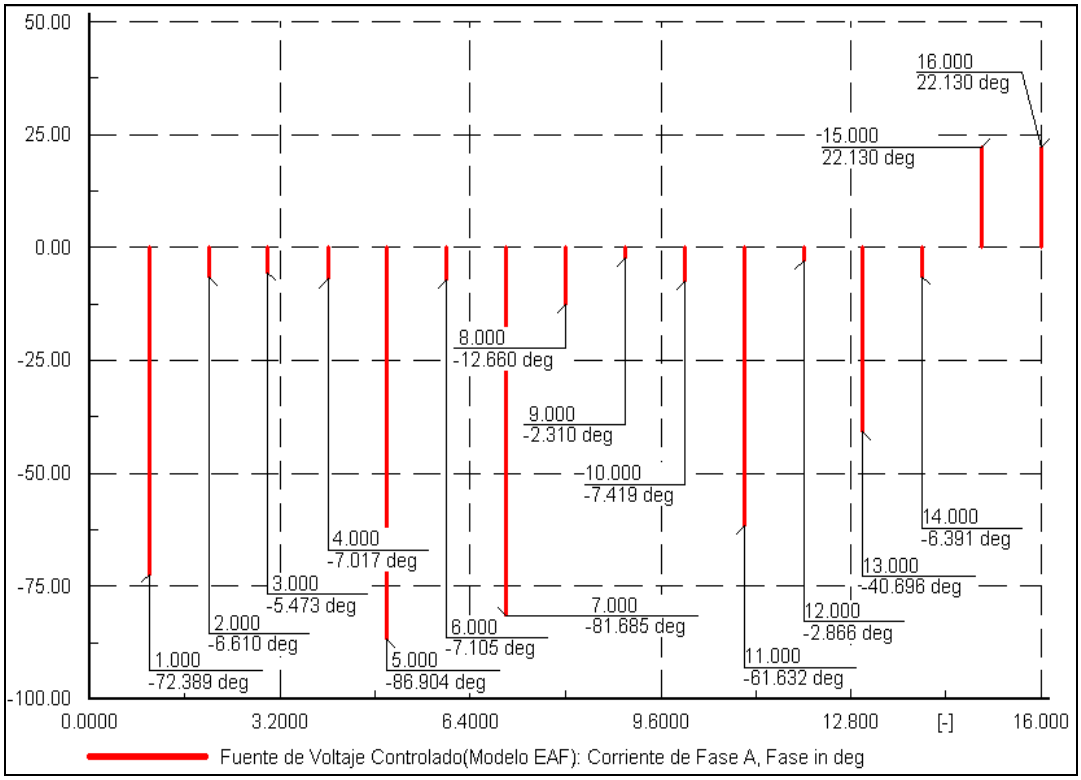


Figura 4.28 Espectro de Frecuencias (Ángulo) de la Corriente de la Fase A del Horno de Arco

En la tabla 4.4 se resume el ángulo de cada armónico que forma el espectro de frecuencias de la corriente de la fase A del horno de arco.

Tabla 4.4 Espectro de Frecuencias (Ángulo) de la Corriente de la Fase A del Horno de Arco

Corriente Fase A			
h	***phiA_h [deg]***	***phiA'_h [deg]***	***phiA"_h [deg]***
1,00	-72,389	0,000	0,000
2,00	-6,610	138,168	138,168
3,00	-5,473	211,694	-148,306
4,00	-7,017	282,539	-77,461
5,00	-86,904	275,041	-84,959
6,00	-7,105	427,229	67,229
7,00	-81,685	425,038	65,038
8,00	-12,660	566,452	-153,548
9,00	-2,310	649,191	-70,809
10,00	-7,419	716,471	-3,529
11,00	-61,632	734,647	14,647
12,00	-2,866	865,802	145,802
13,00	-40,696	900,361	-179,639
14,00	-6,391	1007,055	-72,945
15,00	22,130	1107,965	27,965
16,00	22,130	1180,354	100,354

Donde h es el orden del armónico, phiA_h [deg] es el ángulo de cada armónico en grados, phiA'_h [deg] es el ángulo de cada armónico referido al ángulo del primer armónico ($phiA_1$) calculado con la ecuación 4.14, phiA"_A [deg] es el valor de phiA'_h [deg] en el rango de -180 a +180 grados.

4.2.2 FLUJO DE CARGA ARMÓNICO

Para ejecutar el flujo de carga armónico en Power Factory se remplaza al horno de arco por una carga general (figura 4.30). En la ventana de diálogo del tipo de carga se coloca fuente de corriente (figura 4.29) y en la sección Armónicos de la carga general (figura 4.31) se ingresa el espectro de frecuencias (Magnitud y Ángulo) de la corriente del horno de arco.

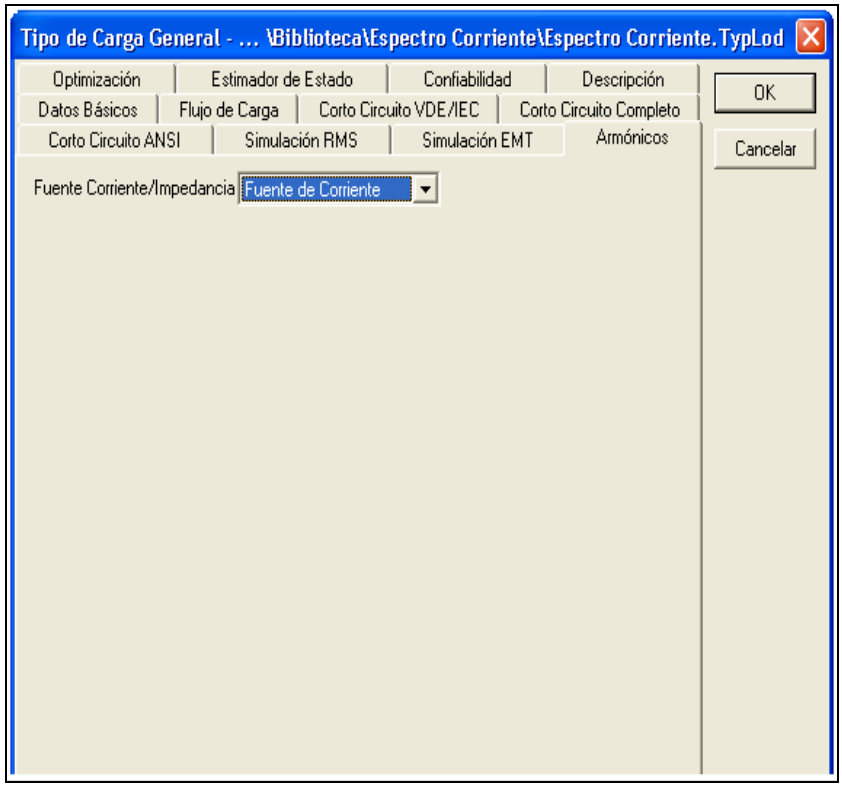


Figura 4.29 Carga General como Fuente de Corriente Armónica

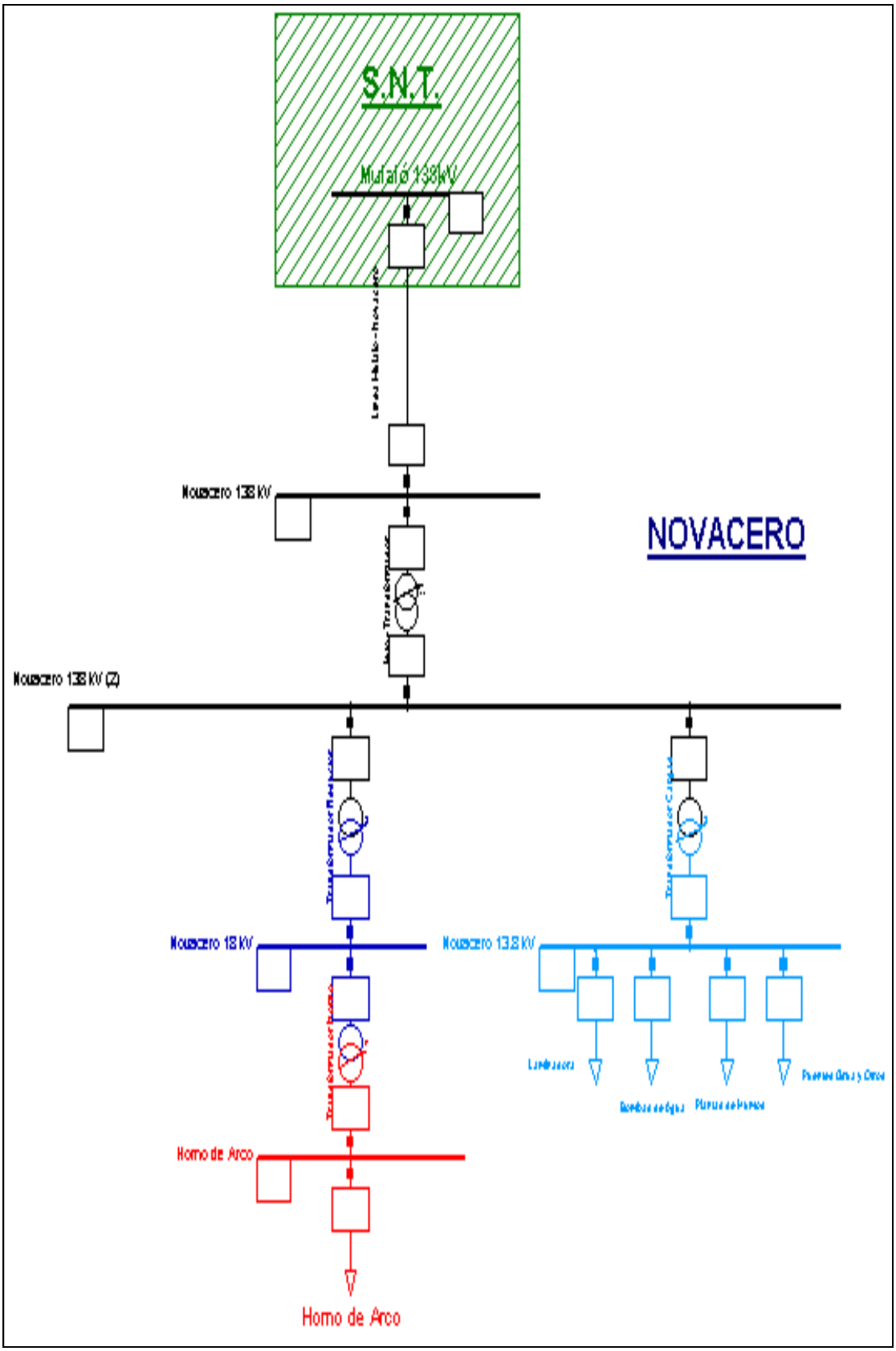


Figura 4.30 El Horno de Arco como Carga General en el SNT para el Flujo de Carga Armónico

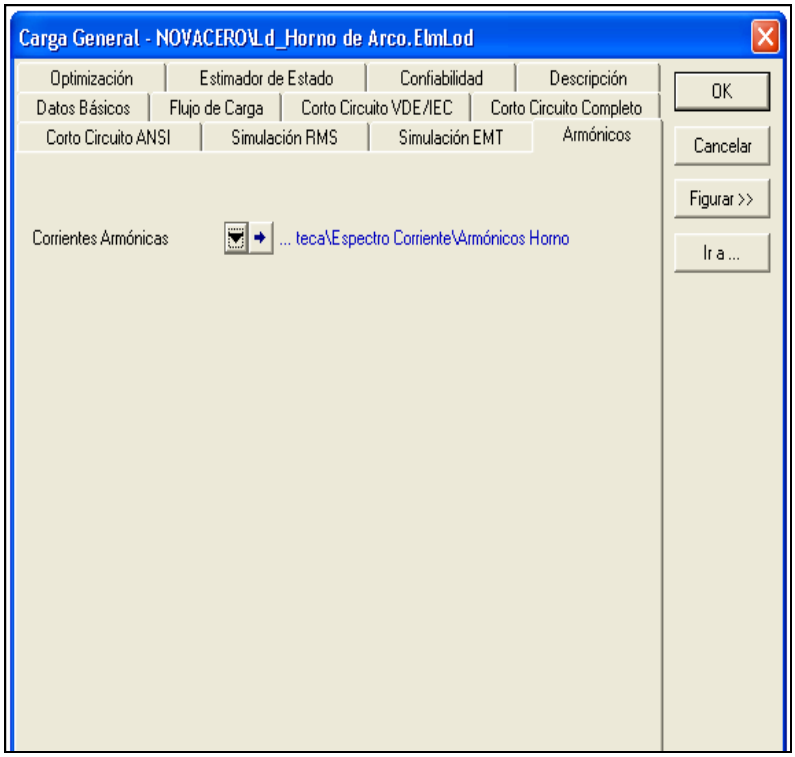
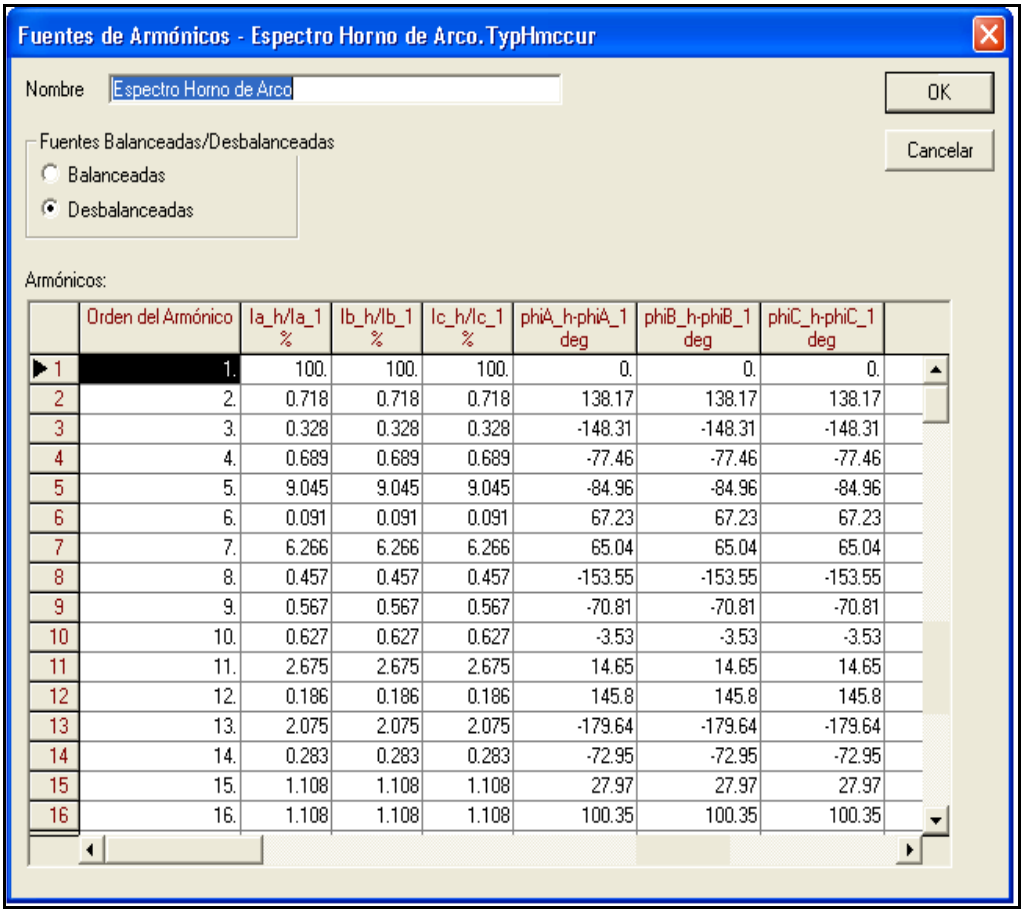


Figura 4.31 Ingreso del Espectro Armónico de la Corriente del Horno de Arco

La fuente de armónicos puede alimentar al sistema como armónicos de voltaje o armónicos de corriente, esto depende exclusivamente del elemento al que el tipo de espectro se está asociando. La carga general que se está utilizando como fuente de armónicos requiere un espectro de corrientes, razón por la cual se utiliza el espectro de frecuencias de la corriente del horno de arco.

En la figura 4.32 se presenta el espectro armónico de las corrientes del horno de arco ingresado en la fuente de armónicos de Power Factory.

La magnitud de los armónicos es el mismo para las tres fases debido a que son corrientes simétricas, el valor del ángulo de los armónicos que forman a corriente de la fase A se ingresa en las tres fases debido a que Power Factory internamente realiza el defasamiento de 120 grados entre las fases.



	Orden del Armónico	Ia_h/Ia_1 %	Ib_h/Ib_1 %	Ic_h/Ic_1 %	phiA_h-phiA_1 deg	phiB_h-phiB_1 deg	phiC_h-phiC_1 deg
▶ 1	1.	100.	100.	100.	0.	0.	0.
2	2.	0.718	0.718	0.718	138.17	138.17	138.17
3	3.	0.328	0.328	0.328	-148.31	-148.31	-148.31
4	4.	0.689	0.689	0.689	-77.46	-77.46	-77.46
5	5.	9.045	9.045	9.045	-84.96	-84.96	-84.96
6	6.	0.091	0.091	0.091	67.23	67.23	67.23
7	7.	6.266	6.266	6.266	65.04	65.04	65.04
8	8.	0.457	0.457	0.457	-153.55	-153.55	-153.55
9	9.	0.567	0.567	0.567	-70.81	-70.81	-70.81
10	10.	0.627	0.627	0.627	-3.53	-3.53	-3.53
11	11.	2.675	2.675	2.675	14.65	14.65	14.65
12	12.	0.186	0.186	0.186	145.8	145.8	145.8
13	13.	2.075	2.075	2.075	-179.64	-179.64	-179.64
14	14.	0.283	0.283	0.283	-72.95	-72.95	-72.95
15	15.	1.108	1.108	1.108	27.97	27.97	27.97
16	16.	1.108	1.108	1.108	100.35	100.35	100.35

Figura 4.32 Espectro de Frecuencias de las Corriente del Horno de Arco (Magnitud y Ángulo)

Luego de ingresar el espectro armónico en la fuente de armónicos se ejecuta el Flujo de Carga Armónico en Power Factory, para determinar los índices de distorsión armónica en el PCC.

Los índices de distorsión armónica individual del voltaje (V_{HD}) de cada fase en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC) calculados en el Flujo de Carga Armónico se presentan en un diagrama de barras en la figura 4.33.

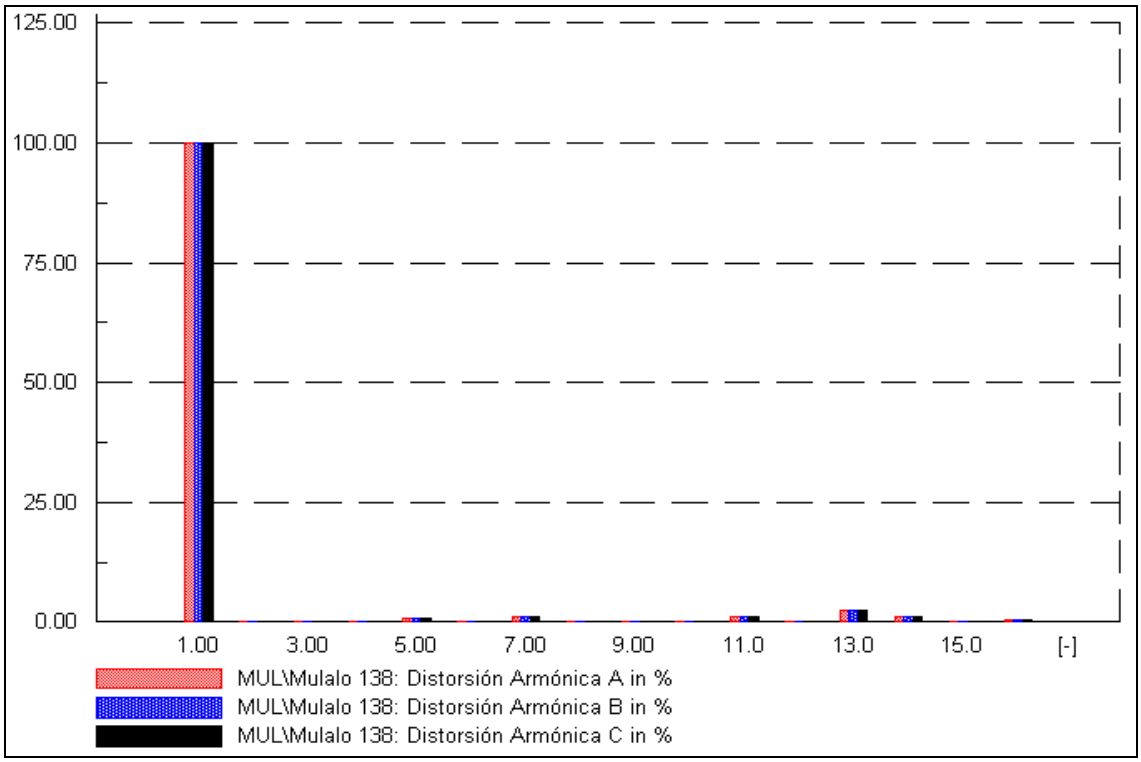


Figura 4.33 Distorsión Armónica de Voltaje de las Fases A, B y C en el PCC

En la tabla 4.5 se resume el valor de V_{HD} para cada una de las fases en el PCC.

Tabla 4.5 Distorsión Armónica de Voltaje de las Fases A, B y C en el PCC

h	*VHD_A [%]*	*VHD_B [%]*	*VHD_C [%]*
1,00	100,000	100,000	100,000
2,00	0,039	0,039	0,039
3,00	0,000	0,000	0,000
4,00	0,076	0,076	0,076
5,00	0,093	0,093	0,093
6,00	0,000	0,000	0,000
7,00	1,189	1,189	1,189
8,00	0,098	0,098	0,098
9,00	0,000	0,000	0,000
10,00	0,208	0,208	0,208
11,00	1,296	1,296	1,296
12,00	0,000	0,000	0,000
13,00	2,529	2,529	2,529
14,00	1,059	1,059	1,059
15,00	0,000	0,000	0,000
16,00	0,568	0,568	0,568

Los valores de V_{THD} en el PCC se presentan en la figura 4.34, estos se despliegan en la caja de resultados del diagrama unifilar.

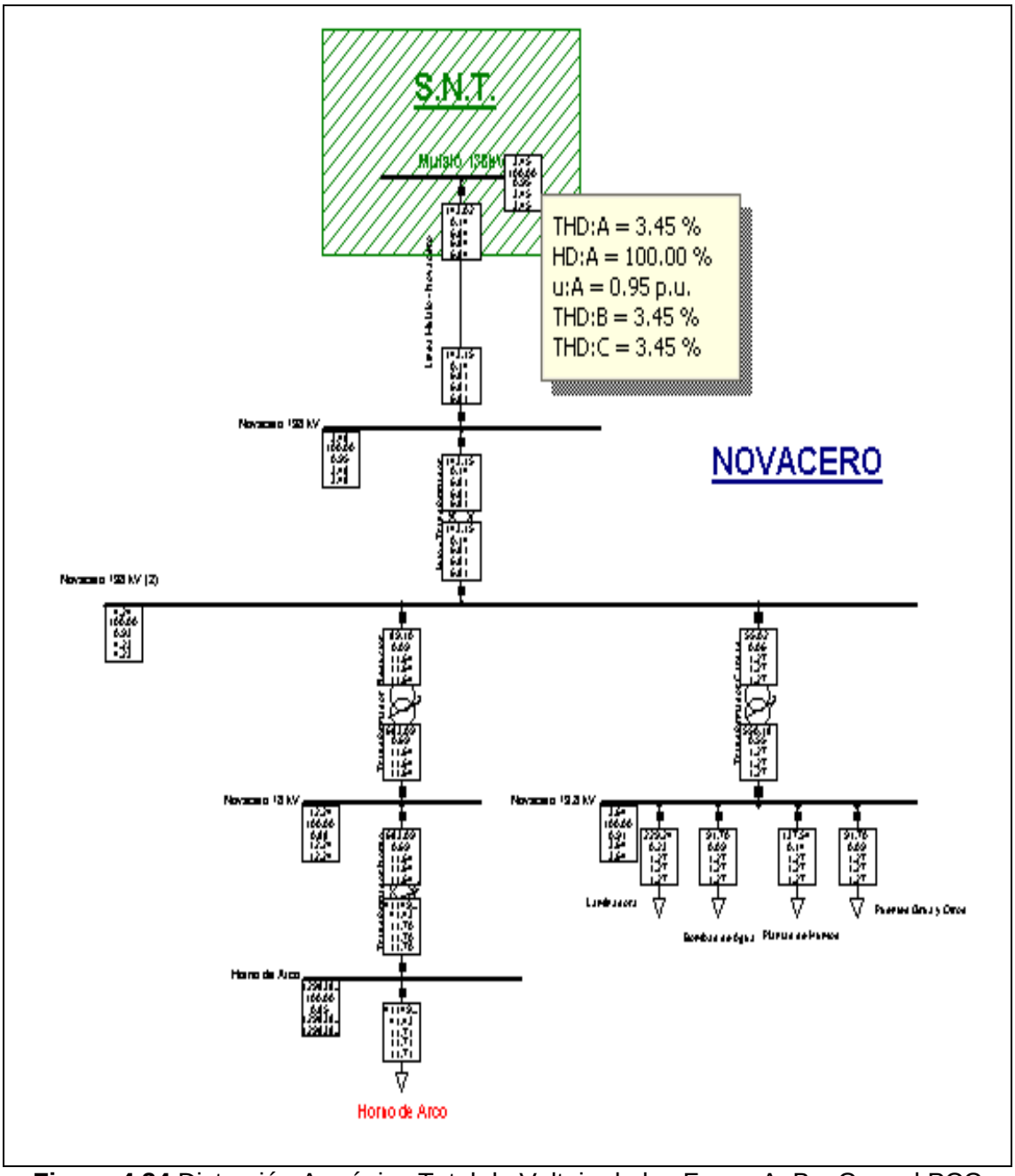


Figura 4.34 Distorsión Armónica Total de Voltaje de las Fases A, B y C en el PCC

En la tabla 4.6 se resume el valor de la distorsión armónica total de voltaje de cada fase en el PCC.

Tabla 4.6 Distorsión Armónica Total de Voltaje de las Fases A, B y C en el PCC

VTHD_A [%]	*VTHD_B [%]*	*VTHD_C [%]*
3,45	3,45	3,45

Los índices de distorsión armónica individual del corriente (I_{HD}) de cada fase en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC) calculados en el Flujo de Carga Armónico se presentan en un diagrama de barras en la figura 4.35.

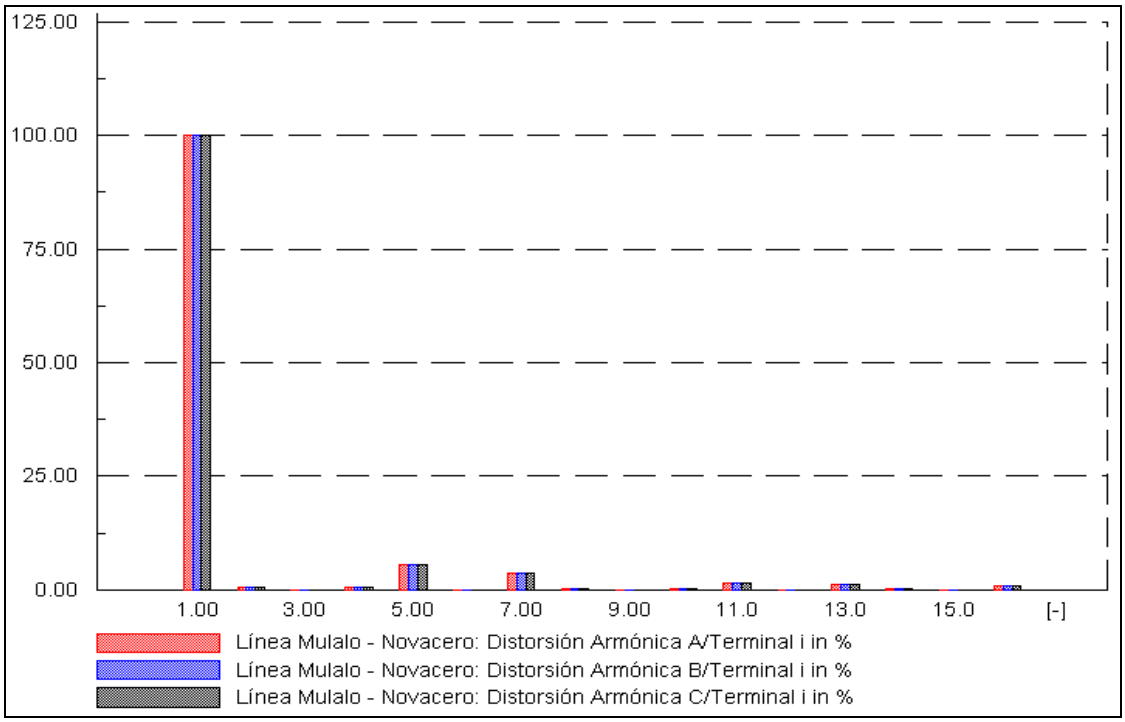


Figura 4.35 Distorsión Armónica de Corriente de las Fases A, B y C en el PCC

En la tabla 4.7 se resume el valor de I_{HD} para cada una de las fases en el PCC.

Tabla 4.7 Distorsión Armónica de Corriente de las Fases A, B y C en el PCC

h	*IHD_A [%]*	*IHD_B [%]*	*IHD_C [%]*
1,00	100,000	100,000	100,000
2,00	0,433	0,433	0,433
3,00	0,000	0,000	0,000
4,00	0,405	0,405	0,405
5,00	5,349	5,349	5,349
6,00	0,000	0,000	0,000
7,00	3,663	3,663	3,663
8,00	0,268	0,268	0,268
9,00	0,000	0,000	0,000
10,00	0,364	0,364	0,364
11,00	1,533	1,533	1,533
12,00	0,000	0,000	0,000
13,00	1,160	1,160	1,160
14,00	0,161	0,161	0,161
15,00	0,000	0,000	0,000
16,00	0,691	0,691	0,691

Los valores de I_{THD} en el PCC se presentan en la figura 4.36, estos se despliegan en la caja de resultados del diagrama unifilar.

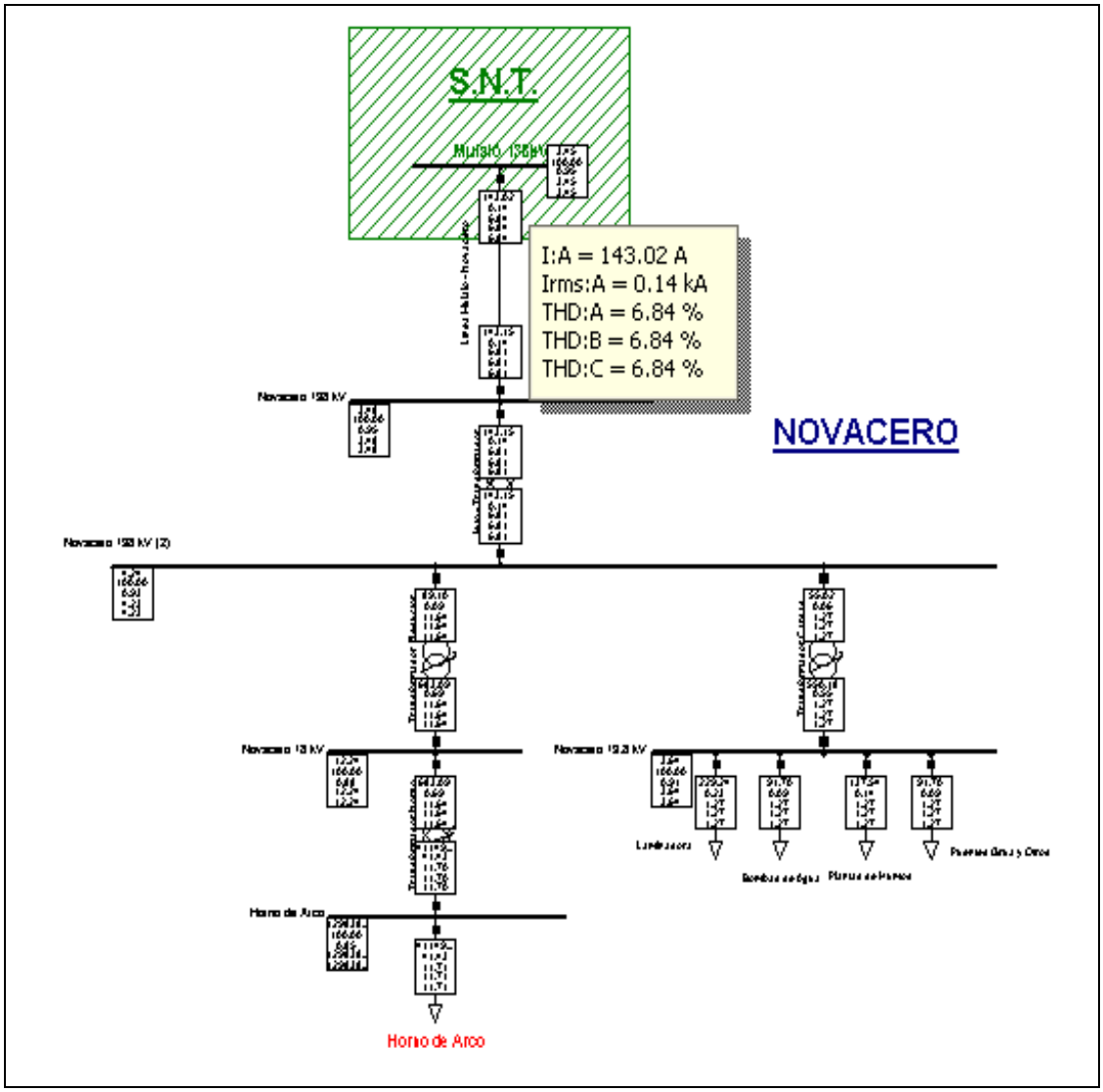


Figura 4.36 Distorsión Armónica Total de Corriente de las Fases A, B y C en PCC

En la tabla 4.8 se resume el valor de la distorsión armónica total de corriente de cada fase en el PCC.

Tabla 4.8 Distorsión Armónica Total de Corriente de las Fases A, B y C en el PCC

ITHD_A [%]	*ITHD_B [%]*	*ITHD_C [%]*
6,84	6,84	6,84

4.3 COMPARACIÓN DE ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA CON LÍMITES ESTABLECIDOS EN NORMAS

Para determinar si los índices de distorsión armónica calculados en el PCC se enmarcan dentro de las normas, se comparan con los límites establecidos en la norma IEEE 519 y en la Regulación CONELEC 003/08.

Con el propósito de entender y aplicar los límites establecidos en las normas a continuación se realiza un breve análisis de la norma IEEE 519, en la cual se basa la Regulación CONELEC 003/08.

4.3.1 NORMA IEEE 519

Las normas difieren en ocasiones ampliamente de un país a otro respecto a los valores de la distorsión armónica individual y total, del sitio de aplicación de los límites de distorsión armónica, de los parámetros eléctricos (voltaje o corriente), de la variación en el tiempo de la distorsión, de la responsabilidad y acción para corrección de los límites, etc. Ante la ausencia de una única norma o recomendación internacional acerca de la limitación de armónicos se estableció la recomendación práctica IEEE-519 [1].

La norma indica que las mediciones y análisis de la distorsión armónica se deben realizar en el punto donde el usuario se conecta con el sistema eléctrico, en el cual es factible conectar a otros usuarios, a este punto lo define como Punto Común de Conexión. Según lo anterior el análisis de armónicos para la norma no es de cada carga individual sino del sistema de potencia, no considera los armónicos producidos por cargas individuales dentro de una instalación y se orienta a la interface entre la empresa y el usuario, esta concebida especialmente para clientes industriales y no considera pequeñas cargas productoras de armónicos.

4.3.1.1 Límites Permitidos

Los límites permitidos por la norma dependen del nivel de voltaje al cual está conectado el usuario, del tamaño relativo de la carga respecto al sistema, y del orden de los armónicos.

Los niveles permitidos de inyección de corrientes armónicas dependen de la relación entre la corriente de cortocircuito en el PCC y la corriente a frecuencia fundamental de la carga del usuario en el PCC (ecuación 4.15).

$$SCR = \frac{Isc}{I_L} \qquad \textbf{(4.15)}$$

donde:

I_{sc} = Corriente de cortocircuito en el PCC.

I_L = Corriente a frecuencia fundamental de la carga del usuario en el PCC.

I_L se calcula de acuerdo a la norma IEEE 519 como el promedio de las máximas demandas mensuales durante un año, mientras que la Regulación CONELEC 003/08 calcula el valor de I_L como el promedio de las máximas demandas en el mes.

Para aplicar la norma IEEE 519 en la etapa de diseño se calcula el valor de I_L como el valor de la corriente a plena carga de la carga no lineal debido a que la máxima contribución de la carga no lineal a la distorsión armónica se produce cuando está funcionando a plena carga.

4.3.1.1.1 Límites del Contenido Armónico de Voltaje

Se determinan en base a los índices de contenido armónico individual (HD) y total (VTHD) en barras de los sistemas de transmisión que tengan puntos de conexión.

Para efectos de la Regulación CONELEC 003/08 se consideran las armónicas comprendidas entre la 2°Y 40°, incluyendo las mism as [36].

El contenido armónico individual máximo en porcentaje, es respecto al voltaje nominal de operación Vn de la barra.

Tabla 4.9 Límites para Contenido Armónico de Voltaje [36,37]

Voltaje de Barras [kV]	**Contenido Armónico Individual Máximo VHD [%]**	**VTHD Máximo [%]**
Vn≤69 kV	3,00	5,00
69 kV≤Vn≤161kV	1,50	2,50
Vn >161 kV	1,00	1,50

Para determinar que límites de la norma se deben aplicar se debe definir el valor del voltaje nominal (Vn) en el PCC, en este caso es de 138 kV. De la tabla 4.9 los límites que se deben aplicar corresponden al intervalo de voltajes de Vn, 69kV≤Vn≤161kV resumidos en la tabla 4.10.

Tabla 4.10 Límites Aplicables para Contenido Armónico de Voltaje

Voltaje de Barras [kV]	**Contenido Armónico Individual Máximo VHD [%]**	**VTHD Máximo [%]**
69 kV≤Vn≤161kV	1,50	2,50

Power Factory permite comparar gráficamente los índices de armónicos calculados en el Flujo de Carga Armónico con los límites aplicables de la norma, en la ventana de diálogo del instrumento virtual Harmonic Distortions (figura 4.37) se escoge los límites de distorsión armónica individual de voltaje (VHD) de la norma IEEE 519 que se utilizaran para la comparación.

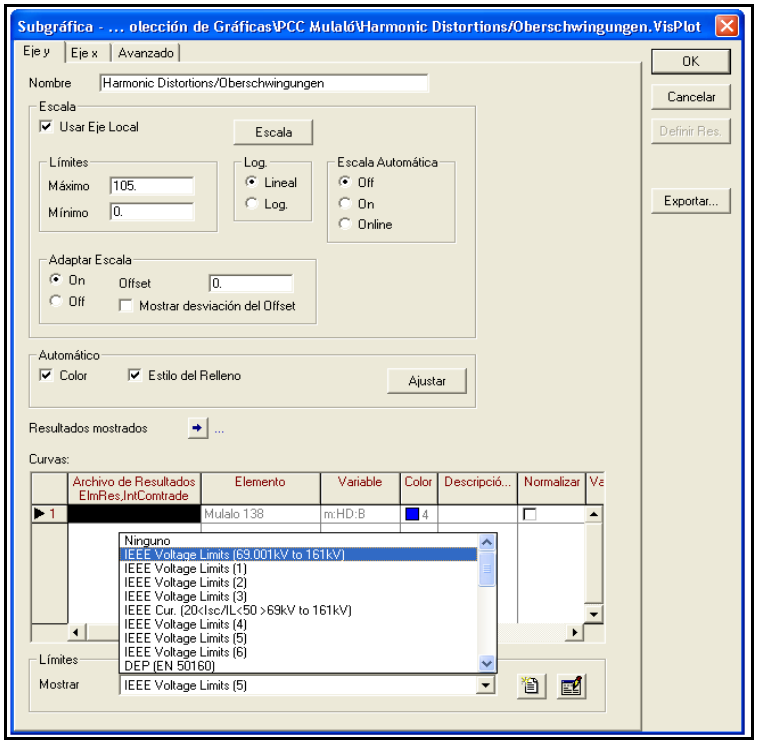


Figura 4.37 Determinación de Límites de Distorsión Armónica de Voltaje de la Norma en Power Factory

La comparación gráfica entre los índices de VHD calculados en el Flujo de Carga Armónico y los límites aplicables de la norma IEEE 519 que se presenta en la figura 4.38 permite visualizar que el valor de VHD que excede el límite de la norma es causado por el armónico de orden 13.

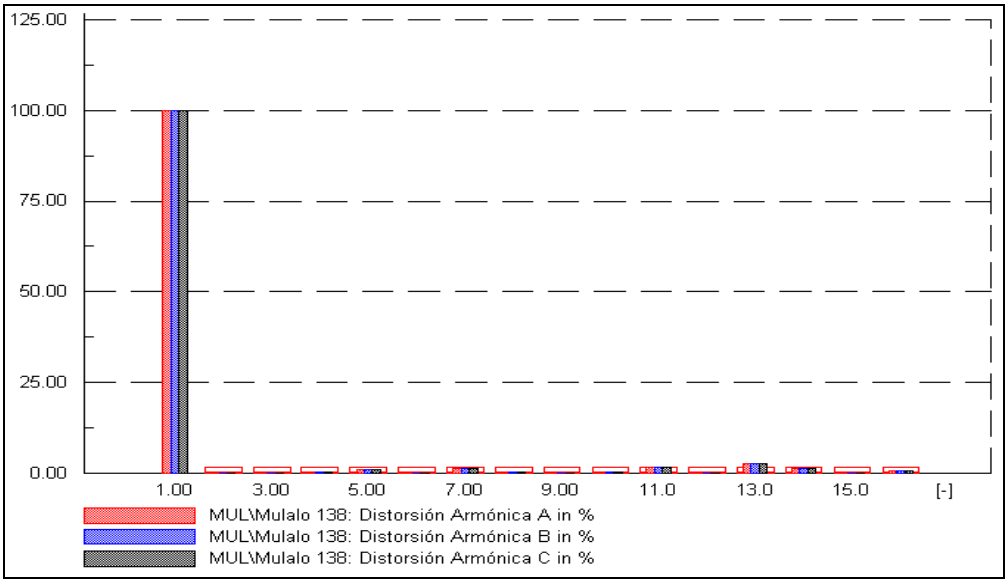


Figura 4.38 Comparación Gráfica entre los Valores de VHD Calculados con los Límites de Distorsión Armónica de Voltaje de la Norma IEEE 519

En la tabla 4.11 se resume los valores de VHD calculados en el Flujo de Carca Armónico junto al valor máximo de VHD establecido por la norma, los valores de VHD que exceden el valor establecido por la norma están marcados en color azul. El valor de VHD del décimo tercer armónico es el único valor que sobrepasa el valor establecido en la norma en 1,029.

Tabla 4.11 Comparación entre los Valores de VHD Calculados con los Límites de Distorsión Armónica de Voltaje de la Norma IEEE 519

h	*VHD [%]*	*VHD MÁXIMO [%]*	*VHD EXCEDIDO [%]*
2,00	0,039	1,50	-1,461
3,00	0,000	1,50	-1,500
4,00	0,076	1,50	-1,424
5,00	0,093	1,50	-1,407
6,00	0,000	1,50	-1,500
7,00	1,189	1,50	-0,311
8,00	0,098	1,50	-1,402
9,00	0,000	1,50	-1,500
10,00	0,208	1,50	-1,292
11,00	1,296	1,50	-0,204
12,00	0,000	1,50	-1,500
13,00	2,529	1,50	1,029
14,00	1,059	1,50	-0,441
15,00	0,000	1,50	-1,500
16,00	0,568	1,50	-0,932

En la tabla 4.12 se compara el valor de distorsión armónica total VTHD calculado en el Flujo de Carga Armónico con el valor establecido en la norma IEEE 519, se observa que la distorsión armónica total de voltaje en el PCC sobrepasa el valor establecido en la norma en 0,95.

Tabla 4.12 Comparación entre los Valores de VTHD Calculados con los Límites de Distorsión Armónica Total de Voltaje de la Norma IEEE 519

VTHD [%]	*VTHD MÁXIMO [%]*	*VTHD EXCEDIDO [%]*
3,45	2,50	0,95

4.3.1.1.2 Límites del Contenido Armónico de Corriente

Se determinan en base de los índices del contenido armónico individual (HD) en la onda de corriente y del valor del TDD (Factor de Distorsión Total de la Demanda)

de la carga conectada por los Agentes en los puntos de conexión. Para efectos de la Regulación CONELEC 003/08, se consideran las armónicas comprendidas entre la 2°Y la 30°, incluyendo las mismas [36].

Tabla 4.13 Límites para Contenido Armónico de Corrientes [36,37]

I_{SC}/I_L	Orden del Armónico					TDD
	h<11	11≤h<1	17≤h<2	23≤h<3	35≤h	
120 V<Vn<69 kV						
< 20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20 – 50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50 – 100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100 – 1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
>1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00
69kV <Vn≤161kV						
< 20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20 – 50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50 – 100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100 – 1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
>1000	7,50	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00
Vn>161kV						
<50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
≥50	3,0	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

Donde h es el orden de la armónica y los límites de contenido armónico de corriente Ih, están expresados en porcentaje de la corriente I_L.

Los límites de las componentes armónicas individuales de corriente Ih indicados en la tabla 4.13 se aplican sólo para las componentes impares mientras que para las componentes armónicas pares los límites son el 25 % de los valores indicados en la tabla 4.13.

El valor de TDD se calcula con la ecuación 4.16.

$$TDD = ITHD \cdot \frac{CMD}{CNC} \qquad \textbf{(4.16)}$$

donde:

$ITHD$ = Distorsión Armónica Total de Corriente.

CMD = Corriente (I_L) promedio de las máximas demandas registradas en el mes.

CNC = Corriente nominal del circuito en el punto de conexión.

Para calcular el valor de TDD en la etapa de diseño, etapa en la que no se dispone de mediciones, se considera que el valor de CMD es igual al valor de CNC, resultado de lo cual TDD es igual a ITHD.

Para determinar que límites de la norma IEEE 519 se deben aplicar se define el voltaje nominal del PCC, que en este caso corresponde al valor de 138 kV, y el valor de SCR que se calcula a continuación.

El valor de I_L se calcula como la corriente a plena carga del horno de arco de Novacero S.A a nivel de 138 kV.

$$I_L = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot V_N}$$

$$I_L = \frac{18MVA}{\sqrt{3} \cdot 138kV}$$

$$I_L = 0{,}0753A$$

La corriente de cortocircuito I_{SC} del SNT en el PCC es 3,10 kA (anexo 9).

$$SCR = I_{SC} / I_L$$

$$SCR = 3{,}10kA / 0{,}0753kA$$

$$SCR = 41$$

Para valores de $V_n = 138kV$ y $SCR = 41$ se aplica los límites de contenido armónico de corriente resumidos en la tabla 4.14.

Tabla 4.14 Límites Aplicables para el Contenido Armónico de Corriente

= SC L	Orden del Armónico					TDD
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	
69kV <Vn≤161kV						
20 – 50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00

Power Factory permite comparar gráficamente los índices de armónicos de corriente calculados en el Flujo de Carga Armónico con los límites aplicables de la norma. En la ventana de diálogo del instrumento virtual Harmonic Distortions (figura 4.39) se escoge los límites de distorsión armónica individual de corriente (IHD) de la norma IEEE 519.

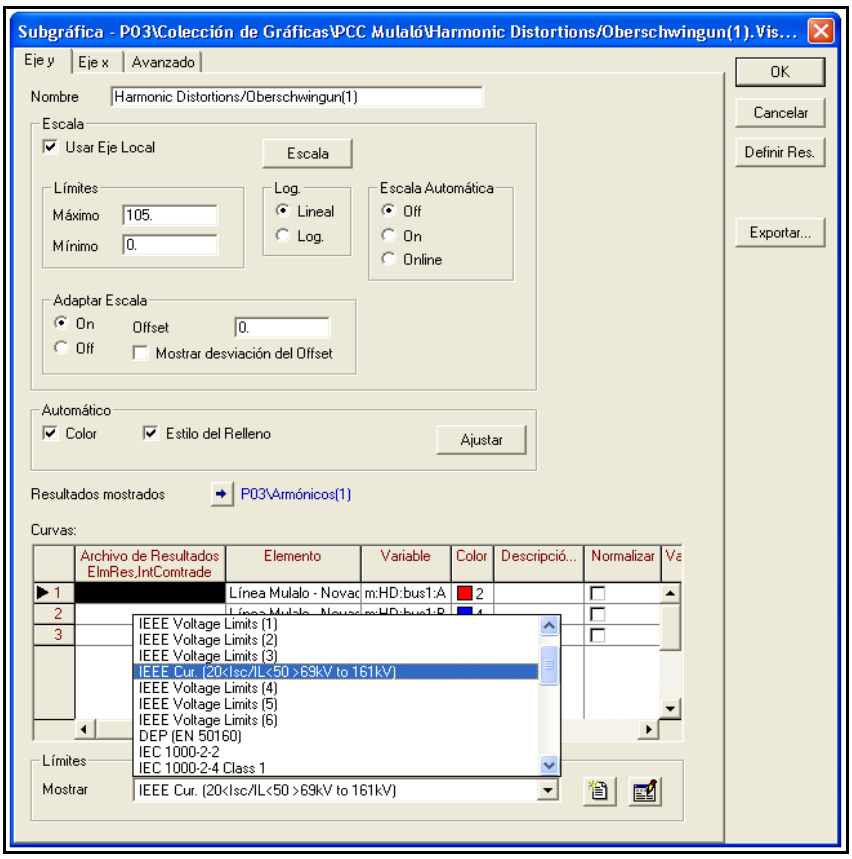


Figura 4.39 Determinación de Límites de Distorsión Armónica de Corriente de la Norma en Power Factory

La comparación gráfica entre los índices de IHD calculados en el Flujo de Carga Armónico con los límites aplicables de la norma IEEE 519 que se presenta en la figura 4.40 permite visualizar que los valores de IHD que exceden los límites de la norma son causados por los armónicos de orden 5, 7 y 16.

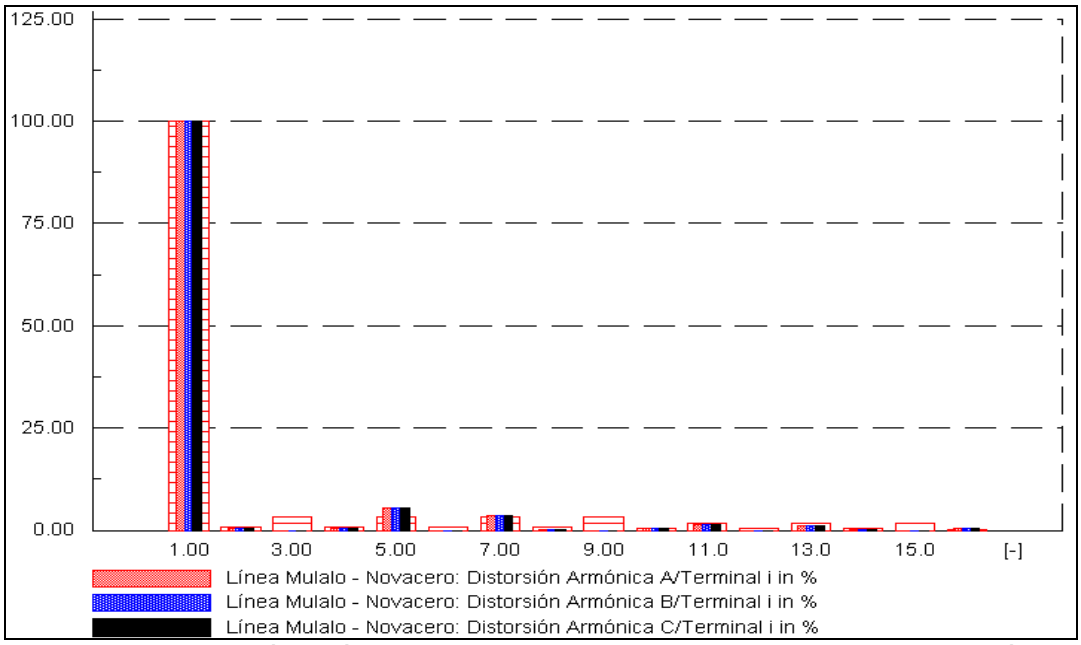


Figura 4.40 Comparación Gráfica entre los Valores de IHD Calculados con los Límites de Distorsión Armónica de Corriente de la Norma IEEE 519

En la tabla 4.15 se resume los valores de IHD calculados en el Flujo de Carga Armónico junto al valor máximo de IHD establecido por la norma.

Tabla 4.15 Comparación entre los Valores de IHD Calculados con los Límites de Distorsión Armónica de Corriente de la Norma IEEE 519

h	*IHD [%]*	*IHD MÁXIMO [%]*	*IHD EXCEDIDO [%]*
2,00	0,433	0,875	-0,442
3,00	0,000	3,500	-3,500
4,00	0,405	0,875	-0,470
5,00	5,349	3,500	1,849
6,00	0,000	0,875	-0,875
7,00	3,663	3,500	0,163
8,00	0,268	0,875	-0,607
9,00	0,000	3,500	-3,500
10,00	0,363	0,875	-0,512
11,00	1,533	1,750	-0,217
12,00	0,000	0,438	-0,438
13,00	1,160	1,750	-0,590
14,00	0,161	0,438	-0,277
15,00	0,000	1,750	-1,750
16,00	0,691	0,438	0,254

Los valores de IHD que exceden el valor establecido por la norma están marcados en color azul. El valor de IHD de la quinta, séptima y décimo sexta armónica sobrepasan los valores establecidos en la norma en 1,849, 0,163 y 0,264 respectivamente.

En la tabla 4.16 se compara el valor de distorsión armónica total de corriente ITHD calculado en el Flujo de Carga Armónico con el valor establecido en la norma IEEE 519, se observa que la distorsión armónica total de corriente en el PCC sobrepasa el valor establecido en la norma en 2.84.

Tabla 4.16 Comparación entre los Valores de ITHD Calculados con los Límites de ITHD de la Norma IEEE 519

ITHD [%]	*ITHD MÁXIMO [%]*	*ITHD EXCEDIDO [%]*
6,84	4,00	2,84

4.4 SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL HORNO DE ARCO EN ESTADO DINÁMICO

Utilizando el módulo de estabilidad de Power Factory se realiza simulaciones del comportamiento del horno de arco que permiten visualizar las formas de onda de voltaje y corriente del horno de arco, así como los voltajes y corrientes presentes en la red de Novacero S.A. y en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló. (PCC).

4.4.1 VOLTAJES DEL HORNO DE ARCO

Los voltajes por fase del horno de arco presentados en la figuras 4.41, 4.42 y 4.43 permiten visualizar la forma característica del voltaje del horno de arco, descrita en el capítulo 2, ondas semejantes a ondas cuadradas que cambian su valor en función de la variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico, generando fluctuaciones aleatorias del voltaje.

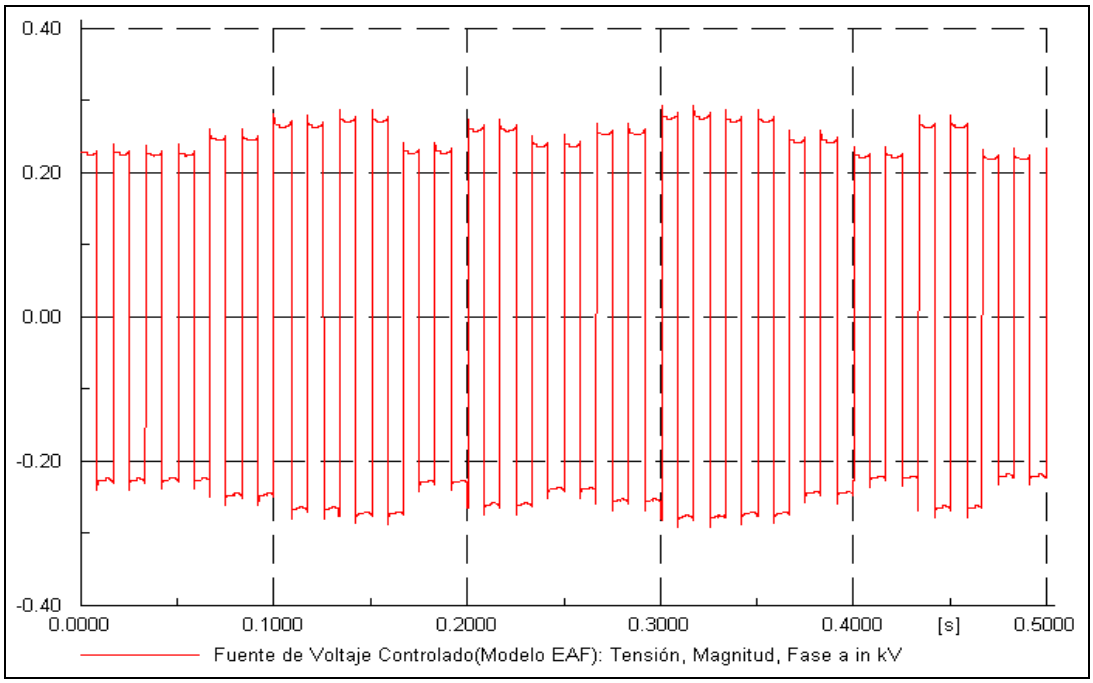


Figura 4.41 Voltaje del Horno de Arco de la Fase A

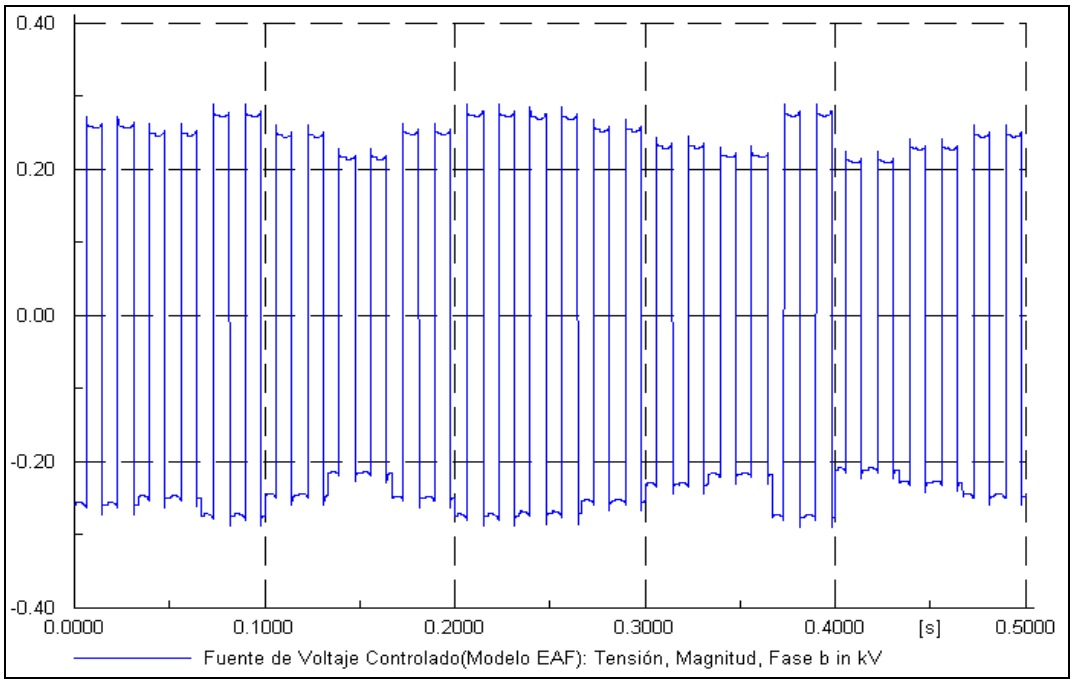


Figura 4.42 Voltaje del Horno de Arco de la Fase B

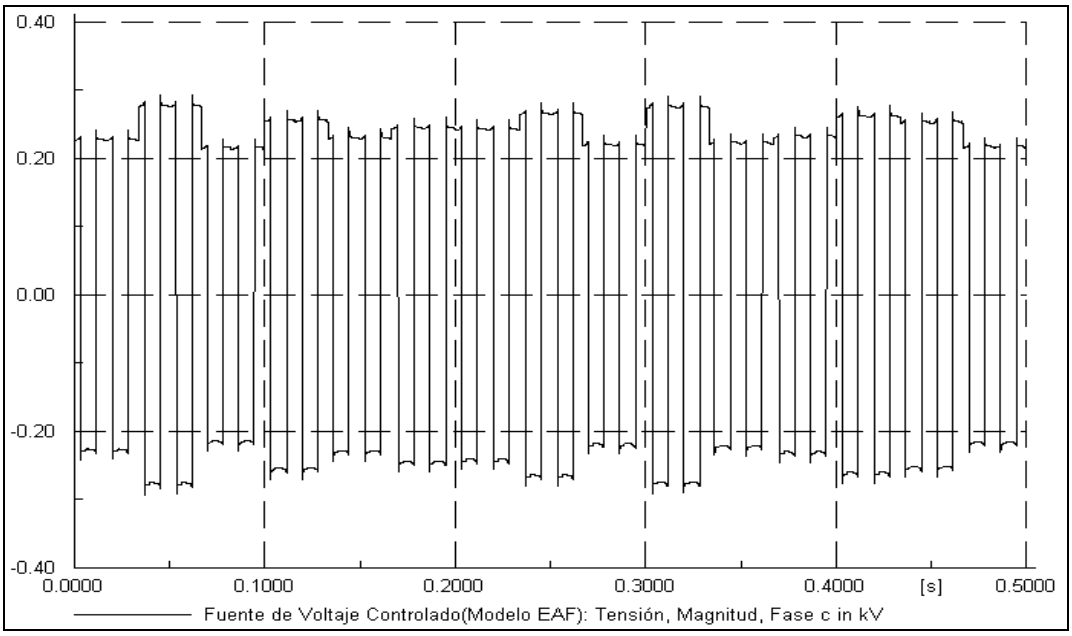


Figura 4.43 Voltaje del Horno de Arco de la Fase C

La figura 4.44 muestra el desbalance de voltaje característico en los hornos de arco, que se produce por la variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico de cada fase, la longitud del arco eléctrico de cada fase es distinta en cada instante de tiempo debido a la forma y tipo del material que se está fundiendo.

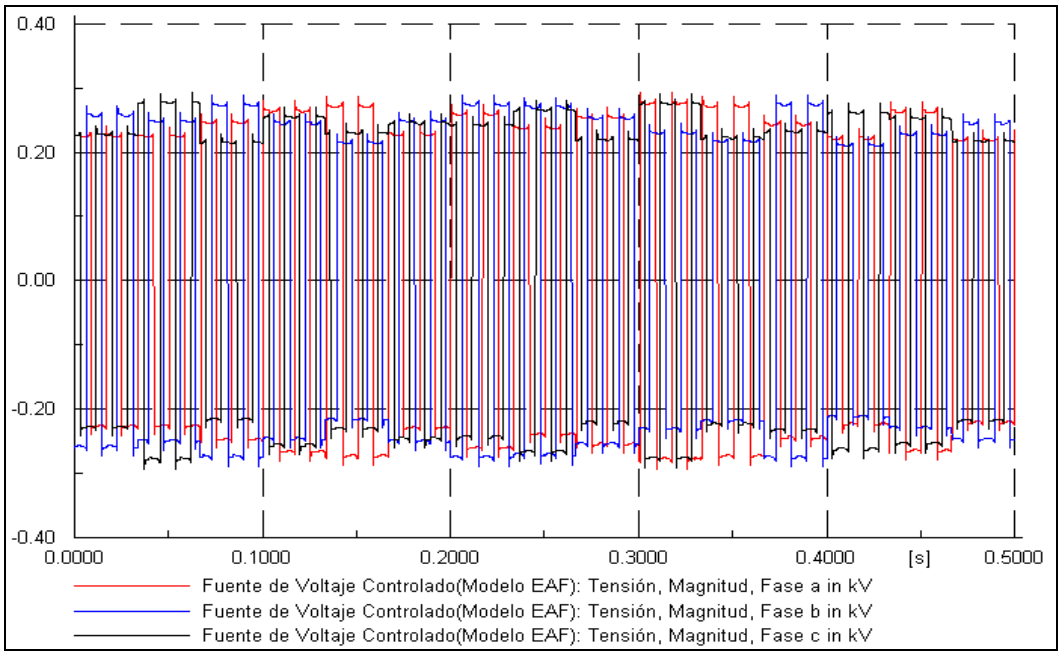


Figura 4.44 Voltaje del Horno de Arco de las Fases A, B y C

4.4.2 CORRIENTES DEL HORNO DE ARCO

Las corrientes por fase que se presentan en las figuras 4.45, 4.46, 4.47 permiten apreciar que su fluctuación no se produce en la misma proporción que el voltaje debido a la relación no lineal entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico, y conservan una forma de onda cuasi sinusoidal con un valor pico que oscila alrededor de 60 kA.

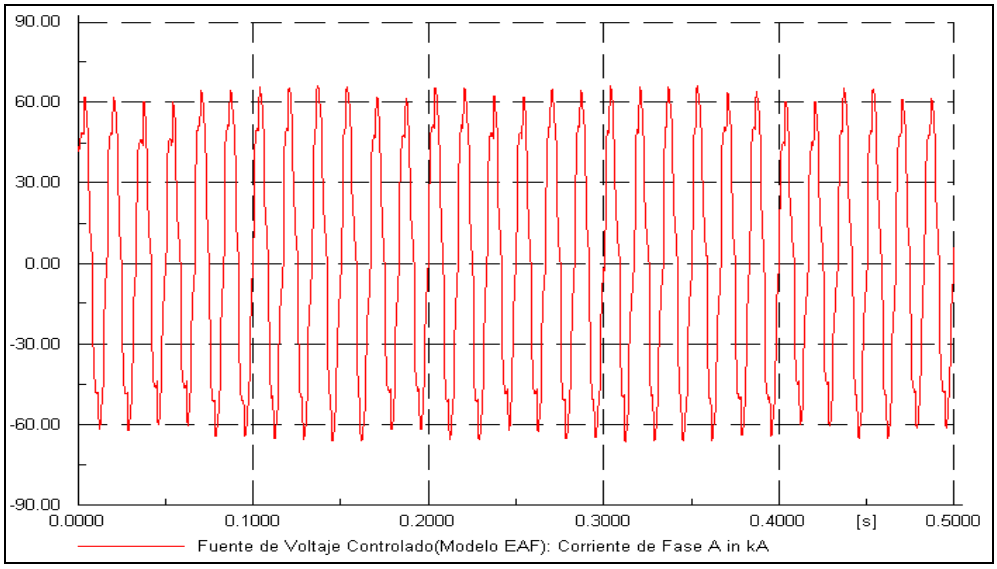


Figura 4.45 Corriente del Horno de Arco en la Fase A

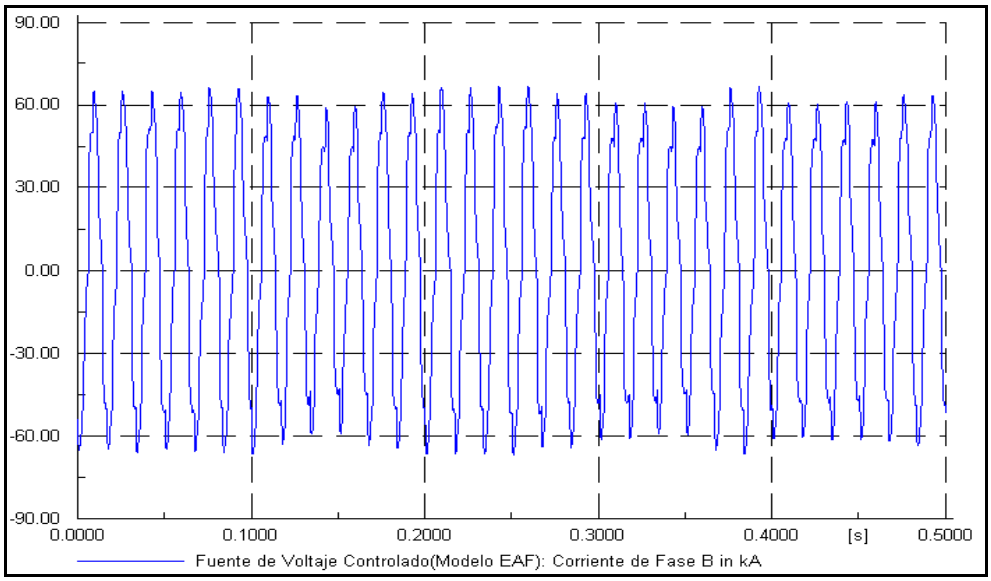


Figura 4.46 Corriente del Horno de Arco en la Fase

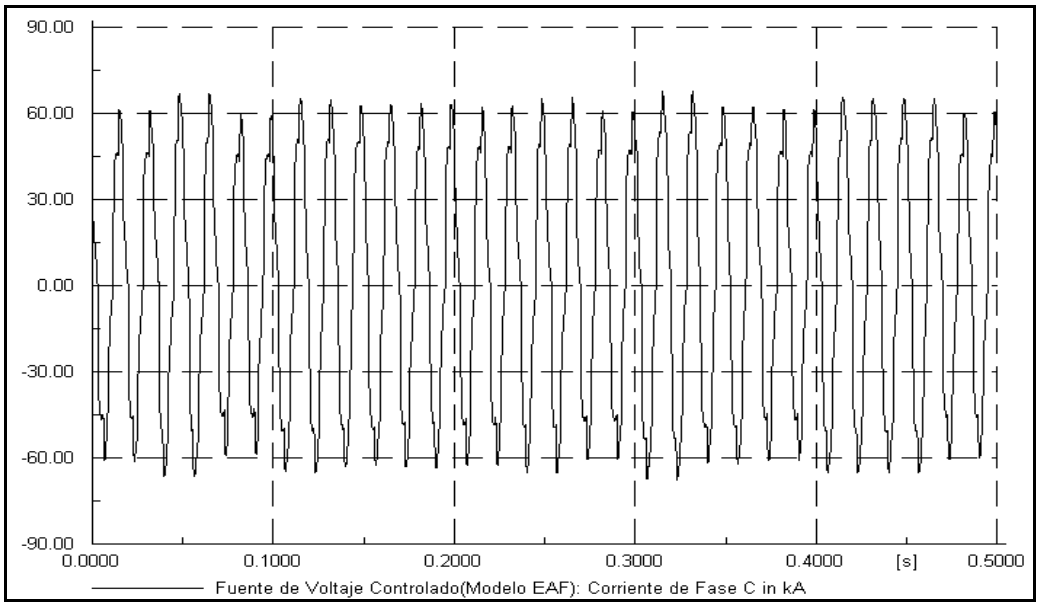


Figura 4.47 Corriente del Horno de Arco en la Fase C

La figura 4.48 muestra el desbalance de las corrientes del horno de arco de Novacero S.A., que se produce por el desbalance del voltaje pero en menor grado debido a la relación no lineal entre el voltaje y la corriente del arco eléctrico.

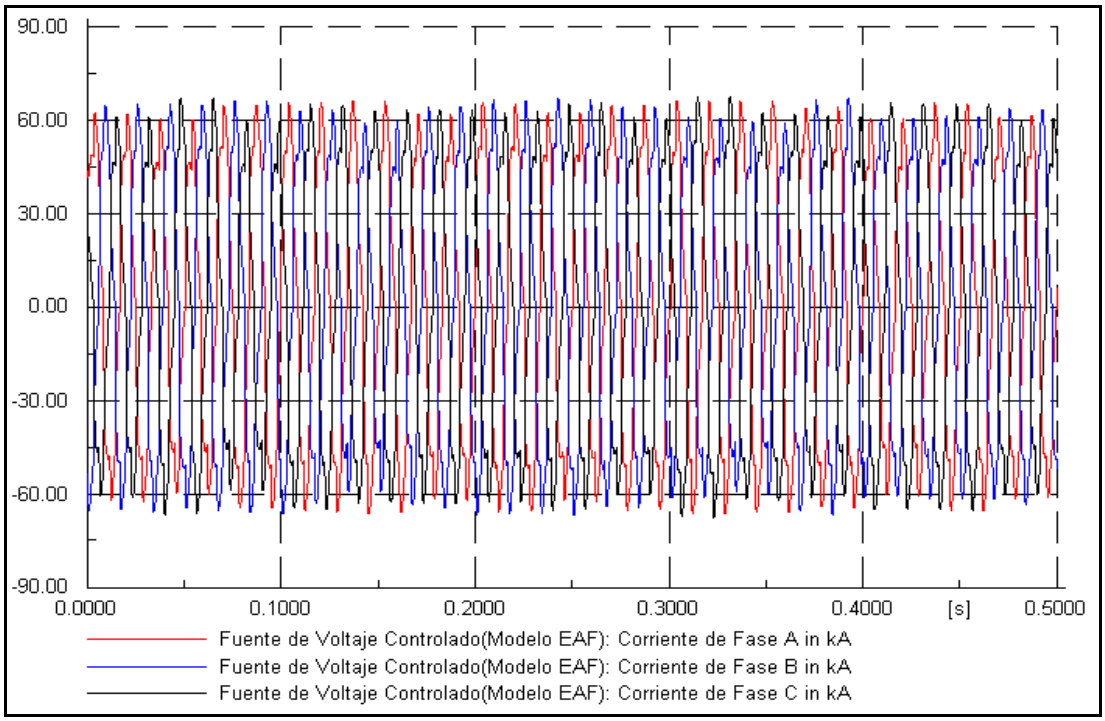


Figura 4.48 Corriente del Horno de Arco en las Fases A, B y C

4.4.3 VOLTAJES Y CORRIENTES EN LA RED DE NOVACERO S.A.

En los voltajes y corrientes en la red de Novacero S.A. se observan fluctuaciones que modulan las ondas de voltaje y corriente de la red. La incidencia de la conexión del horno de arco de Novacero S.A. al SNT se analiza en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC). La conexión del horno de arco de Novacero S.A. causa fluctuaciones de voltaje (figura 4.49) y corriente (figura 4.50).

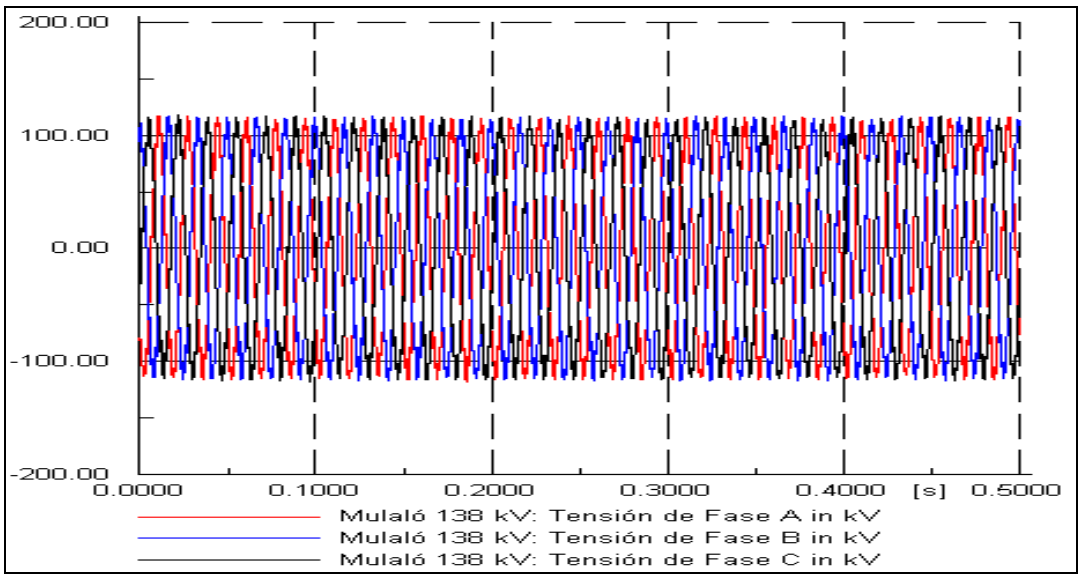


Figura 4.49 Voltajes en la Barra de 138 kV de la Subestación Mulaló (PCC)

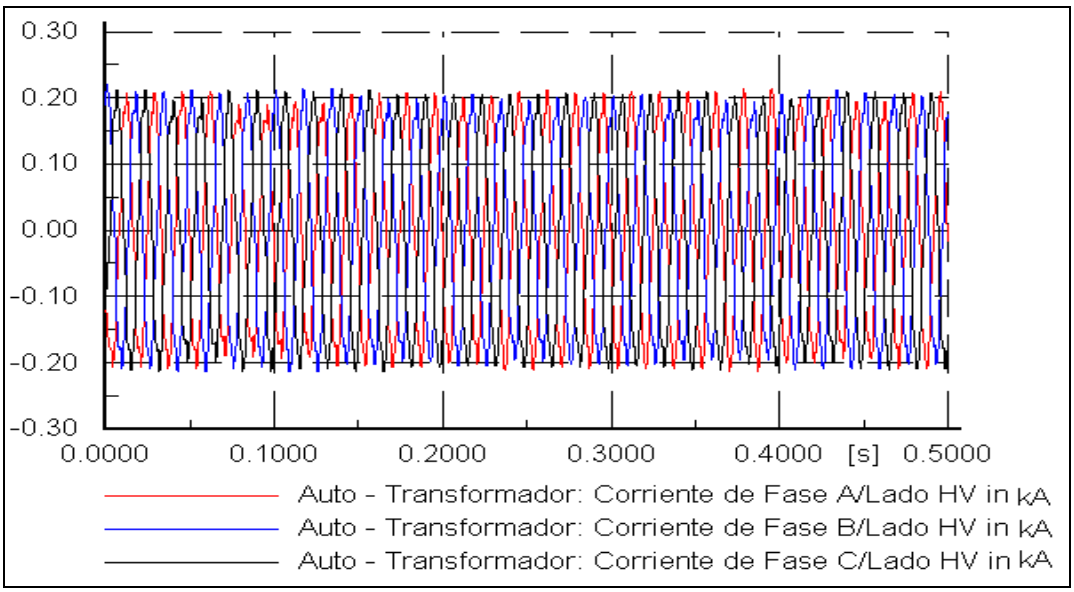


Figura 4.50 Corrientes en la Barra de 138 kV de la Subestación Mulaló (PCC)

4.5 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE FLICKER (Pst)

La evaluación del Pst, se realiza considerando las observaciones de Transelectric S.A. a la solicitud de acceso presentada por Novacero S.A. para su conexión en la subestación Mulaló de 138 kV (Anexo 4). La principal observación, plantea el requerimiento del cálculo de los niveles de flicker producidos por la operación del horno de arco para condiciones de potencia mínima de cortocircuito del SNT.

El Pst causado por la operación del horno de arco de Novacero en el PCC se calcula inicialmente con ayuda del Flickermeter especificado por la norma IEC 61000-4-15 e implementado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Texas. Los valores calculados por este primer método se compara con el valor obtenido aplicando el método de cálculo expuesto en la sección 1.4.2.4.2, que de acuerdo con la Norma Europea CENELEC EN 50160 es una buena estimación del valor de Pst.

4.5.1 DETERMINACIÓN DEL PST UTILIZANDO EL FLICKERMETER

4.5.1.1 El Flickermeter (Flickérmetro)

Las fluctuaciones de voltaje se pueden analizar con el aparato de medida Flickermeter de la Unión Internacional de Electrotermia (UIE). La norma IEC 61000-4-15 (antes IEC 868) describe las especificaciones funcionales de este aparato (figura 4.51) que son las siguientes:

- Adaptación del voltaje de entrada (bloque 1).
- Simulación de la respuesta lámpara–ojo–cerebro (bloques 2, 3 y 4).
- Análisis estadístico del nivel de flicker en línea, (bloque 5).

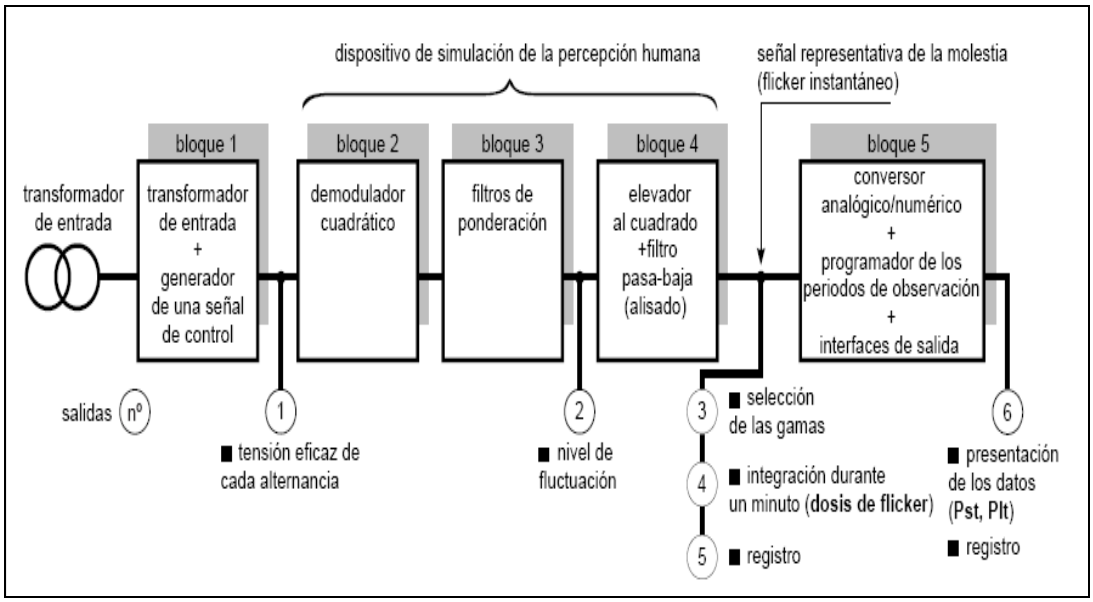


Figura 4.51 Diagrama Funcional del Flickérmetro (IEC 61000-4-15)

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Texas desarrolló una librería (Power Quality Analysis Tools figura 4.52) que contiene bloques utilizados para el análisis de la calidad de energía en Simulink (figura 4.53). El flickérmetro que forma parte de esta librería fue desarrollado siguiendo las especificaciones funcionales descritas en la norma IEC 61000-4-15.

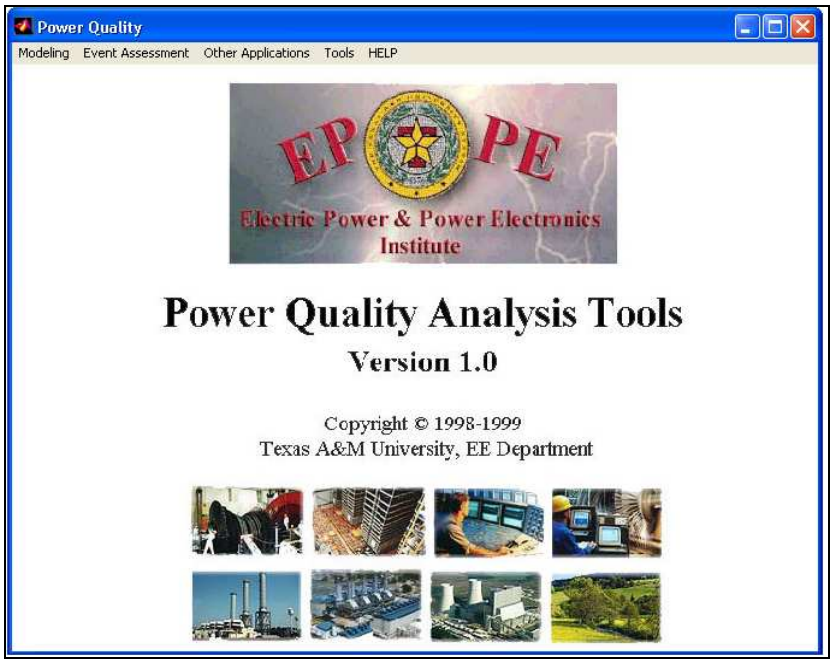


Figura 4.52 Ventana de Presentación de Power Quality Analysis Tools

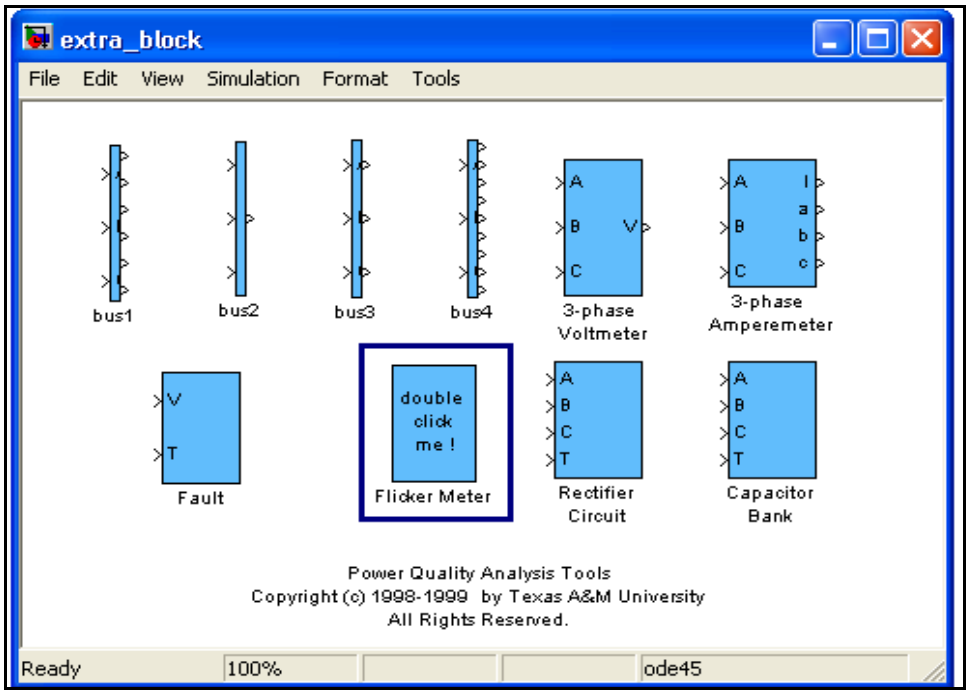


Figura 4.53 Librería Extra de Power Quality Analysis Tools

Para calcular el Pst utilizando el flickérmetro de Simulink se exporta a un archivo de texto las señales de voltaje del PCC obtenidas en las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado dinámico realizadas en Power Factory y al nombre del archivo de texto generado se le agrega la extensión .asc para que sea reconocido por Matlab. El archivo con extensión .asc contiene dos columnas, la primera es el valor del tiempo de simulación en cada instante y la segunda es el valor instantáneo del voltaje. Para trasladar los valores de tiempo y de voltaje del archivo con extensión .asc a Matlab se carga la columna del tiempo en la variable t, y la columna del voltaje en la variable v utilizando el comando load de Matlab.

Para utilizar las variables t y v en la ventana de Simulink se utiliza el bloque From Workspace (figura 4.54) el cual toma los valores de t y v almacenados en Matlab y los traslada a Simulink. El flickermeter requiere que el valor rms de la señal de voltaje (bloque RMS) sea almacenado en un archivo con extensión .mat (bloque To File 1).

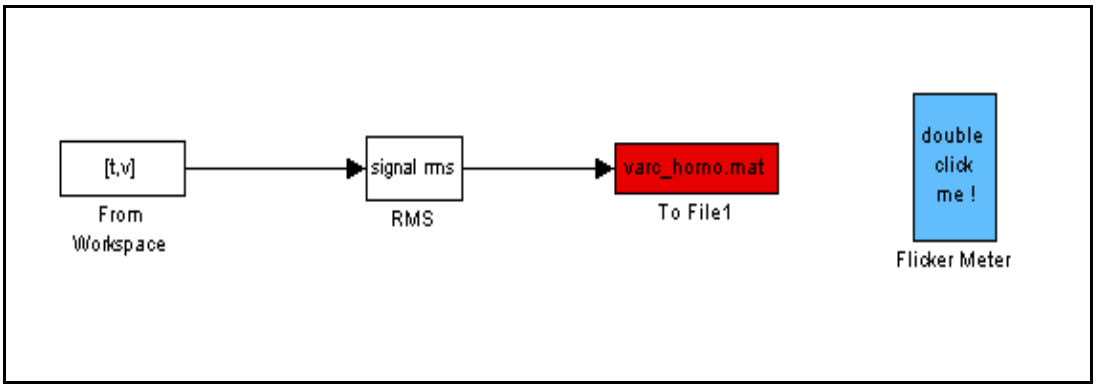


Figura 4.54 Utilización del Flickermeter en la Ventana de Simulink

El bloque del Flickermeter debe ser arrastrado desde la librería de Power Quality Analysis Tools (figura 4.53) hasta la ventana de Simulink (figura 4.54) para poder utilizarlo, para calcular el valor de Pst de la señal de voltaje almacenada en el archivo .mat se debe dar doble click sobre el bloque del flickermeter e ingresar el valor de la frecuencia de muestreo y el nombre del archivo con extensión .mat (figura 4.55).

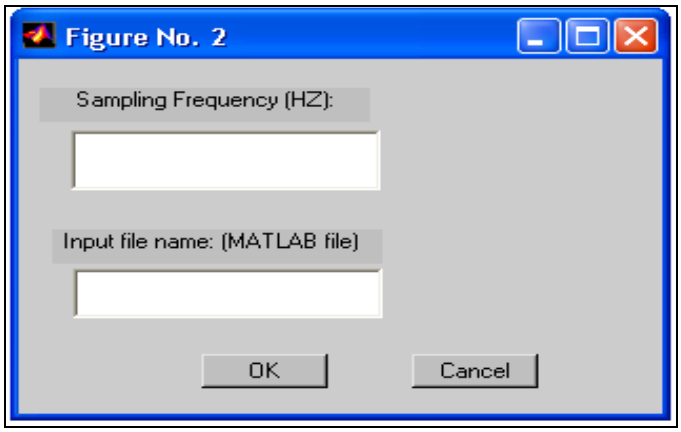


Figura 4.55 Ventana de Diálogo del Flickermeter

La frecuencia de muestreo es el número de muestras por segundo que se tomará de la señal para la evaluación del flicker, recomendándose en este caso el valor de 600 [Hz]. Para calcular el valor de Pst luego de ingresar los datos en la ventana de diálogo del Flickermeter (figura 4.55) se debe dar click en ok y el resultado de Pst se desplegará en la ventana de diálogo de Matlab (figura 4.56).

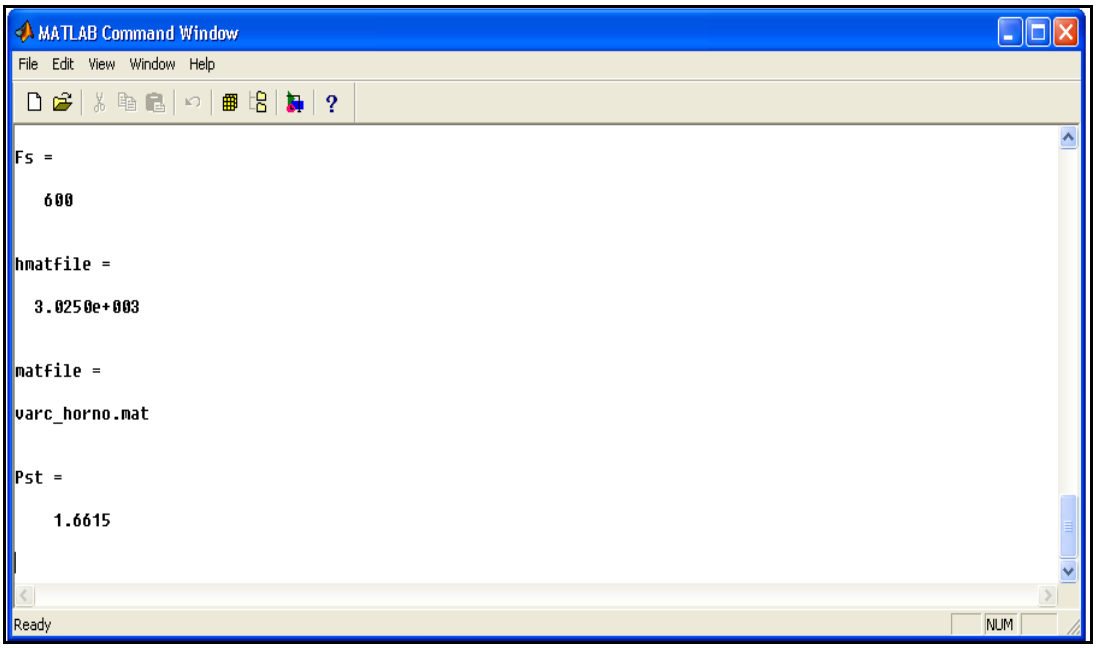


Figura 4.56 Valor de Pst Calculado en la Ventana de Diálogo de Matlab

Para agilizar el procedimiento de evaluación del flicker y disminuir el número de comandos que se deben ingresar se realizó un sólo archivo que contiene las líneas de comando del flickermeter junto a una interfaz gráfica (figura 4.57) que permite que el cálculo del Pst sea más dinámico.

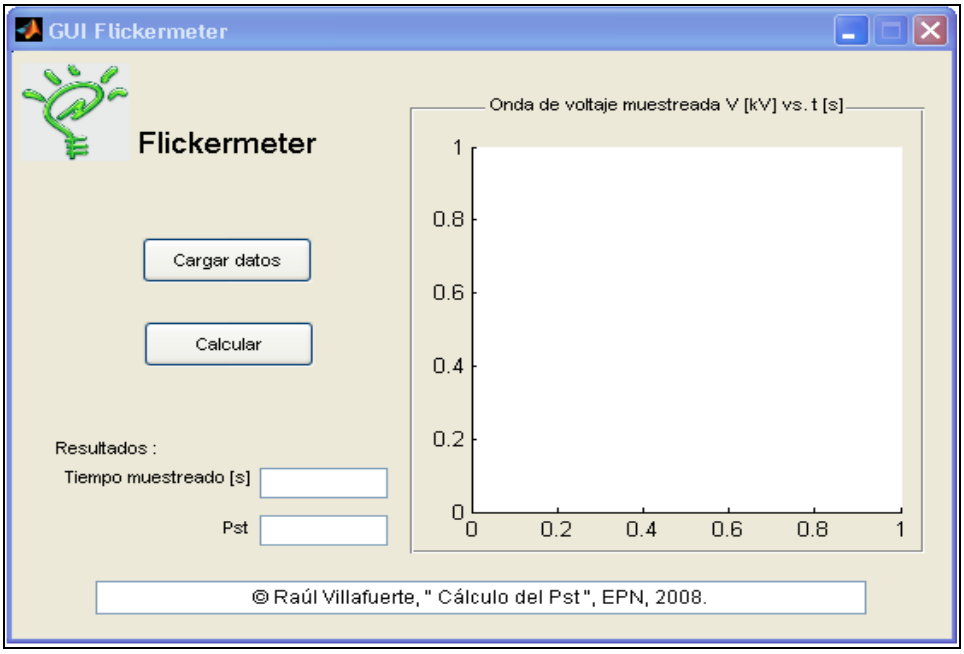


Figura 4.57 Interfaz Gráfica para el Cálculo del Pst

Para calcular el valor del Pst de una señal por medio de la interfaz gráfica se debe escoger el archivo .asc de la señal que se requiere evaluar (generada en Power Factory) presionando Cargar Datos (figura 4.57) que despliega una ventana de diálogo que permite buscar al archivo .asc (figura 4.58)

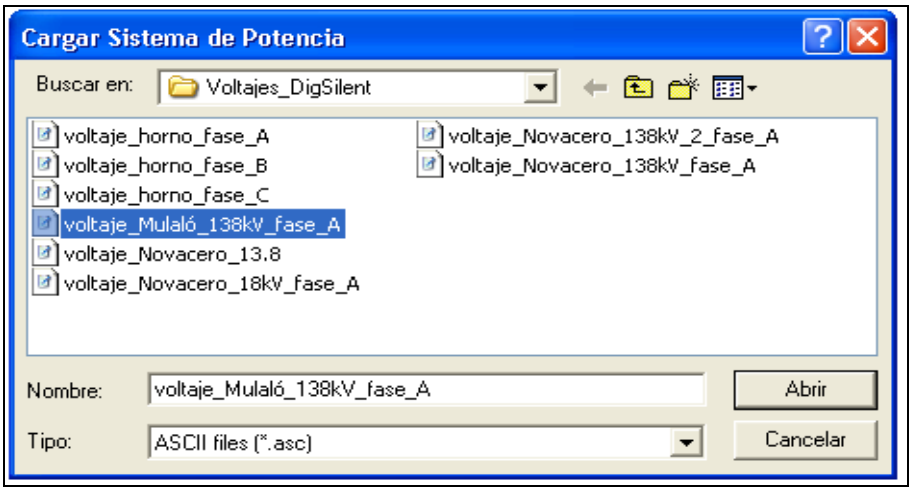


Figura 4.58 Búsqueda del Archivo . asc de la Señal de Voltaje

Al escoger el archivo .asc se genera en la interfaz gráfica la forma de onda de la señal y el comentario “Datos cargados correctamente” (figura 4.59).

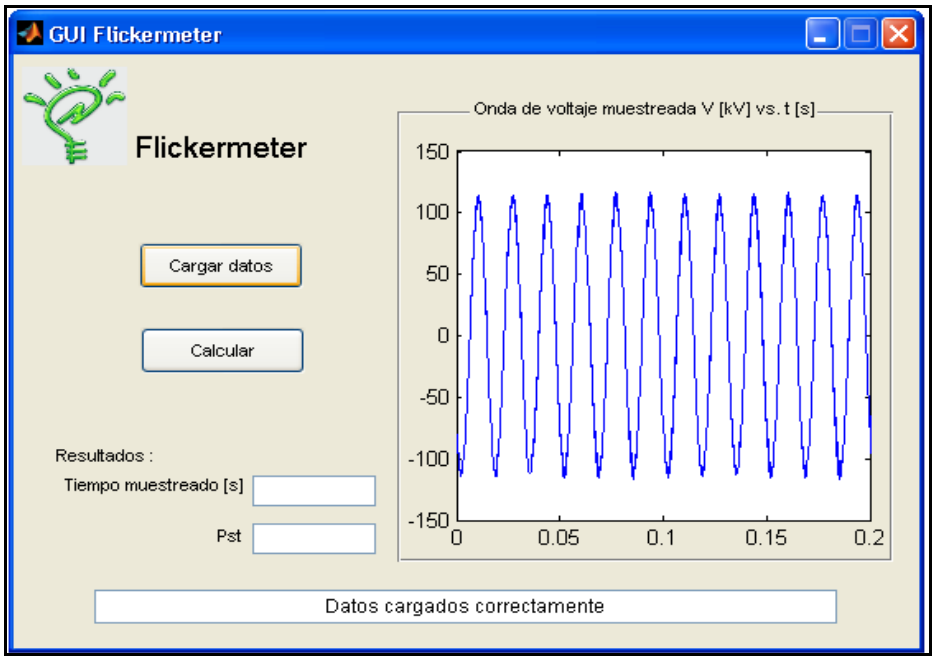


Figura 4.59 Ingreso del Archivo . asc de la Señal de Voltaje en el Flickermeter

Para calcular el valor de Pst de la señal de voltaje cargada se presiona “Calcular” y automáticamente se muestra en la ventana de diálogo de la interfaz gráfica el valor de Pst calculado (figura 4.60).

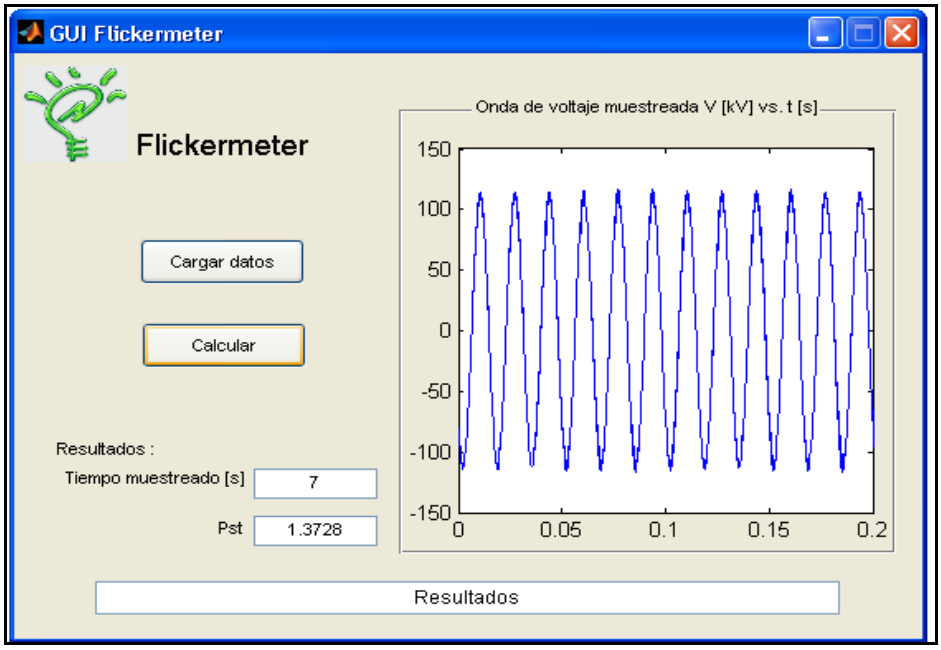


Figura 4.60 Cálculo del valor de Pst de la Señal de Voltaje en el Flickermeter

4.5.1.1.1 Cálculo del Pst en el PCC

Para calcular el valor de Pst en el PCC se carga el archivo .asc de la señal de voltaje en el PCC utilizando la interfaz gráfica del flickermeter (figura 4.57). El valor de Pst causado por la conexión del horno de arco de Novacero S.A. al SNT en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC), calculado con ayuda del Flickermeter de la librería extra de Simulink es 1,3728 (figura 4.60).

4.5.1.2 Determinación del Pst Utilizando el Método Planteado en la Sección 1.4.2.4.2

Este método utiliza una formula experimental (ecuación 1.15) que permite estimar el valor de Pst en el PCC producido por la operación de los hornos de arco. La figura 4.60 muestra el esquema eléctrico equivalente de la alimentación eléctrica del horno de arco de Novacero S.A. donde el PCC es la barra de 138 kV de la

subestación Mulaló, punto de conexión común con la alimentación de los circuitos de iluminación (Empresa Eléctrica Cotopaxi ELEPCO S.A.) que serán afectados por el flicker causado en la operación del horno de Novacero S.A.

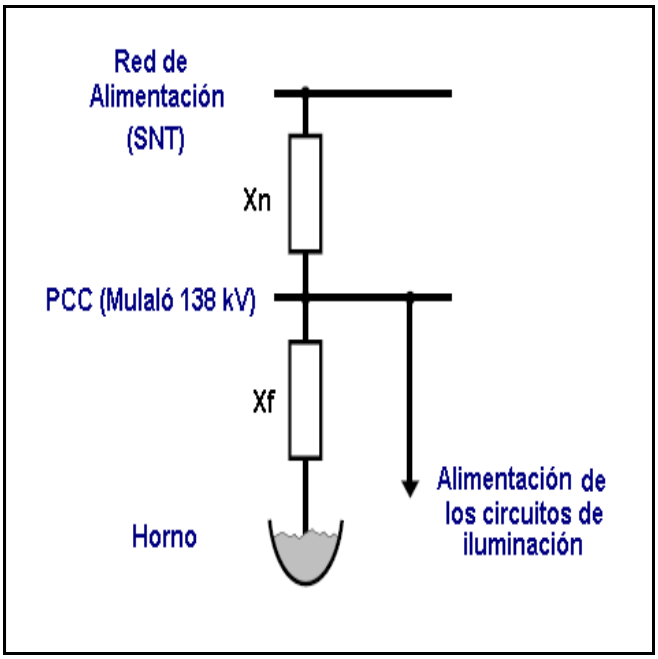


Figura 4.61 Esquema Eléctrico Equivalente de la Alimentación Eléctrica del Horno de Arco de Novacero S.A.

Los datos que se deben introducir en la ecuación experimental 1.15 son:

$$Pst = Kst \cdot \frac{Sccf}{Sccn} \cdot \frac{1}{R_{SVC}} \cdot C_{AV/BV}$$

Kst : Coeficiente experimental comprendido entre 48 y 85, el valor recomendado por la referencia [16] es 75 .

$Sccf$: Potencia de cortocircuito a nivel del horno de arco de Novacero S.A.

$Sccn$: Potencia de cortocircuito del SNT en barra de 138 kV de la subestación Mulaló $S_{ccn} = 741{,}36MVA$ (anexo 9) .

R_{SVC} : Factor de reducción de flicker aportado por la compensación estática, se asume que la red de Novacero S.A no cuenta con compensación estática ($R_{SVC} = 1$).

$C_{AV/BV}$: Coeficiente de atenuación para la transmisión del flicker de alto voltaje hacia abajo voltaje, en mediciones realizadas al mismo tiempo en el PCC y en la red de bajo voltaje de varias instalaciones demostraron que las fluctuaciones de voltaje sufrían una fuerte atenuación cuando se propagaban de la red de alto voltaje hacia la red de bajo voltaje, pero no se ha demostrado mediante un estudio cual es el porcentaje de atenuación del flicker y su dependencia, por esta razón no se considera la atenuación del flicker ($C_{AV/BV} = 1$).

4.5.1.2.1 Cálculo de la Potencia de Cortocircuito a Nivel del Horno de Arco de Novacero S.A.

En la tabla 4.17 se resume las características de la red de alimentación eléctrica del horno de arco de Novacero S.A.

Tabla 4.17 Características de la Red de Alimentación Eléctrica del Horno de Arco de Novacero S.A.

Red del SNT aguas arriba del PCC	Potencia de Cortocircuito	$S_{ccn} = 741{,}36MVA$
	Voltaje Nominal	$V_n = 138kV$
L/T Mulaló-Novacero	Reactancia	$X_{L/T} = 0{,}4909\Omega$
Auto-Transformador	Potencia Nominal	$S_{AT} = 60MVA$
	Voltaje de Cortocircuito	$V_{cc_{AT}} = 4\%$
Transformador Reductor	Potencia Nominal	$S_{T_R} = 22MVA$
	Voltaje de Cortocircuito	$V_{cc_{T_R}} = 10\%$
Transformador del Horno	Potencia Nominal	$S_{T_H} = 22MVA$
	Voltaje de Cortocircuito	$V_{cc_{T_H}} = 7{,}7\%$
	Voltaje Nominal en el lado de bajo voltaje	$V_{BV_{T_H}} = 298{,}8V$
Horno de Arco	Impedancia de las conexiones de bajo voltaje	$X_{BV_H} = 0{,}003\Omega$
	Potencia Nominal	$S_H = 18MVA$

El valor de la impedancia de las conexiones de bajo voltaje del horno de arco no fue presentado por Novacero S.A. razón por la que se toma un valor típico $X_{BV_H} = 0{,}003\Omega$. El valor real de la impedancia de las conexiones de bajo voltaje del horno de arco tiene una importancia trascendente en el cálculo de la potencia de cortocircuito a nivel del horno de arco de Novacero S.A., dependiendo de su valor el resultado de Pst puede variar significativamente.

Para calcular la potencia de cortocircuito del horno de arco *Sccf* se calcula inicialmente el valor de todas las reactancias que alimentan al horno de arco convertidas al nivel de voltaje del PCC (138 kV).

Reactancia de la Red del SNT aguas arriba del PCC

$$X = \frac{V^2}{S}$$

$$X_n = \frac{V_n{}^2}{S_{ccn}}$$

$$X_n = \frac{(138kV)^2}{741{,}36MVA}$$

$$X_n = 25{,}69\Omega$$

Reactancia de la Línea de Transmisión Mulaló-Novacero

$$X_{L/T} = 0{,}4909\Omega$$

Reactancia del Auto-Transformador

$$X = \frac{V^2}{S}$$

$$X_{AT} = \frac{(138kV)^2}{60MVA} \cdot \frac{4}{100}$$

$$X_{AT} = 12{,}696\Omega$$

Reactancia de Transformador Reductor

$$X = \frac{V^2}{S}$$

$$X_{T_R} = \frac{(138kV)^2}{22MVA} \cdot \frac{10}{100}$$

$$X_{T_R} = 86{,}56\Omega$$

Reactancia de Transformador del Horno

$$X = \frac{V^2}{S}$$

$$X_{T_H} = \frac{(18kV)^2}{22MVA} \cdot \frac{7{,}7}{100} \cdot \left(\frac{138kV}{18kV}\right)^2$$

$$X_{T_H} = 66{,}654\Omega$$

Reactancia de las conexiones de bajo voltaje del horno de arco

$$X_{BV_H} = 0{,}003\Omega \cdot \left(\frac{18kV}{0{,}2988kV}\right)^2 \cdot \left(\frac{138kV}{18kV}\right)^2$$

$$X_{BV_H} = 639{,}909\Omega$$

Reactancia de cortocircuito aguas abajo del PCC hasta el horno de arco.

$$X_f = X_{L/T} + X_{AT} + X_{T_R} + X_{T_H} + X_{BV_H}$$

$$X_f = 0{,}4909\Omega + 12{,}696\Omega + 86{,}56\Omega + 66{,}654\Omega + 639{,}909\Omega$$

$$X_f = 806{,}31\Omega$$

Reactancia Total

$$X_T = X_n + X_f$$

$$X_T = X_n + X_{L/T} + X_{AT} + X_{T_R} + X_{T_H} + X_{BV_H}$$

$$X_T = 25{,}69\Omega + 0{,}4909\Omega + 12{,}696\Omega + 86{,}56\Omega + 66{,}654\Omega + 639{,}909\Omega$$

$$X_T = 832\Omega$$

La relación entre la reactancia de cortocircuito del horno de arco de Novacero S.A. X_f y la reactancia de cortocircuito del SNT aguas arriba del PCC X_n es:

$$\frac{X_f}{X_n} = \frac{806{,}31\Omega}{25{,}69\Omega} = 31{,}69$$

El riesgo de perturbaciones "molestas" debidas a la operación de hornos de arco se considera nulo si $X_f / X_n > 36$, para el caso del horno de arco de Novacero S.A. esta relación es menor a 36 concluyéndose que el nivel de flicker producido por la operación del horno de arco de Novacero S.A. en el PCC es superior al valor admisible por la norma.

Potencia de cortocircuito, a nivel del horno de arco de Novacero S.A.

$$S_{ccf} = \frac{V_n^{\,2}}{X_T}$$

$$S_{ccf} = \frac{(138kV)^2}{832\Omega}$$

$$S_{ccf} = 22{,}89MVA$$

La relación entre la potencia de cortocircuito del SNT en el PCC S_{ccn} y la potencia de cortocircuito a nivel del horno de arco de Novacero S.A. S_{ccf} es:

$$\frac{S_{ccn}}{S_{ccf}} = \frac{741{,}36MVA}{22{,}89MVA} = 32{,}39$$

El riego de perturbaciones "molestas" debidas a la operación de hornos de arco también se considera nulo si $S_{ccn}/S_{ccf} > 36$, para el caso del horno de arco de Novacero S.A. esta relación es menor a 36 con lo que se reafirma que el nivel de flicker producido por la operación del horno de arco de Novacero S.A. en el PCC es superior al valor admisible por la norma.

Con estas consideraciones la ecuación 1.15 se puede escribir como la ecuación 4.17.

$$P_{st} = Kst \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} \qquad \textbf{(4.17)}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 4.17 el valor de Pst producido por la operación del horno de arco de Novacero S.A. en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC) se calcula como:

$$P_{st} = (48.....75...85) \cdot \frac{22{,}89MVA}{741{,}36MVA}$$

$$Pst = 1{,}482.....2{,}316....2{,}624$$

Dependiendo del valor de Kst que se escoja el valor del Pst producido por la operación del horno de arco de Novacero S.A. en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló PCC calculado con la formula experimental (ecuación 1.15) de los hornos de arco puede variar desde 1,482 hasta 2,624.

El valor de Pst (1,482) calculado utilizando la fórmula experimental (ecuación 1.15) de los hornos de arco con el valor mínimo de Kst coincide razonablemente con el valor de Pst (1,3728) calculado utilizando el Flickermeter. El error en el cálculo del Pst del 7.95 % obtenido con el valor mínimo de Kst, de 68,70 % obtenido con el valor recomendado de Kst y de 91.14 % obtenido con el valor máximo de Kst muestra que la fórmula experimental para el cálculo del Pst

producido por los hornos de arco en el PCC no es un método preciso pero permite tener una referencia del grado de afectación causado en el PCC.

4.6 COMPARACIÓN DEL PST CON EL LÍMITE ESTABLECIDO EN LA NORMA

Para determinar si el Pst calculado en el PCC se enmarca dentro de la norma, se compara con el límite establecido en la norma.

Con el propósito de entender y aplicar la norma a continuación se realiza un breve análisis de la norma IEC 61000-4-15.

4.6.1 NORMA IEC 61000-4-15

La Norma Internacional IEC 61000-4-15 fue elaborada en Febrero de 2003 y remplaza a la norma IEC 868, esta norma proporciona las especificaciones funcionales y de diseño para medidores de flicker.

Los medidores de flicker permiten 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 voltaje en ese punto de la red de alimentación eléctrica en los niveles de molestia equivalentes que serían percibidos por el sistema ojo-cerebro del observador. La norma especifica las características de funcionamiento y diseño del instrumento de medición de flicker.

4.6.1.1 Límites Permitidos

El valor de Pst igual a 1 indica que menos del 50% de los observadores se irritará, el valor de $Pst > 1$ sugiere que mucho más que el 50% de los observadores se irritará. El valor máximo admisible de Pst por la norma es 1.

La tabla 4.18 muestra el valor de Pst causado por la conexión del horno de arco de Novacero S.A. al SNT en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló, calculado con ayuda del Flickermeter junto al valor límite de Pst establecido en la norma. Se aprecia que valor calculado de Pst excede en 0,3728 al valor límite, estableciéndose un impacto negativo en las instalaciones aledañas.

Tabla 4.18 Valor de Pst Excedido por el Horno de Arco de Novacero S.A. en el PCC

Pst Calculado con el Flickermeter	**Pst Límite (Norma IEC 61000-4-15)**	**Pst Excedido**
1,3728	1	0,3728

4.7 MEDIDAS CORRECTIVAS PARA REDUCIR LOS ÍNDICES DE DISTORSIÓN ARMÓNICA Y EFECTO FLICKER

El objetivo principal de esta tesis es modelar y simular el comportamiento en estado estacionario y dinámico del horno de arco, aplicado al caso de Novacero S.A., para determinar los índices de armónicos y efecto flicker en el SNT debido a la conexión del horno de arco de Novacero S.A., desarrollar un estudio detallado de soluciones para mitigar los efectos causados al SNT por la conexión del horno de arco de Novacero S.A. a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló no forma parte del alcance de esta tesis pero si proponer soluciones generales que se deben realizar para que los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados por la conexión del horno de arco de Novacero S.A. se encuentren dentro de los límites establecidos por las normas. Para evitar que los armónicos producidos por la operación del horno de arco de Novacero S.A. originen efectos negativos a la operación del SNT y a sus equipos, como los descritos en la sección 1.3.3, se recomienda la instalación de filtros para los armónicos de orden 5, 7 y 16. Para evitar que las fluctuaciones de voltaje causadas por la operación del horno de arco, que originan el efecto flicker, afecten la alimentación de los circuitos de iluminación conectados a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC) se puede considerar diversas soluciones como las expuestas en la sección 1.4.3 para disminuir el valor de Pst a un valor menor o igual a 1.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- En el modelo en estado estacionario del horno de arco se representa el comportamiento no lineal entre el voltaje y la corriente, causa principal de la generación de armónicos, en el modelo en estado dinámico del horno de arco se representa la variación aleatoria de la longitud del arco eléctrico, causa principal de la generación de fluctuaciones de voltaje que originan el efecto flicker. El modelo en estado estacionario se utiliza para determinar los índices de distorsión armónica, mientras que el modelo en estado dinámico se utiliza para determinar el índice de efecto flicker generado por la operación del horno de arco.

- Las simulaciones del comportamiento del horno de arco en estado estacionario y dinámico realizadas en este estudio son similares a las simulaciones realizadas en las referencias consultadas, verificando así la validez de los modelos desarrollados.

- Los modelos desarrollados para estado estacionario y dinámico del horno de arco pueden aplicase al caso de cualquier industria siderúrgica que requiera conectarse al Sistema Nacional de Transmisión –SNT. Esto permitirá determinar los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados en el Punto Común de Conexión (PCC) por su operación.

- El lenguaje de simulación DSL del software Power Factory de DIgSILENT permite realizar modelos de control que pueden ser utilizados para caracterizar el funcionamiento cargas que no se encuentran en los elementos de librerías del programa como es el caso del horno de arco, debiéndose analizar que elemento de la red permite emular los efectos que produce la incorporación de un horno de arco en una red de potencia.

- La conexión del horno de arco de Novacero S.A. a la barra de 138 kV de la subestación Mulaló provoca afectación al SNT debido a que los índices de distorsión armónica y flicker en el PCC, sobrepasan los límites establecidos en la normas.

- Para la corriente eléctrica, la distorsión armónica individual de los armónicos de orden 5, 7 y 16 y la distorsión amónica total, sobrepasan los límites establecidos en la norma IEEE 519 y en la Regulación CONELEC 003/08. Caso similar ocurre con el voltaje para la distorsión armónica individual del armónico de orden 13 y su correspondiente distorsión amónica total. El valor de Pst sobrepasa en 0,3728 al valor establecido en la norma IEC 61000-4-15.

- El nivel de distorsión armónica en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló producido por la conexión del horno de arco de Novacero S.A., sobrepasa los límites establecidos en las normas y en consecuencia producirá efectos negativos al SNT como el deterioro del aislamiento, mayores pérdidas en el cobre como consecuencia de la circulación de corrientes armónicas y mal funcionamiento de relés y equipos electrónicos del SNT.

- El flickermeter calcula el nivel de sensación que experimentaría un observador medio, situado en la Barra de 138 kV de la subestación Mulaló. El resultado de la medida se proporciona en unidades de perceptibilidad (p.u.), estableciéndose un umbral de percepción al que se adjudica el valor 1, para el caso de NOVACERO S.A. el nivel de Pst calculado en el PCC es 1.3728, superior a 1 y se le considera perceptible, y por tanto, susceptible de ocasionar molestias.

- Para disminuir el nivel de distorsión armónica en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló se debe instalar filtros para los armónicos de orden 5, 7 y 16 que reduzcan los efectos adversos producidos por la conexión del

horno de arco de Novacero S.A. al SNT. Para disminuir el efecto flicker en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló causado por la conexión del horno al SNT se debe considerar diversas soluciones, entre las que sobresale la instalación de un compensador de vares estático (SVC).

- Al momento de la entrada en operación del horno de arco de Novacero S.A. se recomienda realizar mediciones de los índices de distorsión armónica y efecto flicker causados por conexión del horno de arco en la barra de 138 kV de la subestación Mulaló (PCC). Esta información permitirá parametrizar y validar los modelos desarrollados en esta tesis, y en tal sentido mejorará la representación del funcionamiento real del horno de arco lo que contribuirá a la realización de futuros estudios que involucren dicho equipamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] RAMÍREZ, Samuel. Calidad del Servicio de Energía Eléctrica. Primera Edición. Colombia. 2003.

[2] JACCARD, Ricardo. Principios Básicos para Definición de los Parámetros Eléctricos Operacionales de los Hornos de Arco.
www.jaccard.com.br

[3] KOVAL, Don; BERISTAIN, Jorge; BENT, Dale. Evaluating the Reliability Cost of Computer System Interruptions due to Power System Disturbances. IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 25, No. 2, March/April 1989.

[4] TRAD; RATTA; MOMBELLO; ZINI. Transitorios electromagnéticos. Curso de posgrado Universidad Nacional de San Juan. 1997.

[5] MARTZLOFF. Coupling, Propagation, and Side Effects of Surges in an Industrial Building Wiring System. IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No. 2, March/April 1990.

[6] BUSCHART, Richard. Computer Grounding and the National Electrical Code. IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 1897.

[7] LEE, Ralph. Grounding of Computer and Other Similar Sensitive Equipment. IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 1987.

[8] MAGGIOLI, Victor. Grounding and Computer Technology. IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 1987.

[9] ZIPSE, Donald. Grounding for Process Control Computers and Distributed Control Systems: The National Electrical Code and Present Grounding Practice. IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 1987.

[10] IEEE Task Force Report. Secondary (Low-Side) Surges in Distribution Transformers". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992.

[11] DUGAN, Roger; SMITH, Stephen. Low Voltage Side Current Surge Phenomena in Single Phase Distribution Transformer Systems. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 2, April 1988.

[12] DUGAN, Roger; KERSHAW, Stanley; SMITH, Stephen. Protecting Distribution Transformers From Low Side Current Surges. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, November 1990.

[13] PURI; ABI-SAMRA; DIONISE; SMITH. Lightning Induced Failures in Distribution Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, October 1988.

[14] WILSUM. A Practical Harmonic Guideline for Adjustable Speed Drive Applications. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, Janury 1992.

[15] SMITH, Robert; STRATFORD, Ray. Power System Harmonics Effects from Adjustable Speed Drives. IEEE Trans. on Industry Applications, July/August 1984.

[16] WIERDA, René. Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas. Schneider Electric. Francia. 1995.

[17] JACCARD, Ricardo. Parámetros Eléctricos de Operación del Horno de Arco. www.jaccard.com.br

[18] Efecto Flickering o Parpadeo
http://146.83.6.25/software/pelicular/pagproyecto/efecto_flickering.htm

[19] MEYNAUD,W. Flicker et Conditions de raccordement d'appareils Produisant des Variations Rapides de tensión.

[20] ROBERT, A; MARQUET, J. Evaluation de la Qualité de la Tensión Point de vue Harmonique. 1992.

[21] ROBERT, A; COUVREUR,M. Recent Experience of Connecting of big Arc Furnaces whit to Reference to Flicker Level. 1994.

[22] SAKULIN, M; RENNER, H. Strategy for Worldwide Applicability of the UIE/IEC Flickermeter. Austria.

[23] LEÓN, José. Flicker. Universidad Simón Bolivar. Julio. 2005.

[24] SAITO, N; KOBAYASHY, I. Investigation and Analysis of Voltage Fluctuation in DC Arc Furnaces.

[25] MIRRA, C. Connection of Fluctuating Loads. Paris. 1988.

[26] BONNARD, G; DECHARTE, G. Condition de Raccordement d'équipement Générateurs de Fluctuations Rapide de Tension. Bulletin DER dÉDF; nº 4. 1982.

[27] SANDOVAL, Handel. Apuntes de Materia Calidad del Servicio Eléctrico. Quito. 2007.

[28] ZAMORA, Inmaculada; FERNÁNDEZ, Elvira; SAGASTABEITIA, Koldobika. Simulación de Sistemas Eléctricos. Pearson Prentice Hall. Madrid. 2005.

[29] NORIEGA, Ernesto. Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía. 2005.
www.monografias.com

[30] COLLOMBET, Christian; LUPIN, Jean-Marc; SCHONEK, Jacques. Los Armónicos en las Redes Perturbadas y su Tratamiento. Schneider Electric. Francia. 1999.

[31] GÓMEZ, Antonio. Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica. McGraw-Hill. España. 2002.

[32] PANOIU, Manuela; PANOIU, Caius; SORA, Ioan; OSACI, Mihaela. About the Possibility of Power Controlling in the Three-Phase Electric Arc Furnaces Using PSCAD EMTDC Simulation Program. Advances in Electrical and Computer Engineering. Volume 7. Number 1. 2007.

[33] VARADAN, Srinivas; MAKRAM, Elham; GIRGIS, Adly. A New Time Domain Voltage Sourse Model for an Arc Furnace Using EMTP. IEEE Transactions on Power Delivery. Volume 11. Number 3. July. 1996.

[34] TANG, Le; KOLLURI, Sharma; McGRANAGHAN, Mark. Voltage Flicker Prediction for Two Simultaneously Operated AC Arc Furnaces. IEEE Transactions on Power Delivery. Volume 12. Number 2. April. 1997.

[35] VERVENNE, I; REUSEL, Van; BELMANS, R. Electric Arc Furnace Modelling form a Power Quality Point of View. IEEE Benelux Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering. April. 2006.

[36] REGULACIÓN N°. CONELEC – 003/08. Calidad del Transporte de Electricidad y del Servicio de Transmisión y Conexión en el Sistema Nacional Interconectado.

[37] IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System.

[38] INELIN. Solicitud de Acceso de Novacero a la Capacidad de Transmisión Existente o Remanente de Sistema Nacional de Transmisión, en la Subestación Mulaló de 138 kV.

[39] NOVACERO. www.novacero.com

[40] TRANSELECTRIC. División Comercial y Conexiones.

[41] POWER FACTORY*. Manuals Power Factory básico. V*ersión 12.1.Germany. 2001.

[42] POWER FACTORY*. Manuals Power Factory avanzado. V*ersión 12.1.Germany. 2001.

[43] FERNÁNDEZ, Cesar; SERVICIO TRANSPORTE DE ENERGÍA. Capacitación en Manejo de DIgSILENT Power Factory. Quito. 2002.

[44] POWER FACTORY. Help.

[45] TRANSELECTRIC. Base de datos del SNT. DIgSILENT Power Factory.

[46] RIOS, Carlos; ARISTIZABAL, Marcelo; GALLEGO, Alfonso. Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos. Grupo de Investigación en Planeamiento de Sistemas Eléctricos Universidad Tecnológica de Pereira. 2006

ANEXOS

ANEXO Nº 1

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y COMPORTAMIENTO FRENTE A LAS VARIACIONES DE VOLTAJE DE DISTINTAS FUENTES LUMINOSAS [21].

fuentes luminosas	fluorescencia	incandescencia	vapor de sodio a baja presión	vapor de sodio a alta presión	vapor de mercurio a alta presión
tipo de lámparas	rectilínea, circular, de un solo casquillo, compacta, miniatura o de sustitución	éstandard, fantasía, halógena BT o MTB		con distintos casquillos	ampolla fluorescente, luz mixta con yoduros metálicos, con distintos casquillos
potencia eléctrica (W)	de 45 a 65	de 5 a 2000	de 18 a 180	de 35 a 1000	de 35 a 3500
Eficacia luminosa ($lm.W^{-1}$)	de 35 a 104	de 8 a 25	de 100 a 200	de 37 a 150	de 11 a 120
comportamiento al ponerla en tensión	después del cebado se obtiene el flujo luminoso completo. Una corriente de precalentamiento de algunos segundos puede alcanzar 2 I_n	el flujo luminoso es inmediato. La sobreintensidad puede alcanzar 14 I_n	hay una espera de entre 5 y 10 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. No hay una sobreintensidad notable	hay una espera de entre 5 y 7 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,2 ó 1,3 I_n	hay una espera de entre 1 y 4 minutos desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,5 ó 1,7 I_n
comportamiento frente a fluctuaciones de la tensión de alimentación	sólo se perturba con fluctuaciones 2 ó 3 veces más fuertes que las que afectan a las lámparas de incandescencia. Esto es debido a la remanencia del depósito fluorescente	especialmente sensibles a las pequeñas variaciones de tensión repetidas. Esto se debe a la pequeña constante térmica de los filamentos	muy sensible, puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa	ídem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión	ídem que la lámpara de vapor de sodio a baja presión

ANEXO Nº 2

SOLICITUD DE ACCESO DE NOVACERO S.A. A LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN EXISTENTE O REMANENTE DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN, EN LA SUBESTACIÓN MULALÓ DE 138kV.

NOVACERO
SOLUCIONES DE ACERO

Ing. P. Gómez

Oficio No.1114071210
Quito, 14 de diciembre de 2007

Ing. L. Rueda
Su análisis y respuesta

Señor Ingeniero
René Morales Cardoso
PRESIDENTE EJECUTIVO
TRANSELECTRIC S.A
Presente.-

VICEPRESIDENCIA TECNICA
Recibido por: Sandra Calderón
Hora: 8 18 DIC. 2007 8446

De mi consideración:

De conformidad con lo establecido en el Art.30 del "Reglamento de Libre Acceso a los Sistemas de Transmisión y Distribución, agradeceré considerar la presente solicitud de acceso a la capacidad de transmisión existente o remanente del Sistema Nacional de Transmisión, en la Subestación Mulaló de 138kV, una vez que se han atendido las observaciones realizadas por TRANSELECTRIC S.A.

Las características principales del proyecto son:

- Una línea de transmisión de aproximadamente 1 kilómetro de longitud, cuyo conductor es un 3/0 AWG/ACSR montado en aisladores Tipo poste y estructuras metálicas para la salida y llegada de la línea.

- Una subestación de 138kV / 18kV-13.8kV que contará con un auto transformador de 60MVA y con dos transformadores de 20MVA.

Forman parte de esta solicitud de acceso los siguientes documentos de soporte:

- Diseño del Pórtico (S/E Mulaló), Subestación y Malla de puesta a tierra NOVACERO
- Diseño de la línea de transmisión de 138kV S/E MULALÓ-S/E NOVACERO
- Características de la carga (NOVACERO) a instalarse
- Estudios de Armónicos y Flickers para la planta de NOVACERO
- Estudios Eléctricos (Flujos, Corto Circuitos y Estabilidad Transitoria) para la conexión de la planta de NOVACERO al SNT
- Planos y Anexos

Mc. Fernando

14 DIC. 2007

: Av. de los Shyris 3941 y Río Coca • PBX : 2269 944 • Fax : 2469 966 • Ventas : 2269 919 • Fax : 2254 070 • Casilla : 17-01-546 • e-mail : ventasuio@novacero.com
GUAYAQUIL : 6 de Marzo 3402 y Camilo Destruge • PBX : 2448 700 • Fax : 2449 110 • Casilla : 09-01-9377 • e-mail : ventasgye@novacero.com
CUENCA : Av. Paseo de los Cañaris s/n, entre Cacique Chamba y Juan José Flores • Teléfonos : 2865 404 / 2863 596 • Fax : 2863 597
www.novacero.com

NOVACERO
SOLUCIONES DE ACERO

Adicionalmente:

- ✓ Las simulaciones se han realizado considerando los proyectos que de acuerdo con el Plan de Expansión de Transmisión 2007-2016 entrarán en operación. La entrada en operación del horno está prevista para el mes de junio del 2008, esto en cuanto a pruebas y la carga para el mes de agosto del 2008.

- ✓ Los datos de secuencia y características eléctricas de líneas de transmisión, transformadores y generadores, se los presenta en la sección Anexos del informe adjunto en cuadros, y los datos de demanda, cargas y generación fueron tomados del Plan de Expansión de Transmisión 2007-2016

Esta solicitud consta de cuatro carpetas: una con los estudios y diseños y tres con los planos y anexos respectivos, además de un CD con toda ésta información.

A la espera de contar con una respuesta a mi pedido, me suscribo de usted.

Atentamente,

Ing. Guillermo Miño
Gerente de Planta
NOVACERO

ANEXO Nº 3

OBSERVACIONES DE TRANSELECTRIC S.A. A LA SOLICITUD DE ACCESO DE NOVACERO A LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN EXISTENTE O REMANENTE DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN, EN LA SUBESTACIÓN MULALÓ DE 138kV [40].

TRANSELECTRIC S. A.
Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica

PE-dcc-00265-08
Quito, 17 de enero de 2008

Ingeniero
GUILLERMO MIÑO
Gerente de Planta
NOVACERO S.A.
Presente.-

De mi consideración:

En atención al Oficio No. 111407071210 remitido el 14 de diciembre de 2007, mediante el cual presenta respuestas a las observaciones planteadas al Estudio de Conexión al SNT de la Planta Industrial NOVACERO a través de la S/E Mulaló a nivel de 138kV, y como alcance al Oficio No. PE-dcc-00094-08 de 07 enero de 2008, en el que se suspende el trámite de acceso al SNT en vista que el CENACE presentó observaciones al estudio; me permito indicar lo siguiente:

1. Del estudio presentado por NOVACERO se desprende que existe afectación al SNT, y que bajo ciertas condiciones de despacho de generación no existe capacidad disponible en el sistema para atender en forma continua e ininterrumpida la carga de NOVACERO.

   Por lo tanto, si su representada mantiene su interés en conectarse a la subestación Mulaló del SNT, esta solo podría cumplirse si observan los siguientes aspectos:

   1.1 Aspectos Comerciales en el MEM

   Bajo ciertas condiciones de despacho de generación el sistema no puede atender la carga de NOVACERO, por ejemplo cuando no está operando la generación de Pucará, cuando se ha perdido la interconexión con Colombia o cuando la generación local de la EEQSA se reduce, situaciones en las cuales en el ramal Totoras-Ambato-Mulaló-Vicentina se observa sobrecargas que obligarían la desconexión total o parcial de NOVACERO.

   De producirse contingencias en la zona, atribuibles a NOVACERO, cuyo efecto implique cambios en el despacho de generación, que signifiquen el ingreso de unidades de generación más costosas, para evitar las sobrecargas en las instalaciones de TRANSELECTRIC S.A., el diferencial de costos producto del ingreso de la generación fuera de mérito deberá ser cubierto por NOVACERO, sin perjuicio de atender reclamos por lucro cesante o de cualquier otra índole de los generadores que no pudieron ser despachados.

   1.2 Aspectos Técnicos del SNT

   El estudio de estabilidad transitoria refleja afectación al Sistema Nacional de Transmisión, lo que según el propio estudio se resolvería con la inclusión de un sistema de teledisparo, cuya implementación será responsabilidad de NOVACERO,

una vez aprobados los diseños por TRANSELECTRIC S.A. y el CENACE, quienes en su momento, establecerán los requerimientos específicos del mismo.

1.3 Calidad del Servicio (Factor de potencia, armónicos y flickers)

Será obligación ineludible de NOVACERO, la instalación de los equipos para el control de factor de potencia, armónicos y flicker, indicados en el estudio; se deja expresa constancia que no se habilitará la conexión sino están instalados los equipos antes indicados.

En particular, el factor de potencia de la carga de NOVACERO es inferior al establecido en la regulación actual por lo que la instalación de los equipos de control de factor de potencia, son de carácter obligatorio.

Con el mismo carácter de obligatoriedad expresado en el párrafo anterior, NOVACERO tendrá que instalar todos los equipos, elementos y dispositivos para el registro, medición y supervisión de la calidad del servicio en la conexión, así como de los medios de transmisión de la información registrada por sus equipos.

1.4 La información del estudio de armónicos y flicker es limitada, por lo que se requiere se presente al menos la siguiente información:

- El espectro del contenido armónico del horno de arco, los niveles de flicker presentados para condiciones de potencia mínima de cortocircuito del sistema.
- Debido a la falta de certeza sobre los modelos utilizados para el estudio, TRANSELECTRIC S.A. se reserva el derecho a interrumpir la conexión si al momento de la operación los niveles de calidad (factor de potencia, armónicos y flicker) no se encuentran dentro de los mínimos exigidos en la normativa local o internacional aplicable.

2. Información de instalaciones que debe ser presentada previo a continuar con el proceso de acceso al SNT.

- Presentar los planos de la malla de puesta a tierra en la subestación Mulaló. Los estudios de la malla de puesta a tierra debe considerar dos casos: la ampliación de la bahía y la conexión a la malla existente en la subestación Mulaló.
- Someter para aprobación de TRANSELECTRIC S.A. los diseños, cálculos civiles, estructurales y estudio de suelos para las bases del equipo primario y pórticos respectivamente.
- Indicar como se realizará la transmisión de voz y datos con los centros de control de TRANSELECTRIC S.A. y CENACE, subestaciones adyacentes, gestión de protecciones, medición y RAP's de acuerdo a las regulaciones vigentes. (Trampa de Onda o PLC digital).
- Entregar los diseños y características técnicas de las estructuras metálicas, aisladores, herrajes y cables desnudos para las barras y línea respectivamente.

- La nomenclatura de los equipos en la bahía de 138 kV de la subestación Mulaló debe ser la normada por TRANSELECTRIC S.A.

- TRANSELECTRIC S.A. recomienda utilizar 13 aisladores ANSI 52-3 ó aisladores de vidrio o porcelana tipo FOG, en vez de los 10 resultantes en el análisis presentado por NOVACERO, debido a la alta contaminación del sector.

3. Aspectos que tienen que ser considerados durante la fase de diseño.

En relación al diagrama de medición y protección de la bahía NOVACERO en la subestación Mulaló, se debe considerar lo siguiente:

- El sistema debe ser de control distribuido de acuerdo al estándar de TRANSELECTRIC S.A. y la norma IEC 61850.

- Diseñar la arquitectura de control distribuido, ubicando sus equipos y entregar la información técnica correspondiente.

- Determinar los protocolos de comunicación interno y externo en la arquitectura del sistema del control distribuido.

- El diagrama debe estar en concordancia con el esquema de Barra Principal y de Transferencia de la subestación Mulaló; el diagrama presentado anteriormente no es el adecuado ya que muestra un esquema de doble barra con dos seccionadores tripolares a barras y dos seccionadores tripolares de puesta a tierra.

- Incluir medición local y comercial de la bahía; la medición comercial debe estar separada de la medición de la bahía y debe estar conectada al inicio de las señales de corriente para poder cortocircuitar en caso de mantenimiento y no interrumpir la medición de la bahía.

- Los TC's y TP's deben ser ubicados fuera de los seccionadores.

- Los transformadores de corriente deben ser del tipo Relación Múltiple (MR) con cuatro devanados en lugar de dos (1 clase 0.2 + 3 clase 5P20).

- Los transformadores de potencial deben tener la siguiente relación de voltaje $138/\sqrt{3}$: $0.115/\sqrt{3}$–0.115 kV, y con tres devanados en lugar de dos (1 clase 0.2 + 2 clase 3P).

- Considerar la protección diferencial de barras existente, que es de alta impedancia.

- Incluir la función de voltaje para permisivos de puesta a tierra en líneas y barras, así como la protección por sobrevoltaje, que debe estar prevista en los IED's.

- Las funciones de las protecciones eléctricas deben estar incorporadas de acuerdo a los esquemas estandarizados de TRANSELECTRIC S.A. como son: distancia, diferencial de línea, redundancia, respaldo 67N, etc., comunicaciones (hilo piloto) para permisivos de las protecciones, controladores de bahía e IED's bajo norma IEC61850.

AV. 6 DE DICIEMBRE N26-235 Y AV. ORELLANA, ED.TRANSELECTRIC TELFS.: 593-2 2235-571 / 2557-392. FAX: 2231-346
www.transelectric.com.ec QUITO - ECUADOR

TRANSELECTRIC S. A.
Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica

4. **Aprobación de equipos a ser instalados en la bahía a 138 kV de la subestación Mulaló y línea de interconexión.**

   NOVACERO deberá someter a la aprobación de TRANSELECTRIC S.A. los diseños, cronogramas de suministro y montaje de equipos y materiales asociados a la bahía a 138 kV de la subestación Mulaló y a la línea de interconexión dedicada; cabe indicar que igualmente requerirá la aprobación de TRANSELECTRIC S.A., todos y cada uno de los equipos primarios de la bahía a ser instalados en la subestación de TRANSELECTRIC S.A.

5. **Información para diseños**

   TRANSELECTRIC S.A. entregará la información básica para los diseños de equipo primario de la bahía y de las protecciones asociadas, esto es filosofía, principios y esquema de protecciones.

6. **Sistema de Medición Comercial y de Comunicaciones**

   Es de exclusiva obligación de NOVACERO implementar los sistemas de medición comercial y de comunicaciones con el CENACE, sujetándose a las normas y procedimientos establecidos.

7. **Observaciones del CENACE**

   Previa a la autorización para el acceso de NOVACERO, deberá solventar las observaciones del CENACE así como su aceptación expresa a las condiciones establecidas en los numerales 1, 2, 3, 4 y 5.

Atentamente,

ING. RENÉ MORALES CARDOZO
Presidente Ejecutivo

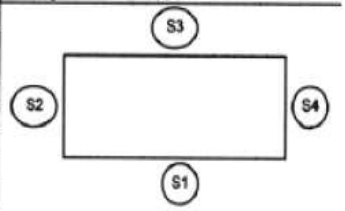
ANEXO Nº 4

DATOS TÉCNICOS DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO DE ARCO [38].

TRAFO EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A.

HOJA DE DATOS
ESPECIFICACIONES GERALES

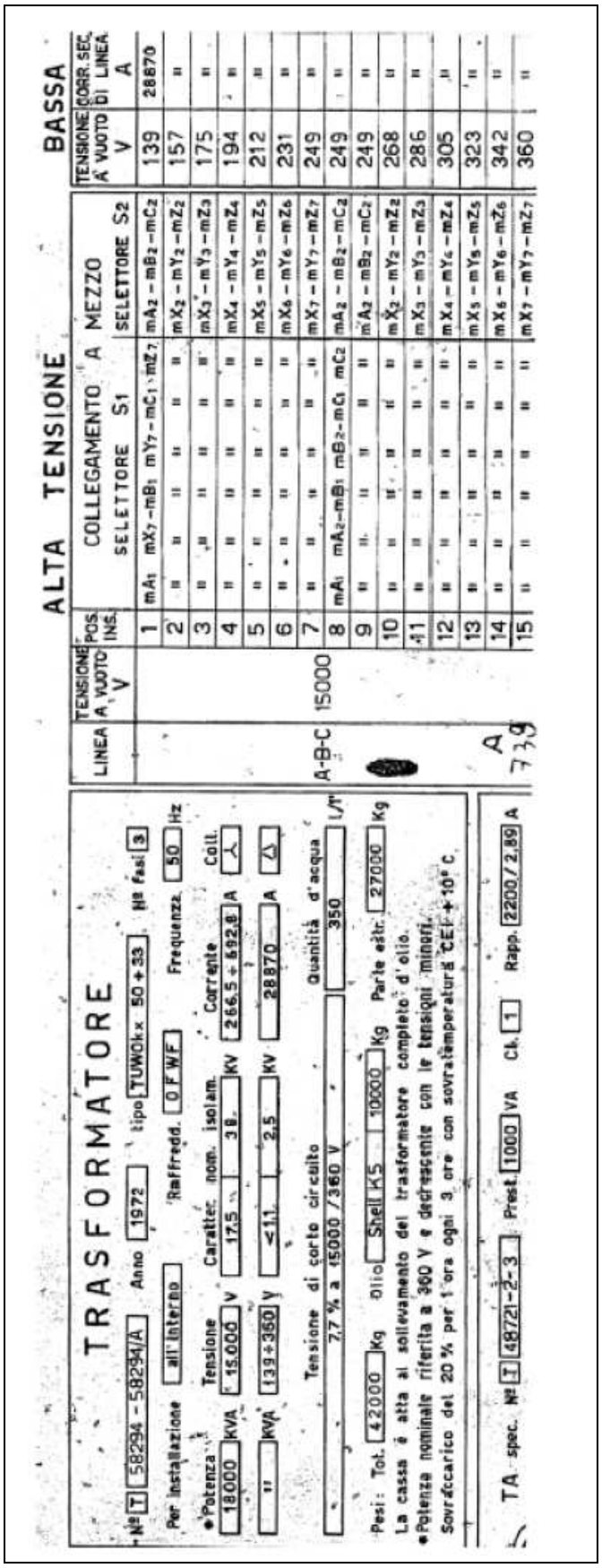
	Cliente / identificación de la HD	NOVACERO				TXE0860_01rev1
	Cantidad	1				
	Instalación	Exterior				
	Obra					
	Temperatura ambiente máxima	40				
	Altitud máxima de la instalación	<2800 m				
1	**CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**					
1,1	Potencia nominal (kVA)	20000				
1,2	Número de fases	3				
1,3	Frecuencia nominal	60				
1,4	**Arrollamiento de tensión superior (AT)**					
	Tensiones (V)	138000 (+2 x 2.5% -2 x 2.5%)				
	Conexión	Delta				
	Nivel de impulso (kV)	550				
	Ubicación de los bushings	En la tapa (S3)				
1,5	**Arrollamiento de tensión inferior (BT)**					
	Tensiones (V)	~~13800~~ 15'000				
	Conexión	Estrella				
	Ubicación de los bushings	En la tapa (S1)				
1,6	Grupo de Conexión	Dyn1				
1,7	**Dados garantizados @ 20MVA-138/13,8, 75C**					
	Pérdidas en Vacio (W)	17300				
	Pérdidas en Carga (W) a 75 °C	93000				
	Pérdidas Totales (W) a 75 °C	110300				
	Impedancia (%) a 75 °C	10,00				
1,8	Liquido aislante	Aceite Mineral Nafténico				
1,9	Tipo de enfriamiento	ONAN				
1.10	Elevación de la temperatura	Arrollamiento	65 °C	Aceite	65 °C	
1,11	Tipo constructivo	Tanque de Expansión Desmontable				
1,12	Caja de protección de los bushings	AT	No aplicable			
		BT	No aplicable			
2	**Accesorios**			**Sistema de pintura**		
2,1	Accionamento conmutador sin tensión	Externo al tanque		Padrón TRAFO		
2,2	Apertura para inspección	Si		Color: gris Munsell N6,5		
2,3	Válvula de drenaje del aceite	Si				
2,4	Medios para izaje Parte activa/tapa/trafo completo	Si				
2,5	Indicador de nivel del aceite	Si				
2,6	Termómetro del aceite	Si				
2,7	Termómetro del arrollamiento	Si				
2,8	Dispositivo para alivio de presión	Si				
2,9	Relé colector de gas tipo Buchholz	Si				
2.10	Manómetro	Si				
2,11	Relé de súbita presión	No aplicable				
2,12	Caja conexión blocos terminales	Si				
2,13	Base del transformador	Base de arrastre				
2,14	Motoventiladores	No aplicable				
2,15	Transformadores de corriente	SI, imagen térmica				
3	Ensayos	Rutina	Si	Tipo	No	
4	Normas utilizadas	Fabricación	IEC-76	Ensayos	IEC-76	
5	Dibujo orientativo					



RESPONSABLE: THIERRY **FECHA:** 13/06/06

ANEXO Nº 5

DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR DEL HORNO DE ARCO [38].



TRASFORMATORE

Nº T 58294 - 58294/A Anno 1972 tipo TUWOk× 50÷33 Nº fasi 3

Per installazione all'interno Raffredd. ONWF Frequenza 50 Hz

	Potenza	Tensione	Caratter. nom. isolam.	Corrente	Coll.
•	18000 KVA	15.000 V	17.5 / 38 KV	266.5 ÷ 692.8 A	Y
"	KVA	139÷360 V	<1.1 / 2.5 KV	28870 A	Δ

Tensione di corto circuito Quantità d'acqua

7,7 % a 15000 /360 V 350 l/'

Pesi: Tot. 42000 Kg Olio Shell K5 10000 Kg Parte attr. 27000 Kg

La cassa è atta al sollevamento del trasformatore completo d'olio.

• Potenza nominale riferita a 360 V e decrescente con le tensioni minori.

Sovraccarico del 20 % per 1 ora ogni 3 ore con sovratemperatura ΔΘ = +10° C

TA spec. Nº T 48721-2-3 Prest. 1000 VA Cl. 1 Rapp. 2200/2,89 A

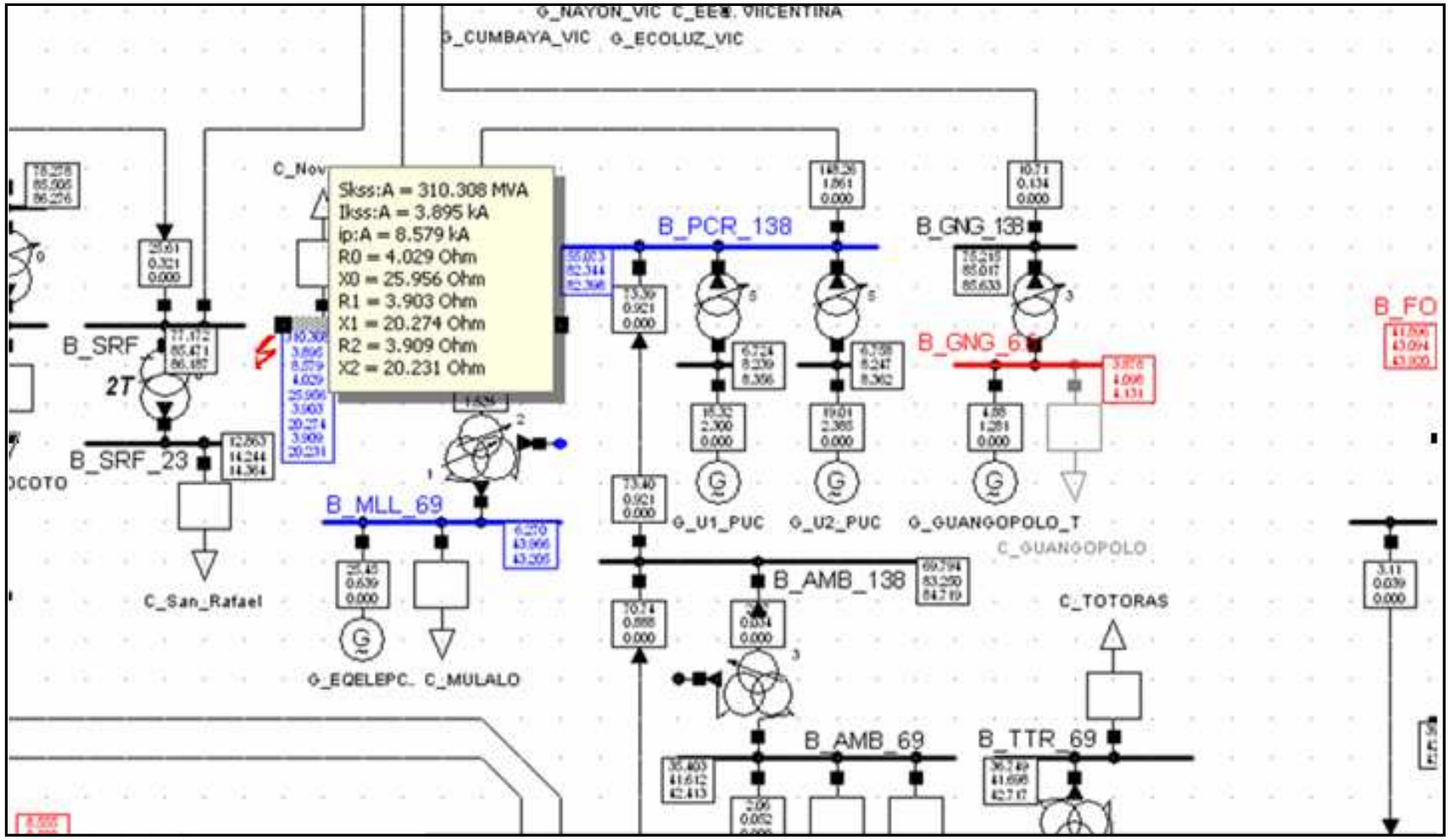
ALTA TENSIONE — BASSA

LINEA	TENSIONE A VUOTO V	POS. INS.	COLLEGAMENTO A MEZZO SELETTORE S1	SELETTORE S2	TENSIONE A VUOTO V	CORR. SEC. DI LINEA A
A-B-C	15000	1	mA_1 mX_7-mB_1 mY_7-mC_1 mZ_7	$mA_2-mB_2-mC_2$	139	28870
		2	" " " " "	$mX_2-mY_2-mZ_2$	157	"
		3	" " " " "	$mX_3-mY_3-mZ_3$	175	"
		4	" " " " "	$mX_4-mY_4-mZ_4$	194	"
		5	" " " " "	$mX_5-mY_5-mZ_5$	212	"
		6	" " " " "	$mX_6-mY_6-mZ_6$	231	"
		7	" " " " "	$mX_7-mY_7-mZ_7$	249	"
		8	mA_1 mA_2-mB_1 mB_2-mC_1 mC_2	$mA_2-mB_2-mC_2$	249	"
		9	" " " " "	$mA_2-mB_2-mC_2$	249	"
		10	" " " " "	$mX_2-mY_2-mZ_2$	268	"
		11	" " " " "	$mX_3-mY_3-mZ_3$	286	"
		12	" " " " "	$mX_4-mY_4-mZ_4$	305	"
		13	" " " " "	$mX_5-mY_5-mZ_5$	323	"
		14	" " " " "	$mX_6-mY_6-mZ_6$	342	"
		15	" " " " "	$mX_7-mY_7-mZ_7$	360	"

A 739

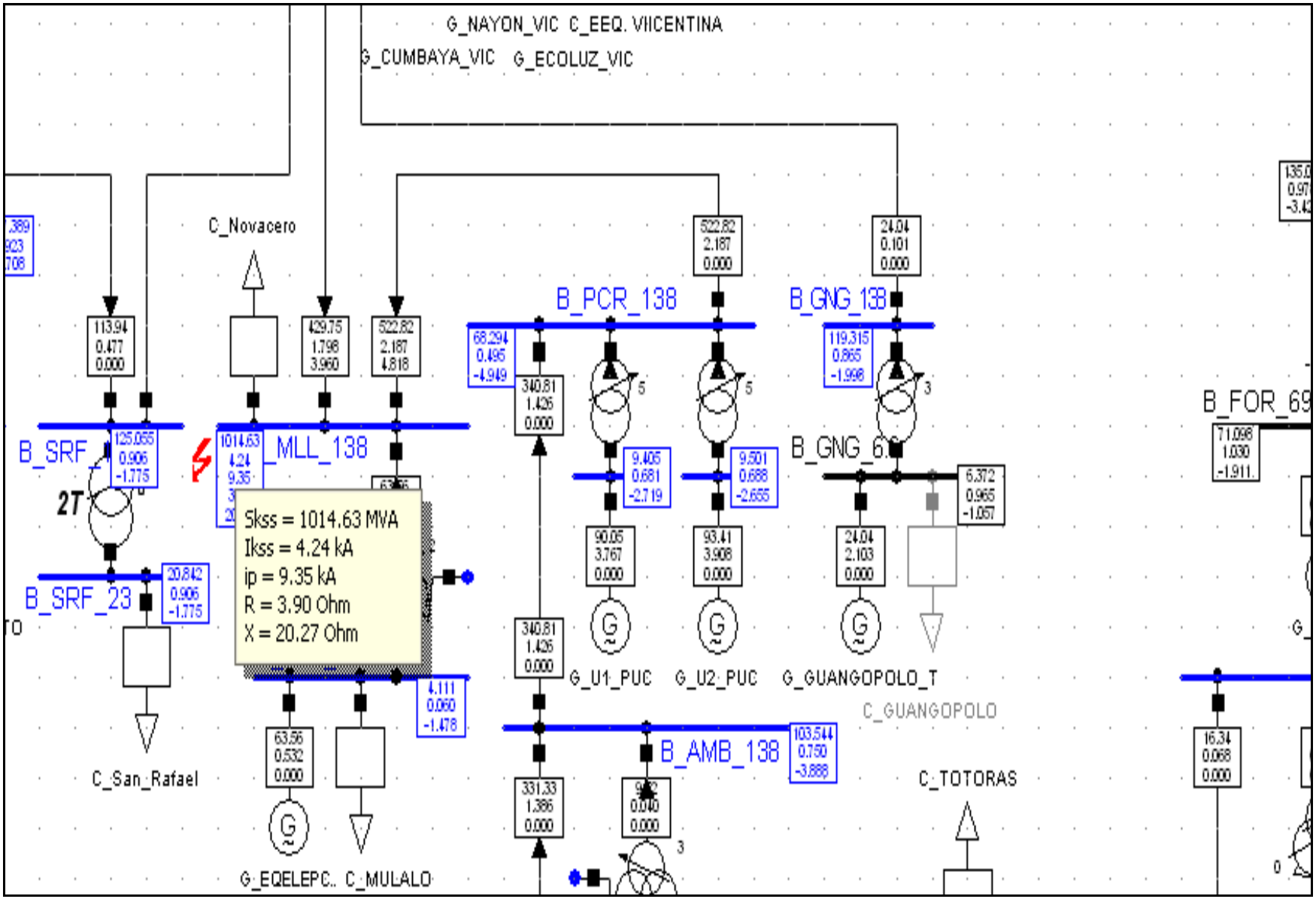
ANEXO Nº 6

CORRIDA DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO A MÁXIMAS CORRIENTES SUBESTACIÓN MULALÓ 138 kV [45].


G_NAYON_VIC
G_CUMBAYA_VIC
G_ECOLUZ_VIC
Skss:A = 310.308 MVA
Ikss:A = 3.895 kA
ip:A = 8.579 kA
R0 = 4.029 Ohm
X0 = 25.956 Ohm
R1 = 3.903 Ohm
X1 = 20.274 Ohm
R2 = 3.909 Ohm
X2 = 20.231 Ohm
B_PCR_138
B_GNG_138
B_FO
B_SRF
2T
B_SRF_23
B_MLL_69
B_AMB_138
B_AMB_69
B_TTR_69
G_U1_PUC
G_U2_PUC
G_GUANGOPOLO_T
C_GUANGOPOLO
C_TOTORAS
C_San_Rafael
G_EQELEPC_ C_MULALO

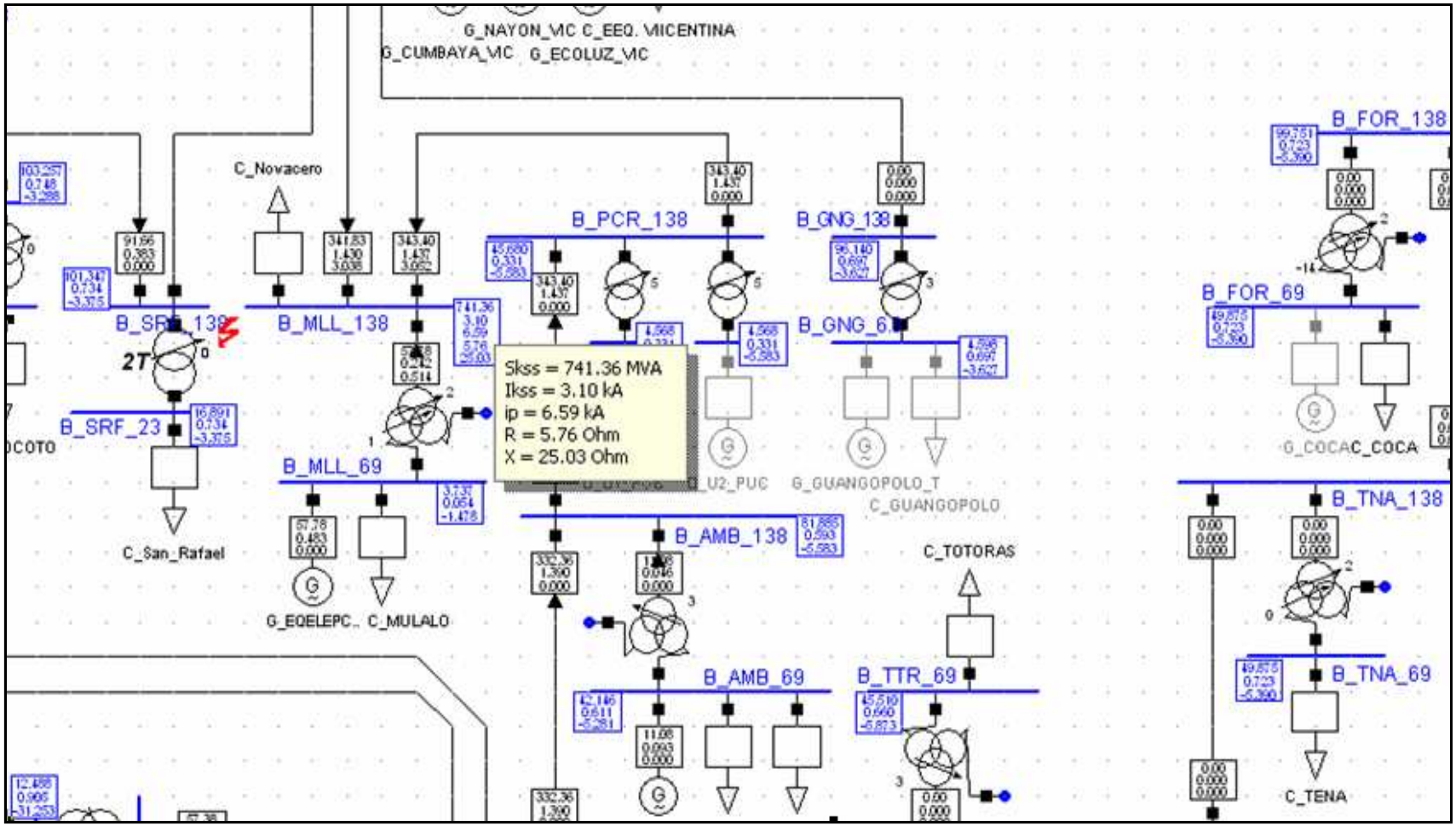
ANEXO Nº 7

CORRIDA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO A MÁXIMAS CORRIENTES SUBESTACIÓN MULALÓ 138 kV [45].


G_NAYON_VIC
C_EEQ. VIICENTINA
G_CUMBAYA_VIC
G_ECOLUZ_VIC
C_Novacero
B_PCR_138
B_GNG_138
B_SRF_
2T
B_SRF_23
_MLL_138
Skss = 1014.63 MVA
Ikss = 4.24 kA
ip = 9.35 kA
R = 3.90 Ohm
X = 20.27 Ohm
B_AMB_138
B_GNG_6
B_FOR_69
G_U1_PUC
G_U2_PUC
G_GUANGOPOLO_T
C_GUANGOPOLO
C_TOTORAS
C_San_Rafael
G_EQELEPC..
C_MULALO

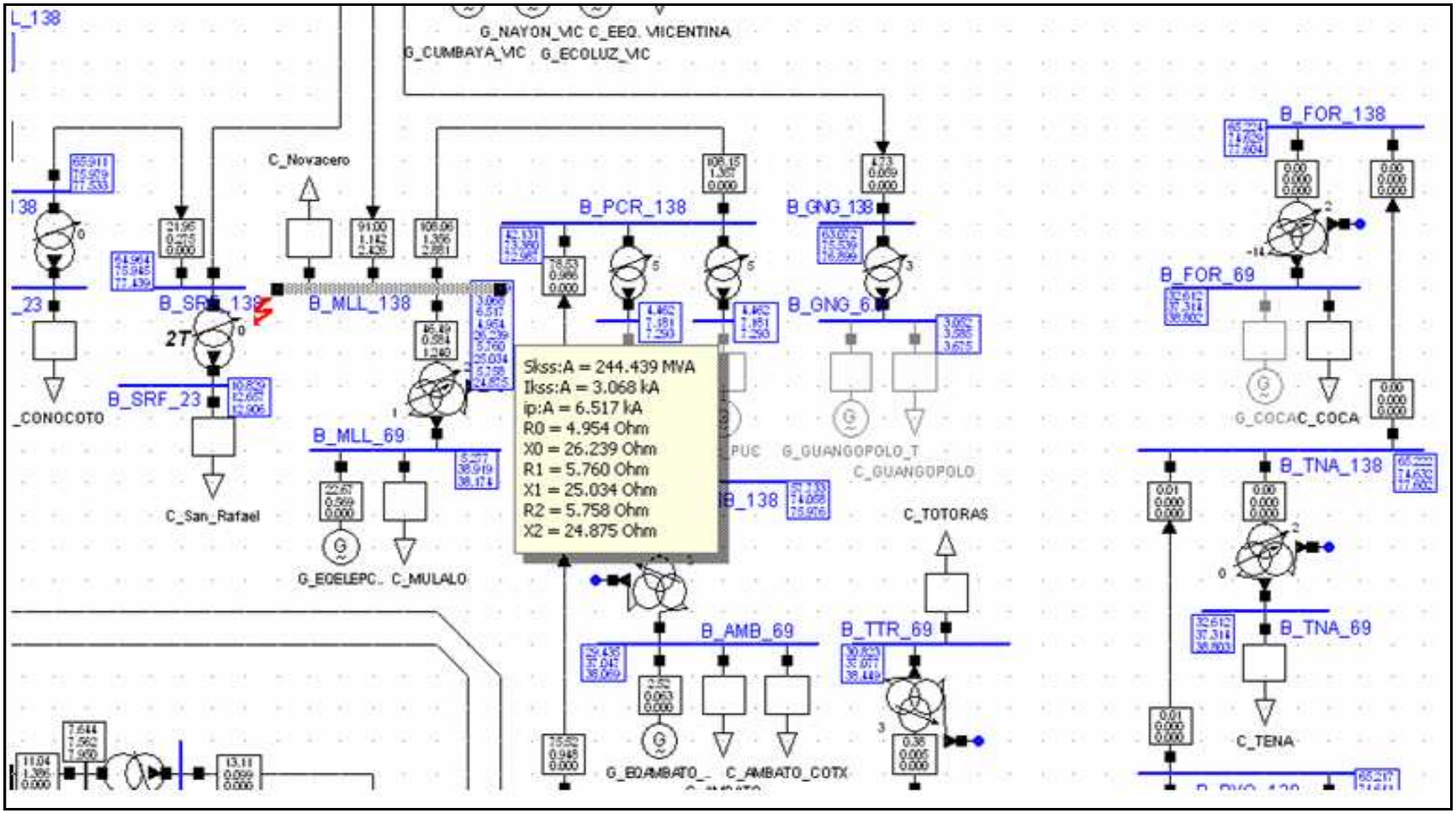
ANEXO Nº 8

CORRIDA DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO A MÍNIMAS CORRIENTES SUBESTACIÓN MULALÓ 138 kV [45].


G_NAYON_VIC C_EEQ. VICENTINA
G_CUMBAYA_VIC G_ECOLUZ_VIC
C_Novacero
B_PCR_138
B_GNG_138
B_FOR_138
B_SRF_138
B_MLL_138
B_GNG_6
B_FOR_69
2T
B_SRF_23
Skss = 741.36 MVA
Ikss = 3.10 kA
ip = 6.59 kA
R = 5.76 Ohm
X = 25.03 Ohm
G_COCAC_COCA
B_MLL_69
G_GUANGOPOLO_T
C_GUANGOPOLO
B_TNA_138
B_AMB_138
C_TOTORAS
C_San_Rafael
G_EQELEPC..
C_MULALO
B_AMB_69
B_TTR_69
B_TNA_69
C_TENA

ANEXO Nº 9

CORRIDA DE CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO A MÍNIMAS CORRIENTES SUBESTACIÓN MULALÓ 138 kV [45].


L_138
G_NAYON_VIC C_EEQ. VICENTINA
G_CUMBAYA_VIC G_ECOLUZ_VIC
C_Novacero
B_PCR_138
B_GNG_138
B_FOR_138
B_FOR_69
B_SRF_138
B_MLL_138
2T
B_SRF_23
_CONOCOTO
C_San_Rafael
B_MLL_69
G_EQELEPC.. C_MULALO
Skss:A = 244.439 MVA
Ikss:A = 3.068 kA
ip:A = 6.517 kA
R0 = 4.954 Ohm
X0 = 26.239 Ohm
R1 = 5.760 Ohm
X1 = 25.034 Ohm
R2 = 5.758 Ohm
X2 = 24.875 Ohm
G_GUANGOPOLO_T
C_GUANGOPOLO
G_COCAC_COCA
B_TNA_138
B_TNA_69
C_TENA
C_TOTORAS
B_AMB_69
B_TTR_69
G_EQAMBATO_.. C_AMBATO_COTX

ANEXO Nº 10

SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA LA UTILIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA PRESENTADA POR NOVACERO S.A A TRANSELECTRIC S.A. EN LA SOLICITUD DE ACCESO A LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN EXISTENTE O REMANENTE DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISIÓN, EN LA SUBESTACIÓN MULALÓ DE 138KV

TRANSELECTRIC S. A.
Compañía Nacional de Transmisión Eléctrica

Señor Ingeniero
Guillermo Miño
Gerente de Planta
NOVACERO S.A.
Quito

De mi consideración:

TRANSELECTRIC S.A. mantiene un programa de pasantías con la Escuela Politécnica Nacional, bajo el cual los estudiantes de los últimos semestres o egresados de ingeniería desarrollan su proyecto de titulación en campos aplicados al Sistema Nacional de Transmisión.

El señor Raúl Santiago Villafuerte Novoa, bajo esta modalidad y con mi supervisión está desarrollando un proyecto de Tesis de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, sobre modelación de hornos de arco y la incidencia de éstos en el SNT.

Con los antecedentes expuestos, me permito solicitar la autorización para que el señor Villafuerte pueda utilizar la información técnica presentada por NOVACERO S.A. a TRANSELECTRIC S.A. en la solicitud de acceso a la capacidad de transmisión existente o remanente del Sistema Nacional de Transmisión, en la subestación Mulaló de 138 kV, el 14 de diciembre de 2007.

Atentamente,

Ing. Luis Ruales Corrales
VICEPRESIDENTE TÉCNICO (E)

Transmitiendo desarrollo
AV. 6 DE DICIEMBRE N26-235 Y AV. ORELLANA, ED.TRANSELECTRIC TELFS.: 593-2 2235-571 / 2557-392. FAX: 2231-346
www.transelectric.com.ec QUITO - ECUADOR