

UNIVERSIDAD DE ORIENTE.
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI.
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD.



**ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS ARMÓNICOS EN LA
SUBESTACIÓN MELONES OESTE DE PDVSA EN EL
DISTRITO SAN TOMÉ.**

Realizado por:
Rafael A. Narváez
C.I: 17.359.396.

*Trabajo de Grado Presentado Ante la Universidad de Oriente
como Requisito Parcial para Obtener el Título de:*

INGENIERO ELECTRICISTA.

Barcelona, septiembre de 2010.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE.
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI.
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD.



**ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS ARMÓNICOS EN LA
SUBESTACIÓN MELONES OESTE DE PDVSA EN EL
DISTRITO SAN TOMÉ.**

ASESORES.

Prof. Luis Suárez.
Asesor Académico.

Ing. Ezomar Uzcátegui.
Asesor Industrial.

Barcelona, octubre de 2010.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE.
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI.
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD.



**ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS ARMÓNICOS EN LA
SUBESTACIÓN MELONES OESTE DE PDVSA EN EL
DISTRITO SAN TOMÉ.**

TRABAJO DE GRADO APROBADO POR EL DEPARTAMENTO DE
ELÉCTRICIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE.

El Jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:

APROBADO

Ing. Manuel Maza
Jurado Principal.

Ing. Jhon Acosta
Jurado Principal.

Ing. Luís Suárez.
Asesor Académico.

Ing. Ezomar Uzcátegui.
Asesor Industrial.

Barcelona, octubre de 2010.

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grados de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos especiales de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrían ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participara al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA.

A mi familia, mi madre Mireya Rodríguez de Narváez, mi padre Rafael Narváez Hernández, Mi hermana Miriangel del Valle Narváez Rodríguez, al igual que a mis abuelos, por ser siempre quienes me han apoyado y respaldado a la hora de cumplir las mis metas, estando siempre presente en las buenas y en las malas, para ustedes y por ustedes con el mayor cariño del mundo.

Rafael Ángel Narváez Rodríguez..

AGRADECIMIENTOS.

Nunca hubiese logrado cumplir esta meta sin la presencia de Dios Todo poderoso en mi corazón brindándome lo más valioso y el mejor regalo que se le puede reconocer a la humanidad que es la bondad, esperanza y honestidad.

A mi familia con quienes estaré por siempre agradecidos, ya que, han sido el apoyo y la mano esperanzadora que siempre estuvo y estará hay para mi y mis metas al igual que lo estaré yo para ellos por siempre.

Mi madre Mireya Rodríguez de Narváez y mi padre Rafael Narváez Hernández, demostrándome ser una madre y padre atentos y amorosos enseñándome el camino de la dignidad y honestidad, estando siempre presentes, pendientes y preocupados por mi y mi hermana dándonos siempre el ejemplo a seguir.

A mis hermanas Miriangel, con quien he compartido todo desde que recuerdo siendo así una compañera con quien me reflejo y aprendo, Loli Narváez, quien siempre brinda su apoyo para seguir adelante, mi hermano Luis Narváez, dios lo tenga en su gloria, Tíos y Tías, mis abuelos Ramón y Teodoro, mis abuelas Candelaria y Antonia, mi novia Stephany Paola Ruiz

quien en estos últimos años me ha acompañado apoyándome durante el tiempo que realice este proyecto y compartiendo junto a mi muchas experiencias tanto buenas como malas, demostrándome su cariño y amor al igual que por ella siento, mis primos con quienes en general he compartido mucho y de los cuales he aprendido de sus experiencias y enseñanzas y a Porfiria con quien compartí y quien cuidó de mi y mi hermana siendo parte de la familia.

A mis amigos y compañeros con quien viví y compartí durante mucho tiempo entre risas, rabias y desgracias, pero teniendo siempre en frente las ganas de seguir y luchar por nuestros ideales y creencias, pudiendo nombrarlos a todos pero sabiendo que siempre serán reflejo de triunfo y gloria, recordándolos a todos siempre y esperando haber sido una parte importante de ellos como ellos lo son de mí.

A la Universidad de Oriente en su Departamento de Electricidad, por recibirme en tan prestigiosa institución donde me forme bajo la tutela de diversos profesores y guías de quienes aprendí mucho tanto en lo técnico como lo personal, influyendo esto en el profesional en que hoy me he convertido.

A Ezomar Uzcategui y Luis Suarez quienes más que tutores de este proyecto se convirtieron en amigos y guías al igual que Hernán Rodríguez, quienes siempre estuvieron pendientes de brindar su ayuda incondicional para llevar a cabo esta meta, brindando las herramientas necesarias para el mismo y a Jerson Hernández que más que un compañero de trabajo fue un amigo en las buenas y en las malas y al final logramos la meta.

A todo el personal de Servicios Eléctricos de PDVSA- San Tomé por recibirme en tan valiosa institución y brindarme el apoyo para concretar y realizar las labores del este proyecto, sin contar una experiencia laboral y compañerismo único, Demostrando ser no solo una empresa productora si no una empresa unida de compañeros y amigos donde el triunfo y éxito se vive día tras día.

A todos quienes me han dado fuerzas, a todos quienes me han ayudado y mostrado el camino.

Eternamente gracias...
Rafael Ángel Narváez.

INDICE GENREAL.

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA.	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
INDICE GENREAL.....	ix
ÍNDICE DE TABLASY FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xix
RESUMEN.....	xxiv
INTRODUCCIÓN	xxv
DESCRIPCION DEL PROBLEMA.	28
1.1. PETROLEOS DE VENEZUELA, S. A. (PDVSA).....	28
1.1.2. RESEÑA HISTORICA.....	28
1.1.3. UBICACIÓN GEOGRAFICA.....	31
1.1.4. SERVICIOS ELECTRICOS PDVSA-SAN TOMÉ.	33
1.1.4.1. FUNCIONES BASICAS DE LA GERENCIA DE SERVCIOS ELÉCTRICOS.....	34

1.1.4.2. ESTRUCTURA OPERACIONAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS.	35
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	36
1.2.2. PROBLEMAS A FUTURO.	39
1.2.4. DESCRIPCIÓN DEL AREA AFECTADA.	40
1.2.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.	41
1.3. OBJETIVOS PROPUESTOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.	41
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.	41
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	41
1.3.3. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS.	42
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	45
2.1. ANTECEDENTES.	45
2.2. ASPECTOS GENERALES.	47
2.2.1. METODOS DE EXTRACCIÓN ARTIFICIAL DE CRUDO.	47
2.2.1.1. BOMBEO MECANICO (BM).	49
2.2.1.2 BOMBEO HIDRÁULICO (BH).	51
2.2.1.3 LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR GAS (LAG).	52
2.2.1.4. BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (BCP).	52
2.2.1.5. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES).	55
2.2.2. MOTOR ELÉCTRICO ASOCIADO.	57
2.2.3. ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y ELEMENTOS DE ESTADO SÓLIDO PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR.	58

2.2.3.1. VARIADOR DE FRECUENCIA.....	58
2.2.3.2. CONSTITUCIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA. .	59
2.2.4. ELEMENTOS BASICOS DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA.	60
2.2.4.1. ETAPA DE RECTIFICACIÓN.	60
2.2.4.2. CIRCUITO DC O FILTRO INTERNO.....	64
2.2.4.3. ETAPA INVERSORA.	64
2.2.4.4. ETAPA DE CONTROL.....	65
2.2.5. TIPOS DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.	67
2.2.5.1. INVERSOR CON FUENTES DE VOLTAJE (VVI).....	67
2.2.5.2. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM).....	68
2.2.5.3. INVERSOR DE FUENTE DE CORRIENTE.....	68
2.3. SEÑALES ARMÓNICAS.	69
2.4. DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	70
2.4.1. INDICE DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	72
2.4.1.1. DISTORSIÓN TOTAL DE VOLTAJES.....	73
2.4.1.2. DISTORSIÓN TOTAL DE CORRIENTES.....	74
2.5. ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS.	74
2.5.1 EFECTO DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA.	76
2.5.1.1. RESONANCIA ARMÓNICA.....	77
2.5.1.1.1. RESONANCIA EN PARALELO.	79
2.5.1.1.2. RESONANCIA EN SERIE.	79

2.6. TRAYECTORIA DE LOS ARMÓNICOS.....	79
2.7. CLASIFICACIÓN DE LOS ARMÓNICOS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO EN LAS REDES DE SECUENCIA.....	80
2.7.1. SECUENCIA POSITIVA. (Rotación directa).	80
2.7.2. SECUENCIA NEGATIVA. (Rotación inversa).	81
2.7.3. SECUENCIA CERO.....	81
2.8. NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICOS.....	82
2.8.1. GRANDES CONVERTIDORES DE POTENCIA.....	82
2.8.2. TERMINALES EN HVDC.....	82
2.8.3. HORNOS DE INDUCCIÓN.....	84
2.8.4. CONVERTIDORES DE MEDIANO TAMAÑO.....	85
2.8.5. CONTROLADORES DE MOTORES DE A.C.	85
2.9. CRITERIOS Y BASES LEGALES PARA LA EVALUACIÓN DE ARMÓNICOS EN AL CARGA CONECTADA A LOS CIRCUITOS DE LA S/E MELONES OESTE.....	86
2.9.1. LIMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE (THDI).....	87
2.9.2. LIMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJES (THDV).	89
2.10. FILTRADO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.....	90
2.10.1. FILTRADO PASIVO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.	90
2.10.1.1. FILTROS SERIE.....	91
2.10.1.2. FILTROS SHUNT O PARALELO.....	91
2.10.2. FILTRADO ACTIVO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.	93
2.11. FLUJO DE CARGA ARMÓNICO.....	94

2.12. ANALISIS MEDIANTE SERIES DE FOURIER PARA ARMONICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA.	98
2.13. APROXIMACIONES PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA DE SEIS (6) PULSOS.	99
METODOLOGIA Y TECNICAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO.	107
3.1. TIPO DE INVESTIGACION.	107
3.2. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.	107
3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA A NIVEL DE TRANSMISION DE PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.....	108
3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE. .	111
3.4.1. TRANSFORMADOR PRESENTE EN LA SUB ESTACIÓN MELONES OESTE.	112
3.4.2. ESTACIÓN DE BOMBEO MELEN.....	114
3.4.3. CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN CARAPA I Y II.	116
3.4.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS Y LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.....	123
3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA USADOS POR PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.....	125
3.6. CALCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA A CONSIDERAR.	127
3.7. TECNICAS DE MEDICION Y REGISTRO DE LAS COMPONENTES ARMONICAS.....	129
3.7.1. PASOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO POWER LOGGER 1735 MARCA FLUKE PARA EL REGISTRO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.....	131

3.7.2. PASOS PARA LA ACTIVIDAD DE MEDICIÓN EN CALIENTE DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS EN LOS VARIADORES A NIVEL DE 480V.	137
3.8. TÉCNICAS DE MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE DE PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.....	138
3.8.1. SECCIONADORES.....	141
3.8.2. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	141
3.8.4. MOTOR DE INDUCCIÓN.....	142
3.8.5. TRANSFORMADOR.....	143
3.8.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE.	144
3.8.7. MODELADO DE CARGAS CONCENTRADAS.	144
3.8.8. MODELADO DE LOS CABLES.....	145
3.8.9. MODELADO DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA DE SEIS (6) PULSOS. (CARGAS NO LINEALES).....	146
3.8.10. MODELADO DE LOS FILTROS DE ARMÓNICAS.....	148
3.9. PROPUESTAS PARA LA INCORPORACIÓN DE LA MACOLLA KARIÑA AL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE.....	149
PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	151
4.1. RESUMEN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS.....	151
4.2. VALORES TEORICOS DE THDV (%) EN LOS VDF.....	158
4.3. RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA ARMÓNICO OBTENIDOS DE LAS SIMLUACIONES EN EL PROGRAMA ELECTRICAL	

ENGINEERING SOFTWARE POWER SYSTEM ANALYSIS SOFTWARE (ETAP).	167
4.4. SELECCIÓN Y DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.....	180
4.5. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	198
CONCLUSIONES Y RECOMENACIONES.....	201
5.1. CONCLUSIONES.....	201
5.2. RECOMENDACIONES.	203
GLOSARIO DE TERMINOS.	204
BIBLIOGRAFÍA.....	205
ANEXO A.....	¡Error! Marcador no definido.
A.1. Fotografías tomadas mientras se realizaba las mediciones.....	¡Error! Marcador no definido.
A.2. Registro Armónico tomado con el equipo Power Logger 1735 marca Fluke.	¡Error! Marcador no definido.
A.1.1. Fotografías tomadas mientras tomaba la medición a secundario de los TC y TP de las barras de la subestación Melones Oeste. A) Conexión de los toroidales y pinzas a los secundarios de los TC y TP. B) Equipo Power Logger 1735 descargando registros al computador. ¡Error! Marcador no definido.	
A.1.2. Fotografías tomadas a la subestación Melones Oeste. A) Transformador principal TX1. B) Estructura física de la subestación.	¡Error! Marcador no definido.
A.1.3. Fotografías tomadas mientras se ejecuta la medición a la entrada de los variadores. A) Medición pozo Mel 206. B) Medición al pozo Mel 261.....	¡Error! Marcador no definido.

A.1.5. Fotografías tomadas mientras se ejecuta la medición a la entrada de los variadores. A) Medición pozo Mel 272. B) Medición al pozo Mel 297.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B.....	¡Error! Marcador no definido.
B.2. Diagrama Unifilar de la Subestación Melones Oeste, configuración actual. CTO Carapa II.....	¡Error! Marcador no definido.
B.3. Diagrama Unifilar de la Subestación Melones Oeste, configuración actual en ETAP. CTO Carapa I.....	¡Error! Marcador no definido.
B.4. Diagrama Unifilar de la Subestación Melones Oeste, configuración actual en ETAP. CTO Melen 1,1 y 1,2.....	¡Error! Marcador no definido.
B.5. Diagrama Unifilar Sistema Eléctrico Subestación Melones Oeste, configuración Propuesta 1 en ETAP. CTO Carapa II.	¡Error! Marcador no definido.
B.6. Diagrama Unifilar Sistema Eléctrico Subestación Melones Oeste, configuración Propuesta 1 en ETAP. CTO Carapa I.	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS.

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1. <i>Clasificación de las componentes armónicas según las redes de secuencia. (ESP OIL 2005. Cap. 3. p.33).</i>	81
Tabla 2.2: <i>Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general de (120 V a 69 kV). (IEEE-519 1992).</i>	88
Tabla 2.3: <i>Limites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV. (IEEE-519 1992).</i>	89
Tabla 2.4. <i>Limites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV. (IEEE-519 1992).</i>	89
Tabla 2.5. <i>Límites de distorsión de voltajes. (IEEE Std. 519 – 1992).</i>	90
Tabla 2.6. <i>Aproximación de las constantes A_1 y B_1 para el calculo de las corrientes armónicas en un arreglo de filtro DC tipo inductivo. (IEEE. Paice D. P.103).</i>	104

<i>Tabla 2.7. Aproximación de las constantes A_{ic} y B_{ic} para el calculo de las corrientes armónicas en un arreglo de filtro DC tipo capacitivo. (IEEE. Paice D. P.105).</i>	104
<i>Tabla 3.1. Voltaje de las subestaciones a nivel de transmisión.</i>	110
<i>Tabla 3.2. Características Técnicas Transformador 115 kV/13.8 kV.</i>	113
<i>Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste.</i>	117
<i>Tabla 3.4. Caracterización total de la carga conectada.</i>	121
<i>Tabla 3.5. Parámetros para el dimensionamiento de las crucetas.</i>	124
<i>Tabla 3.6. Caracterización de los variadores de frecuencia.</i>	125
<i>Tabla 3.7. Numero de muestras aproximado.</i>	128
<i>Tabla 3.8. Tabal de conexión de las pinzas de voltaje y corriente. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.</i>	132
<i>Tabla 3.9. Tabal de conexión de las pinzas de voltaje y corriente. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.</i>	136
<i>Tabla 3.10. Componentes de un sistema de potencia para el análisis de armónicos. . (IEEE Std. 399 – 1997).</i>	139
<i>Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas.</i>	152
<i>Tabla 4.2. Promedio de la corrientes armónicas aportadas por cada variador de frecuencia.</i>	158
<i>Tabla 4.3. Corrientes de carga y de cortocircuito de los transformadores.</i> ...	160
<i>Tabla 4.4. Resultados teóricos para el THDv (%).</i>	162
<i>Tabla 4.5. Resumen de resultados del flujo de carga, incluyendo las propuestas 0,1, y la configuración actual.</i>	165

Tabla 4.6. <i>Distorsión total de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito</i>	169
Tabla 4.7. <i>Distorsión individual de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito</i>	172
Tabla 4.8. <i>Distorsión individual de corriente encontrado en las líneas y las entradas de las barras más resaltantes</i>	174
Tabla 4.9. <i>Distorsión individual de corriente encontrado en las líneas y las entradas de las barras en la configuración Propuesta 1</i>	176
Tabla 4.10. <i>Valores de diseño de los filtros para la subestación Melen</i>	182
Tabla 4.11. <i>Valores de diseño de los filtros sintonizados</i>	183
Tabla 4.12. <i>Distorsión total de voltaje THDv (%) en cada barra</i>	184
Tabla 4.13. <i>Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal</i>	186
Tabla 4.14. <i>Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal en la configuración de la propuesta 1</i>	188
Tabla 4.15. <i>Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración actual luego del filtrado</i>	190
Tabla 4.16. <i>Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración de la propuesta 1 luego del filtrado</i>	191

ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura. 1.1</i> Ubicación geográfica del distrito San Tomé resaltando en rojo la zona de Melones. (Golindano R. 2009. p 20)	33
<i>Figura 1.2.</i> Diseño organizacional de Servicios Eléctricos San Tomé. (Gerencia de Servicios Eléctricos San Tomé. 2010).....	36

<i>Figura.2.1.</i> Esquema de pozo de extracción de petróleo por flujo natural. Departamento de optimización y producción de PDVSA. Distrito San Tomé.	48
<i>Figura 2.2.</i> Unidad de Bombeo mecánico, “balancín”.....	49
<i>Figura 2.3.</i> Modelo completo de la unidad de bombeo mecánico. http://www.consrv.ca.gov/dog/well.html	51
<i>Figura 2.4.</i> Bomba de cavidad progresiva (BCP) de un solo motor.	54
<i>Figura 2.5.</i> Tornillo inferior de la bomba de cavidad progresiva. http://www.neopp.com/Technology/Artificial_Lift/PCP/pcp.htm	55
<i>Figura 2.6.</i> Rectificador Trifásico Tipo Puente No Controlado. Rodríguez. Curso El VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.....	61
<i>Figura 2.7.</i> Voltaje de salida del Rectificador Trifásico Tipo Puente No Controlado. Rodríguez. Curso El VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.....	62
<i>Figura 2.8.</i> Esquema de un Variador de Frecuencia. Rodríguez. Curso El VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.	66
<i>Figura 2.9.</i> Variador de Frecuencia del tipo Inversor Con Fuente de Voltaje. Rodríguez. Curso El VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.	67
<i>Figura 2.10.</i> Señales armónicas en comparación con la fundamental a 60Hz; a) segunda armónica, b) tercera armónica, c) cuarta armónica y d) quinta armónica. (ESP OIL 2005.cap1. p 2).	69
<i>Figura 2.11.</i> Representación de corrientes armónicas ideales a un circuito. (Stefanova. E 2005.p 5).	72
<i>Figura 2.12.</i> Sistema de potencia con carga no lineal acoplada y su forma de onda.....	76

<i>Figura 2.13.</i> Espectro de las corrientes armónicas en un convertidor de frecuencia de 6 pulsos. A) Forma de onda de la corriente. B) Espectro armónico.	84
<i>Figur.2.14.</i> Controlador trifásico de enlace DC (típico variador de frecuencia).	86
<i>Figura 2.15.</i> Filtro pasivo en serie.	91
<i>Figura 2.16.</i> Filtro sintonizado simple. A) Diseño del filtro. B) Comportamiento en frecuencia. (Gallego R. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. 2003. P.22).	92
<i>Figura 2.17.</i> Filtro sintonizado pasa alto. A) Diseño del filtro. B) Comportamiento en frecuencia. (Gallego R. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. 2003. P.23).	93
<i>Figura 2.18.</i> Análisis del funcionamiento del tiristor ante un semiciclo positivo.	101
<i>Figura 2.19.</i> Circuitos filtros DC del tipo inductivo o capacitivo. (IEEE. Paice D. P.99).	102
<i>Figura 2.20.</i> Forma de onda de salida de un rectificador controlado de seis (6) pulsos. A) Circuito. B) Forma de onda. Muhammad H. Rashid.(2006) Ca5.p.167.	106
<i>Figura 3.1.</i> Sistema de Transmisión Distrito San Tome.	109
<i>Figura 3.2.</i> Diagrama Unifilar S/E Melones Oeste 115 kV.	112
<i>Figura 3.3.</i> Diagrama unifilar de la subestación Melones Oeste a nivel de 13.8 kV.	113
<i>Figura 3.4.</i> Total de pozos con variador de frecuencia Vs. pozos en conexión de arranque directo.	122

<i>Figura 3.5.</i> Cantidad de motores según su potencia en los circuitos Carapa I y II.	122
<i>Figura 3.6.</i> Dimensionamiento de crucetas. A) Cruceta para postes de alineación. B) Cruceta para poste de amarre.	123
<i>Figura 3.7.</i> Porcentaje de muestras a tomar.	128
<i>Figura 3.8.</i> Pantalla de programación del Power Logger 1735. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.	131
<i>Figura 3.9.</i> Conexión para redes de en conexión estrella. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.	133
<i>Figura 3.10.</i> Conexión para redes de en conexión Delta. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.	133
<i>Figura 3.11.</i> Visualización de armónicas de forma puntual. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.	134
<i>Figura 3.12.</i> Visualización de armónicas en forma de registro. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.	135
<i>Figura 3.13.</i> Modelo del seccionador M907 del circuito Carapa II.	141
<i>Figura 3.14.</i> Modelo de las línea principal del circuito Carapa II.	142
<i>Figura 3.15.</i> Parámetros para el modelado de las líneas de distribución.	142
<i>Figura 3.16.</i> Modelo del motor de inducción presentado por ETAP.	143
<i>Figura 3.17.</i> Modelo y datos resaltantes del transformador para la simulación.	143
<i>Figura 3.18.</i> Modelado del circuito de alimentación de la subestación Melones Oeste.	144
<i>Figura 3.19.</i> Modelo de carga concentrada.	145
<i>Figura 3.20.</i> Modelo para la simulación del cable.	146

<i>Figura 3.21.</i> Cargado de datos medidos en las nuevas librerías.	147
<i>Figura 3.22.</i> Carga de la componente armónica al modelo del variador de frecuencia.	148
<i>Figura 4.1.</i> Sistema simplificado para el cálculo al punto de corto circuito (PCC).	159
<i>Figura 4.2.</i> Forma de onda vista en la protección diferencia del transformador TX1 de la subestación Melones Oeste.	161
<i>Figura 4.3.</i> Pantalla de programación para bloqueo por armónicos.	161
<i>Figura 4.4.</i> Porcentaje de corrientes armónicas en base de 1 MVA en la configuración actual.	177
<i>Figura 4.5.</i> Corrientes armónicas en base a 1 MVA en la configuración propuesta 1.	178
<i>Figura 4.6.</i> Corrientes armónicas en base a la fundamental en la configuración actual.	179
<i>Figura 4.7.</i> Corrientes armónicas en base a la fundamental en la configuración propuesta 1.	179
<i>Figura 4.8.</i> Porcentaje de corrientes armónicas después de filtrar en base de 1 MVA en la configuración actual.	194
<i>Figura 4.9.</i> Porcentaje de corrientes armónicas después de filtrar en base de 1 MVA en la configuración propuesta 1.	195
<i>Figura 4.10.</i> Corrientes armónicas en el transformador TX1 después del filtrado en la configuración actual.	195
<i>Figura 4.11.</i> Corrientes armónicas en el transformador TX1 después del filtrado en la configuración Propuesta 1.	196
<i>Figura 4.12.</i> Filtro de armónico de modo PAD- Mounted.	197

Figura 4.13. Filtros de armónico incorporado al poste..... 197

RESUMEN.

En este trabajo se desarrolla un estudio de armónicos en un sistema de potencia formado por circuitos de distribución en una red trifásica, donde, se encuentran gran número de cargas no lineales (variadores de frecuencia), que produce distorsión tanto en las ondas de corriente como de voltaje.

El estudio se centra en la subestación Melones Oeste que forma parte del sistema de transmisión de PDVSA Distrito San Tomé, para la realización del estudio se emplea la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP). Con el fin de modelar el sistema de la subestación y sus circuitos de distribución, donde las componentes armónicas inyectadas por los variadores se miden directamente a la entrada de cada variador, dato que se emplea en la simulación como parte del flujo de carga armónico.

Conociendo la distorsión en cada punto del circuito se selecciona los puntos de mayor impacto armónico, seleccionando y diseñando filtros para aminorar la distorsión armónica en los circuitos sin disminuir la escalabilidad del sistema.

INTRODUCCIÓN

La gerencia de Servicios Eléctricos en el distrito San Tomé, responsable de planificar, operar y mantener, en forma eficiente la transmisión y distribución de la energía, velando por la confiabilidad del Sistema Eléctrico de PDVSA, llevó a cabo un diagnóstico referido a la calidad de energía vista en la subestación Melones Oeste, gracias a la incorporación de cuatro bombas multifarias con sus respectivos variadores de frecuencia, en la estación de bombeo MELEN, que esta conectada a la subestación, y al escalable uso de cargas no lineales (Variadores de frecuencia) en el circuito Carapa, para controlar la velocidad y el arranque de los motores de las bombas de extracción artificial de crudo.

En este diagnóstico se detectaron distorsiones armónicas que afectaban la calidad del servicio y a la protección diferencial del

transformador de potencia de la subestación. En vista de esto se decide realizar la división del circuito carapa en dos partes, que son Carapa I y Carapa II. Esta maniobra se realizó mediante la apertura de un seccionador identificado como M1211, y la conexión como fuente de la parte seccionada a una salida de reserva existente en la subestación, quedando por realizar el presente estudio armónico completo incluyendo una jornada de medición de armónicos a una muestra de la carga conectada a los circuitos de carga de la subestación comprendiendo que con este se logra la cuantificación e identificación del problema y sus causas.

El estudio realizado contempla la elaboración del modelo del sistema de potencia de la subestación basado en los datos reales levantados en el campo asociado, tomando en cuenta la modificación realizada y la futura incorporación de nuevas cargas del tipo no lineal, realizando propuestas factibles de resolución, para el filtrado de las componentes armónicas inyectadas al sistema, y proponiendo un mejor seccionado del circuito para el equilibrio de las cargas trifásicas conectadas.

DESCRIPCION DEL PROBLEMA.

1.1. PETROLEOS DE VENEZUELA, S. A. (PDVSA).

Petróleos de Venezuela, S.A. (PDVSA) es una de las corporaciones más importantes del mundo, encargada del desarrollo de la industria petrolera y carbonífera, y ahora guiada con un enfoque social con el fin de brindar el apoyo necesario a las comunidades dando uso equitativo a las riquezas del estado. Entre sus funciones están planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades operativas de sus divisiones, tanto en Venezuela, en sus cinco grandes sectores: Occidente, Oriente, Faja del Orinoco, Sur y Costa Afuera, como en el exterior.

PDVSA lleva adelante actividades en materia de exploración y producción para el desarrollo de petróleo y gas, así como explotación de yacimientos de carbón.

1.1.2. RESEÑA HISTORICA.

El primer registro de producción petrolera en Venezuela data de 1878, sin embargo, en el año 1914 fue cuando se inicio el desarrollo comercial de crudo a nivel nacional. El 30 de agosto de 1975, luego de la



nacionalización del petróleo, se crea Petróleos de Venezuela. Sociedad Anónima (PDVSA). Con el fin de coordinar, planificar y supervisar las actividades de las empresas filiales que operaban en Venezuela y en el exterior.

Desde enero de 1976, Venezuela, de acuerdo a la ley que reserva al estado la industria y comercio de los hidrocarburos, nacionaliza la industria petrolera, quedando el estado venezolano con el exclusivo derecho de todo lo relacionado a la explotación del territorio nacional. Quedando constituido así Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), teniendo como subsidiarias al grupo de compañías operadoras de petróleo existentes en Venezuela para esa fecha. De esta forma, la Mene Grande Oil Company pasó a constituirse como Meneven, y posteriormente se constituían en nuestro país, las empresas Lagoven, Maraven y Corpoven.

A partir de Junio de 1986, por decisión de (PDVSA), las empresas S.A. Meneven y Corpoven S.A., fueron fusionadas en una sola empresa con el nombre de Corpoven S.A. Surgiendo un nuevo esquema de organización, donde la empresa tiene la capacidad de llevar a cabo con éxito, la totalidad de las operaciones petroleras, y las actividades de: exploración, explotación, producción, refinación, transporte y comercialización nacional e internacional, tanto de crudos como de gas natural y productos refinados. Es el 1 de Enero de 1998 que la gerencia de PDVSA debido a un proceso de transformación decide restaurar y consolidar las funciones operativas, mediante la fusión de sus filiales; LAGOVEN, MARAVEN y CORPOVEN, S.A., en tres (3) grandes divisiones funcionales que conforman PDVSA Petróleo y Gas, de ellas se desprenden subdivisiones como lo son; Exploración y Producción, Manufactura y Mercadeo, y Servicios.



Exploración y Producción se encargan de desarrollar las actividades de búsqueda de reservas y explotación de petróleo y gas natural, así como de los negocios del carbón, de la participación de la industria en los contratos de exploración a riesgo y producción en áreas nuevas bajo el esquema de ganancias compartidas y en las asociaciones estratégicas para el desarrollo de los crudos pesados de la Faja del Orinoco.

La responsabilidad de Manufactura y Mercadeo pasa por integrar todos los sistemas de refinación ubicados en el país, incluso la refinería Isla, ubicada en Curazao; igualmente comprende la comercialización internacional de hidrocarburos, de productos en el mercado industrial interno, y en el mercadeo al detal.

En octubre de 2000, se dio inicio a la reestructuración de la empresa, donde estas divisiones se convierten en:

- Exploración, Producción y Mercadeo.
- Refinación, Suministro y Comercio.
- Gas.

El 01 de mayo 2007, se llevo a cabo la recuperación y nacionalización de los Convenios de Asociación de la Faja Petrolífera del Orinoco y de Exploración a Riesgo y Ganancias Compartidas. El Complejo Petrolero, Petroquímico e Industrial de JOSE, sede de los mejoradores de las operadoras SINCOR, Petrozuata, Ameriven, Cerro Negro y Sinovensa, fue el escenario donde se celebró la nacionalización de estas empresas petroleras que estaban en manos de transnacionales, y que desde ese día pasaron a empresas con mayoría accionaria del Estado venezolano.



La Nacionalización de la Faja Petrolífera del Orinoco se llevó a cabo, luego del proceso de migración que se desarrolló de acuerdo a un cronograma establecido previamente, y que culminó de manera exitosa, lo que incluyó previamente la firma de acuerdos de Entendimiento con 10 de las 13 empresas extranjeras que operaban en la Faja Petrolífera del Orinoco y en los Convenios de Exploración a Riesgo y Ganancias Compartidas.

En los últimos años PDVSA se ha convertido en una de las empresas petroleras mas grandes del mundo, teniendo la mas basta reserva de petróleo a nivel mundial, realizando acuerdos entre empresas internacionales y forjando empresas mixtas para incrementar y mejorar la producción de hidrocarburos.

1.1.3. UBICACIÓN GEOGRAFICA.

Petróleos de Venezuela posee una cede principal en la capital de la Republica Bolivariana de Venezuela, sus principales sedes operativas se encuentran en los estados Anzoátegui, Falcón, Zulia y Monagas. Y se divide en distritos estructurados por unidades de producción y procesos, conformados en bloques cada uno bajo una dirección general.

El área operativa de PDVSA en la faja del Orinoco se divide en cuatro (4) bloques. Los cuales son; Ayacucho, Ubicado al sur del estado Anzoátegui, ocupando también parte del norte del estado Bolívar. Boyacá, ubicado al occidente del estado Guárico, abarcando también parte de los estados Barinas y Apure. Carabobo, ubicado en el estado Monagas. Y por ultimo el bloque Junín, que se encuentra al sur del estado Anzoátegui limitando con el bloque Ayacucho y con el estado Guárico.



En el Bloque Ayacucho se encuentra el Distrito San Tomé y Petro Piar. Realizándose la pasantía de grado en el Distrito San Tomé.

Este distrito se encuentra Ubicado en la Mesa de Guanipa, al Sur del Estado Anzoátegui, jurisdicción del distrito Freites, Municipio Cantaura; comprendiendo parte de la región Centro Oeste del Estado Monagas y parte de la región Sur del estado Guárico. Posee un área total de 17.085 Kilómetros Cuadrados, 135 Kilómetros en dirección Norte-Sur y 180 Kilómetros en dirección Este-Oeste.

Los 17.085 Kilómetros Cuadrados están dividido en dos áreas: las áreas Tradicionales (Crudo Liviano-Mediano) que abarca 8.585 Kilómetros Cuadrados del área total y áreas no tradicionales (Crudo Pesado y Extrapesado) que ocupa 8.5 Kilómetros Cuadrados del área total. Las coordenadas geográficas del Distrito San Tomé están ubicadas dentro de los siguientes puntos observándose en la figura 1.1.

LONGITUD NORTE 63°09'48,8" LONGITUD ESTE 09°08'54,8"

LONGITUD NORTE 65°00'02,7" LONGITUD ESTE 08°30'35,4"

LONGITUD NORTE 67°359'02,2" LONGITUD ESTE 07°51'56,0"

Bajo la Gerencia de SERVICIOS ELECTRICOS de San Tomé en la faja del Orinoco, se realiza el planteamiento del estudio a la subestación Melones Oeste y a todos los circuitos asociados. Dicha subestación se encuentra en el área de pesado, en el campo operacional de nombre Melones (Merey-20). En la figura1.1 se muestra la división de las zonas operativas y se resalta la zona de melones en color rojo.

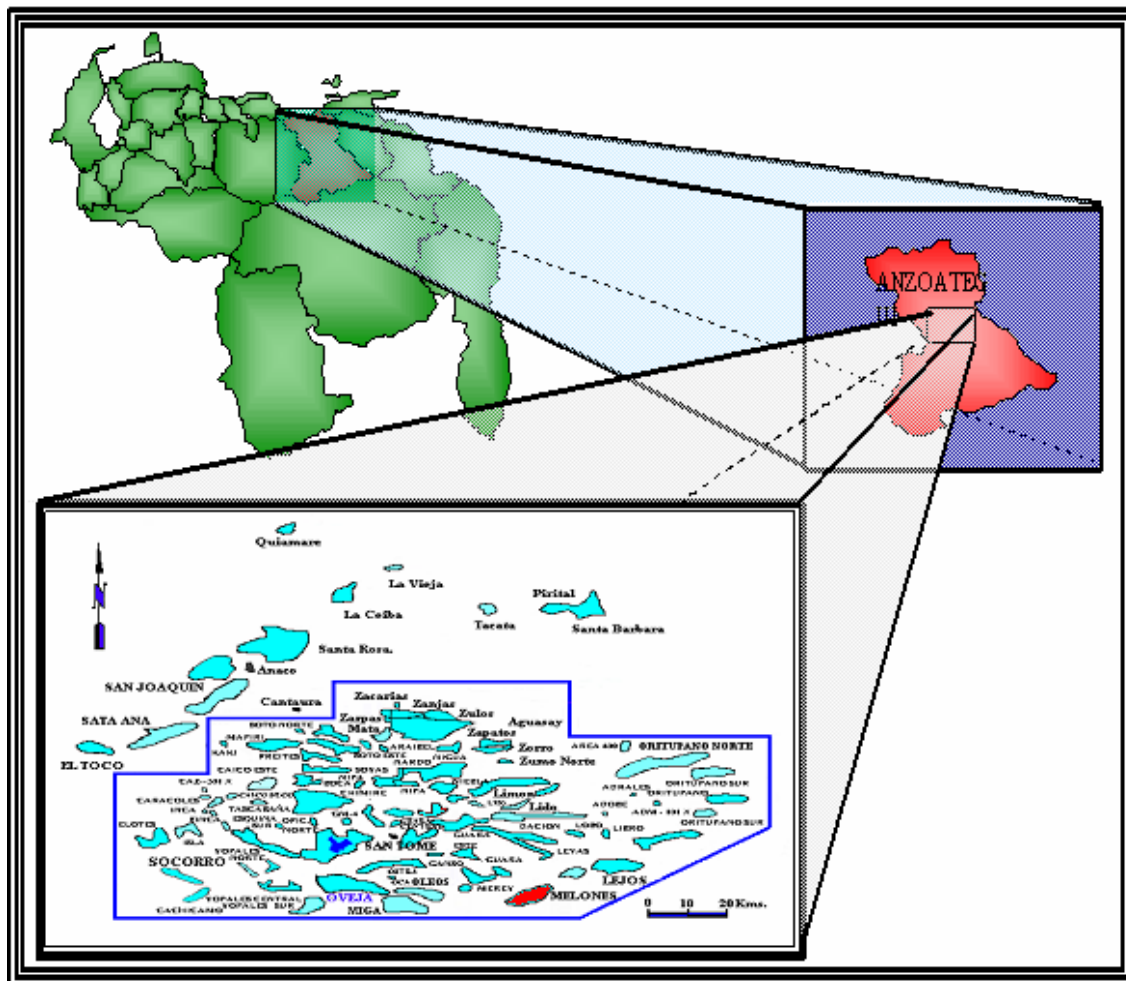


Figura. 1.1 Ubicación geográfica del distrito San Tomé resaltando en rojo la zona de Melones. (Golindano R. 2009. p 20)

1.1.4. SERVICIOS ELECTRICOS PDVSA-SAN TOMÉ.

El Departamento de Servicios Eléctricos de PDVSA en el Distrito San Tomé, tiene como misión suministrar la potencia necesaria para lograr un correcto funcionamiento de todos los sistemas asociados a la extracción, producción, manufactura y manejo de petróleo del Distrito; sin embargo,



ciertos factores externos, como las descargas atmosféricas, objetos que chocan contra las líneas de transmisión y distribución, averías en transformadores, etc. ocasionan fallas, tanto transitorias como permanentes, en el sistema eléctrico de potencia.

En vista de esto es obligación de la gerencia de Servicios Eléctricos atender la fallas del sistema de trasmisión y distribución en el menor tiempo posible para cumplir con la meta de producción del distrito, manteniendo y contemplando la calidad del servicio eléctrico., incluyendo el impacto de la implementación de nuevas tecnologías y equipos al sistema.

1.1.4.1. FUNCIONES BASICAS DE LA GERENCIA DE SERVICIOS ELÉCTRICOS.

- Programar y controlar la ejecución de los mantenimientos productivos y preventivos del sistema de transmisión y distribución de electricidad en el área de operación, industrial y residencial.
- Apoyar y definir estudios para mejorar la confiabilidad y disponibilidad del sistema eléctrico de transmisión y distribución de PDVSA en oriente.
- Establecer y controlar los parámetros de calidad, confiabilidad, oportunidad y seguridad requeridos por los clientes internos y externos en la operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas.
- Programar y controlar las actividades administrativas a fin que la ejecución se desarrolle en función de los presupuestos de operaciones e



investigaciones y que permitan apoyar la definición y formulación de estos presupuestos.

- Cumplir las normas, procedimientos, esquemas y prácticas operacionales a aplicar en el mantenimiento y operación del sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica.
- Establecer y controlar los programas de transmisión integral tanto del personal como de las instalaciones a fin de evitar la ocurrencia de accidentes.

1.1.4.2. ESTRUCTURA OPERACIONAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS.

La estructura y organización de la gerencia de servicios eléctricos en el distrito San Tomé se clasifica actualmente según se muestra en la figura 1.2.

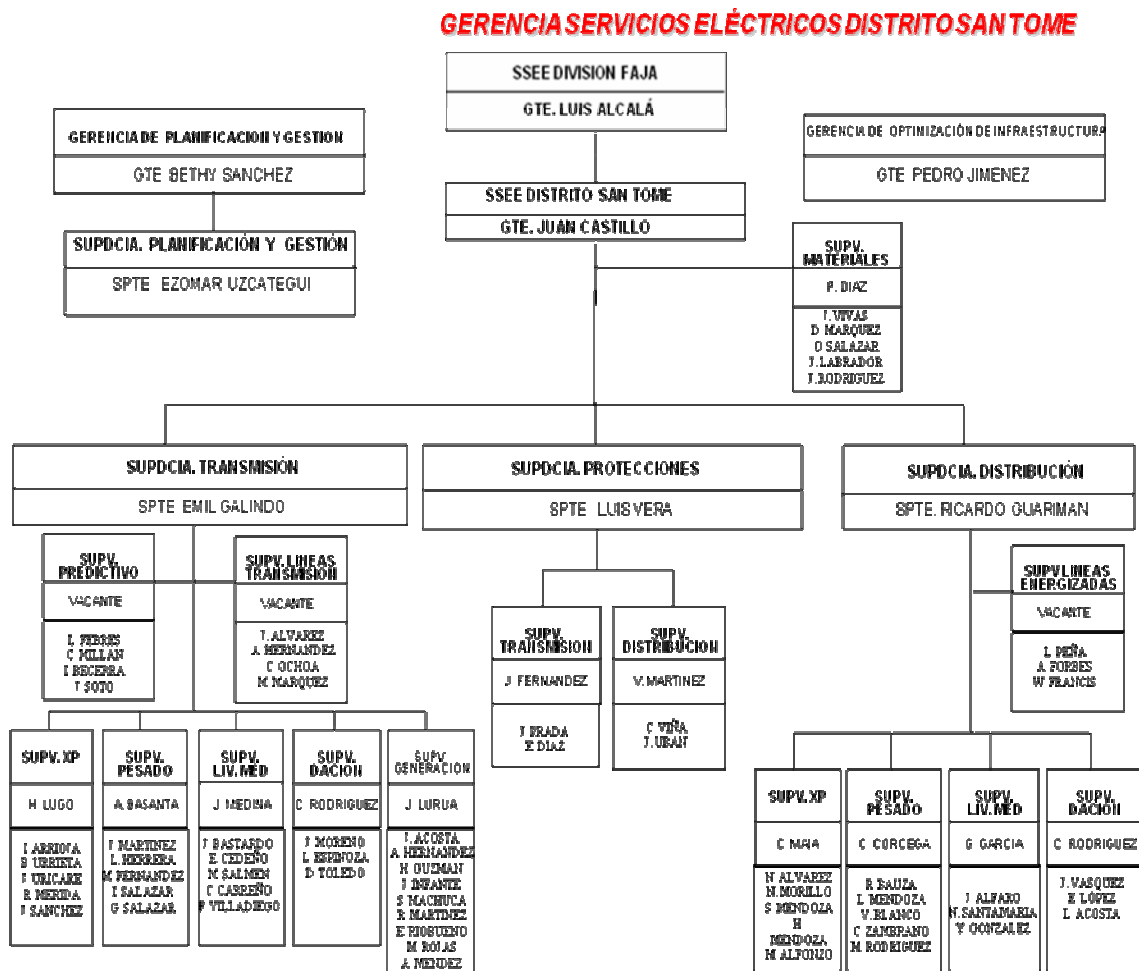


Figura 1.2. Diseño organizacional de Servicios Eléctricos San Tomé.

(Gerencia de Servicios Eléctricos San Tomé. 2010)

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la extracción del crudo en PDVSA, Distrito San Tomé se utilizan esencialmente varios tipos de tecnologías, llamados métodos de extracción artificial, los cuales son, bombeo mecánico (BM), bombeo de cavidad



progresiva (BCP), bombeo electro – sumergible (BES) y extracción por inyección de gas.

Los tres primeros utilizan motores trifásicos para dar el torque necesario al eje de las bombas de levantamiento artificial.

Los motores de las bombas, en especial las adheridas a los metodos BCP y BES, deben ser controlados desde el punto de vista de la velocidad y el torque, para evitar mal funcionamiento en estos sistemas como podria ser la rotura o perdida de la cabilla en el metodo de BCP.

El control de estos parametros de los motores se logra mediante el uso de componentes de electronica de potencia, como lo es el variador de frecuencia, que mediante la manipulación de la magnitud y forma de la señal de alimentacion del motor logra regular la velocidad y esfuerzo hecho por el mismo.

Estos equipos son hechos con la mas alta precisión y son configurados según las condiciones intrinsicas del pozo, es decir, condiciones y características del crudo, permitiendo que durante la operación del motor se controle la condicion de la craga que en este caso es el crudo que se extrae, la siguiente condición que hace de suma importancia el uso de controladores para los motores es la condición de arranque o re arranque, ante fallas o condiciones de cese de operaciones por mantenimiento, entre otras.

Este control se logra mediante la conmutación sincronizada de múltiples tiristores. Al producirse esta gran cantidad de conmutaciones se generan señales que son derivadas de la señal fundamental, a frecuencias



superiores múltiplos de la original, denominadas señales o componentes armónicas, estas nuevas señales de corriente y voltaje se inyectan al sistema sumándose a la señal fundamental distorsionándola y desmejorando la calidad del servicio eléctrico de manera notable, produciendo mal funcionamiento de los equipos, averías y un sobre consumo de potencia eléctrica.

La incorporación actual de estas nuevas tecnologías (cargas no lineales) a los sistemas de distribución, es creciente, y se hace recurrente en los campos operacionales de melones, lugar donde se ha incrementado el uso del método de BCP, incluyendo esto la utilización de variadores de frecuencia de 6 pulsos para el control de los motores.

Los Campo Melones y Lejos pertenecientes a la sección de yacimientos pesados contempla una producción promedio de crudo para los años 2010-2012 de 107 MBD y la producción promedio de gas anual que esta prevista en el PID es de 64.4 MMPCD, con incremento constante hasta finalizar el año 2012. contemplando un crecimiento a nivel de carga operativa en los circuitos del area de Melones, en especial en los circuitos de distribución Carapa 1 y 2, pertenecientes a la S/E Melones Oeste, a nivel de 13,8 kv. Entre estas ampliaciones esta la incorporación al sistema de una nueva macolla de nombre Kariña compuesta de 12 pozos de 150hp, con el método de extracción BCP.

Los variadores usados en el campo de Melones Oeste asociados a los circuitos de Carapa, esta configurados para realizar re arranques de manera controlada para evitar la averia del sistema de bomba y poder continuar la extracción de manera satisfactoria, en un tiempo cordinado según la naturaleza dela falla de suministro, condicion de torque y cantidad de energia



acumulada en el bucle DC. En ellos se puede producir un efecto de back sping que no es mas que ante la parada del motor, el crudo desiente por la cabilla haciendola girar en sentido contrario, para esto se implementan frenos y en otros casos se puede aprovechar energia de este efecto para mantener la configuracion del variador hata que el servicio se restablesca.

La distorsión aportada por estas nuevas tecnologías al sistema de potencia, amerita la realización de un estudio y medición exhaustiva del contenido armónico en puntos estratégicos del sistema que alimenta tanto a las bombas multifásicas, como al circuito de Carapa con el fin de optimizar los niveles de distorsión armónica según lo recomendado por la norma IEEE-519, y con ello el funcionamiento de los equipos del sistema y los recursos que se disponen.

1.2.2. PROBLEMAS A FUTURO.

El impacto Armónico debe ser estudiado y cuantificado para proponer la disminución de ello. De no realizarse la corrección necesaria a la red actual y no establecer el nuevo ingreso de mejores tecnologías para evitar el crecimiento del problema, el sistema se vera saturado e incrementara el ritmo de desgaste de los equipos conectados aumentando el riesgo de fallas tanto en el transformadores como motores. Sin contar que estas componentes disminuyen la calidad de medición de los instrumentos de medición y control de las protecciones. Y el incremento exponencial de reactivos en la red disminuirá el factor de potencia de manera dramática.

Teniendo enfocado el futuro crecimiento de estos circuitos y el uso de variadores para el control del sistema de producción de cada pozo, se hace



necesaria la realización del estudio, para corregir el índice de contaminación Armónica del sistema.

1.2.4. DESCRIPCIÓN DEL AREA AFECTADA.

El sistema de transmisión anillado que interconecta las subestaciones a cargo del distrito San Tomé, se interconecta en dos niveles de alta tensión, los cuales son; 115 KV y 69KV. Estas son subestaciones de alto perfil, con distintas configuraciones de conexión, que tienen como fuente a la subestación La Canoa, de donde se alimenta a la subestación Dobokubi a nivel de 115 kv y saliendo desde dobokubi la alimentación de la subestación Melones Oeste a nivel de 115 kv.

La S/E Melones Oeste, se encuentra ubicada en el área cubierta por el campo operacional de Melones, que es donde se enfocara el estudio por su alta contaminación armónica gracias al uso de variadores de frecuencia. Asociado a esta subestación se encuentran, dos circuitos de distribución a nivel de 13.8 kv llamados carapa 1 y 2, al mismo tiempo que una estación de rebombeo de nombre Melen 1. Estos circuitos se encuentran en la zona sur del Estado Anzoátegui, cercanos carretera nacional, a nivel del kilometro numero 48 contando desde la intersección de El Tigre / Tigrito se pueden localizar dos entradas de carreteras de tierra separas aproximadamente por 5 km. Estas entradas llevan a la red caminos que se utilizan para recorrer los circuitos de la subestación Melones oeste, que son circuitos dedicados a la producción y explotación petrolera, mediante el uso de equipos trifásicos. Contemplando cargas residenciales mínimas comprendidas por fondos existentes en la zona.



A esta subestación se le suma la contribución de Dobokubi, y Guara Oeste a nivel de transmisión.

1.2.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

El estudio se enfoca en la determinación del impacto armónico inyectado al sistema de distribución a nivel de 13,8 KV de la subestación Melones Oeste, gracias al uso de cargas no lineales como lo son los variadores de frecuencia, realizando mediciones directas a la carga y el análisis del comportamiento del sistema de potencia asociado a esta subestación en estado estable mediante el uso de la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).

1.3. OBJETIVOS PROPUESTOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

- Estudiar los fenómenos armónicos que afectan la calidad de la energía eléctrica en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Describir el sistema de potencia a nivel de transmisión y subestaciones de PDVSA-Distrito San Tome.



- ✚ Diagnosticar usando técnicas de medición y registro de campo los valores de las componentes armónicas, factor de potencia, voltaje, corriente y energía a una muestra representativa de la carga de la subestación Melones Oeste.

- ✚ Simular el sistema eléctrico de la subestación Melones Oeste mediante el programa Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP). Para el análisis de los niveles de armónicos inyectados a la red por los variadores de frecuencia conectados en diversos pozos de producción petrolera.

- ✚ Analizar los resultados teóricos, simulados y medidos del impacto armónico en el sistema eléctrico de la subestación Melones Oeste asociado a los pozos de producción petrolera.

- ✚ Proponer modificaciones para el sistema eléctrico de la subestación Melones Oeste para la corrección los efectos negativos derivados de la inyección de componentes armónicas.

1.3.3. ALCANCE Y LIMITACIONES DE LOS OBJETIVOS PROPUESTOS.

El estudio se centra en los sistemas de la subestación Melones Oeste, a nivel de 115 KV y 13,8 KV. Contemplando las cargas asociadas a los circuitos de distribución, como fuentes de distorsión armónica.

El estudio armónico a los circuitos de la subestación Melones Oeste de PDVSA, contempla en si mismo la realización de diversas actividades entre ellas caben destacar como factores fundamentales;



- ✚ Caracterización y cuantificación de la carga operativa relacionada a los circuitos de distribución a nivel de 13,8 KV asociados a la subestación Melones Oeste.
- ✚ Escogencia del número de muestras, basado en la cantidad de carga cuantificada anteriormente. Asumiendo un máximo del 10% de error estadístico.
- ✚ Realizar el levantamiento de la información en campo asociado al circuito, tal como, distancias de líneas de distribución, cotejo entre la caracterización previamente realizada y la el estado actual de la carga operativa en campo.
- ✚ Llevar a cabo las registro de las componentes armónicas a la entrada de cada variador seleccionado previamente, mediante el uso del equipo POWER LOGGER 1735 marca; FLUKE. Que cuenta con certificación ISO 9000.
- ✚ Modelar el sistema de potencia a nivel de distribución asociado a la subestación Melones Oeste de PDVSA, basado en el registro realizado. Usando la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).
- ✚ Obtener los resultados del análisis de Armónicos por parte de la simulación en el circuito, a partir de estos llevar a cabo una propuesta factible para la corrección de los mismos.



Entre las actividades más extensas y dificultosas se encuentra el levantamiento de la información relacionada a estos circuitos, incluyendo tanto equipos asociados como las distancias de las líneas de distribución. Al igual, que la realización del registro de las componentes armónicas, lo que significa realizar la medición a cada carga (pozo) incluida en el la muestra estadística.

Estas actividades se ven acopladas a la disposición de recursos para la movilización y respaldo de la Gerencia de Servicios Eléctricos San Tomé, hacia la zona en estudio y de la factibilidad de acceso a los pozos y secciones de líneas que se encuentren dentro de propiedades privadas como los fundos o que cuya vía de acceso (caminos de tierra) existan y sea posible transitarlas.

La realización del modelo para la simulación del sistema mediante el uso de la herramienta computacional ETAP, se ejecuta con los datos reales y actuales obtenidos según las actividades anteriormente descritas. Mas la validación del modelo presentado mediante el cotejo con bases preexistentes no será posible gracias a que no existen bases previas del circuito, motivo por el cual, se busca llevar a lo real lo más posible el modelo presentado.

2.1. ANTECEDENTES.

Actualmente en PDVSA se incorporan cargas que por definición introducen distorsiones armónicas al sistema de potencia, a pesar de esto actualmente no se encuentran estudios de armónicos realizados en las áreas pertenecientes al Distrito San Tome, Más se pueden nombrar otros estudios realizados para otras áreas de producción petrolera, de la empresa y estudios realizados que cumplan con ciertas condiciones descritas a continuación.

Para la realización del estudio, se consideran trabajos presentados como estudios independientes por parte de Ingenieros Electricistas, al igual que publicaciones echas por editoriales y organizaciones, como también trabajos de grado presentados que guarden relación con referencia al estudio del impacto armónico en sistemas de potencia.

Basado en lo anterior se pueden nombrar entre otros los siguientes antecedentes;

Paice D. En 1996 mediante la IEEE realizó la publicación de un libro llamado **“Power electronic converter harmonics, multipulse methods for**



clean power”. En donde se definen de manera muy específica todo lo referente al impacto armónico en las redes de potencia y en equipos, explicando como realizar cálculos teóricos de las magnitudes de las componentes armónicas en los sistemas de potencia e incluso realizando propuestas para la corrección de las mismas.

Fernández L. En enero del 2002 realizó una evaluación de los niveles de contaminación armónicas en la subestación Morichal de PDVSA, en donde realizó un estudio de las componentes armónicas producidas por los motores asociados a los pozos de producción simulando con el paquete ETAP e incluyendo el modelo y tipo de estructura de los postes implicados, concluyendo que las componentes armónicas pueden ser disminuidas mediante el uso de técnicas de filtrado, realizando así la propuesta del tipo de filtro.

Giampoclaro A. En agosto del 2005, llevó a cabo un análisis teórico de la influencia armónica en el diseño de líneas de transmisión según las normas de PDVSA, usando las ecuaciones hiperbólicas características para el diseño de líneas de alta tensión, concluyendo que en condiciones nominales y de diseño los lineamientos de PDVSA cumplen con los niveles armónicos establecidos en las normas IEEE- 519.

Lumbreras M. En mayo del 2006 llevó a cabo un estudio sobre técnicas de filtrado armónico para compensar los reactivos en la red de manera instantánea, con la implementación de filtros activos. Ejemplificando como los componentes de electrónicos de potencia actuales afectan la calidad de servicio eléctrico gracias a la inyección de corrientes y voltajes armónicos.



García R. Realizo en octubre del 2006 el análisis en la líneas de distribución eléctrica de los efectos armónicos, interarmónicos y subarmónicos, mediante la transformada Wavelet, el cual es un tipo de transformada de Fourier, que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita.

Velásquez D. En abril del 2008 llevo a cabo el estudio de armónicos en el sistema eléctrico de potencia del campo de producción petrolera de Petrozuata, analizando las diversas fuentes de armónicas del sistema, realizando mediciones en los componentes reconocidos como fuentes armónicas del sistema e implementando un flujo de carga armónico en el programa; Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).

2.2. ASPESTOS GENERALES.

2.2.1. METODOS DE EXTRACCIÓN ARTIFICIAL DE CRUDO.

Cuando la energía natural de un yacimiento es suficiente para promover el desplazamiento de los fluidos desde su interior hasta el fondo del pozo, y de allí hasta la superficie, es decir, que el pozo fluye “naturalmente”, el fluido se desplaza como consecuencia del diferencial de presión entre la formación y el fondo del pozo y surge por si solo hacia la superficie.

En este caso la extracción de crudo se realiza mediante la instalación de equipos compuestos por válvulas que contribuyen a la dirección del flujo, para su canalización mediante tuberías hacia estaciones de bombeo,



tanques y diversos dispositivos de almacenamiento o complejos de procesos, este equipo es llamado "árbol de navidad". Una imagen de esto se muestra en la figura 2.1.

Cuando estas condiciones no se reúnen en un pozo, se necesita recurrir a métodos incisivos, aplicando mediante el uso de componentes artificiales la fuerza necesaria para la extracción del crudo desde el subsuelo hacia la superficie.

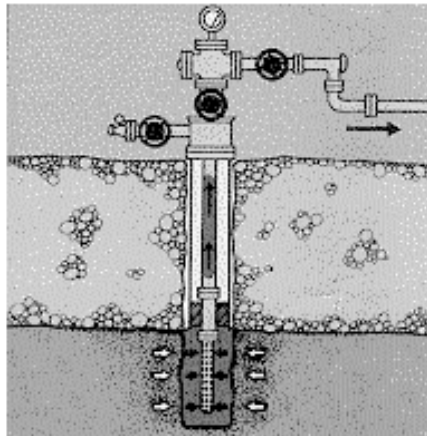


Figura.2.1. Esquema de pozo de extracción de petróleo por flujo natural. Departamento de optimización y producción de PDVSA. Distrito San Tomé.

Como resultado de la explotación de las cualidades naturales del pozo, estas disminuyen, aminorando la producción del mismo, es por esto, que se implementan métodos artificiales de extracción de crudo, caso en los cuales, se aporta un esfuerzo ajeno al pozo para completar así la tarea de extracción del crudo.

Estos esfuerzos adicionales son varios entre ellos se destacan;



2.2.1.1. BOMBEO MECANICO (BM).

Este método se refiere a la extracción mediante el uso de la unidad llamada balancín (figura 2.2), y consiste en la extracción semi-continua de crudo mediante succión, siempre y cuando el petróleo alcance cierto nivel de fluidos que hace posible el uso de este método. Este contempla un arreglo de pesos que hacen juego y con el esfuerzo de un motor se cumple la tarea de extracción, ejecutando un movimiento balanceado de sube y baja.



Figura 2.2. Unidad de Bombeo mecánico, “balancín”.

Las unidades convencionales de bombeo mecánico constan normalmente de los siguientes elementos;



- ✚ **Motor:** Suministra la potencia al sistema, puede ser de combustión interna o eléctrico.

- ✚ La unidad de transmisión de potencia o caja reductora de velocidades.

- ✚ **Equipo de bombeo en superficie:** El cual se encarga de transformar el movimiento rotatorio (primario) en movimiento linealmente oscilatorio.

- ✚ **Bomba de subsuelo:** Es una bomba de pistón de desplazamiento positivo, desde su profundidad de instalación hasta la superficie, que funciona por diferenciales de presión mediante bolas y asientos, para permitir la entrada y sello de fluido en ciclos periódicos sincronizados.

- ✚ **Sarta de cabillas:** Es el elemento de conexión entre el equipo de bombeo y la bomba de subsuelo, la cual transmite el movimiento y la potencia a la bomba de subsuelo.

- ✚ Aquí también puede incluirse la sarta de revestimiento y la de tubería de producción. En algunos casos, se incluyen variadores de frecuencia para controlar la velocidad del motor.

Como ilustración de lo antes mencionado se muestra el complejo de elementos acoplados en la figura 2.3.

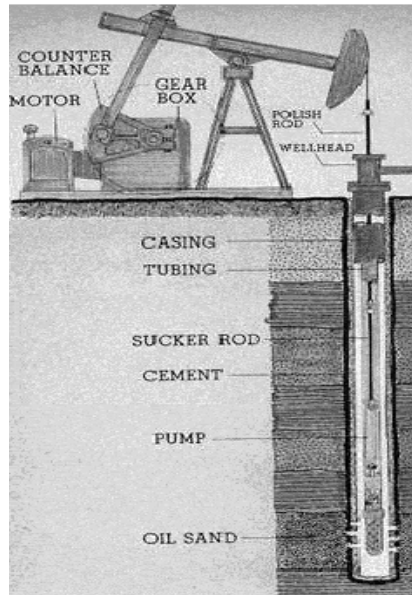


Figura 2.3. Modelo completo de la unidad de bombeo mecánico.

<http://www.consrv.ca.gov/dog/well.html>.

2.2.1.2 BOMBEO HIDRÁULICO (BH).

Los sistemas de Bombeo Hidráulico transmiten su potencia mediante el uso de un fluido presurizado que es inyectado a través de la tubería. Este fluido, conocido como fluido de potencia o fluido motor, es utilizado por una bomba de subsuelo que actúa como un transformador para convertir la energía de dicho fluido a energía potencial o de presión sobre el fluido producido, que es enviado hacia la superficie.

Los fluidos de potencia más utilizados son agua y crudos livianos, los cuales pueden provenir del mismo pozo.



2.2.1.3 LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POR GAS (LAG).

Este método de extracción artificial opera mediante la inyección de algún gas (puede ser gas natural o CO₂, gas carbónico) a alta presión en el anular entre tubing y casing y hacerlo pasar al tubing a través de pequeñas válvulas, con el objeto de disminuir la densidad del fluido producido y reducir el peso de la columna hidrostática sobre la formación, obteniéndose así un diferencial de presión entre el yacimiento y el pozo que permite que el pozo fluya adecuadamente. Las burbujas generadas al expandirse harán ascender el fluido a la superficie arrastrándolo en bloques. La presurización puede ser artificial (desde la superficie) o natural, aprovechando la existencia de gas en alguna capa intermedia. La desventaja que tiene es que está muy limitado por las variables del pozo y en general no alcanza producciones muy elevadas.

A pesar de su aparente simplicidad, es muy complejo de diseñar y un cambio en las variables del pozo, como por ejemplo que se modifique el porcentaje de agua o la presión el gas (ya sea del utilizado para el gas lift o del mismo reservorio), puede desembocar en una falla del sistema que se manifestará por la interrupción de la producción de petróleo y un surgimiento de la producción de gas solamente que es difícil de revertir.

2.2.1.4. BOMBEO DE CAVIDAD PROGRESIVA (BCP).

Las bombas de Cavidad Progresiva son máquinas rotativas de desplazamiento positivo cuyo funcionamiento es similar al de girar un tornillo sin fin. La bomba está en el fondo del pozo, y es comparable con un tornillo gigante recubierto por un polímero muy duro y la fuerza motriz la entrega un motor en la superficie (eléctrico o de combustión). El efecto de bombeo se



obtiene a través de cavidades sucesivas e independientes que desplazan los fluidos hacia arriba desde la succión hasta la descarga de la bomba a medida que el rotor gira dentro del estator.

La transmisión es realizada por un eje de varillas, similar al de las bombas mecánicas, pero en este caso, el movimiento es rotativo, lo cual disminuye mucho el desgaste por rozamiento de las mismas.

El movimiento es generado por un motor – reductor acoplado a las cabillas, el cual es controlado por un variador de frecuencia acoplado a la entrada de las fases del motor eléctrico.

La Bomba de Cavidad Progresiva está compuesta por cuatro componentes básicos:

- 🔧 **Cabezal giratorio:** Su función principal es la de soportar el peso de la sarta de cabillas. Además, evita que ésta última retroceda cuando el sistema se apaga, eliminando el efecto de back sping.
- 🔧 **Movimiento primario (motor):** Su función principal es la de proveer la energía necesaria para mover el equipo de superficie, y por ende la sarta de cabillas y la bomba.
- 🔧 **Equipo de transmisión de potencia:** A través de un conjunto de poleas, cadenas y un sistema hidráulico, se encarga de transmitirle potencia al motor. También se puede incluir dentro de este grupo el Prensaestopas y la Barra Pulida.



🔧 **Variador de frecuencia:** Permite arrancar los motores a bajas velocidades reduciendo los esfuerzos en el eje de la bomba y controlando la velocidad de operación bajo carga de la misma, protegiendo el equipo de variaciones eléctricas.

En la Figura 2.4. Se puede observar una instalación en la superficie de una Bomba de Cavidad Progresiva de PDVSA Distrito San Tomé.



Figura 2.4. Bomba de cavidad progresiva (BCP) de un solo motor.

Seguidamente se puede apreciar la forma que tienen los tornillos internos de las varillas que están sumergidas en el pozo.

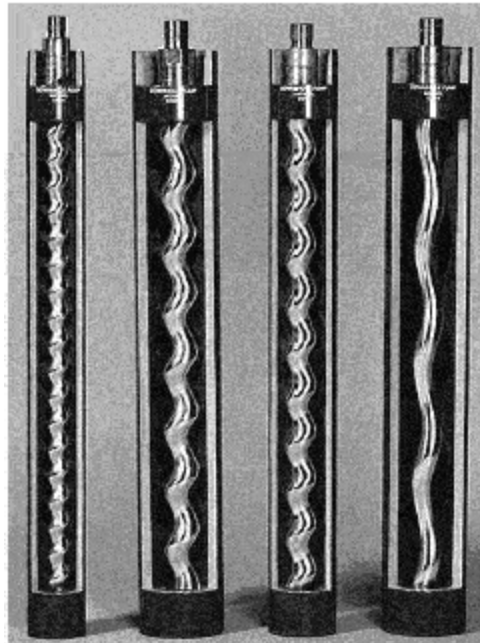


Figura 2.5. Tornillo inferior de la bomba de cavidad progresiva.

http://www.neoppg.com/Technology/Artificial_Lift/PCP/pcp.htm.

Normalmente este tipo de bombas se caracterizan por operar a bajas velocidades con el fin de preservar la integridad de las varillas insertadas en el pozo debido a la larga distancia en la que ellas se encuentran. Haciendo necesario el uso de un elemento capaz de controlar la velocidad del motor teniendo en cuenta la relación de transformación de la caja de engranajes o equipo de transmisión.

2.2.1.5. BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES).

Este Método de Extracción Artificial es aplicable cuando se desea producir grandes volúmenes de fluido, en pozos medianamente profundos y con grandes potenciales.



Sin embargo, los consumos de potencia por barril diario producido son también elevados, especialmente en crudos viscosos. Una instalación de este tipo puede operar dentro de una amplia gama de condiciones y manejar cualquier fluido o crudo, con los accesorios adecuados para cada caso.

El equipo de bombeo electrosumergible cuenta principalmente con los siguientes elementos:

- ✚ **Tablero de control:** Su función es controlar las operaciones en el pozo.
- ✚ **Variador de frecuencia:** Permite arrancar los motores a bajas velocidades reduciendo los esfuerzos en el eje de la bomba, protege el equipo de variaciones eléctricas.
- ✚ **Caja de conexión:** Está ubicada entre el cabezal del pozo y el tablero de control, conecta el cable de energía del equipo de superficie con el cable de conexión del motor. Permite ventear a la atmósfera el gas que fluye a través del cable, impidiendo que llegue al tablero de control.
- ✚ **Motor eléctrico:** Es la fuente de potencia que genera el movimiento a la bomba para mantener la producción de fluidos.
- ✚ **Bomba electrosumergible:** Es de tipo centrífugo–multietapas, cada etapa consiste en un impulsor rotativo y un difusor fijo. El número de etapas determina la capacidad de levantamiento, como la potencia requerida para ello, y el movimiento rotativo del impulsor se imparte de



manera tangencial al fluido que pasa a través de la bomba, creando la fuerza centrífuga que impulsa al fluido en forma radial, es decir, el fluido viaja a través del impulsor en la resultante del movimiento radial y tangencial, generando al fluido verdadera dirección y sentido del movimiento.

2.2.2. MOTOR ELÉCTRICO ASOCIADO.

Generalmente el motor trifásico asociado a una bomba de extracción de crudo debe ser lo mas resistente posible y operar en condiciones de intemperie, normalmente estos motores son de inducción del tipo jaula de ardilla, para trabajos pesados, bajo la norma NEMA D.

Mayormente estos motores son de seis (6) o cuatro (4) polos, con velocidades sincrónicas 1200 y 1800 RPM respectivamente, la potencia de los motores se obtiene según las características intrínsecas del crudo encontrado en el pozo, tomando en cuenta la potencia necesario en el eje para la arrancada, la caja de engranajes que reducirán la velocidad con que opere el balancín, de ser el caso.

El conexionado de estos motores trifásicos depende del sistema de bombeo que se emplee, pudiendo conectarse de manera directa a la alimentación proveniente de un transformador en baja tensión si se usa el método de bombeo mecánico, por el contrario, se debe establecer un sistema de control de la velocidad operación según las características del sistema de bombeo utilizado.



2.2.3. ELECTRÓNICA DE POTENCIA Y ELEMENTOS DE ESTADO SÓLIDO PARA EL CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR.

Primero definimos la electrónica de potencia como la parte de la Electrónica encargada del estudio de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica. Seguidamente encontramos que Fink, D. y Christiansen, D. en su obra “Manual de Ingeniería Electrónica” (1992). Enuncia;

La electrónica de potencia engloba las aplicaciones de elementos electrónicos y componentes asociados a la conversión, control y acondicionamiento de la energía eléctrica. Frecuentemente la necesidad de controlar la energía eléctrica responde al deseo de controlar o regular uno o más parámetros no eléctricos en este caso la velocidad de los motores de las bombas de extracción de petróleo. (Sec. 15, pp. 1-69).

Siendo necesario el control de los parámetros de operación de las bombas de extracción de fluidos en especial de crudo, como lo es la velocidad de operación de las bombas, se hace vital la utilización de estos elementos conocidos como cargas no lineales. Resaltando el variador de frecuencia, que con él, se puede obtener un control de la velocidad tanto de arranque como de operación.

2.2.3.1. VARIADOR DE FRECUENCIA.

Los variadores de frecuencia son los elementos de control asociados a sistemas de potencia que tiene un auge creciente debido a su versatilidad de uso y precisión sobre el control de operación de un motor acoplado, ya que,



estos elementos no solo pueden controlar la velocidad de operación y arranque, si no, que permiten la visualización del consumo de potencia eléctrica, factor de potencia, voltaje y corriente de entrada entre otras.

Estos emplean elementos de conmutación que permiten el control de la frecuencia temporizando adecuadamente la maniobra repetitiva de conmutación manteniendo valores altos de rendimiento en una amplia gama de posiciones de control.

La conmutación natural ocurre debido a los cambios de Voltajes de la Línea de CA, donde el cambio en el voltaje de línea instantánea provoca que un dispositivo deje de conducir, por contrario la conmutación forzada ocurre debido a la habilidad de un apagado inherente o artificial, donde la corriente en un dispositivo, como un tiristor, se fuerza a cero mediante un circuito adicional. También existe, la conmutación de carga que depende inherente o artificialmente por las características de la carga producida, La conmutación de carga utiliza las corrientes oscilantes producidas por la carga para desactivar un dispositivo.

2.2.3.2. CONSTITUCIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA.

Un convertidor estático de energía eléctrica es un dispositivo capaz de transformar la energía eléctrica de un tipo a otro con diferentes características. Rodriguez A. en la publicación “Variadores de frecuencia y sus aplicaciones” (2005) determino;

Existen dos tipos de convertidores estáticos de frecuencia empleados para el control de la velocidad o posición de un motor de CA: Convertidores



Directos (de un solo paso), realizan conversión directa de CA a CA, y se denominan CICLOCONVERTIDORES, por otro lado los Convertidores Indirectos (de dos pasos), realizan una doble conversión de CA a CD y de CD a CA, estos son denominados VARIADORES DE FRECUENCIA. (Cap.3).

El convertidor de frecuencia directo está conmutado por la línea, y técnicamente está relacionado con el convertidor doble para accionamientos de DC. Su mayor inconveniente es la moderada gama de frecuencias en que trabaja, desde 0 hasta $1/3$ de la frecuencia de la línea, por lo que su aplicación es mejor para máquinas grandes y lentas.

Los convertidores indirectos de frecuencia, son aquellos en donde la conversión de frecuencia tiene lugar en dos etapas, estos a su vez pueden dividirse a su vez en dos grupos:

Convertidores con enlace de DC y fuente de voltaje, y convertidores con enlace de DC y fuente de corriente (CSI). Así mismo, los convertidores con fuente de voltaje pueden ser: Convertidores con enlace de DC y fuente de voltaje variable (VVI) o Convertidores con enlace DC de voltaje constante modulados en ancho de pulso (PWM).

2.2.4. ELEMENTOS BASICOS DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA.

2.2.4.1. ETAPA DE RECTIFICACIÓN.



El Rectificador es un convertidor de CA a CD que puede utilizar dos tipos de conmutación natural o forzada. Existen diferentes tipos de Rectificadores:

- Rectificador trifásico tipo puente no controlado.

Este tipo de puente rectificador es diseñado con elementos semiconductores (diodos) de conmutación natural, frente a las ondas trifásicas de potencia que cambian su magnitud según la frecuencia.

La figura 2.6 muestra el diseño típico de estos elementos.

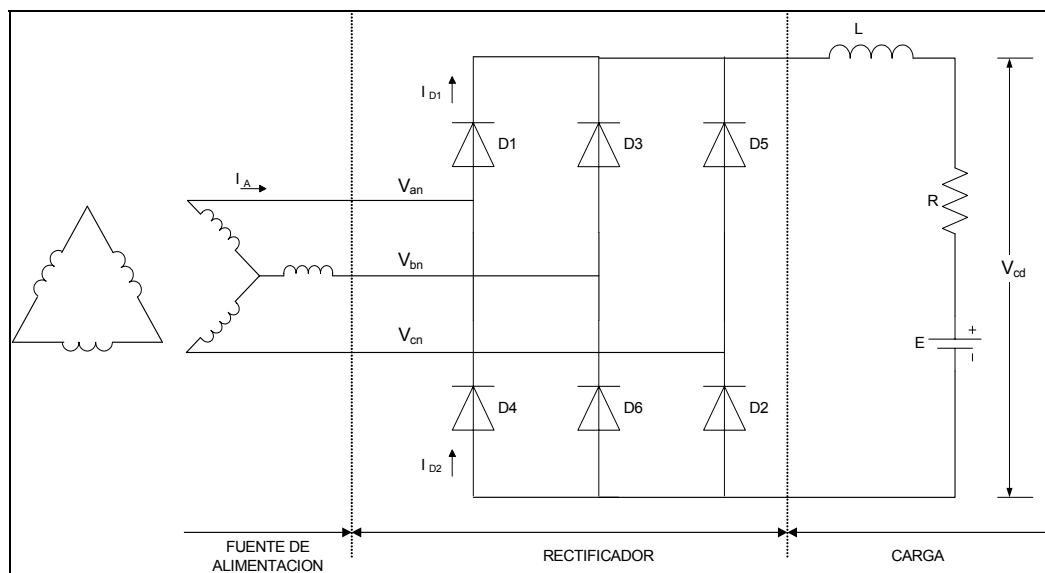


Figura 2.6. Rectificador Trifásico Tipo Puente No Controlado. Rodríguez.

Curso EI VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.

La conmutación se da según el nivel de voltaje de cada fase de las líneas de alimentación en la secuencia mostrada en la figura 2.7. Identificando la región de operación por par de elementos de



conmutación (diodos, tiristores, IGBT, etc). Brindando a la salida un voltaje del tipo DC que alimenta la etapa intermedia de los variadores de frecuencia.

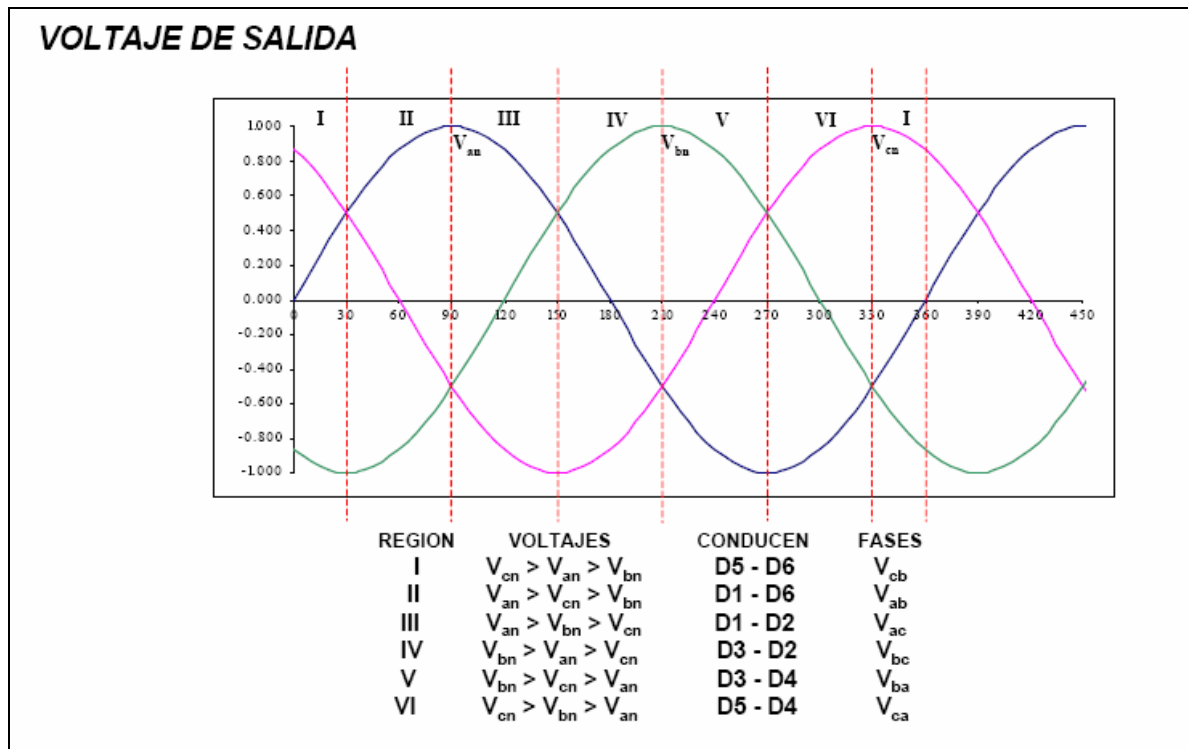


Figura 2.7. Voltaje de salida del Rectificador Trifásico Tipo Puente No Controlado. Rodríguez. Curso EI VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.

- Rectificador trifásico tipo puente semi-controlado o controlado.

En los rectificadores se pueden sustituir, total o parcialmente, los diodos por tiristores, de forma que se pueda obtener un sistema de rectificación semicontrolada o controlada. Estos sistemas permitirán la regulación del valor medio de la tensión en la carga. La sustitución del diodo por el tiristor permite retardar el instante de encendido del mismo, lo cual



ocurre no sólo cuando la tensión entre sus bornes es positiva, sino cuando, siendo positiva se inyecta un pulso de encendido a la compuerta del tiristor.

El parámetro fundamental en estos rectificadores con tiristores será el ángulo de retardo α , de forma que un tiristor conduce con un retardo de tiempo α/ω con relación al instante en el cual conduciría el diodo al que ha sustituido.

En los rectificadores con tiristores se distinguen dos tipos:

- a.- Rectificadores semicontrolados. Formados por tiristores y diodos.
- b.- Rectificadores completamente controlados. Formados únicamente por tiristores.

El principio de funcionamiento consiste en disparar los tiristores con un cierto ángulo respecto del punto de conmutación natural o paso por cero de la señal de entrada. Con ello se consigue aplicar la tensión de la fuente sobre la carga un tiempo variable, que depende del momento del disparo y por tanto se conseguirá variar los valores medios y eficaces de la tensión en la carga. Dependiendo del tipo de carga, se deberá analizar el tipo de impulso de encendido del tiristor. Para las cargas con componente inductiva, la corriente en la carga, y por tanto en el tiristor, no variará bruscamente, por lo que se tardará un cierto tiempo en alcanzar la corriente de apagado del tiristor. Así se deberá mantener la excitación de compuerta hasta que el tiristor alcance el estado de conducción. En esta circunstancia será más adecuado el uso de un tren de impulsos de larga duración, evitando pérdidas en el tiristor. En el caso de cargas poco inductivas, se deberá tener en



cuenta la intensidad de la corriente con respecto al tiempo (di/dt), con el fin de no sobrepasar los niveles de corriente máximos de cada tiristor.

Los sistemas trifásicos de potencia se definen como tres fuentes de voltaje de magnitudes iguales 120° de diferencia entre cada una de las fases.

Los rectificadores más comúnmente utilizados para el diseño de los variadores de frecuencia trifásicos son los rectificadores no controlados, semicontrolados y controlados de 6 pulsos y de 12 pulsos.

2.2.4.2. CIRCUITO DC O FILTRO INTERNO.

El Filtro es una etapa intermedia que puede ser de tipo inductivo, L o de tipo inductivo capacitivo, LC. El filtro de la salida se encarga de suavizar las diferencias entre la forma de onda de voltaje sintetizada por el circuito de potencia y la forma de onda de voltaje de salida deseada, comúnmente es denominado Bus DC. La característica dominante del enlace de DC consiste en tener un capacitor grande que sea capaz de asegurar que el voltaje del enlace de DC sea cambiado solo de manera relativamente lenta y que sea capaz de proveer la corriente que es demandada por el inversor. El enlace de DC también puede contener un pequeño reactor para limitar las fallas en la corriente y para ayudar a aislar los dos convertidores entre sí.

2.2.4.3. ETAPA INVERSORA.

En la sección final de un VDF está el inversor. El inversor convierte la fuente de DC mantenida atrás por el Bus DC, en una fuente de CA de frecuencia variable para motores de inducción. Algunos inversores controlan



ambos, niveles de voltaje o corriente y frecuencia, mientras otros controlan frecuencia exclusivamente.

En un inversor de fuente de voltaje, el voltaje de salida o la forma de onda es controlada, y la forma de la onda de corriente es determinada por la carga aplicada. El inversor fuente de corriente (CSI), es justo lo opuesto en que la forma de la onda de corriente de la salida es controlada y la forma de onda del voltaje de salida es determinada por la carga aplicada. Así mismos, los inversores de fuente de voltaje pueden ser: Inversor de fuente de voltaje variable (VVI) o Inversor de fuente de voltaje constante modulados en ancho de pulso (PWM). La mayoría de las instalaciones emplean inversores de fuente de voltaje. Esto significa que el Bus DC incluirá un banco grande de condensadores para proporcionar una fuente de voltaje al inversor. Se usan muchos dispositivos semiconductores diferentes en los inversores de los VDF, como por ejemplo, Rectificadores de Silicio Controlado (SCR), Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBT), Transistores Bipolares de Potencia (Darlington) o Tiristor de Apagado por Compuerta (GTO).

2.2.4.4. ETAPA DE CONTROL.

La etapa de control se encarga de controlar los instantes de disparo de los elementos de conmutación integrados en la etapa de rectificación y en la etapa inversora, el generador de las señales de control de conmutación recibe las señales de las líneas de la entrada, las líneas de salida, desde el circuito de potencia, y/o de las líneas de control externas y las procesa generando el apropiado pulso de disparo para actuar en cada tipo de interruptor.



En los VDF las señales de disparo deben sincronizarse apropiadamente con la frecuencia de la fuente de CA y la frecuencia de salida deseada. En efecto, la menor de estas dos frecuencias modula la frecuencia más grande.

La designación del generador de las señales de control de conmutación utiliza toda la tecnología del circuito aplicable de la electrónica analógica y digital.

En la Figura 2.8 se puede observar un esquema de las partes que componen un Variador de Frecuencia.

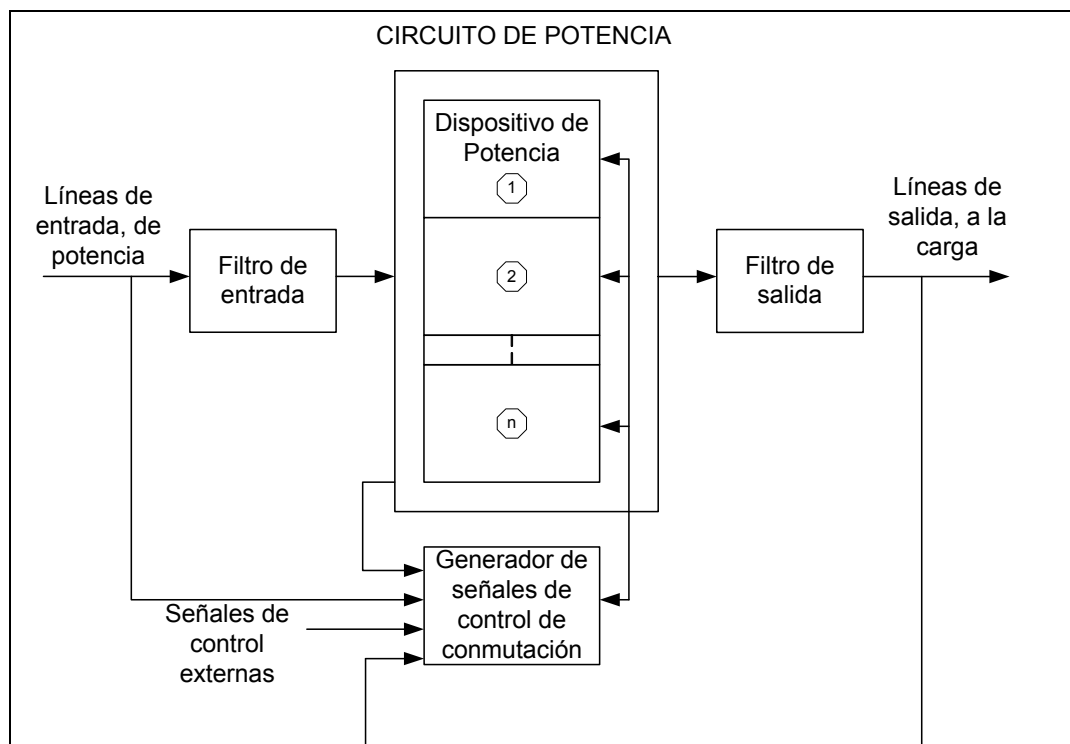


Figura 2.8. Esquema de un Variador de Frecuencia. Rodríguez. Curso El VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.

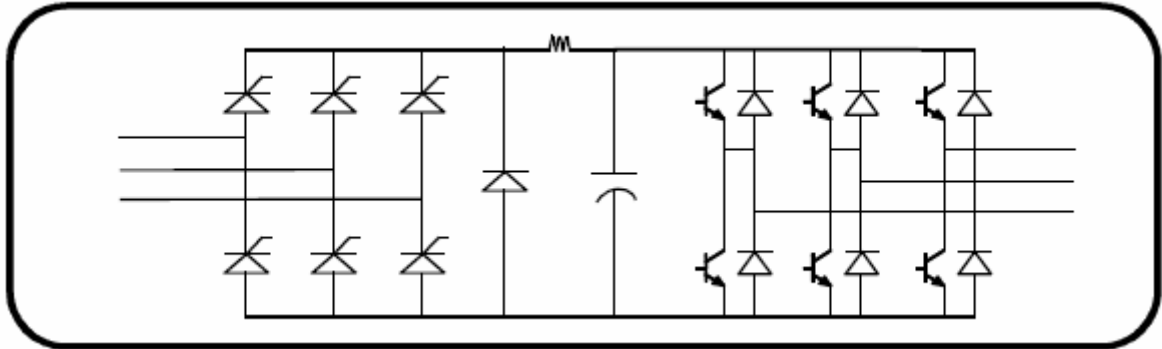


Figura 2.9. Variador de Frecuecncia del tipo Inversor Con Fuente de Voltaje. Rodríguez. Curso EI VDF y sus Aplicaciones. ESP OIL.

2.2.5. TIPOS DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y SUS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.

2.2.5.1. INVERSOR CON FUENTES DE VOLTAJE (VVI).

El control del voltaje de salida es realizado por el Rectificador (fuente de voltaje variable) y el control de la frecuencia de salida la realiza el inversor.

CARACTERÍSTICAS:

- ✓ Adaptable a tecnología transistor – GTO.
- ✓ Aplicable a motores de mayor potencia que el rango del VDF.
- ✓ Capacidad de varios motores.
- ✓ Control simple.
- ✓ Bajo factor de potencias a bajas velocidades.
- ✓ Pulsaciones del motor a bajas velocidades.



- ✓ Filtro de la sección de CD de gran dimensión.

2.2.5.2. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM).

En este VDF el rectificador opera como una fuente de voltaje constante dejando al inversor el control tanto del voltaje como de la frecuencia de salida.

CARACTERISTICAS

- ✓ Adaptable a tecnología transistor – GTO.
- ✓ Aplicable a motores de mayor potencia que el rango del VDF.
- ✓ Capacidad de varios motores.
- ✓ Alto factor de potencias a bajas velocidades.
- ✓ Filtro de la sección de CD de pequeña dimensión.
- ✓ Sin pulsaciones del motor a bajas velocidades.

2.2.5.3. INVERSOR DE FUENTE DE CORRIENTE.

Este tipo de VDF controla la velocidad del motor en función de la variación de corriente.

CARACTERISTICAS

- ✓ Este tipo de VDF controla la velocidad del motor en función de la variación de corriente.
- ✓ Supresión de cortos circuitos en forma inherente.
- ✓ Circuito de potencia simple basado en SCR's.
- ✓ Control simple.
- ✓ Requiere de un control en lazo cerrado.
- ✓ No aplicable a motores de mayor potencia que el rango del VDF.



- ✓ Pulsaciones del motor a bajas velocidades.

2.3. SEÑALES ARMÓNICAS.

Cuando una señal senoidal opera a una frecuencia determinada esta se define como la fundamental, de los efectos producidos por diversos equipos y demás fuentes armónicas se producen ondas senoidales de distintas frecuencias (múltiplos de la frecuencia fundamental) que se suman con la misma resultando una forma de onda distorsionada que será la que alimente la carga. La figura 3.2 muestra las graficas de la onda fundamental a 60 ciclos por segundo y la forma de onda de las señales armónicas a frecuencias múltiplos de ella. ($h=2,3,4,5$).

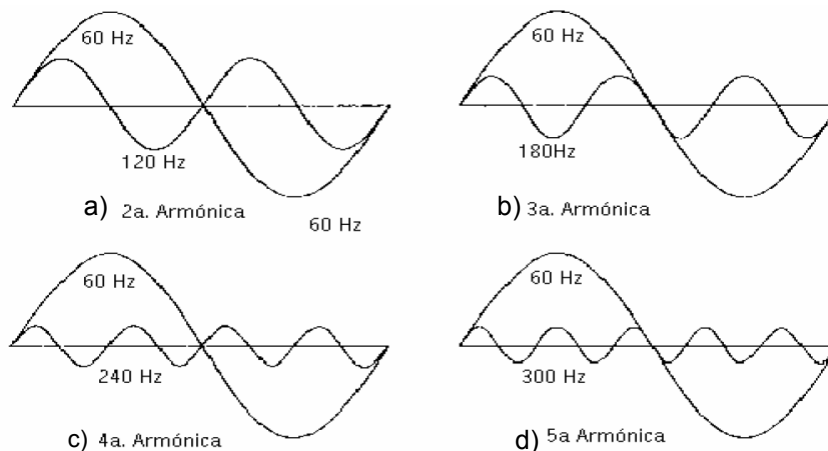


Figura 2.10. Señales armónicas en comparación con la fundamental a 60Hz; a) segunda armónica, b) tercera armónica, c) cuarta armónica y d) quinta armónica. (ESP OIL 2005.cap1. p 2).



Al mismo tiempo hay que tener en cuenta que únicamente la señal fundamental es la que produce potencia activa.

Las componentes armónicas en corriente alterna (variante en el tiempo) se produce en múltiplos de la fundamental creando así una razón de ella.

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

- Su amplitud: hace referencia al valor de la tensión o intensidad del armónico.
- Su orden: hace referencia al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). Así, un armónico de orden 3 tiene una frecuencia 3 veces superior a la fundamental, es decir $3 * 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$.

El orden del armónico, también es referido como el rango del armónico y es la razón entre la frecuencia de un armónico f_n y la frecuencia del fundamental (60 Hz).

$$n = \frac{f_n}{f_1} \text{ (Por principio, la fundamental } f_1 \text{ tiene rango 1).} \quad (2.1)$$

2.4. DISTORSIÓN ARMÓNICA.

La distorsión armónica se produce cuando la señal de salida de un sistema no equivale a la señal que entró en él. Esta falta de linealidad afecta



a la forma de la onda, porque el equipo ha introducido armónicos que no estaban en la señal de entrada.

De manera general se puede decir que la forma de onda de una señal electromagnética nominalmente es de forma senoidal, cíclica según su frecuencia. Esta es la forma ideal en la que se genera la energía eléctrica, que es inyectada a los sistemas de potencia, alimentando así la carga conectada con una forma de energía variante en el tiempo.

Al generar la energía eléctrica, pueden producirse breves alteraciones que cambian la forma de onda resultando una señal distorsionada. Esta señal entra a la red que se compone de diversas líneas de transmisión por donde se alimenta a las demás cargas del sistema, cuando el suministro eléctrico llega a la carga se consigue con diversos dispositivos que incrementan esta distorsión (cargas no lineales) y al mismo tiempo estas distorsiones se denominan armónicas de la señal ideal o fundamental bien sea de corriente o voltaje.

Las distorsiones armónicas afectan de manera insidiosa a la calidad del servicio eléctrico produciendo desde sobre tensiones hasta sobrecalentamiento en los conductores de neutro.

“Los problemas asociados con las armónicas en sistemas eléctricos de potencia no son nuevos, de hecho, al comienzo de los años 1920 los ingenieros electricistas tomaron las primeras muestras de ondas distorsionadas.” (Fernández L. 2005. p.18).

Inicialmente los problemas de distorsión se debían a la saturación del núcleo magnético de los transformadores y a ciertas cargas industriales



(hornos de arco, soldadoras también de arco, etc.). La preocupación recurría sobre las maquinas de síncronas, las de inducción, la interferencia telefónica y las fallas que ocasionen en los capacitores conectados que se encargan de corregir el factor de potencia.

Actualmente la distorsión armónica constituye un problema creciente uso de cargas no lineales (fuentes de armónicas) en las redes eléctricas, tales como, convertidores estáticos de potencia y controladores de velocidad ajustables. (Fernández L. 2005. p.19).

La figura 2.11. Muestra de manera simple las corrientes armónicas con fuentes ideales de corriente que operan a distintas frecuencias alimentando la carga colocada en un simple circuito con la resultante de la suma de las componentes armónicas con la fundamental.

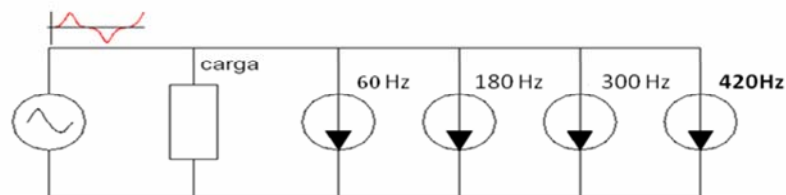


Figura 2.11. Representación de corrientes armónicas ideales a un circuito.

(Stefanova. E 2005.p 5).

2.4.1. INDICE DE DISTORSIÓN ARMÓNICA.

El método más usado para medir la distorsión armónica en un sistema de potencia es la distorsión total armónica (THD), este puede ser calculado para la corriente o para la tensión, dependiendo de donde se quiera medir la



distorsión. Hay al menos otros dos índices usados en el análisis armónico, generalmente aplicables a circunstancias especiales, esto incluye el índice por el factor de influencia telefónica (TIF), que compara el contenido armónico en relación al sistema telefónico, y el factor K, el cual considera las pérdidas adicionales que las corrientes provocan en el transformador debido a la presencia de armónicas. Sin embargo, en la mayoría de los casos donde las armónicas son estudiadas en un sistema de potencia para identificar su fuente o diseñar como deshacerse de ellas, el índice de distorsión más apropiada es el THD, medido por separado para la tensión y para la corriente.

2.4.1.1. DISTORSIÓN TOTAL DE VOLTAJES.

El factor de distorsión total del voltaje THD_v se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de las componentes armónicas al cuadrado, desde h = 2 hasta h = infinito, dividida entre el valor eficaz de la componente fundamental.

THDV viene expresada por la formula siguiente;

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.2)$$

Donde;

V₁: Es el valor RMS del voltaje de la señal fundamental.

V_n: Es el valor de la magnitud RMS de cada componente de voltaje armónico.

h: Se refiere al orden de la armónica.



La distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion, THD) da una medida del grado de distorsión de la variable. En una señal senoidal pura el THD es igual a cero (0). En cambio, a medida que aumentan las armónicas, aumenta el valor del THD.

2.4.1.2. DISTORSIÓN TOTAL DE CORRIENTES.

El factor de distorsión total del corriente THDi se define como la raíz cuadrada de la sumatoria de los valores eficaces de las componentes armónicas al cuadrado, desde $h = 2$ hasta $h = \infty$, dividida entre el valor eficaz de la componente fundamental.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

Donde;

I_1 : Es el valor RMS del voltaje de la señal fundamental.

I_n : Es el valor de la magnitud RMS de cada componente de voltaje armónico.

h : Se refiere al orden de la armónica.

2.5. ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS.

En general, los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la tensión). Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una



tensión sinusoidal adsorben una intensidad no sinusoidal, pudiendo estar la corriente desfasada un ángulo respecto a la tensión.

Existen dos categorías generadoras de armónicos. La primera es simplemente las cargas no lineales en las que la corriente que fluye por ellas no es proporcional a la tensión. Como resultado de esto, cuando se aplica una onda sinusoidal de una sola frecuencia, la corriente resultante no es de una sola frecuencia. Transformadores, reguladores y otros equipos conectados al sistema pueden presentar un comportamiento de carga no lineal y ciertos tipos de bancos de transformadores multifase conectados en estrella-estrella con cargas desbalanceadas o con problemas en su puesta a tierra. Diodos, elementos semiconductores y transformadores que se saturan son ejemplos de equipos generadores de armónicos, estos elementos se encuentran en muchos aparatos eléctricos modernos.

Invariablemente esta categoría de elementos generadores de armónicos, lo harán siempre que estén energizados con una tensión alterna. Estas son las fuentes originales de armónicos que se generan sobre el sistema de potencia.

El segundo tipo de elementos que pueden generar armónicos son aquellos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia.

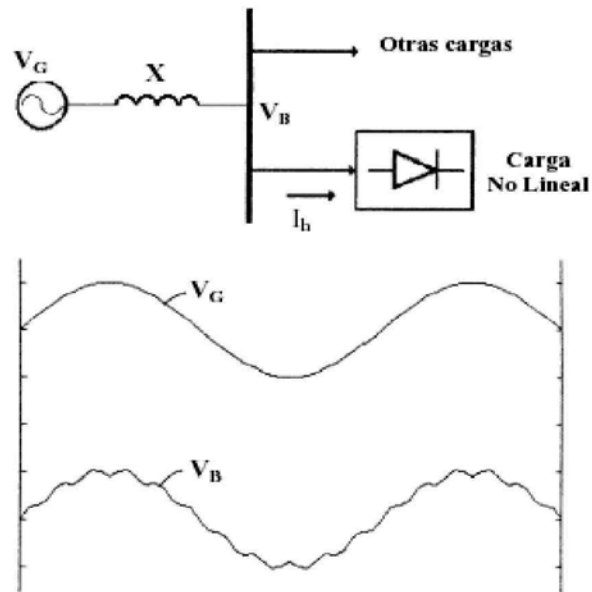


Figura 2.12. Sistema de potencia con carga no lineal acoplada y su forma de onda.

2.5.1 EFECTO DE LAS SEÑALES ARMÓNICAS EN UN SISTEMA DE POTENCIA.

Las señales armónicas producen diversas respuestas totalmente inesperadas en un sistema interconectado, que puede causar desde sobrecalentamiento hasta maniobras no ordenadas. La aparición de corrientes y/o tensiones armónicas en el sistema eléctrico crea problemas tales como, el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de las protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos, disminución de la vida útil de los equipos, entre otros mencionados a continuación.



Algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son:

- Aumento en las pérdidas por efecto Joule ($I^2 R$).
- Sobrecalentamiento en conductores del neutro.
- Sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores y cables, reduciendo su vida útil.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla de bancos de capacitores.
- Falla de transformadores
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.
- Los efectos dependerán de la proporción que exista entre la carga no lineal y la carga total del sistema, aunado a que se debe mantener la distorsión dentro de los límites establecidos por las normas.

2.5.1.1. RESONANCIA ARMÓNICA.

En los sistemas de potencia, se utilizan elementos capacitivos e inductivos, con diversos fines, uno de ellos es mejorar el factor de potencia, si el caso es el uso de capacitores. Estos elementos reaccionan de manera diferente ante distintas frecuencias, generando dos casos emblemáticos de resonancia en los circuitos que son la resonancia en paralelo y la resonancia en serie.



Cuando es el caso de que la frecuencia alcance el nivel de resonancia serie, en el circuito las impedancias de las inductancias y capacitancias se anulan dejando solo la aportada por la resistividad de los elementos conectados produciendo grandes corrientes, que pueden causar fallas eléctricas en el sistema.

Si por el contrario se presenta un caso de resonancia en paralelo la impedancia total de la frecuencia de resonancia es muy grande, produciendo tensiones elevadas en los terminales de los elementos combinados en paralelo, siendo aun el caso de pequeñas corrientes armónicas y presentándose una corriente circulante muy elevada internamente en los elementos involucrados. Giampoclaro A. (2005) enuncia;

“Como consecuencia de la reducción de la reactancia capacitiva y el incremento de la reactancia inductiva con la frecuencia, las frecuencias de resonancia de los circuitos inductivo-capacitivo que se forman en las redes eléctricas presentan condiciones de resonancias muy cercanas a las frecuencias de las armónicas características.” (P. 22).

Entre las condiciones que pueden causar los efectos de resonancias en los sistemas de potencia podemos nombrar;

- ✚ Daños en los bancos de capacitores.
- ✚ Sobre corrientes o tensiones capaces de causar daños a los componentes dieléctricos de los cables y demás equipos.
- ✚ Operación recurrente de interruptores de los bancos de capacitores.



2.5.1.1.1. RESONANCIA EN PARALELO.

Como ya se enuncia la resonancia en paralelo ocurre cuando las impedancias de los elementos reactivos del sistema se igualan a cierta frecuencia, resultando en una alta impedancia. Si la combinación de las capacitancias e inductancias del sistema resultan resonantes ante una de las armónicas características generadas por las cargas no lineales del mismo, la corriente armónica producida excitará lo que se conoce como el “circuito tanque”, dando origen a una corriente amplificada que oscilará entre la energía que almacena el capacitor y el inductor, dicha corriente sería la causante de distorsiones de voltaje, que interfieren con dispositivos de control y telecomunicaciones próximos al circuito en cuestión.

2.5.1.1.2. RESONANCIA EN SERIE.

Esta condición de resonancia ocurre como resultado de la combinación serie de las inductancias de los transformadores o líneas con los bancos de capacitores. En este caso se presenta una situación de baja impedancia en el circuito, permitiendo de manera más simple el paso de corrientes por estos circuitos, esto dependerá de cual sea la frecuencia de resonancia del circuito, convirtiéndose esta en la componente armónica que recorra al mismo.

2.6. TRAYECTORIA DE LOS ARMÓNICOS.

Toda corriente eléctrica fluye por donde se le presenta menor resistencia a su paso. Por esta razón las corrientes armónicas siguen trayectorias distintas, pues se tiene que las impedancias de los sistemas



varían según la frecuencia. Donde se tiene que la reactancia inductiva se incrementa con la frecuencia y la resistencia se incrementa en menor medida, mientras que la reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia.

Así las armónicas fluyen hacia donde se le presenta menos resistencia a su paso. La trayectoria que siguen las armónicas también depende del tipo de sistemas, ya sean monofásicos o trifásicos, así como las conexiones de los transformadores que se encuentra a su paso. Las armónicas que se presentan en sistemas balanceados tienen una relación directa con las componentes de secuencias positiva, negativa y cero.

2.7. CLASIFICACIÓN DE LOS ARMÓNICOS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO EN LAS REDES DE SECUENCIA.

Los componentes de los sistemas de potencia se comportan de manera distinta frente las determinadas redes de secuencia, lo mismo, ocurre en las componentes armónicas debido a que estas componentes se producen por la interacción de la señal fuente ante el comportamiento variante de un elemento.

Una pequeña explicación del comportamiento de las componentes armónicas en las redes de secuencia serian:

2.7.1. SECUENCIA POSITIVA. (Rotación directa).

En este caso las corrientes armónicas producen sobrecalentamiento de los conductores llegando a extremo de romper conductores, reducir la vida útil de los equipos o dañarlos por completo.



2.7.2. SECUENCIA NEGATIVA. (Rotación inversa).

En este caso se pueden producir una componente que sea capaz de frenar el motor y producir sobrecalentamiento en los conductores de los devanados acortando su vida útil o dañando el mismo.

2.7.3. SECUENCIA CERO.

En este caso no se encuentra un sentido definido de rotación por esto se le conoce como rotación homopolar, esta variación es posible que cause sobrecalentamientos en los conductores, y causa el mismo calentamiento en el neutro.

Los armónicos múltiplos de tres no entran al sistema de potencia debido a que son de secuencia cero, es decir, que necesitan un camino de retorno para circular, en la parte de baja del interconectado nacional si se encuentra un retorno conexión a neutro) mas en la parte de alta tensión no se encuentra camino de retorno para que las armónicas de múltiplos de tres circulen, mas el resto de las armónicas de son de secuencia positiva y secuencia negativa por lo tanto si circulan.

Tabla 2.1. Clasificación de las componentes armónicas según las redes de secuencia. (ESP OIL 2005. Cap. 3. p.33).

Armónicas de secuencia positiva	1,4,7,10,13,16,19
Armónicas de secuencia negativa	2,5,8,11,14,17,20
Armónicas de secuencia cero	3,6,9,12,15,18,21



2.8. NUEVAS FUENTES DE ARMÓNICOS.

Al referirse a las nuevas fuentes de armónicos, lo que, se quiere destacar es la entrada de la electrónica de potencia y nuevas tecnologías que involucran elementos que variantes como una carga no lineal. Actualmente podríamos mencionar entre muchos otros los siguientes;

2.8.1. GRANDES CONVERTIDORES DE POTENCIA.

Las fuentes más grandes de armónicas son los convertidores como los utilizados en la industria metálica y transmisión en HVDC. Su potencia nominal se especifica en MW y generalmente tiene mucha más inductancia en el lado de D.C que en el lado de A.C, por lo que la corriente directa es prácticamente constante y el convertidor actúa como una fuente de voltaje armónico en el lado de D.C y como una fuente de corriente armónica en el lado de A.C; Más aún, con un sistema perfectamente simétrico, las corrientes resultantes son iguales en todas las fases.

2.8.2. TERMINALES EN HVDC.

Una aplicación común de los grandes convertidores estáticos de potencia es en los grandes sistemas de transmisión de corriente HVDC. Los grandes grupos de sistemas utilizados en algunos casos son conectados en HVDC para hacer más fácil la operación de todos los sistemas en sincronismos. En algunos casos la instalación del HVDC podría estar “espalda con espalda” con distancia pequeña o no, entre el rectificador y el inversor, ambos son convertidores de 6 o 12 pulsos.



El espectro típico de un convertidor no incluye componentes armónicas de orden par, las armónicas $n = 1, 5, 9$ son de secuencia positiva y las de orden 3,7,11 son de secuencia negativa. En el caso de convertidores de seis pulsos se pueden hacer las siguientes observaciones:

- ✚ No existen armónicas triples
- ✚ Existen armónicas de orden $6k + 1$ para valores enteros de "k".
- ✚ Los valores armónicos de orden $6k+1$ son de secuencia positiva.
- ✚ Las armónicas de orden $6k-1$ son de secuencia negativa.

En la figura 2.13. Se muestra el típico espectro armónico de voltaje de un convertidor de 6 pulsos.

Existen también convertidores de 12 pulsos que básicamente consisten de dos convertidores de 6 pulsos alimentados de dos transformadores trifásicos en paralelo, con igual voltaje fundamental y un desfase de 30° . Este tipo de convertidores sólo tienen armónicas de orden $12k \pm 1$. Las corrientes armónicas de órdenes $6k \pm 1$ con k impar ($k=5,7,17,19$, etc.) circulan entre los dos convertidores pero no penetran la red de a.c.

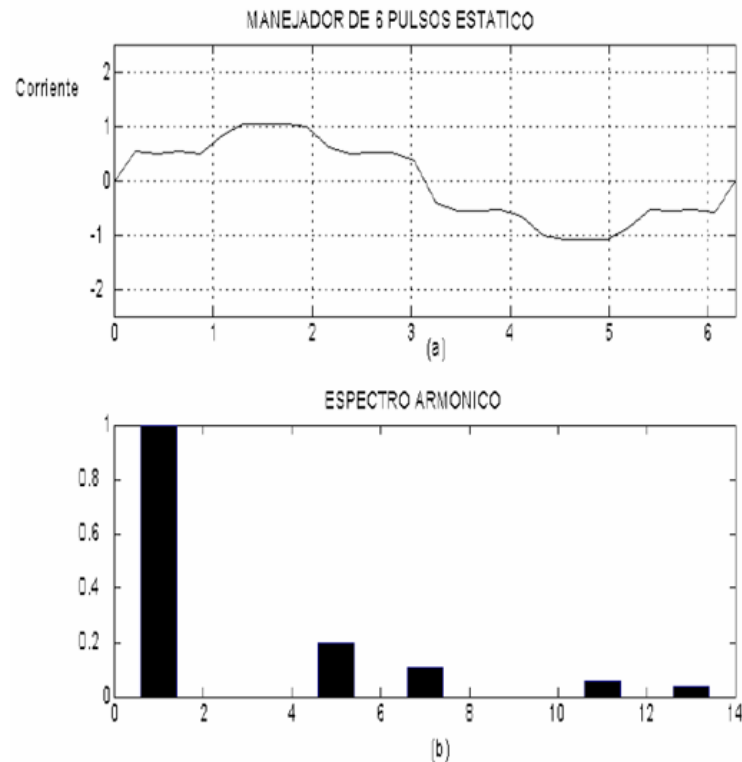


Figura 2.13. Espectro de las corrientes armónicas en un convertidor de frecuencia de 6 pulsos. A) Forma de onda de la corriente. B) Espectro armónico.

2.8.3. HORNOS DE INDUCCIÓN.

Este horno de inducción, consiste en un rectificador e inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta manera la bobina mediante la inducción hace que se calienten las piezas metálicas (como si fuera el núcleo de la bobina) las cuales alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas.



2.8.4. CONVERTIDORES DE MEDIANO TAMAÑO.

El número de convertidores de tamaño mediano (de decenas de miles de kW) está creciendo rápidamente en la industrias. Las primeras aplicaciones se basan en el control de velocidad para motores de d.c. Que aún representa el mayor mercado para este tipo de convertidores. Sin embargo, el énfasis se está inclinando hacia la utilización de inversores y motores de inducción. Más aún, el uso de transistores de potencia y de tiristores GTO (gate turn off) gradualmente están ganando adeptos en el área de control de motores de a.c.

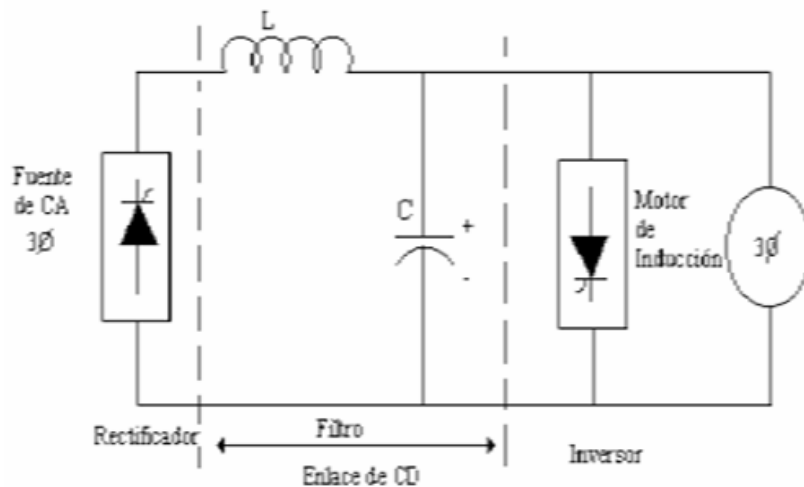
2.8.5. CONTROLADORES DE MOTORES DE A.C.

Los controladores de motores de c.a. de velocidad ajustable son también usados en la industria. De hecho, los motores de inducción trifásicos son los más frecuentes encontrados. Mientras que los motores de CA son empleados en aplicaciones de alta velocidad como son bombas, compresores y ventiladores. Estos motores de inducción típicamente operan a velocidades de 1200, 1800 y 3600 r.p.m. o más. Además los motores de c.a. son generalmente más robustos, requieren menos mantenimiento y son menos caros que los motores de c.d. La velocidad de un motor de c.a. es usualmente controlada por ajustes en el voltaje y en la frecuencia. Estos se puede realizar con un convertidor conocido como "controlador de voltaje-ajuste, frecuencia ajustable". En la figura 2.14. Se muestra un controlador que consiste de un rectificador trifásico de 6 pulsos y un inversor, conectado por enlace de c.d., un inductor de aplanamiento y un filtro capacitivo son incluidos en el enlace de cd. Esto proporciona un voltaje constante para la sección inversora. El rectificador se conecta a la línea de alimentación trifásica y el inversor se conecta a los devanados de la armadura en el



estator del motor de inducción trifásico. Este tipo de convertidor controlado es a menudo conocido como convertidor de “enlace de c.d.”.

El voltaje ajustable lo proporciona el puente rectificador, mientras que la frecuencia variable proviene de la porción inversora. El inversor es capaz de generar su propia frecuencia de c.a. por tratarse de un inversor de conmutación forzada. Todos los elementos necesarios para la conmutación están incluidos en el propio inversor.



Figur.2.14. Controlador trifásico de enlace DC (típico variador de frecuencia).

2.9. CRITERIOS Y BASES LEGALES PARA LA EVALUACIÓN DE ARMÓNICOS EN AL CARGA CONECTADA A LOS CIRCUITOS DE LA S/E MELONES OESTE.

Para la evaluación de los niveles máximos de distorsión armónica permisibles en los circuitos de la subestación Melones Oeste, se empleará



las recomendaciones establecidas por Norma **IEEE Std 519-1992 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”**, la cual plantea las siguientes consideraciones a seguir:

2.9.1. LIMITES DE DISTORSIÓN DE CORRIENTE (THDI).

El objetivo de estos límites es:

- Limitar la inyección de armónicos por las cargas individuales de manera que no causen distorsiones de voltaje inaceptables para características normales del sistema.
- Limitar la distorsión armónica total del voltaje suministrado por la red.

En la tabla 2.2, se expresa la relación entre la capacidad de corriente de cortocircuito, en el punto donde la carga se conecta a la red y su corriente máxima. Los límites individuales de corrientes armónicas son expresados como un porcentaje de esta corriente de carga máxima (demanda).

Las siguientes observaciones rigen para las tablas N° 2.2, 2.3 y 2.4:

- Las armónicas pares están limitadas al 25% de los valores para armónicas impares mostrados en las tablas.
- No son admisibles distorsiones de corriente que generen corriente continua.



- **ICC:** Máxima corriente de cortocircuito en el PCC.
- **PCC:** Punto de acoplamiento común (Point of Common Coupling) y corresponde al lugar en que se interconectan el convertidor (carga no lineal) con los otros consumidores.
- **IL:** Máxima corriente demandada por la carga en el PCC (componente de frecuencia fundamental).
- Máxima corriente de distorsión en % de IL. Para armónicas impares. Para armónicas pares se incrementa el límite en 25% de las impares.

Tabla 2.2: Límites de distorsión de corriente para sistemas de distribución general de (120 V a 69 kV). (IEEE-519 1992).

Máxima corriente de distorsión en % de IL. Para armónicas impares						
I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0



Tabla 2.3: *Limites de distorsión de corriente para sistemas de 69 001 V a 161 KV. (IEEE-519 1992).*

I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	2.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Tabla 2.4. *Limites de distorsión de corriente para sistemas mayores a 161 KV. (IEEE-519 1992).*

I_{cc} / I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	THDi
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

2.9.2. LIMITES DE DISTORSIÓN DE VOLTAJES (THDV).

El estándar IEEE-519 establece límites para los niveles de distorsión de voltaje en forma porcentual referido a la componente fundamental. Estos límites están en función de los niveles de voltaje estandarizados para el suministro de energía, tal y como se muestra en la Tabla 2.5.



Tabla 2.5. Límites de distorsión de voltajes. (IEEE Std. 519 – 1992).

Voltaje del barra	Distorsión Individual de Voltaje [IHD]	Distorsión Total de Voltaje THDV [%]
≤ 69 KV	3.0	5.0
69 KV < $V_{bus} \leq 161$ KV	1.5	2.5
> 161 KV	1.0	1.5

2.10. FILTRADO DECOMPONENTES ARMONICAS.

El filtrado de las componentes armónicas consiste en crear una banda de paso para que sean estas el camino preferente de las armónicas, de esta forma es posible separarlas de la componente fundamental. La creación de este paso se realiza básicamente mediante el aprovechamiento de las condiciones de resonancia de los elementos reactivos permitiendo esto la reducción o incremento de las impedancias frente a diversas frecuencias.

Existen diversos tipos o arreglos de filtros y técnicas de filtrado, algunos se nombran a continuación;

2.10.1. FILTRADO PASIVO DE COMPONENTES ARMONICAS.

El uso de filtros para componentes armónicas en sistemas potencia tiene dos objetivos: Servir de sumidero para las corrientes y tensiones armónicas; y proveer al sistema toda o parte de la potencia reactiva que éste necesita.



Los filtros pasivos pueden ser, según el propósito particular que se persigue, de dos tipos:

2.10.1.1. FILTROS SERIE.

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 posicionan en serie a la parte de la red que se desea proteger.

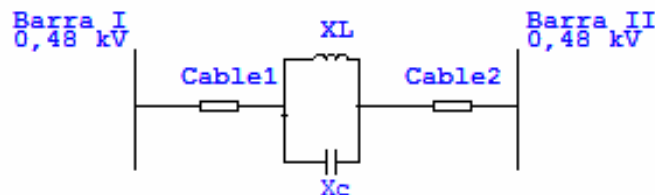


Figura 2.15. Filtro pasivo en serie.

2.10.1.2. FILTROS SHUNT O PARALELO.

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



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.

Entre los filtros Shunt o paralelos pasivos se encuentran los filtros sintonizados y los pasa altos.

Los filtros sintonizados simples se caracterizan por ser diseñados para eliminar una determinada componente armónica, son muy económicos y viables para los sistemas de distribución, su diseño es esencialmente simple y consta de un capacitor en serie con un inductor y una resistencia interna. La sintonización de las reactancias se hace coincidiendo la frecuencia de resonancia con la de la armónica a filtrar.

$$W = 2\pi fh \quad (2.4)$$

Donde h es el orden de la armónica que se desea filtrar, f la frecuencia fundamental y W la frecuencia angular del sistema.

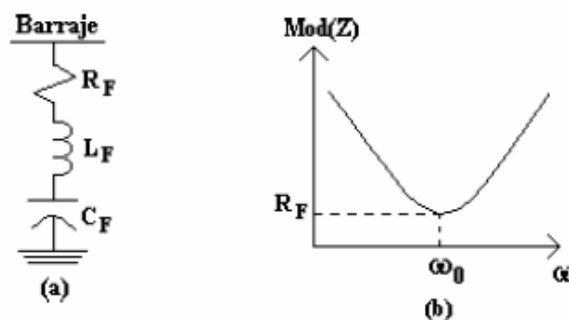


Figura 2.16. Filtro sintonizado simple. A) Diseño del filtro. B) Comportamiento en frecuencia. (Gallego R. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos.



El filtro pasa altos 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, presenta una baja impedancia para la frecuencia de sintonía y superiores a ésta. O sea que, absorbe corrientes armónicas (si existen) de frecuencias desde la de sintonía en adelante. Para frecuencias menores a la sintonía, el filtro presenta impedancias altas. El factor de calidad de este filtro es bajo (0.5-5).

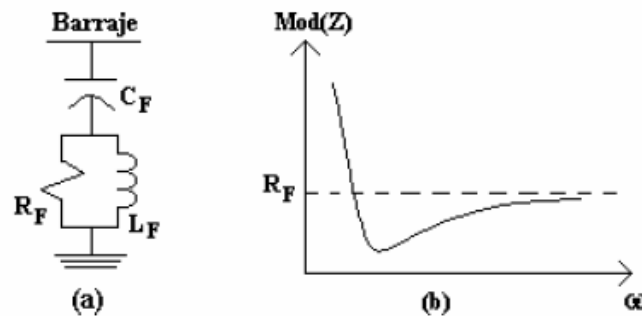


Figura 2.17. Filtro sintonizado pasa alto. A) Diseño del filtro. B) Comportamiento en frecuencia. (Gallego R. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. 2003. P.23).

2.10.2. FILTRADO ACTIVO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.

Los filtros activos son arreglos de circuitos electrónicos especiales, los cuales, revisan constantemente el estado de la corriente de carga de un circuito y generan una corriente de compensación igual a la diferencia entre la corriente de carga y la corriente fundamental, esta diferencia es la suma de las corriente armónicas, esta se desfasa en 180° y se inyecta a la carga de manera que estas anulen las componentes armónicas que en la misma



carga se generan. Un filtro activo puede generar la señal adecuada para el rango de frecuencias establecido con el fin de eliminar la componente armónica bien sea de voltaje o corriente.

Este tipo de filtros son diseñados con componentes de alta tecnología, para así eliminar la necesidad de un inductor en el circuito, por en cambio se utilizan componentes electrónicos como amplificadores operacionales, conformando circuitos de control con sus respectivas funciones de transferencia, teniendo un factor k de selectividad del espectro de frecuencia con el que trabaja el filtro según sea el tipo (pasa bajos, pasa altos, pasa banda, pasa todo, etc). A lo anterior se le puede adicionar el uso de plantillas para limitar el paso de la señal en análisis por medio del circuito que define el filtro.

2.11. FLUJO DE CARGA ARMÓNICO.

El flujo de carga armónico, al igual que el flujo de carga convencional, busca establecer el estado del sistema a partir de los parámetros de los elementos lineales que lo conforman, de información sobre demanda en los nodos, de la potencia generada por las máquinas síncronas, de la topología del sistema y de las características de los elementos no lineales que dan origen a voltajes y corrientes de frecuencias múltiplos de la fundamental en el sistema. Los elementos lineales y no lineales deben ser modelados considerando la variación que éstos pueden presentar con la frecuencia.

El sistema se debe modelar como un conjunto de elementos pasivos ensamblados mediante la matriz de admitancias de barra y demás fuentes de armónicas inyectadas a la barra donde se ubica las cargas consideradas



fuentes de armónicas, esta modalidad se conoce como el método de inyección de corriente.

Para el cálculo de los voltajes armónicos por barra se plantea la ecuación 2.5.

$$(Y_h)_{barra} * (V_h)_{barra} = (I_h)_{barra} \quad (2.5)$$

Donde;

$(Y_h)_{barra}$: Matriz de admitancia de barra del sistema frente a la frecuencia correspondiente al armónico indicado por el orden h.

$(V_h)_{barra}$: Vector de voltaje de barra del sistema frente a la frecuencia correspondiente al armónico indicado por el orden h.

$(I_h)_{barra}$: Vector de voltaje de barra del sistema frente a la frecuencia correspondiente al armónico indicado por el orden h.

Con referencia al cálculo de la impedancia presentada en las barras del sistema frente a las frecuencias armónicas, se debe realizar el calculo de la impedancia de barra usando la magnitud de la corriente de la componente armónica de interés usando un arreglo de la ecuación 2.5. Mostrado en la ecuación 2.6.

$$(Z_h)_{barra} = 1 / (Y_h)_{barra} = \frac{(V_h)_{barra}}{(I_h)_{barra}} \quad (2.6)$$



Donde;

$(Z_h)_{\text{barra}}$: Se refiere a la impedancia de la barra frente las componentes de frecuencia armónica indicada por h.

Para la realización de estos cálculos se debe tener en cuenta las siguientes características;

- ✚ La impedancia equivalente de cortocircuito del sistema.
- ✚ La capacidad de los bancos de condensadores conectados.
- ✚ Las características de las líneas y cables del sistema.
- ✚ Las características de las cargas conectadas.

El cálculo necesario para las componentes totales e individuales de la distorsión armónica de forma porcentual se obtiene a partir de las ecuaciones 2.2 para las corrientes y 2.3 para los voltajes. Donde el valor de las magnitudes tanto individuales como totales depende de la naturaleza de la fuente armónica y del modelo propuesto para el mismo.

El cálculo de la frecuencia de resonancia de un sistema se puede realizar mediante la ecuación 2.7.

$$h_r = \sqrt{MVA_{cc} / MVAR_c} = \sqrt{X_c / X_{cc}} \quad (2.7)$$

En donde;

h_r : Componente de la frecuencia de resonancia expresada en múltiplo de la fundamental.



MVA_{cc} : Capacidad de cortocircuito del sistema en el punto de estudio.

$MVAR_c$: Capacidad nominal del capacitor.

X_c : Reactancia capacitiva del capacitor a la frecuencia fundamental.

X_{cc} : Reactancia de cortocircuito en la fuente del sistema.

Seguidamente es posible realizar el cálculo de la impedancia de respuesta del sistema frente a las componentes armónicas características de la fuente considerada.

Para la realización de un flujo de carga armónico es necesario establecer el modelado de cada elemento presente en la red, tomando especial consideración en el modelo de las cargas no lineales, dependiendo de este modelo y su dependencia con respecto a la frecuencia, además, de su representación matemática se puede realizar un estudio en estado estable al sistema para determinar el nivel del impacto armónico y su penetración al mismo. Existen varias maneras de realizar el modelado de los elementos presentes en un sistema, siguiendo el estándar IEEE std 399 de 1997 y el estándar 519 también de la IEEE del año 1992, para el estudio de armónicos en sistemas industriales se pueden realizar las aproximaciones necesarias para la mayoría de las cargas típicas y las no lineales se recomienda ejemplificarse con fuentes de corrientes cuyo valor porcentual provenga de mediciones realizadas en las cargas no lineales y estén en base a la corriente fundamental.



2.12. ANALISIS MEDIANTE SERIES DE FOURIER PARA ARMONICOS EN SISTEMAS DE POTENCIA.

Las series de Fourier representan la herramienta eficaz para el análisis de las componentes armónicas, presentes como distorsión recurrente de una señal periódica en estado estable. Las series de Fourier para funciones periódicas basadas en una frecuencia fundamental se representa como:

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(h\omega t + \phi_n) \quad (2.8)$$

En donde;

ω : $2\pi \cdot f$

C_0 : Valor de la componente a frecuencia cero, componente DC.

C_n : Valor pico de la componente armónica según el orden n .

ϕ_n : Angulo de fase de cada componente armónica según el orden n .

Mediante el uso de las series se calcula el impacto total armónico dependiendo de la cantidad de armónicos que entren en juego en la serie. Cuando las armónicas no son múltiplos de la frecuencia fundamental se conocen como interarmónicas.

Cuando las armónicas están presentes en estado estable se pueden usar las series de Fourier para representar las componentes de voltaje y corriente como se muestran en las ecuaciones 2.9 y 2.10.



$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \text{sen}(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.9)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \text{sen}(h\omega_0 t + \delta_h) \quad (2.10)$$

Donde;

$v(t) = v_h(t)$: Voltaje total al orden armónico indicado.

$i(t) = i_h(t)$: Corriente total al orden armónico indicado.

V_h y I_h : Magnitud de la componente armónica al orden indicado.

En las expresiones 2.9 y 2.10 se desprecian las componentes DC por simplificar los cálculos.

2.13. APROXIMACIONES PARA REALIZAR LOS CÁLCULOS DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS DE UN VARIADOR DE FRECUENCIA DE SEIS (6) PULSOS.

Junto a las características del fabricante en los variadores de frecuencia, considerando que están operando a plena carga, y usando las aproximaciones hechas por Paice D. en su obra "**Power electronic converter harmonics, multipulse methods for clean power**". en 1996.

Se pueden realizar cálculos previos de las componentes armónicas de voltaje de forma teórica, considerando solo una pequeña parte del



sistema, enfocado en un punto de cortocircuito entre el transformador (considerado fuente) y los terminales de entrada del variador tomando en cuenta un cable de interconexión.

Para esto es necesario el uso de una constante armónica (propuesta por Paice) para simplificar los cálculos, la cual la podemos conseguir según la ecuación 3.1.

$$H_c = (2.407 - 0.162X_{pct} + 0.0059X_{pct}^2) * 100 \quad (2.11)$$

Donde;

H_c : Constante armónica.

X_{pct} : Reactancia total transferida a los terminales del VDF.

Seguidamente se puede saber según la ecuación 3.2. el porcentaje de distorsión total a los terminales del VDF.

$$THD(\%) = H_c * \frac{I_L}{I_{CC}} \quad (2.12)$$

Donde;

I_L : Corriente nominal de carga del VDF.

I_{CC} : Corriente de Cortocircuito del arreglo.

También se propone unas aproximaciones para el cálculo de las corrientes armónicas en un sistema de poca complejidad, mas la mejor forma, de analizar la magnitud y fase de las corrientes armónicas producidas



por el fenómeno de conmutación, en un variador de seis (6) pulsos, enfocado desde la parte rectificadora se encuentra en la norma IEEE std 519 de 1992.

Primero se propone el análisis del fenómeno de conmutación, estableciendo los ángulos de apertura y cierre de los tiristores, μ y α , respectivamente. Determinando así la magnitud y forma de la componente DC del rectificador controlado, esto se demuestra en la figura 2.17.

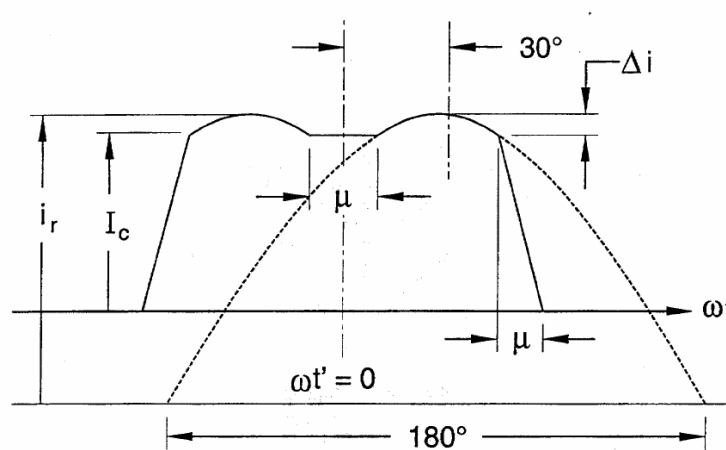


Figura 2.18. Análisis del funcionamiento del tiristor ante un semiciclo positivo.

Siguiendo los datos aportados por la figura 2.17. la norma IEEE std 519 de 1992 propone la ecuación 2.13 para el cálculo de cada corriente armónica.

$$I_h = I_c * \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \left(\frac{\text{sen}\left(\frac{h\pi}{s}\right) * \text{sen}h\frac{\mu}{2}}{\frac{h^2\mu}{2}} + \frac{r_c\theta_h \cos\left(\frac{h\pi}{s}\right)}{1 - \text{sen}\left(\frac{\pi + \mu}{2}\right)} \right) \quad (2.13)$$

Siendo;



$$g_h = \frac{\sin((h+1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right))}{h+1} + \frac{\sin((h-1)\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right))}{h-1} - \frac{2\sin\left(h\left(\frac{\pi}{6} - \frac{\mu}{2}\right)\right)\sin\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\mu}{2}\right)}{h} \quad (2.14)$$

I_c : Se refiere al valor de la corriente DC al final de la conmutación.

R_c : $\Delta i / I_c$

Esta aproximación resulta más compleja y apegada al comportamiento de conmutación de la parte rectificadora del variador. De igual forma otra aproximación es dada en la publicación “**Power electronic converter harmonics, multipulse methods for clean power**” (IEEE- Paice D.), en donde según el circuito filtro que sigue al rectificador divide en dos (2) tipos el calculo de las corrientes armónicas, uno es cuando el rectificador es seguido de un circuito DC compuesto de un inductor y un capacitor y el otro modelo es cuando solo se encuentra en el circuito DC un capacitor, como se muestra en la figura 2.18.

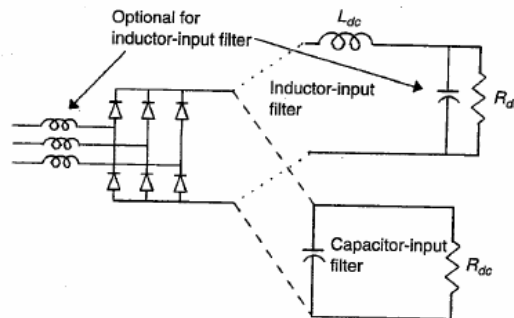


Figura 2.19. Circuitos filtros DC del tipo inductivo o capacitivo. (IEEE. Paice D. P.99)

Partiendo de este principio se hacen aproximaciones matemáticas planteadas en base a la ecuación 2.15 para el cálculo de la reactancia



referida a los terminales del VDF, para luego obtener el porcentaje de las componentes armónicas de corriente con la ayuda de las ecuaciones 2.16 y 2.17. Las constantes que se encuentran en las ecuaciones 2.16 y 2.17 se presentan las tablas 2.6 y 2.7.

$$X_{pct}(\%) = 100 * \frac{I_{f1}}{I_{sc}} \quad (2.15)$$

Donde;

I_{f1} : Corriente a plena carga.

I_{sc} : Corriente de cortocircuito.

Para el cálculo de las corrientes armónicas para el rectificador con circuito DC del tipo inductivo la aproximación sería la ecuación 2.16. por contrario para los rectificadores de circuito DC conformado por inductor y capacitor en paralelo a la carga DC (inversor PWM en el caso de los VDF), se presenta la ecuación 2.17.

$$\%Corriente Armónica \cong A_1 e^{(B_1 X_{pct})} \quad (2.16)$$

$$\%Corriente Armónica \cong A_{ic} X_{pct} e^{(B_{ic})} \quad (2.17)$$

Donde;

A_1 y B_1 al igual que A_{ic} y B_{ic} son constantes de calculo estimadas mediante herramientas computacionales en las aproximaciones presentadas por Paice D, en “**Power electronic converter harmonics, multipulse methods for clean power**” publicado por la IEEE.



Tabla 2.6. Aproximación de las constantes A_1 y B_1 para el calculo de las corrientes armónicas en un arreglo de filtro DC tipo inductivo. (IEEE. Paice D. P.103).

Harmonic	A_1	B_1
3	3,35	-0,0515
5	25,9	-0,0194
7	10,9	-0,0308
11	9,1	-0,0807
13	6	-0,0747
17	4,4	-0,0946
19	3,42	-0,097
23	2,7	-0,11
25	2,3	-0,12

Tabla 2.7. Aproximación de las constantes A_{1c} y B_{1c} para el calculo de las corrientes armónicas en un arreglo de filtro DC tipo capacitivo. (IEEE. Paice D. P.105).

Harmonic	A_1	B_1
Aprox. 3rd with 1% negative sequence	32	-0,87
5	59,6	-0,386
7	36,38	-0,67
11	12,87	-0,5
13	7,67	-0,42
17	5,14	-0,512
19	4,08	-0,531
23	3	-0,634
25	1,71	-0,4



Mediante el uso de las series de Fourier se pueden calcular las componentes armónicas de corriente usando la expresión 2.18.

$$I_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \text{sen}(n\omega t + \phi_n) \quad (2.18)$$

Donde;

I_{sn} : Valor RMS de la corriente a la n armónica.

$$I_{sn} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (2.19)$$

$$\phi_n = -n\alpha \quad (2.20)$$

En donde I_a es la magnitud de la corriente DC en el instante de análisis, n el número de la armónica en estudio y α el Angulo de disparo del tiristor (encendido) en un frente de onda positivo. En la figura 2.19 se puede apreciar el análisis a la formad e onda presentada por el rectificador de seis (6) pulsos, para alimentar el inversor.

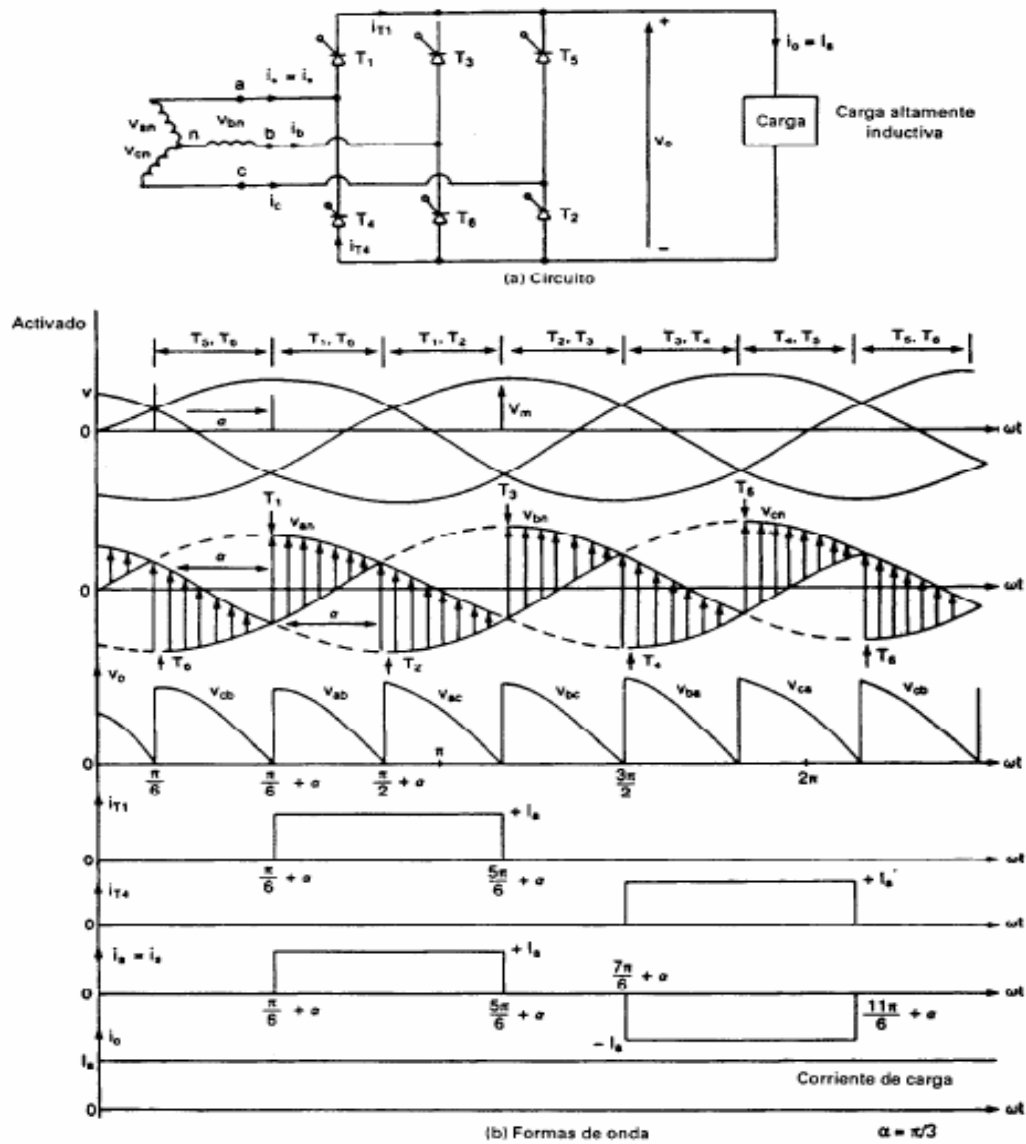


Figura 2.20. Forma de onda de salida de un rectificador controlado de seis (6) pulsos. A) Circuito. B) Forma de onda. Muhammad H. Rashid.(2006)

METODOLOGIA Y TECNICAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO.

3.1. TIPO DE INVESTIGACION.

Esta investigación se cataloga de tipo proyectiva, también conocida como proyecto factible, ya que consistirá en simular el sistema de potencia de la subestación Melones Oeste, bajo el resguardo de la gerencia de Servicios Eléctricos de PDVSA en el Distrito San Tomé, empleando herramientas computacionales especializadas en el estudio de sistemas de eléctricos, incluyendo el estudio de fenómenos armónicos, con el fin, de estimar los efectos debidos a la incorporación de nuevos elementos (cargas no lineales), a los sistemas de distribución de la subestación, en condiciones actuales de carga y topología del sistema.

3.2. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO.

Para realizar el estudio en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé, que se encuentra conectada a un sistema anillado de transmisión, se establecen los siguientes pasos necesarios;



- ✚ Describir el sistema de potencia a nivel de transmisión de PDVSA en el Distrito de San Tomé, tomando en cuenta las características resaltantes de la subestación en estudio.
- ✚ Caracterización de la carga conectada en la subestación en estudio.
- ✚ Determinar el número de muestras de la población total de la carga conectada.
- ✚ Realizar las mediciones de las componentes armónicas a las muestras determinadas.
- ✚ Modelar el sistema de distribución de la subestación para llevar a cabo la corrida del flujo de carga armónico y estudio de la frecuencia, con la ayuda de la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).
- ✚ Plantear la posible solución mediante el uso de técnicas de filtrado de armónicas.

3.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA A NIVEL DE TRANSMISION DE PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.

El sistema de transmisión 115 kV y 69 kV de Servicios Eléctricos del Distrito San Tomé para el año 2010 se compone de diferentes subestaciones como se puede observar en la figura 3.1.

El sistema trifásico de transmisión descrito en la figura 3.1. Se encuentra anillado bien sea nivel de transmisión o distribución, permitiendo tener confiabilidad en el mismo, manejando tres niveles de tensión (400kV en la fuente, 115kV y 69 kV).

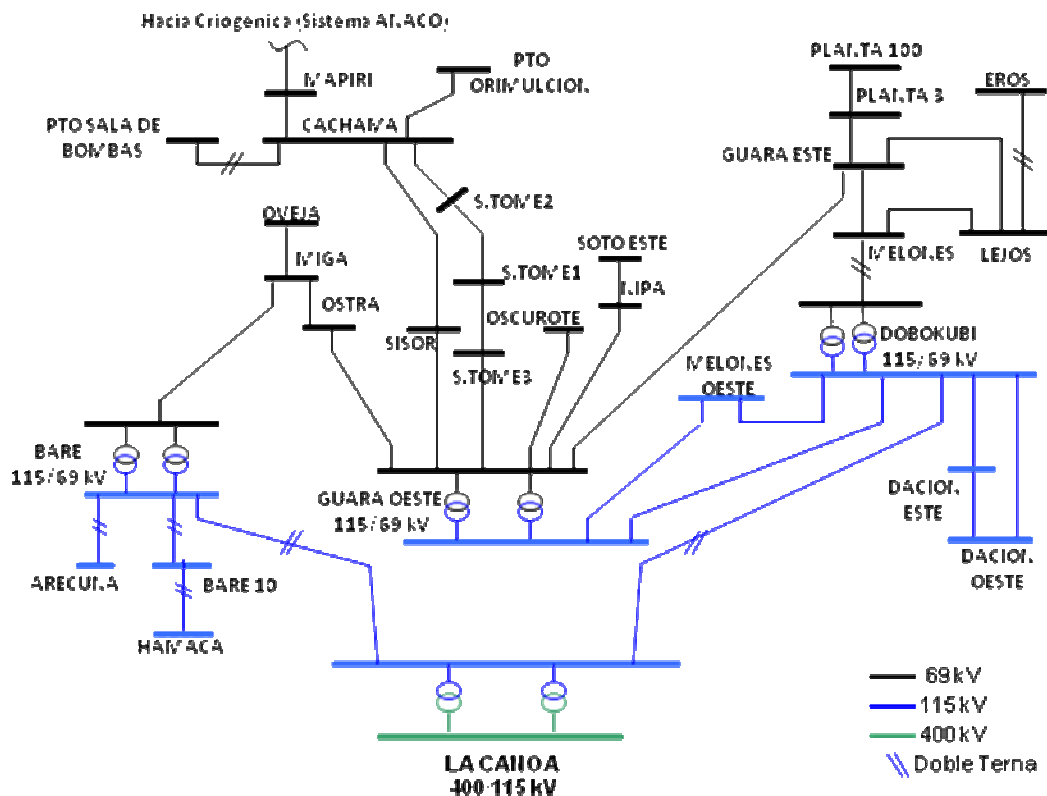


Figura 3.1. Sistema de Transmisión Distrito San Tomé.

La fuente del sistema se ubica en la subestación la La Canoa perteneciente a EDELCA, de donde salen cuatro (4) líneas de transmisión a nivel de 115 kV con conductores 500 KCM, hacia las subestaciones DOBOKUBI y BARE, desde donde se reduce el nivel de voltaje de 115 kV a 69 kV, alimentando a ambos niveles de voltajes a diversas subestaciones, entre ellas la subestación Melones Oeste, desde Dobokubi.

La tabla 3.1 muestra los diferentes niveles de voltaje a nivel de transmisión de las líneas que alimentan las subestaciones mediante un conductor de ACCR de 500 KCM.



Tabla 3.1. Voltaje de las subestaciones a nivel de transmisión.

Subestación	Voltaje a nivel de transmisión	
	KV. De entrada	KV. De salida
Bare	115	115/69
Bare 10	115	115
Hamaca	115	NA
Arecuna	115	NA
Miga	69	69
Oveja	69	NA
Ostra	69	69
Cachama	69	69
Mapiri	69	NA
San tomé 1,2,3	69	69
Dobokubi	115	115/69
Dación Este	115	115
Dación Oeste	115	115
Melones Oeste	115	115
Melones	69	69
Guara Oeste	115	69
Guara Este	69	69
Lejos	69	69
Eros	69	NA
Planta 3	69	NA
Nipa	69	69
Soto Este	69	NA
Oscurote	69	NA



Las subestaciones del sistema de potencia están diseñadas de manera similar, dependiendo de la cantidad de salidas, estas se ubican desde barra simple seccionada hasta anillos de un y medio (1 y 1/2) interruptor por circuito, siendo todas de alto perfil a la intemperie.

Los sistemas de distribución desde donde se alimenta a las cargas conectadas se normalizan a nivel de 13,8 kV, y en baja tensión a 4,16 kV y 480 V, distribuido por conductores Arvidal numero 2/0 y cables de hasta 600 V de aislamiento, numero 2/0.

Para el estudio se enfoca en la subestación Melones Oeste gracias a su número de cargas no lineales (variadores de frecuencia). Esta subestación del tipo reductora se conecta a nivel de 115 kV desde Dobokubi y con Guara Oeste de manera radial, bajando el nivel de voltaje de 115kV a 13,8 kV, para alimentar a su carga, incluyendo una estación de rebombeo y los motores asociados a los pozos de extracción de crudo.

3.4. CARACTERÍSTICAS DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE.

Esta Subestación es de tipo unitaria, aislada en aire, su configuración es de barra simple seccionada, de alto perfil, cuyo diagrama unifilar se muestra en la figura 3.2. La Subestación Melones Oeste 115 kV es alimentada desde la subestación Dobokubi y Guara Oeste, a través de los interruptores H-720 y H-820 respectivamente que alimentan el transformador TX1.



Esta subestación consta actualmente de cuatro salidas activas para alimentar a cuatro circuitos de distribución, en los cuales, se encuentran los circuitos Carapa 1 y 2 conectados al los interruptores D405 y D105 respectivamente, y las dos líneas que alimentan la estación de rebombeo de nombre Melen, las líneas se conocen como Melen 1,1 y Melen 1,2 asociadas a los interruptores D-305 y D-205 respectivamente.

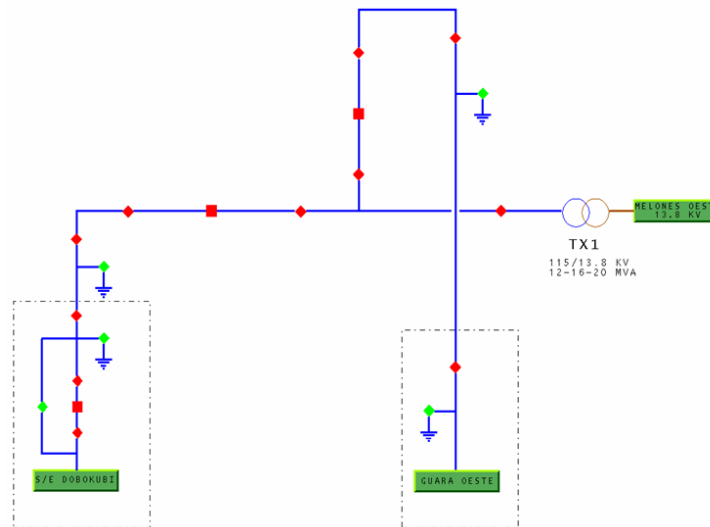


Figura 3.2. Diagrama Unifilar S/E Melones Oeste 115 kV.

Se encuentran asociadas a esta subestación tres nombradas a continuación.

- Línea simple terna 500 KCM 115 kV Guara Oeste.
- Línea simple terna 500 KCM 115 kV Dobokubi.
- Línea hacia CDP desde transformador 115/13,8 kV

3.4.1. TRANSFORMADOR PRESENTE EN LA SUB ESTACIÓN MELONES OESTE.

En esta subestación se encuentra un transformador 115/13.8 kV, cuyas características se muestran en la tabla 3.2. Siendo este el único



transformador operativo de la subestación y en donde se ven reflejados los efectos de las distorsiones causadas por la carga.

Tabla 3.2. Características Técnicas Transformador 115 kV/13.8 kV.

Parámetros	Unidad.	Tx1
Voltaje del Primario	kV	115
Voltaje del secundario	kV	13.8
Nivel básico de aislamiento (BIL)	kV	550
Frecuencia nominal	Hz	60
Capacidad nominal (ONAN/ONAF/OFAF)	MVA	(12/16/20)
Impedancia	%	7

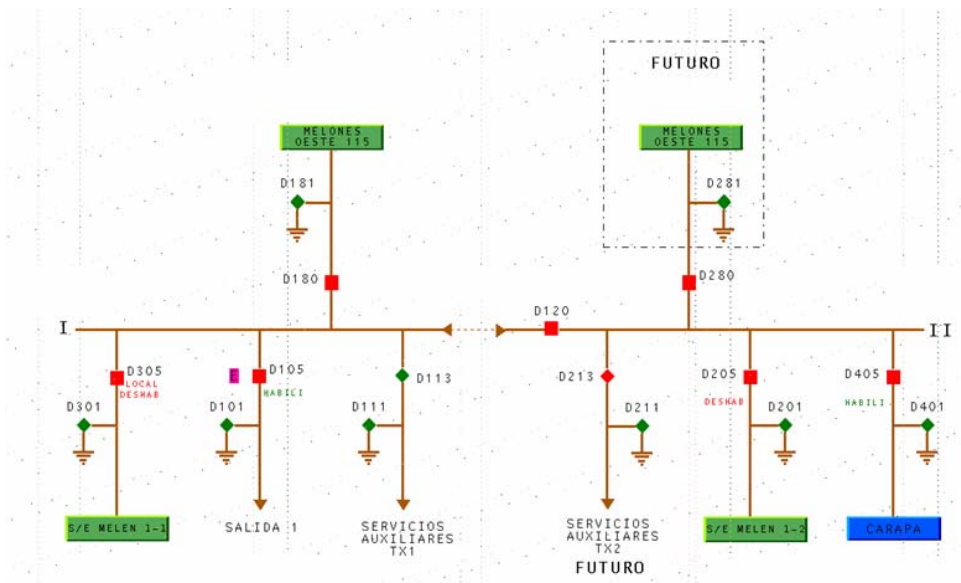


Figura 3.3. Diagrama unifilar de la subestación Melones Oeste a nivel de 13.8 kV.



También se cuenta con un transformador de respaldo en la subestación con las mismas características. En la figura 3.3 se muestra la configuración de la subestación a nivel de 13,8 kV.

3.4.2. ESTACIÓN DE BOMBEO MELEN.

Actualmente la producción del área Melones Oeste es recolectada y transportada a través de una red de tuberías y oleoductos existentes desde ocho (8) Válvulas Multipuerto repartidas en el campo y transferidas en forma independiente a las bombas multifásica a través del Tubo múltiple de succión MTM-205, luego es transportada desde dicho tubo múltiple hasta la estación MELEM, finalmente la producción es impulsada por la estación multifásica hasta la estación de Descarga MED-20, a través de un oleoducto de 16" x 18 km Aproximadamente.

Las bombas Multifasicas reciben la producción a una presión de succión de 120 Libras, las bombas operaran de acuerdo a su estabilización y en la siguiente secuencia: Inicialmente arranca la Bomba P-01, una vez estabilizada esta, arrancará la P-03, luego la P-02 y por ultimo la P-04; esto con el fin de distribuir el flujo en forma equitativa y evitar problemas de Cavitación.

En cuanto a las características de los variadores estos son de la marca Allen Bradley (POWER FLEX 7000) de 6 pulsos bajo la norma de diseño NEMA tipo 1 con capacidad para 1750HP y 185 Amp la instalación fue llevada a cabo por la empresa ELSA POWER y la configuración del sistema estuvo a cargo de la empresa ROCKWELL. Estos variadores tienen la capacidad para manejar cuatro (4) bombas, tres (3) bombas en arranque con bypass u operación Directa y una bomba en arranque con variador,



actualmente cada variador maneja dos bombas (una bomba en arranque con BYPASS o modo directo, y otra bomba en arranque con variador), es decir los variadores solamente pueden controlar 1 bomba mientras que la otra esta en modo directo o Bypass. En caso de dañarse un variador el otro variador puede asumir toda la carga de las cuatro (4) bombas multifásicas y así evitar la paralización del bombeo.

Las bombas multifásicas tienen una capacidad máxima de 1500HP con una velocidad de 1800 RPM y una capacidad mínima de 375HP con una velocidad de 450 RPM.

Cuando las bombas están en arranque directo o Bypass la velocidad de la bomba es de 1800 RPM por defecto. Cuando están en arranque con variador la velocidad es regulada dentro del rango de 450-1800 RPM según las necesidades de flujo, presión, temperatura, inyección, y succión del sistema.

Cada variador posee un panel view plus 1250 donde se pueden observar el status de las principales variables del sistema de bombeo como son presiones y flujos de inyección, presiones y flujos de succión, presiones y temperaturas de la descarga, potencia consumida por el motor, consumo en Amperios, voltajes de línea, velocidad de las bombas y modo de operación de las bombas (arranque con Bypass o con Variador.)

Los transformadores que alimentan las bombas multifásicas tienen una capacidad de 2000KVA nominales 13800/4160 V y 87.7/277.6 Amp; con un sistema de enfriamiento ONAM, impedancia de 5.70%, grupo vectorial Dyn-11, con transformadores de corriente para protección de relación 300/5



en las fases y 50/5 en el neutro, Con un nivel básico de aislamiento para alta tensión de 95KV bajo la norma covenin 536.

3.4.3. CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN CARAPA I Y II.

Los circuitos de distribución asociados a la subestación Melones Oeste, que son conocidos por el nombre de Carapa I y II, son alimentados por un conductor arvidal 2/0, con una ampacidad máxima de 138,2 amperios.

En estos circuitos se encuentran conectados un gran número de pozos de extracción de crudo, que operan, mediante el uso de motores eléctricos, controlados por variadores de frecuencia de distintos fabricantes, pero todos de seis (6) pulsos.

Todos los transformadores ubicados en el circuitos están compuestos por bancos trifásicos de 150 KVA, (cada transformador tiene una capacidad de 50 KVA), con una conexión delta-delta, con una impedancia porcentual de tres (3) por ciento ($Z(\%)=3$).

Para especificar y caracterizar en total la carga conectada en los circuitos de distribución Carapa I y II se presenta la tabla 3.3, en donde, se destacan la cantidad exacta de pozos que se encuentran activos en la actualidad, junto a la capacidad de los motores y variadores de cada pozo según sea el caso.



Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste.

Código del pozo	Método	Marca del variador/ tipo de arranque	Potencia del variador (HP)	Potencia del motor (HP)
MEL 106	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MEL 107	BM	ARRANQUE DIRECTO		75
MEL 108	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MEL 183	BCP	ABB	100	100
MEL 185	BCP	ABB	100	100
MEL 186	BCP	ABB	100	100
MEL 187	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MEL 188	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 202	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 206	BM	TBWOODS	100	100
MEL 207	BCP	INPEGAS	100	100
MEL 210	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 211	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 213	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 216	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 217	BM	TBWOODS	75	75
MEL 219	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 220	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 222	BCP	ÚNICO	150	100
MEL 223	BCP	YASKAWA	100	75
MEL 224	BCP	YASKAWA	100	100
MEL 225	BCP	ABB	150	150
MEL 226	BCP	ÚNICO	150	150



Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste. (Continuación).

Código del pozo	Método	Marca del variador/ tipo de arranque	Potencia del variador (HP)	Potencia del motor (HP)
MEL 227	BCP	YASKAWA	100	150
MEL 228	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 230	BM	ARRANQUE DIRECTO		75
MEL 232	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MEL 234	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 235	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 238	BCP	ÚNICO	150	100
MEL 241	BCP	TBWOODS	100	75
MEL 243	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MEL 245	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 246	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 247	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 248	BCP	TBWOODS	150	100
MEL 251	BCP	YASKAWA	100	100
MEL 254	BCP	YASKAWA	100	100
MEL 255	BCP	ÚNICO	150	150
MEL 256	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 260	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 261	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 262	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 266	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 268	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 269	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 270	BCP	ÚNICO	100	100



Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste. (Continuación).

Código del pozo	Método	Marca del variador/ tipo de arranque	Potencia del variador (HP)	Potencia del motor (HP)
MEL 272	BCP	TBWOODS	100	100
MEL 273	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 276	BCP	ABB	100	100
MEL 278	BCP	YASKAWA	150	150
MEL 280	BCP	TBWOODS	150	150
MEL 284	BCP	INPEGAS	150	150
MEL 285	BCP	ÚNICO	150	150
MEL 287	BCP	ABB	100	100
MEL 289	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 290	BCP	SIEMENS	100	100
MEL 292	BCP	ABB	150	150
MEL 294	BCP	SIEMENS	150	150
MEL 296	BCP	INPEGAS	150	150
MEL 297	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 303	BCP	WELLMAX	150	75
MEL 308	BCP	ÚNICO	150	150
MEL 311	BCP	TBWOODS	150	150
MEL 315	BCP	TBWOODS	150	150
MEL 316	BCP	TBWOODS	150	150
MEL 317	BCP	INPEGAS	150	150
MEL 318	BCP	TBWOODS	150	200
MEL 322	BCP	ABB	150	150
MEL 323	BCP	ÚNICO	100	100
MEL 324	BCP	ABB	150	150



Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste. (Continuación).

Código del pozo	Método	Marca del variador/ tipo de arranque	Potencia del variador (HP)	Potencia del motor (HP)
MEL 325	BCP	BCP-VEN	150	150
MEL 326	BCP	WELLMAX	100	100
MEL 327	BCP	ABB	100	100
MFC 18	BCP	YASKAWA	100	100
MFC 21	BCP	WELLMAX	100	100
MS 452	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MFC 16	BCP	TBWOODS	100	100
MFC 22	BCP	ABB	100	100
MFC 02	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 435	BM	ARRANQUE DIRECTO		75
MS 456	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 458	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MFC 06	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MFC 14	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MS 811	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MS 813	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 814	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MFC 12	BM	ARRANQUE DIRECTO		60
MS 812	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 818	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MFC 13	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 418	BCP	TBWOODS	100	100
MS 446	BM	ARRANQUE DIRECTO		30
MS 459	BM	ARRANQUE DIRECTO		50



Tabla 3.3. Caracterización de la carga conectada a los circuitos Carapa I y II de la subestación Melones Oeste. (Continuación).

Código del pozo	Método	Marca del variador/ tipo de arranque	Potencia del variador (HP)	Potencia del motor (HP)
MS 475	BCP	TBWOODS	100	100
MS 477	BCP	TBWOODS	75	100
MS 480	BCP	ÚNICO	75	75
MS 481	BCP	TBWOODS	100	100
MS 484	BCP	SIEMENS	100	100
MS 824	BM	ARRANQUE DIRECTO		50
MFB 780	BCP	ABB	150	150
MFB 781	BCP	ABB	150	150
MFB 782	BCP	ABB	150	150
MFB 783	BCP	ABB	150	150

Tabla 3.4. Caracterización total de la carga conectada.

Total de motores 30 hp;	13	Total de Pozos;	105
Total de motores 50 hp;	7	Total de Pozos con variador de frecuencia;	81
Total de motores 75 hp;	8	Total de Pozos con arranque directo;	24
Total de motores 100 hp;	52		
Total de motores de 150 hp;	22		



Según los datos aportados por las tablas 3.3 y 3.5 se puede apreciar cualitativamente el total de la carga contemplada para el estudio, también se pueden apreciar la cantidad de cargas no lineales del sistema gráficamente en las figuras 3.4 y 3.5.

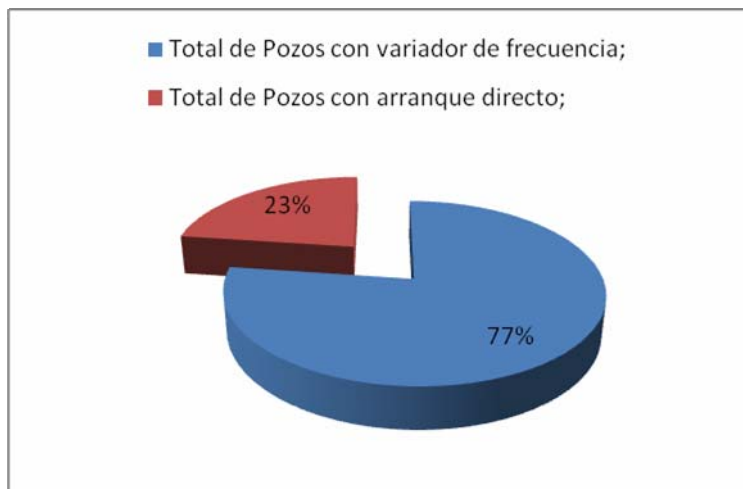


Figura 3.4. Total de pozos con variador de frecuencia Vs. pozos en conexión de arranque directo.

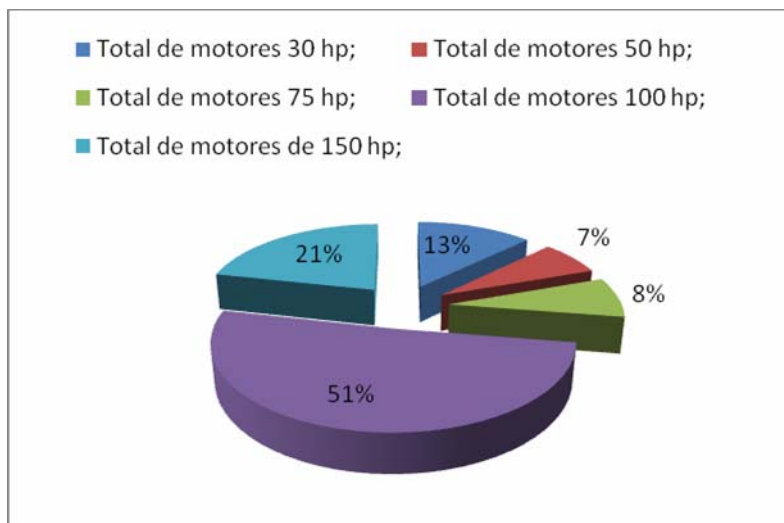


Figura 3.5. Cantidad de motores según su potencia en los circuitos Carapa I y II.



3.4.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS Y LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN.

La red de distribución de los circuitos Carapa I y II al igual que los circuitos de la estación de bombeo Melen. (Melen 1,1 y Melen 1,2), es una red trifásica conformada por postes de transformación, telescópicos y terminales. La red trifásica que interconecta los circuitos opera de manera radial, más se cuenta con a capacidad de transferir carga a otras subestación (Melones y Miga) mediante el cierre de los interruptores M-1258 que conecta el circuito Carapa I con la subestación MIGA en su circuito Este, M-184 que conecta el circuito Carapa II con la subestación Melones mediante el circuito Oeste y el interruptor M-185 que interconecta el circuito con la subestación Miga circuito Este.

Las dimensiones de las crucetas, y las distancias más importantes del circuito se basan en la figura 3.6 y las especificaciones en la tabla 3.5.

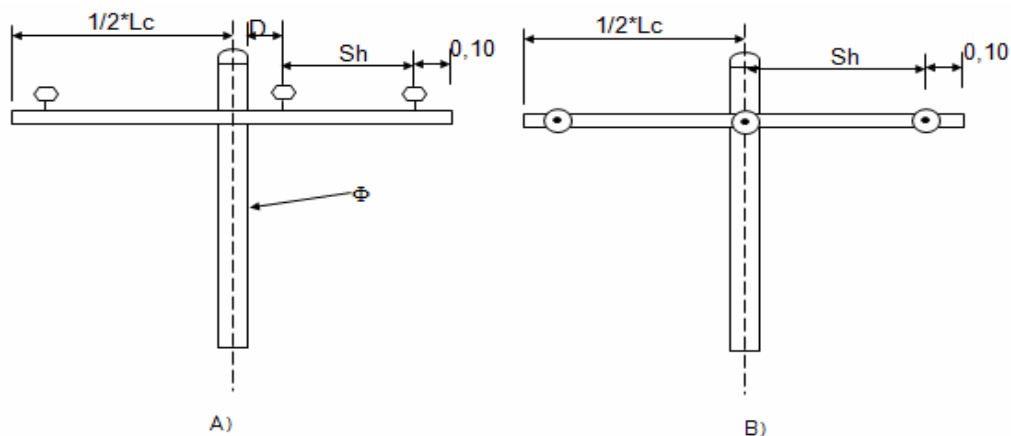


Figura 3.6. Dimensionamiento de crucetas. A) Cruceta para postes de alineación. B) Cruceta para poste de amarre.



Tabla 3.5. Parámetros para el dimensionamiento de las crucetas.

CRUCETAS PARA APOYO EN ALINEACION		
Lc = Longitud de la cruceta	2,32 [m]	
Sh = Distancia horizontal entre conductores	A-B: 0,66[m]	B-C: 1,66[m]
D = Distancia de conductor a tierra (estructura)	0,25 [m]	
f = Diámetro del poste	114,5 [mm]	
CRUCETA PARA APOYO DE AMARRE O SUSPENSION		
wo = Peso del conductor	0,611 [kg/m]	
Wc = Peso compuesto del conductor	0,75 [kg/m]	
S = Flecha máxima del conductor	400 [cm]	
dc = Diámetro del conductor	10,5 [mm]	
Lc = Longitud de la cruceta	2,93 [m]	
Sh = Distancia horizontal entre conductores	136,3 [cm]	

Las longitudes de los circuitos acoplados a la subestación se pueden apreciar en el plano unifilar de los circuitos, incluido en el ANEXO B, donde se definen los troncales principales y sus distancias.



3.5. CARACTERIZACIÓN DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA USADOS POR PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.

Los variadores de frecuencia usados en los sistemas de arranque y control de los motores de los pozos de PDVSA son en su mayoría de seis (6) pulsos de diferentes fabricantes y modelos, con un alto rango de potencia que parte desde 75hp. En el caso específico de la subestación Melones Oeste se establecen desde 75 hp hasta 150 hp para los pozos de extracción de crudo en los circuitos Carapa I y II, y para la estación de bombeo Melen se usan variadores de 1750 hp. Esto variadores son del tipo de rectificación controlada mediante tecnología SCR, pos modulación de ancho de pulso (PWM). Con circuito DC compuesto por banco de capacitores y reactores.

La Tabla 3.6. Muestra las características del fabricante de los variadores usados en PDVSA, distrito San Tomé. A nivel de voltaje de 480 V.

Tabla 3.6. Caracterización de los variadores de frecuencia.

Marca de los variadores (Modelo)	Potencia (HP)	FP	Corriente Nominal (A)
ABB (ACS 601-0100-5)	75	0,98	124
	100	0,98	160
	150	0,98	210
BCP-VEN / CILA2S (CILA 2S-100-100-ND-VFD)	75	0,98	125
	100	0,98	156
	150	0,98	248
	200	0,98	300



Tabla 3.6. Caracterización de los variadores de frecuencia. (Continuación).

Marca de los variadores (Modelo)	Potencia (HP)	FP	Corriente Nominal (A)
ÚNICO (1100-460-075-V-N-J20-C00-805560)	50	0,94	65
	75	0,94	96
	100	0,94	124
	150	0,94	180
	200	0,94	240
YASKAWA (ND)	100	0,97	145
	150	0,97	235
WELLMAX (GPD515C-B096)	75	0,98	130
	100	0,98	140
	150	0,98	190
TBWOODS / INPEGAS (DVC41000BLNOGSA)	75	0,98	105
	100	0,98	140
	125	0,98	170
	150	0,98	205
	200	0,98	261
SIEMENS	75	0,98	98
	100	0,98	156
	150	0,98	220
DANFFOS (175Z4809)	150	0,98	190
SCHLUMBERGER / Speedstar	111 (KVA) 148,02	0,98	133
	200 (KVA) 260	0,98	241
	260 (KVA) 338,06	0,98	313
	390 (KVA) 507,10	0,98	469
	450 (KVA) 585,12	0,98	546
CENTRILIFT / Baker Hughes	150	0,98	245
	450 (KVA) 585,12	0,98	550



3.6. CALCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA A CONSIDERAR.

Para la realización de la jornada de medición, se debe establecer primero el número de la muestra a medir, basado en la población total en estudio. Esto se logra aplicando la ecuación 3.3.

$$n = \frac{0.25 \cdot N}{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 (N-1) + 0.25} \quad (3.3)$$

Donde;

n: Es el número de la muestra.

N: Tamaño de la población.

α : Valor del error aceptable.

Z: Valor del número de unidades de desviación estándar para una prueba de dos colas con una zona de rechazo igual alfa.

Tomando en consideración un error de desviación del 10 % y un valor de Z igual a 1,644, se calculan el número de muestra para los diferentes motores del sistema, según su nivel de potencia.



Tabla 3.7. Numero de muestras aproximado.

Error = 10% Z= 1,644	Numero de muestra	Aproximado
Total de motores 30 hp;	11,039423	11
Total de motores 50 hp;	6,4291027	6
Total de motores 75 hp;	7,2490116	7
Total de motores 100 hp;	29,633164	30
Total de motores de 150 hp;	16,783693	17

Esto arroja un total de setenta y una (71) muestras totales a las cuales se le realizaran mediciones, para determinar el nivel del impacto armónico en cada carga que se inyecta al sistema de potencia, esto será el dato real y actual de vital importancia para el modelo por inyección de corriente que se utilizara mediante la herramienta de simulación Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).

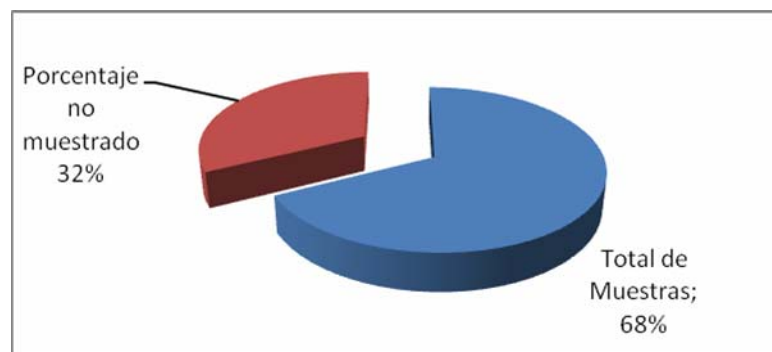


Figura 3.7. Porcentaje de muestras a tomar.

De el total de muestras recogidas se realiza un preselección de los mas característicos e importantes con respecto a la diversidad de las variadores, estos se muestran en el capitulo 4.



3.7. TECNICAS DE MEDICION Y REGISTRO DE LAS COMPONENTES ARMONICAS.

Las componentes armónicas inyectadas al sistema por parte de las cargas no lineales que integran al mismo son variantes según el orden del funcionamiento del equipo y las condiciones de él, siendo así de gran complejidad determinar exactamente la magnitud y fase de cada componentes armónica generada, es por esta razón, se toma en consideración la recomendación de las normas IEEE 399 y 519 donde se plantean realizar mediciones de campo directamente al área afectada y/o la fuente generadora de armónicos en el sistema, de esta manera, se tendría un dato preciso y de gran calidad, el cual, sirve para representar las cargas no lineales en un sistema de mayor tamaño y complejidad, en donde se desea conocer el impacto y penetración de las componentes armónicas al sistema.

Para la realización de las mediciones se cuenta con un equipo analizador de redes, que determina las magnitudes y fases de las componentes armónicas al igual que las distorsiones totales, entre otros parámetros, realizando un registro tomando no solo mediciones puntuales si no realizando un estudio del comportamiento de la carga analizada durante un periodo de tiempo y presentando los resultados obtenidos de dicho análisis.

El equipo a utilizar en las jornadas de medición es el POWER LOGGER 1735, de marca Fluke, equipo que se encuentra certificado por la norma ISO 9000. Siendo este de fácil uso y moderno, presentando un entorno digital de condición robusta para trabajo en campo.



El equipo es capaz de realizar un registro al elemento que se dispone a medir, el tiempo contemplado de este registro se le puede programar a disposición del usuario, según el tipo de estudio que este realizando, esto ira variando la cantidad de iteraciones y el tiempo de toma de datos del equipo, lo cual, es necesario para realizar el promedio y presentar los resultados obtenidos luego e cada medición.

Entre las características contenidas por el equipo se encuentran;

- ✚ El análisis debe realizarse en estado estable, y el equipo puede realizar el registro de las componentes armónicas con un error menor del 5 %.
- ✚ El equipo es capaz de diferenciar claramente entre componentes armónicas características y componentes interarmónicas (de existir), y es capaz de ser selectivo con cada componente.
- ✚ El equipo es capaz de captar a tiempo real variaciones y cambios en el sistema, registrándolos e incorporándolos como parte de los datos para el análisis.
- ✚ Posee un amplio espectro de frecuencias para el análisis, según se le programe la frecuencia fundamental.

El equipo debe primordialmente programarse según las características del sistema potencia y la topología de la red, para así establecer los valores de tolerancia máxima y mínimas, al igual, que la forma de conexión del mismo. Este equipo esta diseñado para trabajar a nivel de baja tensión, es decir, desde 0V hasta a 600V. Este cuenta con ocho (8) dispositivos de conexión a red, los cuales son cuatro (4) pinzas tipo caimán para el voltaje y



cuatro (4) pinzas tipo toroidales para las corrientes, una para cada fase y neutro, estando estas plenamente identificadas.

3.7.1. PASOS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL EQUIPO POWER LOGGER 1735 MARCA FLUKE PARA EL REGISTRO DE COMPONENTES ARMÓNICAS.

La forma de uso del instrumento de medición (POWER LOGGER 1735 MARCA FLUKE) para registrar las componentes armónicas requiere la configuración del sistema de potencia como se muestran en los pasos siguientes.

Primero se debe Seleccionar el tipo de potencia (monofásica, fase dividida, estrella, delta de dos elementos o delta de tres elementos), también se selecciona el voltaje nominal de fase y la frecuencia. La figura 3.8. muestra la pantalla en donde se debe configurar las cualidades del sistema de potencia en estudio.

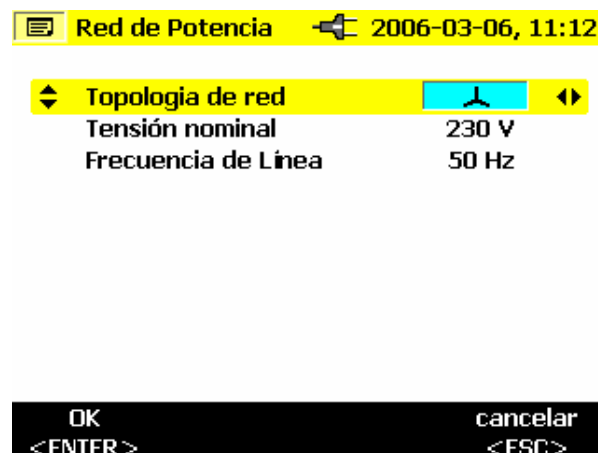


Figura 3.8. Pantalla de programación del Power Logger 1735. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.



Seguidamente se debe colocar la perilla giratoria del equipo en la función de medida de Armónicas. La contribución de las componentes armónicas a la fundamental se muestra en forma de barras hasta la armónica n° 40, iniciando en la segunda debido a que la primera componente sería la fundamental.

El conexionado de las pinzas del equipo se debe realizar como se describe a continuación.

Para medir las fases de un sistema trifásico se debe seguir el diagrama de conexión que se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. *Tabla de conexión de las pinzas de voltaje y corriente. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.*

Línea de la red eléctrica (fases)	Voltaje	Corriente
	Conductores de prueba (Pinzas)	Conductores de prueba (Toroidales)
A(L1)	Pinza L1	Toroidal L1
B(L2)	Pinza L2	Toroidal L2
C(L3)	Pinza L3	Toroidal L3
N	Pinza N	Toroidal N

Las figuras 3.9 y 3.10 muestran el conexionado del equipo a las fases de baja tensión que se encuentran en estudio, para redes de topología delta y estrella.

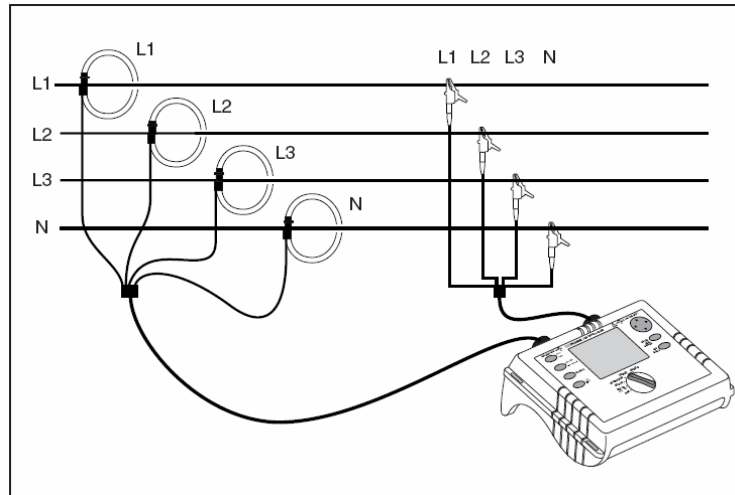


Figura 3.9. Conexión para redes de en conexión estrella. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.

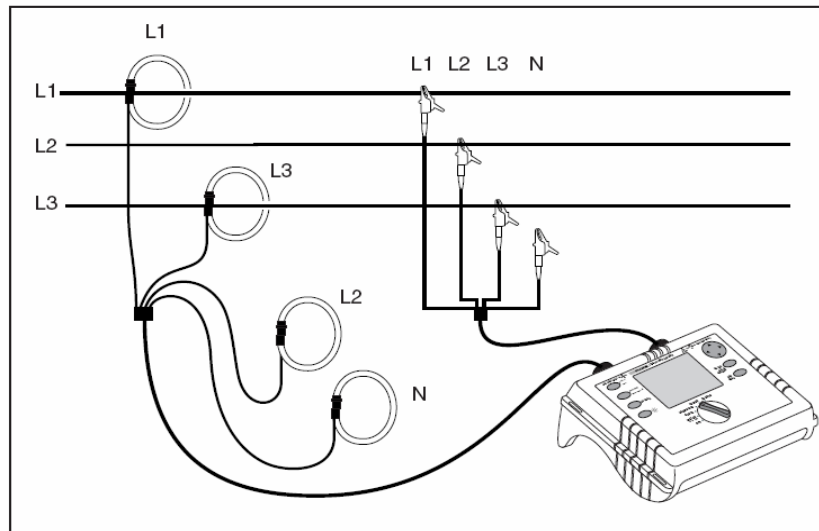
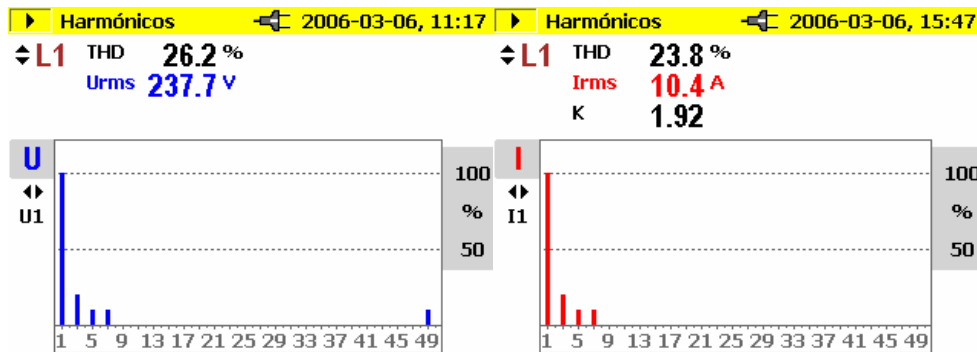


Figura 3.10. Conexión para redes de en conexión Delta. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.



Medición de armónicos.

Cuando seleccione este modo de medición con el selector giratorio, los armónicos se representan de forma clara e inmediata en la pantalla de como se muestra en la figura 3.11.



↕↔ Cambio entre las fases individuales.

↔↔ Cambiar entre V e I.

Figura 3.11. Visualización de armónicas de forma puntual. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.

Con los botones HOLD/RUN, los valores actuales se “congelan” y se detiene la medición o se inicia de nuevo. Pulsando la tecla de cursor, entrará en el modo de cursor, en donde puede leer valores adicionales de cada armónico. Con las flechas laterales se puede seleccionar cada armónico.

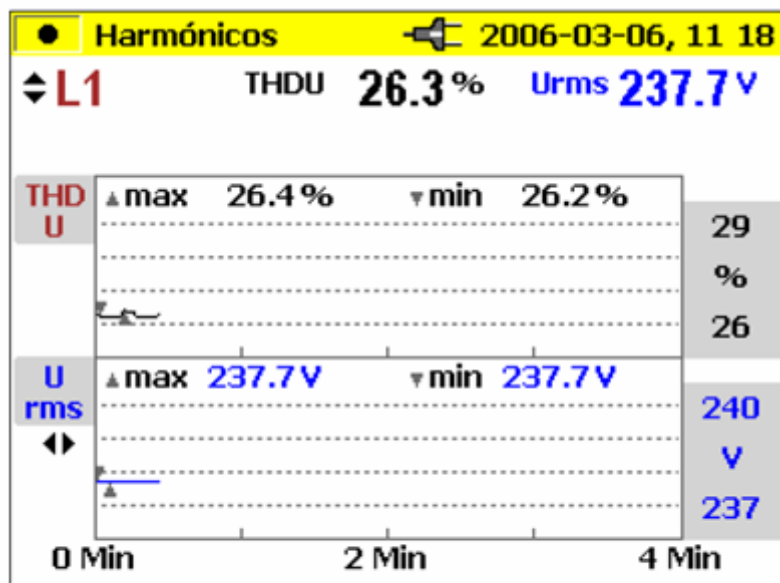
Una vez activado el modo de cursor, se puede cambiar la escala de 100 %-50 % a 50 %-25 % o 10 %-5 %.

Procedimiento para el registro.



Los botones RECORD/MEASURE inicia la función de registro o cambia del modo de registro al de medición, y viceversa. Cuando los gráficos del registrador alcanzan el margen de la pantalla durante el registro, se guarda una imagen de dicha pantalla. Entonces, esa pantalla se borra y se continúa el registro.

Se guardan hasta un total de 6 pantallas automáticas en el transcurso de un registro. Las capturas de pantalla guardadas se pueden recuperar a través del menú *Ver capturas de pantalla automáticas*. Puede salir de una medición con HOLD; sin embargo, después no se podrá continuar.



△▽ Conmutadores entre fases individuales

◁▷ Cambio entre V e I

Figura 3.12. Visualización de armónicas en forma de registro. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.



En el modo de registro se toman los siguientes valores de cada fase (L1, L2, L3).

- Voltajes (V)
- Corrientes (I)
- THD V
- THD I
- Valores de armónicos desiguales de 1-25 para V e I
- Frecuencia.

Estos valores se pueden registrar en el instrumento, descargar y evaluar con el paquete de *software* Power Log. Proveído por el equipo, teniendo la opción de visualizar el resultado de un registro y exportarlo en tablas. Los números de mediciones tomadas para las iteraciones con el fin de entregar los resultados del registro, se expresan en cada tiempo, es decir, cada cuanto se toma una medición, esto se aprecia en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. *Tabla de conexión de las pinzas de voltaje y corriente. Manual de operación del Power Logger 1735 marca Fluke.*

Función de medición	Intervalo Promedio (s)	Tiempo de registro (min)
V/A/Hz Armónicos, Potencia	0,5	36
	1	72
	2	144
	5	360
	10	720
	30	2160
	60	4320
	300	21600
	600	43200
	900	64800



3.7.2. PASOS PARA LA ACTIVIDAD DE MEDICIÓN EN CALIENTE DE LAS COMPONENTES ARMÓNICAS EN LOS VARIADORES A NIVEL DE 480V.

- ✚ Apertura de la puerta del Variador de Frecuencia sin necesidad de desenergizar el interruptor principal.
- ✚ Inspección Visual a fin de verificar las condiciones operativas del Variador de frecuencia.
- ✚ Verificar presencia y niveles de Voltaje y Corriente en las tres (3) Fases.
- ✚ Verificar las condiciones del aislamiento de conductores, interruptor principal y conexiones de puesta a tierra.
- ✚ Instalación y Conexión en Caliente de las Pinzas Amperimétricas Aisladas (Tipo Toroidal de Núcleo Partido) para referencias de Corrientes. Dichas pinzas se conectarán en los Conductores y/o Barras de entrada al Interruptor Principal del Variador de Frecuencia.
- ✚ Instalación y Conexión en Caliente de las Puntas Aisladas para referencia de voltajes (tipo pinza y/o caimán). Dichas pinzas se conectarán en las Barras y/o conductores de potencia de entrada del Variador de frecuencia de 480 Voltios.
- ✚ Con la conexión ya colocada, se procede a tomar la lectura por un espaciado de tiempo según la tabla aportada previamente en las especificaciones del equipo. Al finalizar se debe realizar la desconexión de los equipos de medición.



- ✚ Al finalizar se procede a hacer la descarga del registro desde el equipo hacia un computador portátil con el software del equipo previamente instalado.

Este procedimiento se está realizando en un equipo energizado, lo cual, conlleva ciertos riesgos, para lo cual se elabora el permiso de trabajo y se utilizaron guantes aislados.

3.8. TÉCNICAS DE MODELADO DEL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE DE PDVSA EN EL DISTRITO SAN TOMÉ.

Para el modelado del sistema de potencia de la subestación se toman en consideración los modelos propuestos por las normas IEEE 399 y 519, estas normas explican y proponen diferentes formas de realizar el estudio pero ambas concluyen que para sistemas de gran tamaño y complejidad es necesario utilizar herramientas de cálculo computacional, que permitan realizar el flujo de carga armónico y el escaneo de las frecuencias.

Los modelos propuestos por la normativa IEEE 399, se muestran en la tabla 3.10. Estos modelos están hechos para los componentes más comunes de un sistema de potencia, como motores, transformadores, modelo de líneas cortas y largas, capacitores shunt y cargas estáticas, mas como ya se ha mencionado la carga no lineal y nuevos elementos que actualmente integran los sistemas de potencia requieren tratamiento especial.

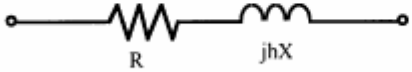
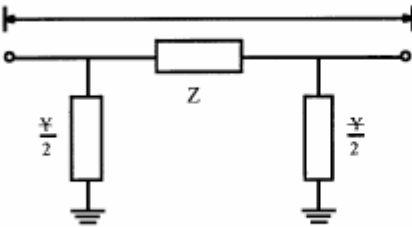
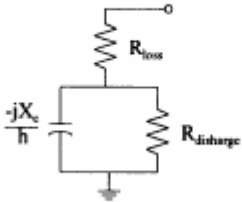


Tabla 3.10. Componentes de un sistema de potencia para el análisis de armónicos. . (IEEE Std. 399 – 1997).

System components	Equivalent circuit model	Model parameters
Synchronous machines		$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$ $X = X''$ or $X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$
Transformer	<p>Ignored if not a significant harmonic source</p>	$R_T = R_{dc}(1 + Ah^B)$ R_T and X_T are transformer rated R and X values
Induction machines		$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$ $X = X''$ or $X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$ NOTE—See 10.5.3 for a more accurate model.
Load	Static load: Motor load: 	$R = \frac{V^2}{P}$ $X = \frac{V^2}{Q}$ $R = \frac{V^2}{P}$ $X = \frac{V^2}{Q}$



Tabla 3.10. Componentes de un sistema de potencia para el análisis de armónicos. . (IEEE Std. 399 – 1997).Continuación.

System components	Equivalent circuit model	Model parameters
Line and cable	<p>Short line and cable:</p>  <p>Long line (equivalent Pi):</p> 	$M = 0.001585 \sqrt{\frac{f}{R_{dc}}}$ <p> f = frequency (Hz) R_{dc} = dc resistance (Ω/m) l = length in meters $R = R_{dc} (0.035 M^2 + 0.938)$, $M < 2.4$ $R = R_{dc} (0.35 M^2 + 0.3)$, $M \geq 2.4$ $z = r + jx_L$ (Ω/m) $y = g + jb_C$ (S/m) </p> $Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}}; \gamma_e = \sqrt{zy}$ $Z = Z_C \sinh(\gamma_e l),$ $\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma_e l}{2}\right)$
Shunt capacitor		

Para la ejecución del modelado con el cual se ejecutarán los cálculos del sistema, se toman los modelos incluidos en la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP), Los cuales, cumplen con lo antes expuesto en la tabla 3.10. Usando la simbología IEC (International Electrotechnical Comisión).



Seguidamente se uso de elementos ficticios como lo son los nodos, las barras que sirven como punto de estudio del circuito, estos elementos no alteran el funcionamiento del sistema.

3.8.1. SECCIONADORES.

En el circuito se encuentran seccionadores, que fueron ejemplificados por el elemento contenido en el paquete de simulación, de nombre interruptor de alto voltaje (high voltage circuit breaker). Como se muestra en la figura 3.13.

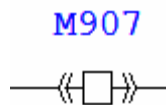


Figura 3.13. Modelo del seccionador M907 del circuito Carapa II.

3.8.2. LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El modelado de las líneas de transmisión a nivel de 13,8 kV se realiza mediante el modelo de líneas cortas, para esto el paquete ETAP, en donde se cargan los datos del tramo de línea como;

- ✚ Configuración de la línea.
- ✚ Datos característicos de los conductores de fase y neutro.
- ✚ Altura del poste.
- ✚ Resistividad del suelo.
- ✚ Distancia entre los vanos.



La carga de estos datos en el sistema de simulación se puede apreciar en la figura 3.14. y 3.15.

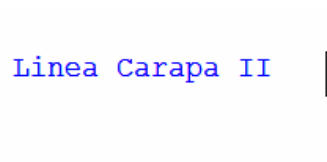


Figura 3.14. Modelo de las línea principal del circuito Carapa II.

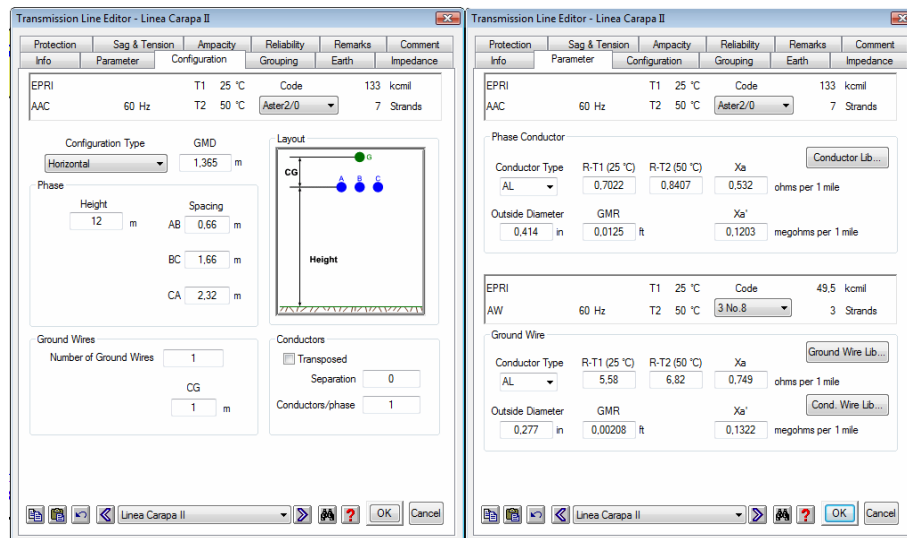


Figura 3.15. Parámetros para el modelado de las líneas de distribución.

3.8.4. MOTOR DE INDUCCIÓN.

Para el modelado de los motores se utiliza el modelo de motores de inducción de ETAP, Tomando en cuenta el hecho que son motores tipo NEMA D, de seis (6) polos, como se muestra en la figura 3.16.

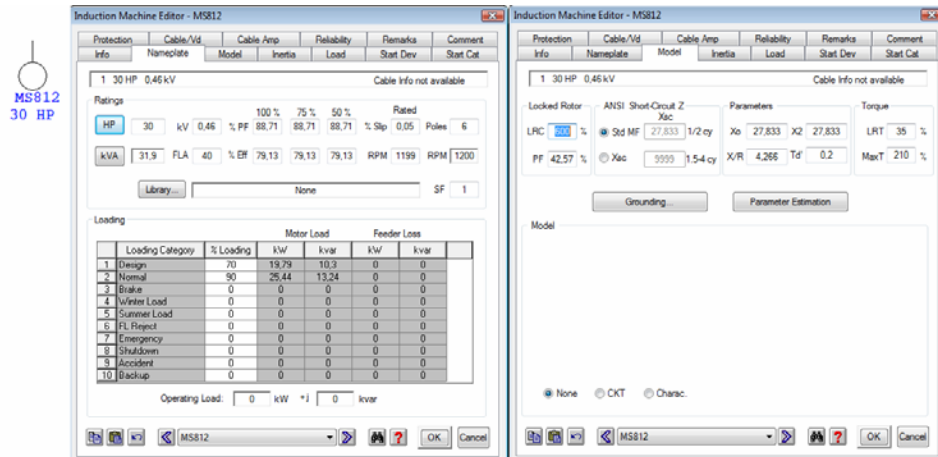


Figura 3.16. Modelo del motor de inducción presentado por ETAP.

3.8.5. TRANSFORMADOR.

El modelado de los bancos de transformación trifásicos, se realiza de manera similar utilizando el modelo contenido en ETAP y cargando los datos pedidos por el programa.

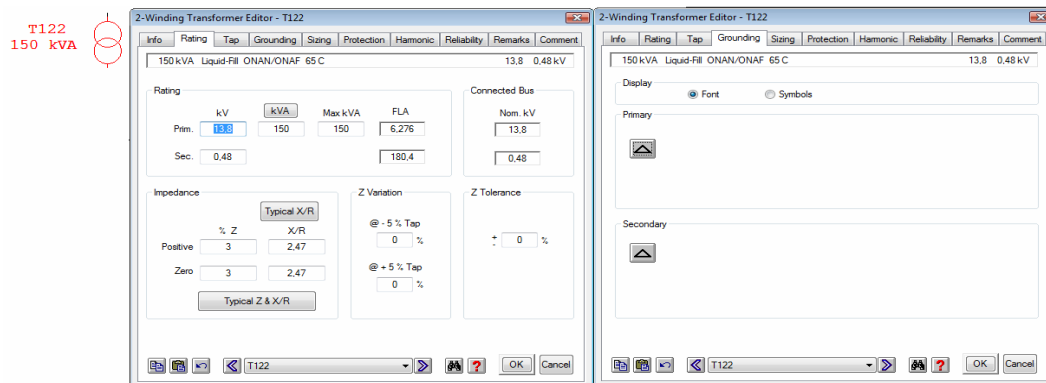


Figura 3.17. Modelo y datos resaltantes del transformador para la simulación.



3.8.6. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA ALIMENTACIÓN DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE.

La capacidad de corto circuito, nivel de voltaje y la impedancia del circuito equivalente de entrada se modela mediante un circuito preescrito en el ETAP, llamado Power Grid. Como se muestra en la figura 3.18.

Alimentación 115 KV
692 MVA_{sc}



Gen. Cat.	%V	Vangle	MW	Mvar	%PF	Qmax	Qmin
1 Design	100	0					
2 Normal	100	0					
3 Shutdown	100	0					
4 Emergency	100	0					
5 Standby	100	0					
6 Startup	100	0					

Operating

% V	Vangle	MW	Mvar
100	0	4,761	2,139

SC Rating

MVA _{sc}	X/R	kA _{sc}
3-Phase 692	4,85	3,474

SC Imp. (100 MVA base)

	% R	% X
Pos.	2,91818	14,1532
Neg.	2,91818	14,1532

Figura 3.18. Modelado del circuito de alimentación de la subestación Melones Oeste.

3.8.7. MODELADO DE CARGAS CONCENTRADAS.

Estas cargas en el circuito se colocan para representar a los fondos conectados al circuito. La figura 3.19. Muestra el menú del mismo.



Fundo 1
10 kVA



Lumped Load Editor - Fundo 1

Info Nameplate Short-Circuit Dyn Model Reliability Remarks Comment

10 kVA 0,12 kV (80% Motor 20% Static)

Model Type
Conventional Rated kV
0,12

Ratings

kVA	kW	kvar	% PF	Amp
10	8,5	5,268	85	48,11

Load Type
Constant kVA
0 80 % 100
100 20 % 0
Constant Z

	Loading Category	% Loading	kW	kvar	kW	kvar
1	Design	80	5,44	3,37	1,36	0,84
2	Normal	100	6,8	4,21	1,7	1,05
3	Brake	0	0	0	0	0
4	Winter Load	0	0	0	0	0
5	Summer Load	0	0	0	0	0
6	FL Reject	0	0	0	0	0
7	Emergency	0	0	0	0	0
8	Shutdown	0	0	0	0	0

Operating 0 0 0 0 kW +j kvar

Fundo 1 OK Cancel

Figura 3.19. Modelo de carga concentrada.

3.8.8. MODELADO DE LOS CABLES.

El modelado de los cables de baja tensión que se interconectan desde el bajante del transformador hasta la entrada del variador de frecuencia o del motor.

Las características de este modelo solo exigen cargar el tipo de cable que se emplea y la distancia que recorre. Como se aprecia en la figura 3.20.

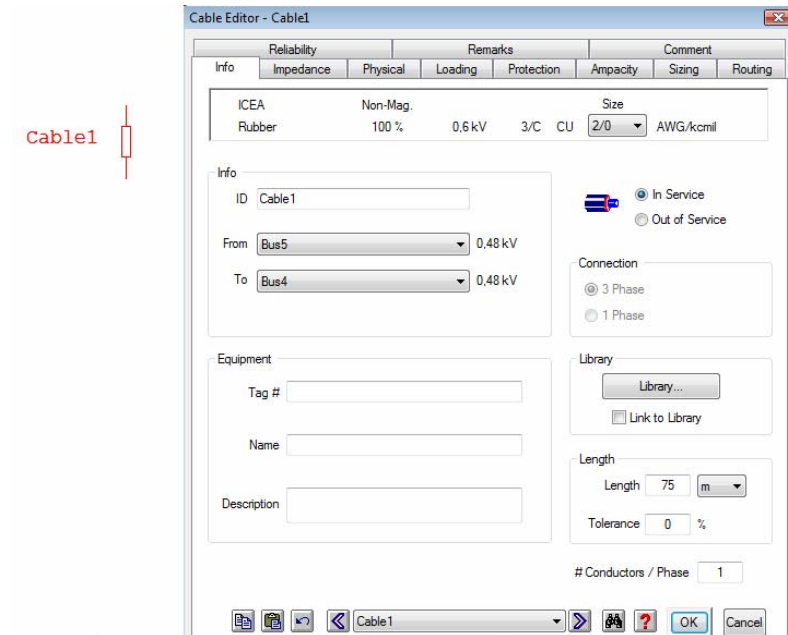


Figura 3.20. Modelo para la simulación del cable.

3.8.9. MODELADO DE LOS VARIADORES DE FRECUENCIA DE SEIS (6) PULSOS. (CARGAS NO LINEALES).

El modelado de las cargas no lineales, específicamente los variadores de frecuencia para el control de motores, son representados en el ETAP según el modelo de estudio por inyección de corrientes armónicas producidas por el elemento, en porcentaje de la fundamental, ETAP proporciona en sus librerías ejemplos de esta aplicación, por lo cual, se hace uso de la herramienta de edición de librerías, para realizar la carga de los datos obtenidos de las mediciones, en las librerías y cargar a cada variador sus componentes armónicas, por contrario, se promedia para aquellos variadores que no fueron medidos. La edición de librerías se muestra en la figura 3.21.

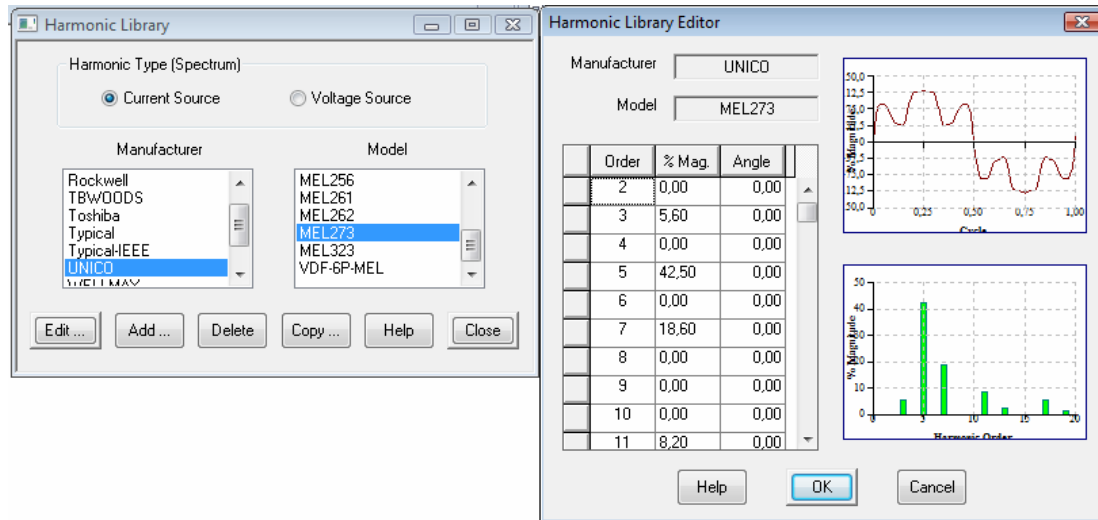


Figura 3.21. Cargado de datos medidos en las nuevas librerías.

Como se puede apreciar en la figura 3.20, el valor de las armónicas se puede cargar, creando nuevas librerías de armónicos, colocando el nombre del fabricante del variador y el modelo, pero en este caso, al igual que en otros, en vez de colocar el modelo de la marca de variador usado, se coloca el nombre del pozo donde se encuentra el variador que inyecta estas componentes armónicas al sistema, como se destaca se registra los datos de un variador de marca ÚNICO, y como este se encuentra asociado al pozo de nombre MEL 273, en el modelo se le coloco MEL 273, estos datos pasarían a ser parte de las librerías, para luego, poder cargarse al variador en juego en la simulación. Estos datos se crearon individualmente para los equipos que se le realizo el registro armónico, para aquellos, los cuales no se le realizo el registro, se empleo un promediado de entre todas las mediciones de variadores de esta marca en especifico, llamándose a este dato con la misma marca (ÚNICO) en este caso, pero en el modelo se coloco el nombre de VDF-6P-MEL, por el hecho de ser el dato de componentes armónicas



para un variador de frecuencia de seis (6) pulsos en la subestación Melones Oeste.

Una vez cargado los datos de las componentes armónicas medidas y promediadas, se procede a cargar estos datos en el modelo del variador de frecuencia presentado por ETAP. Como se muestra en la figura 3.22.

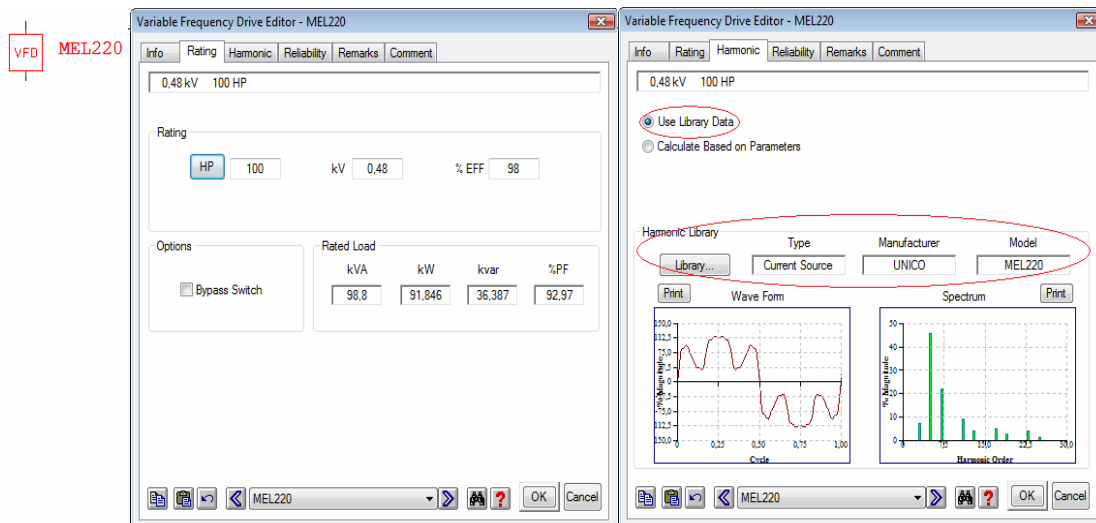


Figura 3.22. Carga de la componente armónica al modelo del variador de frecuencia.

3.8.10. MODELADO DE LOS FILTROS DE ARMÓNICAS.

Para el modelado de los filtros ETAP presenta una versátil herramienta donde se puede escoger el tipo de filtro que se desea incorporar al sistema de potencia, en este se puede escoger del tipo pasivos, los sintonizados, pasa altos amortiguado o no amortiguado, etc. Los parámetros necesarios para el diseño se especifican en el capítulo 4.



3.9. PROPUESTAS PARA LA INCORPORACIÓN DE LA MACOLLA KARIÑA AL SISTEMA DE POTENCIA DE LA SUBESTACIÓN MELONES OESTE.

Entre los planes de ampliación e incorporación de nuevas cargas al sistema se encuentra el plan de incorporar una macolla de doce (12) pozos de producción petrolera al sistema de potencia de la subestación Melones Oeste, las características de algunos de los elementos de cada uno de estos pozos son;

- ✚ Variadores de frecuencia de seis (6) pulsos para el control de la velocidad de los motores, los cuales, serán de marca ABB, con una potencia de 150 HP.
- ✚ Dos (2) Motores de 75 HP de seis (6) polos NEMA D, acoplados a un sistema de correas.
- ✚ Un banco de transformadores trifásico de 150 KVA para cada pozo.
- ✚ Sistema de Bombeo del tipo BCP. (bomba de cavidad progresiva).

Por la proximidad y ubicación de estos pozos a la zona de melones Oeste y previos estudios, La gerencia de Servicios eléctricos de PDVSA en San Tomé, decide alimentar esta macolla desde el circuito Carapa I, desde la macolla de nombre Guaicaipuro, con un tramo de línea de 1,5 kilómetros.

Para esto se presentan dos (2) propuestas, que se denominan propuesta 0 y propuesta 1.



- ✚ Propuesta 0; La primera opción es conectar las nueva cargas sin realizar modificaciones al circuito.

- ✚ Propuesta 1; Esta propuesta consiste en realizar una transferencia de carga del circuito Carapa I al circuito Carapa II. La transferencia de carga se propone mediante el cierre del seccionador M-1211, realizando la apertura del seccionador M-909 y de un nuevo seccionador anterior al M-1248, y por ultimo, colocando un nuevo tramo de línea de aproximadamente tres (3) kilómetros hasta la Macolla 12 desde la Macolla 9. Finalmente se conecta desde las nuevas cargas asignadas a la Macolla Kariña.

Una vez que se cuenta con el modelo de la subestación y sus circuitos asociado se procede a realizar las corridas de flujos de carga de armónicos, flujo de carga y escaneo de frecuencias armónicas, al sistema completo y de forma seccionada a cada circuito.

Los resultados arrojados por las mediciones y las simulaciones mediante el uso de la herramienta computacional ETAP, se muestran en el capitulo cuatro (4), junto con el diseño de implementación de las técnicas de filtrado.

PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentaran los resultados arrojados por las mediciones tanto de componentes armónicas, como de potencia y el levantamiento de las características de los circuitos y la subestación Melones Oeste, especialmente en las distancias de las líneas de distribución a nivel de 13,8 kV. Igualmente que los resultados de las simulaciones realizadas con la herramienta de simulación ETAP. Resultados con los cuales se diseña el filtro que disminuirá el impacto armónico presenta en el sistema.

4.1. RESUMEN DE LAS MEDICIONES REALIZADAS.

Las mediciones se realizaron como se menciona en el capítulo tres (3), mediante el uso de un equipo de medición y su software de interface y análisis de registro.

El resumen de las mediciones realizadas en el campo se copia y muestra en la tabla 4.1. Donde se muestran las componentes de distorsión total e individual tanto de voltaje como corriente, al igual, que se muestra la carga presente y el factor de potencia medido. Recordando que el punto en que se realiza la medición es en el punto conocido como el punto de cortocircuito, el cual, es punto de entrada del variador de frecuencia.



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas.

Código del pozo	Distorsión Armónica Total		Porcentaje de armónicas individuales para Voltaje y Corriente (v (%) -i (%))									Potencia medida	
	THDv (%)	THDi (%)	3	5	7	11	13	17	19	23	25	KVA	Factor de Potencia
MEL 107	2,1	2,8	0,8-1	1,3-2,2	1,4-2,1	1-0,4	0-0	0,4-0	0,2-0	0,5-0	0,3-0	24,7	0,698
MEL 185	3,5	85,6	0,3-15	2,6-77,8	1,8-57,6	0,8-21	0-11	0-5,5	0-3	0,4-0	0-0	25,65	0,827
MEL 188	1,6	99,5	0,2-1,2	1,2-80	1,6-75	0,5-56	0,2-38	0,1-18	0,5-5	0,5-3	0,1-2,2	6,117	0,81
MEL 206	2,4	76,1	0,1-12	1-53,2	0,9-38	0,5-20	0,1-7	0,1-5	0,25-4	0-0	0-0	16,8	0,77
MEL 207	1,8	99,6	0,2-19	1,2-80	1-61,5	0,7-22	0,25-17	0-4	0-3	0-1,5	0,1-0,9	15,27	0,828
MEL 214	3,8	71,6	0,3-9	2,8-58,9	2,5-36	1,6-8	0,6-6	0,5-3	0,6-1,1	0,9-0	0,3-0	24,84	0,815
MEL 219	2,6	79,5	0,4-7	0,7-58	1,9-40	0,8-10	0,1-6	0,4-2	0-0	0-0	0-0	21,217	0,827
MEL 220	2,9	42	0,25-10	1,2-39	1,3-21	0,8-11	0,3-5	0,4-7	0,4-6	0,1-4	0,1-2	19,32	0,75
MEL 225	4,8	59,4	0,1-6	3,5-53	2,1-30	1,3-11	0,6-9	1-3,5	0,5-4	1,1-0	1,3-0	14,49	0,82
MEL 232	2,4	5,1	0,4-1,6	1,7-3,8	1,5-3,6	0,9-0,8	0,2-0,3	0,4-0,3	0,5-0,3	0,2-0,3	0-0	22,7	0,8
MEL 234	2,5	99,8	0,3-21	1,6-75	1,4-70	0,9-40	0,3-35	0,4-22	0,5-18	0,5-9	0,2-2,5	2,185	0,84



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas. (Continuación).

Código del pozo	Distorsión Armónica Total		Porcentaje de armónicas individuales para Voltaje y Corriente (v(%)-i(%))									Potencia medida	
	THDv (%)	THDi (%)	3	5	7	11	13	17	19	23	25	KVA	Factor de Potencia
MEL 235	5,1	48,1	0,5-18	3,8-40	2,2-22	1,8-9	0,6-8	1,1-5	1,1-5	1,3-4	1,3-2	10,8 7	0,86
MEL 238	2,4	82	0,2-8	1,5-63	1,8-42	0,8-11	0,3-10	0,2-3	0-0	0-0	0-0	11,6 5	0,773
MEL 241	2,7	97,2	0,2-16	1,8-79	2,1-58	0,7-20	0,1-18	0,2-5	0,2-5	0-0	0-0	6,51	0,691
MEL 243	2,4	8,6	0,3-0,5	1,6-4	1,6-3,6	0,6-1,8	0,2-0	0,4-0	0,4-0	0,6-0	0,3-0	36,6 1	0,865
MEL 245	2,6	82,8	0,5-60	1,7-40	1,7-23	0,8-17	0,3-16	0,4-4	0,4-6	0,6-5	0,3-3	10,6 7	0,692
MEL 246	2,7	63,5	0,5-10	1,8-52	1,7-31	1,1-11	0,4-9	0,4-7	0,2-6,5	0,8-3	0,3-1	7,46	0,833
MEL 248	2,3	10,6	0-5	1,5-6	1,8-1,3	1,3-1,1	0,2-0	0,3-0	0-0	0,7-0	0,5-0	50,6 7	0,942
MEL 256	2,6	59,6	0,4-9	1,8-56	1,8-35	0,8-10	0,4-8	0-0	0-0	0-0	0-0	7,13 1	0,798
MEL 260	4,2	32,5	0,1-3	2,5-28	2-10,1	1,8-8	0,3-6	1-6,5	0,7-3	1-2,5	1,2-1,5	8,13 2	0,823
MEL	2,7	51,4	0,3-7	1,9-42	1,9-23	0,9-10	0,5-5	0,4-5	0,4-3	0,6-4	0-0	10,2	0,86



261

3

Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas. (Continuación).

Código del pozo	Distorsión Armónica Total		Porcentaje de armónicas individuales para Voltaje y Corriente (v(%)-i(%))									Potencia medida	
	THDv (%)	THDi (%)	3	5	7	11	13	17	19	23	25	KVA	Factor de Potencia
MEL 262	2,8	57,9	0,3-6	1,7-57	1,8-34	0,9-10	0,4-9	0,5-6	0,4-5	0,5-3	0,5-2	6,739	0,844
MEL 269	5	66,9	3,8-10	3,6-57	2,3-35	1,8-10	0,2-10	1,6-7	0,8-4	1,2-0	1,6-0	12,8	0,78
MEL 272	3,2	75,7	0,3-11	2,1-60	2,2-40	1,1-10	0,4-6	0,3-2	0-0	0-0	0-0	18,823	0,777
MEL 273	2,7	42,6	0,3-7	1,7-38,7	1,7-19	1-9,5	0,4-4	0,4-5	0,5-2	0,5-3	0,6-1	11,79	0,897
MEL 278	2,6	8,6	0,2-1,9	1,3-8	1,7-3,8	0,5-1	0,8-0,9	0,5-0	0-0,3	0,8-0,4	0-0	52,52	0,6
MEL 297	3,1	99,4	1-11,2	2,7-92	0,8-75	2,5-50	0,8-30	0,25-20	0-2	0-0	0-0	10,35	0,6
MEL 308	1,6	87,1	0,1-8	0,9-72	1,5-40	0,3-19	0,3-12	0,2-3	0-0	0-0	0-0	12,3	0,797
MEL 323	2,5	9,1	2,3-2	1,8-2,6	1,8-0,1	0,8-0	0,9-0	0,7-0	0,7-0	0,6-0	0,6-0	32,36	0,699



MEL 332	2,4	8,1	0,3-2,1	1,3-8	1,5-0	0,8-1,6	0,3-1	0,4-0	0,6-0	0,8-0	0,3-0	30,98	0,66
MFC 21	2,1	8	0,1-1,3	1,3-6,9	1,4-2	0,5-1,1	0,2-0,8	0,2-0	0,5-0	0,5-0	0,3-0	24,15	0,698

Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas. (Continuación).

Código del pozo	Distorsión Armónica Total		Porcentaje de armónicas individuales para Voltaje y Corriente (v(%) - i(%))									Potencia medida	
	THDv (%)	THDi (%)	3	5	7	11	13	17	19	23	25	KVA	Factor de Potencia
MFC 22	2,2	7,3	0,1-1,1	1,3-7	1,4-1,8	0,5-0,9	0,22-0,9	0,2-0	0,4-0	0,5-0	0,25-0	22,3	0,77
MS 418	3,3	95,4	0,1-16	2,3-77	1,9-58	1,6-22	0,8-18	0-0	0,1-0,1	0-0	0-0	11,66 5	0,684
MS 435	1,1	1,6	0,2-0,5	0,7-1,6	0,4-1	0,5-0,9	0-0	0,4-0	0,3-0	0,2-0	0-0	29,8	0,82
MS 452	0,9	1,9	0,19-0,4	0,4-1,4	0,4-1,1	0,8-1,1	0-0	0,1-0	0,2-0	0-0	0-0	68,5	0,77
MS 456	1	2,7	0,1-1	0,6-0,8	0,4-1,2	0,4-1	0-0,2	0-0,9	0-0	0-0	0-0	13,62	0,78
MS 459	2,8	5,4	0-0,8	1,9-5	1,3-3	1,6-2,2	0,7-0,3	0-0	0-0	0-0	0-0	30,7	0,83
MS 475	2,1	99,8	0,4-20	1,3-77	1,4-55	0,4-18	0,5-16	0-0	0-0	0-0	0-0	12,97	0,696



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

MS 477	4,3	63,7	0,5-5	2,3-57	3,1-36	1,1-7	1,1-6	0,8-3	1-2,5	0,8-0	0,7-0	13,74	0,803
MS 480	4,3	73,7	1,5-15	2,3-71	5,2-53	1,1-12	1,1-8	0,9-5	1-3,5	0,8-0	0,5-0	24,89	0,615
MS 481	4,5	63	0,5-5	1,8-58	3,8-35	1,5-6	1-5,5	0,9-0	0,8-0	0,7-0	0,5-0	18,56	0,828

Tabla 4.1. Resumen de las mediciones realizadas. (Continuación).

Código del pozo	Distorsión Armónica Total		Porcentaje de armónicas individuales para Voltaje y Corriente (v(%)-i(%))									Potencia medida	
	THDv (%)	THDi (%)	3	5	7	11	13	17	19	23	25	KVA	Factor de Potencia
MS 811	2,8	2,2	0-0,8	1-2,2	0,1-0,8	1-2,8	1-0,8	0,3-0	0-0	0-0	0-0	41,5	0,835
MS 812	3,6	3,8	0-0,2	1,6-2,2	0,1-0,3	3,8-2	0,8-0,6	0-0	0-0	0-0	0-0	15,25	0,66
MS 813	2	4,5	0,3-0,9	1,4-3,8	1-2,1	0-0,2	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	20,66	0,621
MS 824	0,8	1,3	0,2-0,8	0,3-0,9	0,1-0,4	1,1-1,2	0-0	0-0	0-0	0-0	0-0	45,028	0,89
MFB 780	3,8	21,8	1-19,5	2,7-25,2	1,9-9	1,3-8	0-6	0,2-5	0-2	0,8-1	0,3-1	53,26	0,738
MFB 781	3,7	25,8	0,9-20	2,5-25	2-9,5	1,1-8	0-7	0,3-4	0-0	0-0	0-0	55,6	0,726



MFB 782	2,7	22	1,1-20	2-28,5	1,8-9	1,5-8	1,2-6	0,5-6	0-3	0-0	0-0	53,22	0,788
MFB 783	3,8	20,8	1,2-20	2,6-24	1,9-10	0,9-8	0,3-5	0,4-6	1,2-2	0-0	0-0	55,67	0,809



Seguidamente se muestra la tabla 4.2. Con los valores de distorsión promedio calculados para cada equipo según el registro realizado, catalogándolo por la marca de cada elemento encontrado en los circuitos de la subestación, basado en el modelo de inyección de corrientes armónicas.

Tabla 4.2. Promedio de la corrientes armónicas aportadas por cada variador de frecuencia.

Marca de los variadores (Modelo promedio)	Promedio de armónicas individuales de Corriente características y encontradas (i(%))									
	3	5	7	11	13	15	17	19	23	25
ABB (VDF-6P-MEL)	18	75	38	11	6,8	5,6	3,7	2,3	2,3	1,4
ÚNICO (VDF-6P-MEL)	12,6	58,6	43,6	16,3	5,6	0	0	2,2	1,2	0,8
YASKAWA (VDF-6P-MEL)	20,5	60	41,5	20	10	3,8	5,6	4	1,5	1,2
WELLMAX (VDF-6P-MEL)	17	86,6	58,9	24,3	18,5	0	2,3	1,3	1,1	0,8
TBWOODS / INPEGAS (VDF-6P-MEL)	15	75,6	56,3	18,9	12,3	0	2,1	1,6	1,1	0

4.2. VALORES TEORICOS DE THDV (%) EN LOS VDF.

Tomando en cuenta las condiciones de fábrica de los variadores de frecuencia y su configuración en el sistema de potencia se realizan cálculos



simples para conocer el THDv % aportado por los variadores de frecuencia, considerando un sistema pequeño en donde el cálculo se toma al punto de corto circuito seleccionado, como se muestra en la figura 4.1.

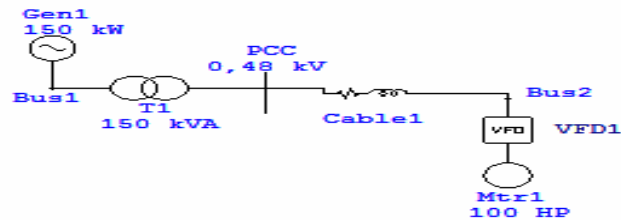


Figura 4.1. Sistema simplificado para el cálculo al punto de corto circuito (PCC).

Mediante el uso de las ecuaciones 2.11 y 2.12 se plantean los THDv% para los diversos tipos de variadores de frecuencia de seis (6) pulsos utilizados por PDVSA en el Distrito San Tomé, planteándose los resultados obtenidos en la tabla 4.3.

Para estos cálculos se toman una serie de consideraciones como son;

- ✚ Eficiencia total del arreglo incluyendo pérdidas en el motor, variador, cables, etc. Equivale al 88 %.
- ✚ Voltaje nominal igual a 480 v.
- ✚ 2,5% de componente armónicas del 5th orden preexistentes en la fuente.



La tabla 4.3. Muestra las cualidades de los transformadores utilizados según la potencia nominal del variador, teniendo en cuenta su reactancia para el cálculo de sus corrientes de cortocircuito, los cuales, son necesarios para el cálculo de las componentes armónicas mostradas en la tabla 4.4.

Tabla 4.3. *Corrientes de carga y de cortocircuito de los transformadores.*

Potencia de los bancos de transformadores (KVA)	Z%	Corriente en el secundario (Amp)	Corriente de Corto circuito (Amp)
150	3	180,42	6014,07
200	3,5	240,56	6873,22
260	4,5	312,73	6949,59
350	5	420,98	8419,69
400	5	481,13	9622,5
450	5	541,27	10825,32

En la grafica 4.1 se muestra la forma de onda vista en la protección diferencia del transformador de la subestación, en esta se parecía las forma de onda de la corriente que circula por el primario y el secundario del transformador donde se puede apreciar la distorsión de la onda.



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

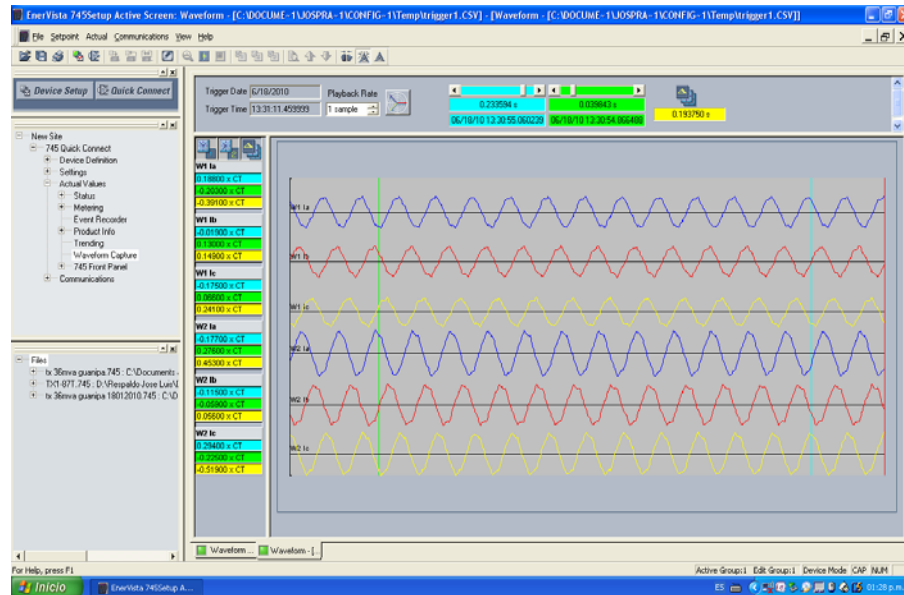


Figura 4.2. Forma de onda vista en la protección diferencia del transformador TX1 de la subestación Melones Oeste.

LA protección diferencial esta programa para bloquearse ante un porcentaje de quinta armónica igual o superior al 20%, como se muestra en la figura 4.2.

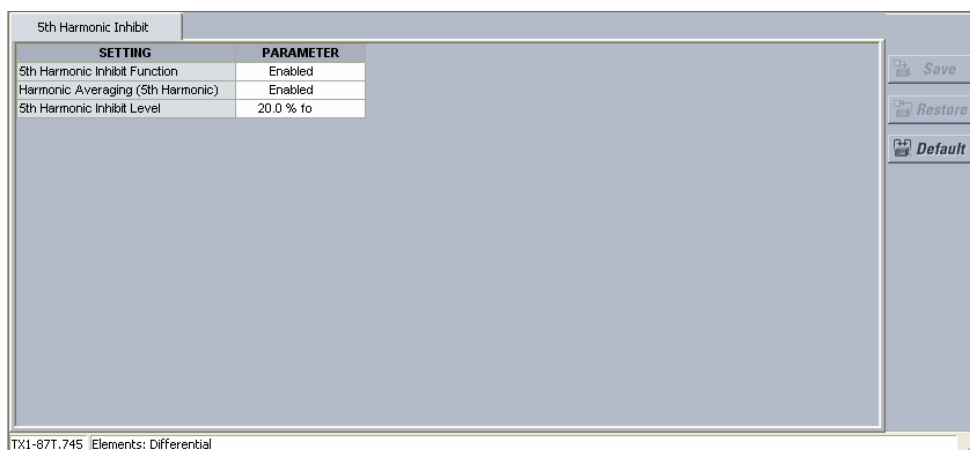


Figura 4.3. Pantalla de programación para bloqueo por armónicos.



Tabla 4.4. Resultados teóricos para el THDv (%).

Marca de los variadores (Modelo)	Potencia (HP)	FP	Corriente Nominal (A)	Reactancia % referida al VDF	Constante Armónica (Hc)	THDv %
ABB (ACS 601-0100-5)	75	0,98	124	4,06	184,63	3,81
	100	0,98	160	4,66	178,02	4,74
	150	0,98	210	5,49	169,53	5,92
BCP-VEN / CILA2S (CILA 2S- 100-100-ND-VFD)	75	0,98	125	4,08	184,44	3,83
	100	0,98	156	4,59	178,73	4,64
	150	0,98	248	6,12	163,62	6,75
	200	0,98	300	6,99	156,3	7,8
ÚNICO (1100-460-075-V-N- J20-C00-805560)	50	0,94	65	3,08	196,39	2,12
	75	0,94	96	3,6	190,07	3,03
	100	0,94	124	4,06	184,63	3,81
	150	0,94	180	4,99	174,52	5,22
	200	0,94	240	5,99	164,83	6,58
YASKAWA (ND)	100	0,97	145	4,41	180,72	4,36
	150	0,97	235	5,91	165,59	6,47
WELLMAX (GPD515C-B096)	75	0,98	130	4,16	183,5	3,97
	100	0,98	140	4,33	181,64	4,23
	150	0,98	190	5,16	172,82	5,46
TBWOODS / INPEGAS (DVC41000BLNOGSA)	75	0,98	105	3,75	188,3	3,29
	100	0,98	140	4,33	181,64	4,23
	125	0,98	170	4,83	176,25	4,98
	150	0,98	205	5,41	170,34	5,81
	200	0,98	261	6,34	161,71	7,02



Tabla 4.4. Resultados teóricos para el THDv (%). Continuación.

Marca de los variadores (Modelo)	Potencia (HP)	FP	Corriente Nominal (A)	Reactancia % referida al VDF	Constante Armónica (Hc)	THDv %
SIEMENS	75	0,98	98	3,63	189,67	3,09
	100	0,98	156	4,59	178,73	4,64
	150	0,98	220	5,66	167,93	6,14
DANFFOS (175Z4809)	150	0,98	190	5,16	172,82	5,46
SCHLUMBERGER / Speedstar	111 (KVA) 148,02	0,98	133	4,21	182,94	4,05
	200 (KVA) 260	0,98	241	5,51	169,39	5,94
	260 (KVA) 338,06	0,98	313	6,5	160,29	7,22
	390 (KVA) 507,10	0,98	469	6,87	157,22	7,66
	450 (KVA) 585,12	0,98	546	7,04	155,86	7,86
CENTRILIFT / Baker Hughes	150	0,98	245	6,07	164,07	6,68
	450 (KVA) 585,12	0,98	550	7,08	155,57	7,9



En la realización del modelado mediante la ayuda de los elementos ficticios mencionados en el capítulo 3 (Nodos y Barras), se establecen puntos de gran importancia aparte de las barras de la subestación, que sirven como punto de referencia para el estudio.

Los puntos antes mencionados se escogen por la cantidad de cargas conectadas (pozos) a ese punto. En PDVSA cuando un conjunto de pozos se encuentran conectados a la misma tubería común, su conexión al sistema de potencia esta en el mismo nodo y por ende muy próximos en distancia entre ellos, se le conoce como Macollas de pozos. En el sistema en estudio se encuentran varios arreglos de este tipo, mas estas no están identificadas, es por esto que se nombraron como Macolla n donde n es el numero de identificación empezando en uno (1).

Los resultados obtenidos del flujo de carga esta basado en la capacidad de carga instalada en los circuitos de la subestación, más eventualmente se realizan labores de mantenimiento a equipos, reemplazo por hurto y en algunas ocasiones de ser necesario se hacen reprogramaciones a los variadores con las cuales se puede incremental o disminuir el consumo de potencia del mismo.

En la tabla 4.5. Se muestran los resultados más importantes del flujo de carga, con el fin de visualizar la carga nominal conectada al circuito actualmente, y la respuesta del circuito ante la incorporación de nuevas cargas, y la propuesta de reconfiguración a los circuitos de distribución, Destacando que las nuevas cargas serán del tipo no lineales (Variadores de frecuencia de seis (6) pulsos).



Tabla 4.5. Resumen de resultados del flujo de carga, incluyendo las propuestas 0,1, y la configuración actual.

Nombre de los circuitos	Configuración actual		Configuración Propuesta 0		Configuración Propuesta 1		
	Potencia (KVA)	FP (%)	Potencia (KVA)	FP (%)	Potencia (KVA)	FP (%)	
Circuito Carapa I (D-405)	1782	85,4	2221	86,5	1642	88,3	
Circuito Carapa II (D-105)	636	85,8	636	85,7	1213	84,2	
Melen 1,1	1253	91,9	1253	92	1253	91,9	
Melen 1,2	1253	92,1	1253	92	1253	92,1	
Nombre de las barras	Voltaje Nominal (KV)	Voltaje actual (%)	Potencia (KVA)	Corriente (Amp)	FP	Voltajes propuesta 0 (%)	Voltajes propuesta 1 (%)
Barra Principal	115	100	5000	25,1	0,883	100	100
Barra I	13,8	98,48				98,35	98,35
Barra II	13,8	98,48				98,35	98,35
Barra I Melen I	13,8	97,9	1253	53,2	0,912	97,52	97,52
Barra II Melen II	13,8	97,9	1253	53,2	0,912	97,52	97,52
Barra Macolla 1	13,8	97,95	72	3,1	0,868	97,86	97,41
Barra Macolla 2	13,8	97,2	82,3	3,5	0,77	97,83	97,38
Barra Macolla 3	13,8	97,7	101,2	4,3	0,907	97,66	96,96
Barra Macolla 4	13,8	97,54	246	11,4	0,894	97,45	96,49
Barra Macolla 5	13,8	97,51	118	5,1	0,89	97,42	96,37
Barra Macolla 6	13,8	96,86	74	3,2	0,769	96,42	96,93
Barra Macolla 7	13,8	96,54	22	1,1	0,792	96,03	96,65
Barra Macolla 8	13,8	95,7	116	5,1	0,898	94,84	94,32



Tabla 4.5. Resumen de resultados del flujo de carga, incluyendo las propuestas 0,1, y la configuración actual.
(Continuación).

Nombre de las barras	Voltaje Nominal (KV)	Voltaje actual (%)	Potencia (KVA)	Corriente (Amp)	FP	Voltajes propuesta 0 (%)	Voltajes propuesta 1 (%)
Barra Macolla 9	13,8	96,48	51	2,2	0,917	94,77	92,25
Barra Macolla 10	13,8	93,24	86	3,9	0,881	91,87	94,11
Barra Macolla 11	13,8	93,22	72	3,2	0,661	91,86	94,26
Barra Macolla 12	13,8	92,6	236	10,6	0,91	91,03	92,7
Barra Macolla 13	13,8	92,5	39	1,7	0,816	90,81	91,84
Barra Macolla 14	13,8	92,5	40	1,8	0,745	90,81	91,84
Barra Macolla 15	13,8	92,4	50	2,7	0,906	90,44	91,47
Barra Macolla 16	13,8	92,17	52	2,4	0,912	90,36	91,39
Barra Macolla 17	13,8	91,7	55	2,5	0,917	90,38	91,42
Barra Macolla 18	13,8	91,66	66	3	0,924	89,1	90,13
Barra Macolla 19	13,8	91,55	74	3,4	0,914	89,09	90,12
Barra Macolla 20	13,8	91,72	71	3,2	0,838	89,34	90,38
Barra Macolla 21	13,8	92,64	72	3	0,816	91,17	93,65
Barra Macolla 22	13,8	92,47	74	3,4	0,906	91	93,48
Barra Macolla 23	13,8	91,75	188	8,5	0,774	90,33	92,78
Barra Macolla 24	13,8	91,77	42	1,9	0,801	90,3	92,77
Barra Macolla 25	13,8	91,76	12	0,5	0,89	90,29	92,76
Barra Macolla 26	13,8	91,75	46	2,1	0,81	90,28	92,76
Barra Macolla Guaicaipuro	13,8	91,83	188	8,6	0,779	86,68	87,72
Barra Macolla Kariña	13,8		410	19,9	0,902	86,41	87,45



4.3. RESULTADOS DEL FLUJO DE CARGA ARMÓNICO OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES EN EL PROGRAMA ELECTRICAL ENGINEERING SOFTWARE POWER SYSTEM ANALYSIS SOFTWARE (ETAP).

El flujo de carga armónico se realizó en varias configuraciones del sistema. Siendo la configuración más importante donde se analiza el sistema entero obteniendo los resultados en la subestación y en las barras más importantes del circuito, las configuraciones tomadas en cuenta se muestran a continuación.

- ✚ Configuración completa; en esta configuración se incluyen todos los circuitos actuales de la subestación. Mostrando los valores de THD tanto de voltaje como de corriente en las barras de interés y en las líneas de entrada a los circuitos y en el transformador de la subestación.
- ✚ Configuración Circuito Carapa I; esta configuración muestra el resultado individual del circuito Carapa I conectado al interruptor D-405 con la carga conectada actual.
- ✚ Configuración Circuito Carapa II; esta configuración muestra el resultado individual del circuito Carapa I conectado al interruptor D-105 con la carga conectada actual.
- ✚ Configuración Melen; En esta se muestran los resultados aportados por la estación de bombeo Melen, en sus líneas Melen 1,1 y 1,2 asociados a los interruptores D-305 y D-205 respectivamente.



- ✚ Configuración Propuesta 1; esta configuración muestra la respuesta del sistema con la adición de las nuevas cargas de la macolla Kariña, tomando en cuenta el análisis realizado en la configuración completa.

- ✚ La última configuración en estudio se refiere a la configuración del circuito Carapa I asociado al interruptor D-405, con la inclusión de la macolla Kariña.

Los resultados obtenidos de las simulaciones en las configuraciones anteriores sobre el THDv (%) y el porcentaje de la fundamental encontrado en cada una de las barras seleccionadas para el estudio se muestran en la tabla 4.6.

Seguidamente se muestran las distorsiones individuales de cada armónica de voltaje en configuración completa, es decir, con toda la carga conectada, se incluye las distorsiones de la macolla Kariña conectada según la propuesta 1, estos resultados se muestran en la tabla 4.7.

También se presentan las distorsiones individuales de corriente encontradas en las líneas más importantes y en las líneas de entrada de las macollas del circuito, estas componentes armónicas se presentan en porcentaje de la base de 1 MVA. Para esto se muestra la tabla 4.8.

En la tabla 4.9. se encuentran los resultados del flujo e incremento de las distorsiones de corriente individuales presentes en la configuración llamada Propuesta 1, en donde se incorpora la macolla Kariña, en esta tabla solo se muestran las que sufrieron alteraciones, el resto permanece tal como se ve en la tabla 4.8.



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.6. Distorsión total de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito.

Nombre de las barras.	Configuración Completa			Configuración CTO. Carapa I		Configuración CTO. Carapa II		Configuración Melen		Configuración Propuesta 1		Configuración Carapa I-M.Kariña	
	Voltaje Nominal (KV)	% Fund.	THDv (%)	% Fund.	THDv (%)	% Fund.	THDv (%)	% Fund.	THDv (%)	% Fund.	THDv (%)	% Fund.	THDv (%)
Barra Principal	115	100	0,94	100	0,68	100	0,06	100	0,36	100	1,03	100	0,81
Barra I	13,8	98,9	5,09	100	3,64	101,29	0,38		1,93	99,32	5,58	100	4,34
Barra II	13,8	98,9	5,09	100	3,64	101,29	0,38		1,93	99,32	5,58	100	4,34
Barra I Melen I	13,8	98,06	5,53					100,54	2,41	98,49	6		
Barra II Melen II	13,8	98,07	5,52					100,54	2,41	98,5	5,99		
Barra Macolla 1	13,8	99,18	5,01			100,25	0,61			99,81	5,97		
Barra Macolla 2	13,8	99,25	5,02			100,24	0,65			99,85	5,98		
Barra Macolla 3	13,8	99,86	5,01			99,68	0,62			99,8	6,22		
Barra Macolla 4	13,8	98,47	5,01			99,01	0,66			99,8	6,22		
Barra Macolla 5	13,8	98,44	5,01			98,99	0,66			99,75	6,59		
Barra Macolla 6	13,8	99,25	7,35	100	5,91					99,92	7,65	100	7,04
Barra Macolla 7	13,8	99,33	7,84	100	6,41					99,69	8,1	100	7,63



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.6. Distorsión total de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito.
(Continuación).

Nombre de las barras	Configuración Completa			Configuración CTO. Carapa I		Configuración Propuesta 1		Configuración Carapa I-M.Kariña	
	Voltaje Nominal (KV)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)
Barra Macolla 8	13,8	99,54	9,58	100	8,15	99,84	11,81	100	10,69
Barra Macolla 9	13,8	99,59	9,71	100	8,29	99,89	11,94	100	10,83
Barra Macolla 10	13,8	99,64	12,6	100	11,18	98,84	9,05	100	11,77
Barra Macolla 11	13,8	99,65	12,59	100	11,17	98,82	8,85	100	11,76
Barra Macolla 12	13,8	99,43	13,51	100	12,06	99,76	14,17	100	11,91
Barra Macolla 13	13,8	99,51	13,83	100	12,39	99,84	15,58	100	12,86
Barra Macolla 14	13,8	99,5	13,83	100	12,4	99,84	15,59	100	12,87
Barra Macolla 15	13,8	99,48	14,45	100	12,99	99,84	16,33	100	13,6
Barra Macolla 16	13,8	99,45	14,69	100	13,23	99,8	16,58	100	13,84
Barra Macolla 17	13,8	99,47	14,61	100	13,16	99,83	16,5	100	13,77
Barra Macolla 18	13,8	99,42	15,69	100	14,21	99,83	18,32	100	15,56
Barra Macolla 19	13,8	99,4	15,71	100	14,24	99,81	18,34	100	15,58
Barra Macolla 20	13,8	99,41	15,29	100	13,82	99,81	17,83	100	15,07
Barra Macolla 21	13,8	99,53	13,51	100	12,8	99,06	9,64	100	12,54



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.6. Distorsión total de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito.
(Continuación).

Nombre de las barras	Configuración Completa			Configuración CTO. Carapa I		Configuración Propuesta 1		Configuración Carapa I- M.Kariña	
	Voltaje Nominal (KV)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)	% Fundamental	THDv (%)
Barra Macolla 22	13,8	99,51	13,7	100	12,66	99,11	9,83	100	12,72
Barra Macolla 23	13,8	99,59	14,08	100	12,66	99,54	10,18	100	13,12
Barra Macolla 24	13,8	99,62	14,07	100	12,65	99,57	10,18	100	13,11
Barra Macolla 25	13,8	99,63	14,07	100	12,66	99,58	10,18	100	13,12
Barra Macolla 26	13,8	99,62	14,07	100	12,65	99,58	10,18	100	13,11
Barra Macolla Guacaipuro	13,8	98,81	15,69	100	14,12	99,12	20,31	100	17,37
Barra Macolla Kariña	13,8					98,98	20,62	99,94	17,66



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de
PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.7. Distorsión individual de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito.

Bus		Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)						
ID	Nominal kV	5	7	11	13	17	19	23
Barra I	13,800	3,29	2,65	2,02	1,52	0,69	0,51	0,54
Barra II	13,800	3,29	2,65	2,02	1,52	0,69	0,51	0,54
M. GUAICAIPURO	13,800	9,66	8,35	6,35	4,94	2,41	1,76	1,43
MACOLLA1	13,800	3,20	2,53	2,11	1,57	0,67	0,50	0,53
MACOLLA2	13,800	3,19	2,52	2,15	1,60	0,67	0,50	0,53
MACOLLA3	13,800	3,18	2,51	2,12	1,57	0,66	0,50	0,53
MACOLLA4	13,800	3,15	2,49	2,13	1,58	0,65	0,49	0,53
MACOLLA5	13,800	3,15	2,49	2,13	1,58	0,65	0,49	0,53
MACOLLA6	13,800	4,65	3,89	2,99	2,24	1,00	0,75	0,75
MACOLLA7	13,800	4,96	4,17	3,18	2,39	1,07	0,79	0,80
MACOLLA 8	13,800	6,09	5,17	3,84	2,86	1,31	0,97	0,96
MACOLLA 9	13,800	6,18	5,26	3,89	2,90	1,32	0,98	0,97
MACOLLA 10	13,800	7,85	6,85	5,18	3,89	1,74	1,31	1,24
MACOLLA 11	13,800	7,84	6,84	5,17	3,89	1,74	1,31	1,24
MACOLLA 12	13,800	8,39	7,33	5,54	4,16	1,87	1,40	1,32
MACOLLA 13	13,800	8,62	7,52	5,65	4,25	1,92	1,45	1,35
MACOLLA 14	13,800	8,62	7,52	5,65	4,25	1,92	1,45	1,35
MACOLLA 15	13,800	9,03	7,86	5,85	4,41	2,00	1,51	1,41
MACOLLA 16	13,800	9,20	7,99	5,92	4,47	2,03	1,53	1,43
MACOLLA17	13,800	9,14	7,96	5,91	4,45	2,02	1,52	1,42
MACOLLA 18	13,800	9,76	8,56	6,35	4,83	2,20	1,66	1,48
MACOLLA 19	13,800	9,77	8,57	6,35	4,83	2,20	1,66	1,48
MACOLLA 20	13,800	9,51	8,32	6,19	4,71	2,15	1,62	1,46



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.7. Distorsión individual de voltaje encontrado en cada Barra y entrada de macollas del circuito.
(Continuación).

Bus		Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)						
ID	Nominal kV	5	7	11	13	17	19	23
MACOLLA 21	13,800	8,34	7,38	5,58	4,17	1,87	1,41	1,32
MACOLLA 22	13,800	8,43	7,49	5,67	4,23	1,90	1,44	1,34
MACOLLA 23	13,800	8,51	7,75	5,95	4,42	1,96	1,49	1,39
MACOLLA 24	13,800	8,50	7,75	5,97	4,42	1,96	1,49	1,38
MACOLLA 25	13,800	8,50	7,75	5,97	4,42	1,96	1,49	1,38
MACOLLA 26	13,800	8,49	7,74	5,97	4,42	1,96	1,49	1,38
Melen I Barra I	13,800	3,61	2,86	2,09	1,57	0,73	0,54	0,57
Melen I Barra II	13,800	3,61	2,86	2,09	1,56	0,73	0,53	0,57
Melones Oeste	115,000	0,61	0,49	0,38	0,28	0,13	0,09	0,10
M. KARIÑA	13,800	13,20	9,69	7,63	6,25	4,77	3,86	3,20



Tabla 4.8. Distorsión individual de corriente encontrado en las líneas y las entradas de las barras más resaltantes.

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Línea Carapa I	56,86	37,91	18,92	12,08	4,16	2,80	2,14
Línea Carapa II	6,65	4,28	2,40	1,06	0,30	0,12	0,05
Melen 1	16,54	8,02	1,81	1,10	0,79	0,49	0,51
Melen 2	16,47	7,92	1,72	1,05	0,79	0,49	0,50
T1	8,26	4,00	0,89	0,54	0,39	0,24	0,25
T2	8,26	4,00	0,89	0,54	0,39	0,24	0,25
T3	6,56	3,26	0,76	0,48	0,38	0,24	0,26
T4	10,05	4,75	0,97	0,58	0,42	0,25	0,25
TX1	86,65	49,79	24,15	15,29	5,27	3,48	3,01
Line4-Macolla 1	3,34	1,61	0,34	0,19	0,16	0,06	0,03
Line5-Macolla 2	2,72	1,50	1,39	0,76	0,04	0,02	0,02
Line15-Macolla 5	0,48	0,27	0,14	0,08	0,02	0,02	0,01
Line22-Macolla 6	1,50	0,81	0,61	0,32	0,09	0,08	0,05
Line24-Macolla 7	0,91	0,46	0,25	0,26	0,13	0,09	0,08
Line29-Macolla 9	2,22	1,71	0,64	0,44	0,11	0,08	0,08
Line30-Macolla 8	9,35	5,48	1,84	0,92	0,52	0,29	0,25
Line37-Macolla 10	1,76	1,21	0,81	0,58	0,03	0,02	0,02
Line39-Macolla 11	0,42	0,11	0,07	0,06	0,01	0,01	0,01
Line43-Macolla 12	2,59	1,45	1,24	0,62	0,10	0,08	0,09



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de
PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.8. Distorsión individual de corriente encontrado en las líneas y las entradas de las barras más resaltantes. (Continuación).

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Line46-Macolla 14	0,96	0,59	0,24	0,14	0,07	0,04	0,04
Line48-Macolla 15	12,32	7,12	2,55	1,57	0,63	0,47	0,43
Line50-Macolla 16	4,01	2,24	0,74	0,50	0,16	0,10	0,09
Line51-Macolla 17	3,60	2,39	0,96	0,49	0,16	0,15	0,10
Line56-M. Guaicaipuro	3,17	0,67	0,76	0,92	0,93	0,69	0,17
Line59-Macolla 18 y 19	10,17	7,05	2,76	1,67	0,41	0,33	0,16
Line64-Macolla 23	1,94	2,52	0,67	0,69	0,14	0,08	0,09
Line67-Macolla 26	0,96	0,67	0,10	0,05	0,04	0,04	0,01
Line57-Macolla Kariña	10,94	4,16	2,71	2,01	1,84	1,40	0,79



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.9. Distorsión individual de corriente encontrado en las líneas y las entradas de las barras en la configuración Propuesta 1.

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Line15-Macolla 5	0,62	0,37	0,19	0,10	0,04	0,02	0,02
Line37-Macolla 10	1,94	1,31	0,87	0,63	0,02	0,03	0,04
Line39-Macolla 11	12,25	10,89	5,59	3,15	0,65	0,27	0,22
Line43-Macolla 12	42,19	23,75	11,23	8,04	4,83	3,70	2,51
Line56-M. Guaicaipuro	12,53	4,49	3,56	3,09	2,96	2,15	1,19
Line64-Macolla 23	2,00	2,56	0,67	0,70	0,14	0,08	0,09
Line67-Macolla 26	0,91	0,63	0,68	0,06	0,04	0,04	0,01
Line57-Macolla Kariña	10,94	4,16	0,11	2,01	1,84	1,40	0,79
Linea Carapa I	55,58	31,65	15,96	10,84	5,71	4,17	3,19
Linea Carapa II	9,38	8,27	7,99	4,04	0,56	0,53	0,32
Melen 1	16,03	7,85	1,72	1,04	0,69	0,49	0,51
Melen 2	15,91	7,73	1,71	0,97	0,68	0,49	0,50
T1	8,01	3,91	0,84	0,51	0,33	0,22	0,20
T2	8,01	3,91	0,84	0,51	0,33	0,22	0,20
T3	6,33	3,18	0,71	0,44	0,33	0,22	0,20
T4	9,70	4,63	0,91	0,53	0,35	0,25	0,25
TX1	95,41	53,05	26,13	16,53	7,22	5,00	4,20



Los resultados mostrados en las tablas 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 son resúmenes de los informes obtenidos de las múltiples simulaciones con el programa ETAP, los informes completos se pueden apreciar en el disco anexo. En los resultados presentados se puede apreciar que las componentes armónicas en el sistema exceden lo establecido en la normativa IEEE Std 519 de 1992.

Las componentes armónicas predominantes en el sistema son la de orden quinto y séptimo a las frecuencias de 300 Hz y 420 Hz respectivamente. En la figura 4.3. Muestra la distorsión de corrientes obtenidas para las líneas más importantes del circuito y en el transformador TX1 de la subestación para la configuración actual a una base de 1 MVA.

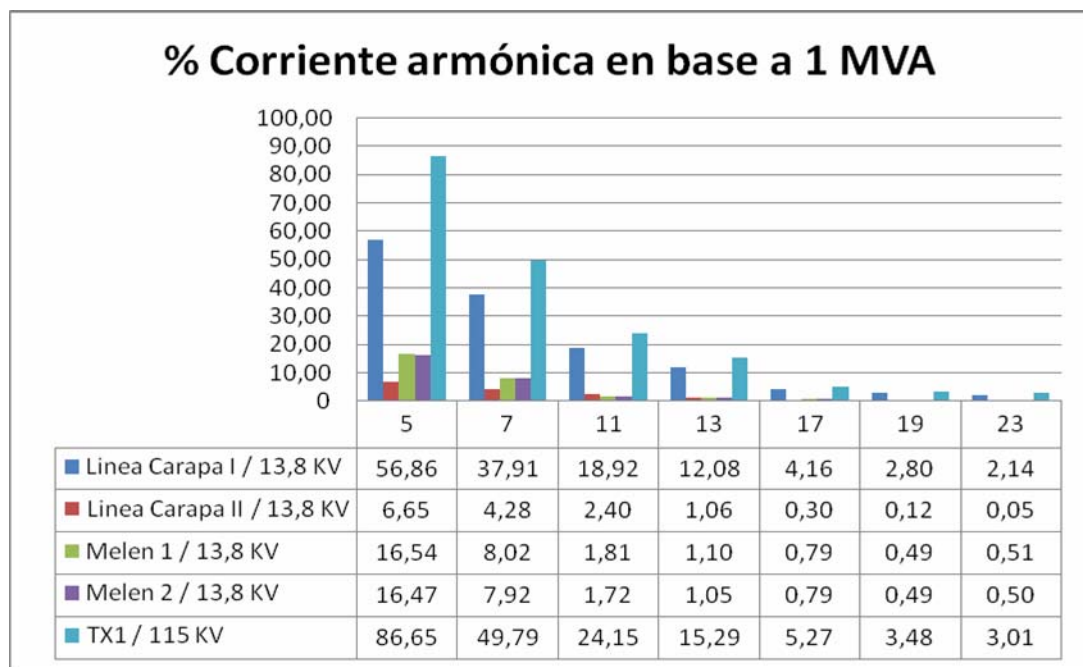


Figura 4.4. Porcentaje de corrientes armónicas en base de 1 MVA en la configuración actual.



Seguidamente se muestran las corrientes armónicas porcentuales en una base de 1 MVA en la configuración propuesta 1 en la figura 4.4. En donde se nota el incremento de la distorsión de las componentes armónicas de corriente frente a la incorporación de la macolla Kariña y el flujo de las armónicas en los circuitos bajo esta nueva configuración.

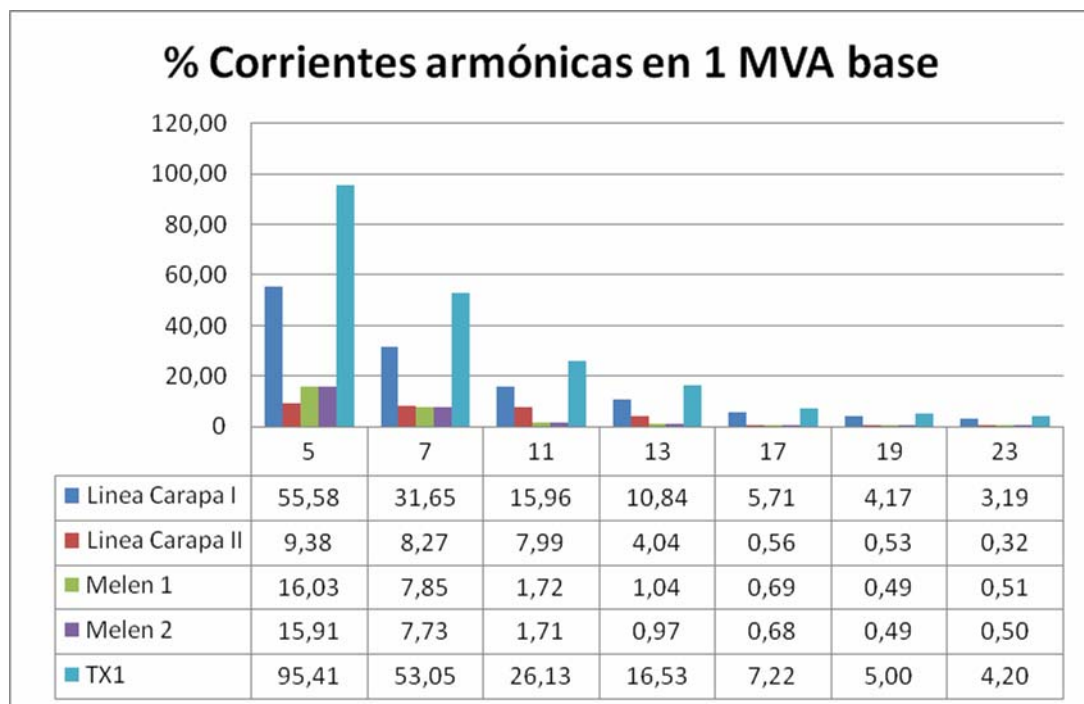


Figura 4.5. Corrientes armónicas en base a 1 MVA en la configuración propuesta 1.

En la figura 4.5. Se muestran las corrientes armónicas en el transformador TX1 en porcentaje de la corriente fundamental en la configuración actual de los circuitos.

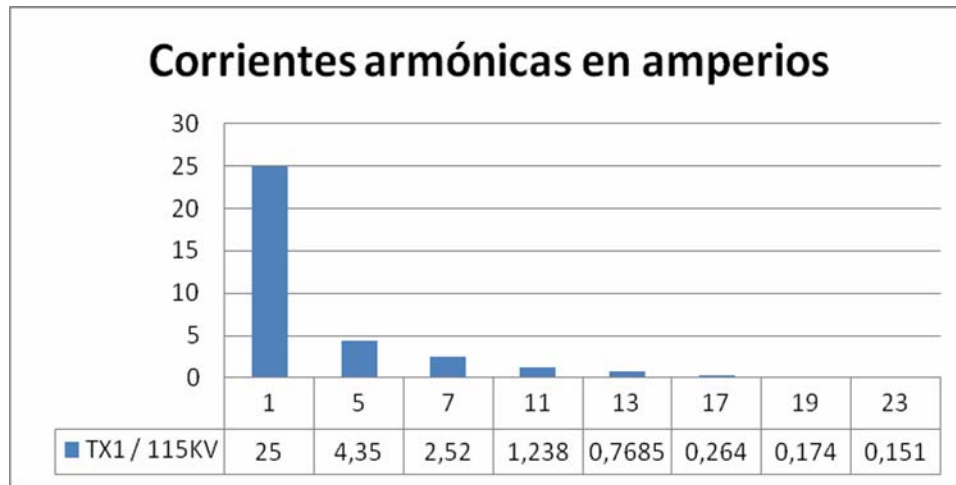


Figura 4.6. Corrientes armónicas en base a la fundamental en la configuración actual.

Seguidamente se muestran en la figura 4.6 las corrientes armónicas en el transformador principal TX1 en la configuración Propuesta 1.

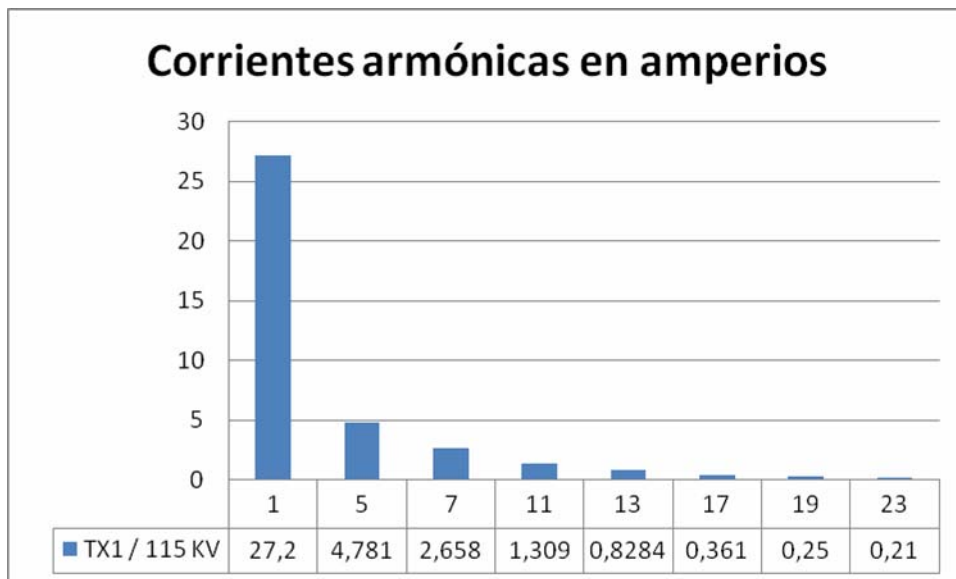


Figura 4.7. Corrientes armónicas en base a la fundamental en la configuración propuesta 1.



4.4. SELECCIÓN Y DISEÑO DEL FILTRO DE ARMÓNICOS.

Tomando en cuenta la naturaleza de las cargas implicadas en el estudio y observando que en los resultados la presencia armónica de mayor importancia se destaca en la quinta y séptima armónica, se propone el diseño de un arreglo de filtros pasivos sintonizados a ambas frecuencias.

El posicionamiento de estos filtros se propone a realizar principalmente en las barras de entrada de la alimentación de la estación de bombeo Melen, gracias a su alto índice armónico y proximidad a la subestación, al igual que se propone colocar filtros en la entrada de cada macolla importante antes estudiada.

Para el diseño de estos filtros se utiliza la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP).

Los principios de diseño se basan en los parámetros propios del filtro empezando con definir la frecuencia angular de la fundamental del sistema, seguidamente se calcula la frecuencia angular sintonizada a la n armónica, lo cual, se consigue mediante el uso de la ecuación 2.4. Con este dato se emplea la ecuación 4.1. Para encontrar la reactancia capacitiva.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{|V|^2}{Q_c} \quad (4.1)$$

Donde;

X_c : Reactancia Capacitiva.

C : Capacitancia del Arreglo.



Q_c : Potencia Reactiva que suministra el filtro.

V : Voltaje nominal del filtro

Para el cálculo del inductor acoplado al filtro se emplea la ecuación 4.2.

$$L_f = \left[\frac{1}{2\pi 60 h \sqrt{C}} \right]^2 \quad (4.2)$$

Donde;

L_f : Inductancia del reactor del filtro.

h : Orden de la armónica a filtrar.

Seguidamente se calcula la reactancia inductiva del filtro con la ecuación 4.3.

$$X_L = \omega L_f \quad (4.3)$$

Donde;

X_L : Reactancia inductiva del filtro.

La resistencia incluida en el filtro se define mediante la ecuación 4.4.

$$R_f = \frac{X_{Lh}}{Q} \quad (4.4)$$

Donde;



R_f : Resistencia interna del inductor.

Q : Factor de calidad del inductor.

Teniendo en cuenta la carga en cada barra, el factor de potencia actual y el deseado, la corriente RMS y la magnitud de la corriente de la armónica a filtrar. Se ejecuta el diseño de los filtros sintonizados para cada barra seleccionada y en distintas configuraciones. Los resultados obtenidos para los filtros a instalar en la estación Melen se muestran en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Valores de diseño de los filtros para la subestación Melen.

Filtros Melen	Filtro Melen 1,1		Filtro Melen 1,2	
Orden Armónico	5	7	5	7
Corriente Armónica (Amp)	7,87	3,81	7,83	3,76
Carga (KVA)	1253	1253	1253	1253
IL RMS (Amp)	32,41	32,46	33,19	32,46
Vc(KV)	6,195	5,99	6,18	5,99
KVAR/ph	131	134	134	134
μ f/ph	20,02	20,54	20,54	20,54
XL	5,29	2,63	5,16	2,63

De igual manera se procede a diseñar filtros para los puntos de mayor impacto armónico. Los resultados del diseño de los filtros se muestran en la tabla 4.11.

Los resultados de la distorsión armónica total en las barras con los filtros se muestran en la tabla 4.12.



Las componentes individuales de voltaje una vez aplicado el filtrado se muestran en la tabla 4.13 en configuración normal y la tabla 4.14 para la configuración propuesta 1. Las componentes individuales de corriente se presentan en la tabla 4.15 y 4.16.

Tabla 4.11. Valores de diseño de los filtros sintonizados.

Orden Armónico	Filtro Macolla 1		Filtro Macolla 8		Filtro Macolla 15	
	5	7	5	7	5	7
Corriente Armónica (Amp)	1,58	0,766	4,45	2,6	5,86	3,38
Carga (KVA)	72	72	116	116	50	50
IL RMS (Amp)	1,908	1,38	5,23	2,94	5,26	3,42
Vc(KV)	25,52	21,566	32,58	24,87	57,39	36,65
KVAR/ph	14,75	14,755	21,47	19,07	7,74	7,747
µf/ph	0,206	0,206	0,299	0,266	0,108	0,108
XL (ohm/ph)	516,28	263,41	354,77	203,77	983,29	501,68
Orden Armónico	Filtro Macolla 18 y 19		Filtro Macolla 23		Filtro Macolla Kariña	
	5	7	5	7	5	7
Corriente Armónica (Amp)	4,84	3,35	0,99	1,2	5,21	1,98
Carga (KVA)	140	140	188	188	410	410
IL RMS (Amp)	4,94	3,51	5,39	5,44	6,95	3,74
Vc(KV)	39,14	28,39	20,27	20,16	24,118	21,29
KVAR/ph	13,838	14,821	73,23	73,23	63,5	43,84
µf/ph	0,193	0,206	1,02	1,02	0,885	0,611
XL (ohm/ph)	550,47	262,23	104,02	53,07	119,91	88,64



Tabla 4.12 .Distorsión total de voltaje THDv (%) en cada barra.

Nombre de las barras	Configuración Completa			Configuración Propuesta 1	
	Voltaje Nominal (KV)	% Fundamental	THDv(%)	% Fundamental	THDv(%)
Barra Principal	115	100	0,34	100	0,36
Barra I	13,8	99,19	1,86	99,56	1,96
Barra II	13,8	99,19	1,86	99,56	1,96
Barra I Melen I	13,8	98,57	1,87	98,96	1,97
Barra II Melen II	13,8	98,47	1,91	98,85	2,02
Barra Macolla 1	13,8	99,3	1,94	99,87	2,21
Barra Macolla 2	13,8	99,36	1,99	99,89	2,25
Barra Macolla 3	13,8	98,95	1,96	99,85	2,32
Barra Macolla 4	13,8	98,53	1,99	99,81	2,48
Barra Macolla 5	13,8	98,5	1,99	99,76	2,48
Barra Macolla 6	13,8	99,43	2,84	99,74	2,84
Barra Macolla 7	13,8	99,49	3,03	99,79	3,01
Barra Macolla 8	13,8	99,63	3,68	99,86	4,46
Barra Macolla 9	13,8	99,66	3,74	99,9	2,25
Barra Macolla 10	13,8	99,67	5,04	98,84	3,47
Barra Macolla 11	13,8	99,68	5,04	98,82	3,39
Barra Macolla 12	13,8	99,46	5,46	99,78	5,44
Barra Macolla 13	13,8	99,54	5,57	99,85	5,99
Barra Macolla 14	13,8	99,53	5,57	99,85	5,99
Barra Macolla 15	13,8	99,51	5,81	99,85	6,26
Barra Macolla 16	13,8	99,47	5,93	99,81	6,38
Barra Macolla 17	13,8	99,49	5,89	99,84	6,34
Barra Macolla 18	13,8	99,45	6,35	99,86	6,98
Barra Macolla 19	13,8	99,43	6,36	99,84	6,99
Barra Macolla 20	13,8	99,62	6,21	99,83	6,81
Barra Macolla 21	13,8	99,58	5,34	99,07	3,66
Barra Macolla 22	13,8	99,57	5,35	99,13	3,69
Barra Macolla 23	13,8	99,71	5,1	99,61	3,54
Barra Macolla 24	13,8	99,72	5,13	99,62	3,56
Barra Macolla 25	13,8	99,72	5,13	99,62	3,56
Barra Macolla 26	13,8	99,72	5,13	99,68	3,57
Barra Macolla Guaicaipuro	13,8	98,83	6,59	99,23	7,64



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Barra Macolla Kariña	13,8			99,12	7,72
-------------------------	------	--	--	-------	------



Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tomé.

Tabla 4.13. Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal.

Bus	Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)							
	Nominal kV	5	7	11	13	17	19	23
Barra I	13,800	0,16	0,02	1,35	1,04	0,46	0,33	0,33
Barra II	13,800	0,16	0,02	1,35	1,04	0,46	0,33	0,33
M. GUAICAIPURO	13,800	0,99	0,30	4,62	3,70	1,81	1,29	0,86
MACOLLA1	13,800	0,19	0,03	1,43	1,09	0,43	0,32	0,33
MACOLLA2	13,800	0,23	0,06	1,47	1,11	0,43	0,32	0,33
MACOLLA3	13,800	0,19	0,06	1,44	1,09	0,43	0,32	0,33
MACOLLA4	13,800	0,20	0,09	1,46	1,10	0,42	0,31	0,32
MACOLLA5	13,800	0,20	0,09	1,46	1,10	0,42	0,31	0,32
MACOLLA6	13,800	0,28	0,06	2,07	1,59	0,69	0,51	0,48
MACOLLA7	13,800	0,30	0,08	2,21	1,70	0,74	0,54	0,51
MACOLLA 8	13,800	0,28	0,10	2,69	2,05	0,92	0,67	0,62
MACOLLA 9	13,800	0,31	0,15	2,74	2,09	0,93	0,68	0,62
MACOLLA 10	13,800	0,63	0,33	3,67	2,82	1,24	0,91	0,78
MACOLLA 11	13,800	0,62	0,32	3,67	2,82	1,24	0,91	0,78
MACOLLA 12	13,800	0,71	0,37	3,96	3,04	1,34	0,98	0,84
MACOLLA 13	13,800	0,71	0,31	4,04	3,12	1,39	1,02	0,85
MACOLLA 14	13,800	0,70	0,32	4,04	3,12	1,39	1,02	0,86
MACOLLA 15	13,800	0,74	0,29	4,21	3,25	1,45	1,08	0,90



Tabla 4.13. Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal. (Continuación).

Bus	Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)							
ID	Nominal	5	7	11	13	17	19	23
	kV							
MACOLLA 16	13,800	0,84	0,37	4,28	3,30	1,48	1,09	0,92
MACOLLA17	13,800	0,81	0,35	4,26	3,28	1,47	1,09	0,91
MACOLLA 18	13,800	0,56	0,16	4,60	3,59	1,61	1,19	0,93
MACOLLA 19	13,800	0,56	0,17	4,61	3,60	1,61	1,19	0,93
MACOLLA 20	13,800	0,68	0,27	4,49	3,50	1,58	1,16	0,92
MACOLLA 21	13,800	0,63	0,40	3,89	2,98	1,32	0,98	0,82
MACOLLA 22	13,800	0,58	0,39	3,90	2,99	1,32	0,98	0,82
MACOLLA 23	13,800	0,06	0,02	3,75	2,88	1,26	0,95	0,79
MACOLLA 24	13,800	0,07	0,02	3,78	2,90	1,27	0,96	0,80
MACOLLA 25	13,800	0,07	0,02	3,78	2,90	1,27	0,96	0,79
MACOLLA 26	13,800	0,07	0,02	3,78	2,90	1,27	0,96	0,79
Melen I Barra I	13,800	0,14	0,03	1,34	1,03	0,47	0,34	0,35
Melen I Barra II	13,800	0,17	0,04	1,36	1,05	0,48	0,35	0,36
Melones Oeste	115,000	0,03	0,00	0,25	0,19	0,08	0,06	0,06



Tabla 4.14. Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal en la configuración de la propuesta 1.

Bus	Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)							
ID	Nominal	5	7	11	13	17	19	23
	kV							
Barra I	13,800	0,15	0,02	1,38	1,06	0,58	0,44	0,43
Barra II	13,800	0,15	0,02	1,38	1,06	0,58	0,44	0,43
M. GUAICAIPURO	13,800	0,19	0,05	4,65	3,98	3,10	2,47	1,84
M. KARIÑA	13,800	0,10	0,02	4,66	4,00	3,16	2,52	1,88
MACOLLA 1	13,800	0,18	0,02	1,62	1,20	0,58	0,44	0,43
MACOLLA 2	13,800	0,21	0,04	1,66	1,22	0,58	0,44	0,43
MACOLLA 3	13,800	0,16	0,08	1,72	1,25	0,58	0,44	0,43
MACOLLA 4	13,800	0,16	0,15	1,87	1,34	0,59	0,45	0,43
MACOLLA 5	13,800	0,16	0,15	1,87	1,34	0,59	0,45	0,43
MACOLLA 6	13,800	0,25	0,02	1,96	1,53	0,88	0,68	0,64
MACOLLA 7	13,800	0,26	0,03	2,07	1,62	0,94	0,73	0,68
MACOLLA 8	13,800	0,32	0,10	3,02	2,38	1,48	1,15	1,03
MACOLLA 9	13,800	0,35	0,16	3,07	2,42	1,49	1,16	1,04
MACOLLA 10	13,800	0,54	0,57	2,62	1,82	0,68	0,50	0,44
MACOLLA 11	13,800	0,50	0,54	2,56	1,78	0,68	0,50	0,44
MACOLLA 12	13,800	0,49	0,19	3,64	2,90	1,84	1,45	1,26
MACOLLA 13	13,800	0,57	0,21	3,97	3,18	2,06	1,64	1,39



Tabla 4.14. Distorsión individual de voltaje (THDv(%)) en base al voltaje nominal en la configuración de la propuesta 1. (Continuación).

Bus	Harmonic Voltages (% of Nominal Voltage)							
ID	Nominal	5	7	11	13	17	19	23
	kV							
MACOLLA 13	13,800	0,57	0,21	3,97	3,18	2,06	1,64	1,39
MACOLLA 14	13,800	0,56	0,21	3,97	3,18	2,06	1,64	1,40
MACOLLA 15	13,800	0,62	0,23	4,14	3,33	2,17	1,72	1,46
MACOLLA 16	13,800	0,72	0,30	4,21	3,38	2,19	1,74	1,49
MACOLLA17	13,800	0,68	0,28	4,20	3,36	2,18	1,74	1,48
MACOLLA 18	13,800	0,44	0,14	4,56	3,73	2,49	2,00	1,63
MACOLLA 19	13,800	0,44	0,15	4,57	3,73	2,50	2,00	1,63
MACOLLA 20	13,800	0,50	0,21	4,44	3,63	2,44	1,95	1,60
MACOLLA 21	13,800	0,58	0,61	2,78	1,92	0,71	0,52	0,44
MACOLLA 22	13,800	0,55	0,57	2,81	1,95	0,71	0,52	0,44
MACOLLA 23	13,800	0,05	0,03	2,77	1,93	0,69	0,51	0,43
MACOLLA 24	13,800	0,06	0,04	2,80	1,94	0,69	0,52	0,43
MACOLLA 25	13,800	0,06	0,04	2,80	1,94	0,69	0,52	0,43
MACOLLA 26	13,800	0,06	0,04	2,80	1,94	0,69	0,52	0,43
Melen I Barra I	13,800	0,14	0,03	1,37	1,05	0,59	0,45	0,44
Melen I Barra II	13,800	0,17	0,03	1,40	1,07	0,60	0,45	0,45
Melones Oeste	115,000	0,03	0,00	0,26	0,20	0,11	0,08	0,08



Tabla 4.15. Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración actual luego del filtrado.

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Line4-Macolla 1	4,82	1,01	0,28	0,09	0,17	0,08	0,05
Line5-Macolla 2	2,72	1,52	1,38	0,75	0,04	0,01	0,01
Line15-Macolla 5	0,03	0,01	0,10	0,06	0,02	0,01	0,01
Line22-Macolla 6	1,50	0,81	0,61	0,32	0,09	0,08	0,05
Line24-Macolla 7	0,91	0,47	0,25	0,26	0,13	0,10	0,08
Line29-Macolla 9	2,28	1,70	0,62	0,42	0,09	0,07	0,06
Line30-Macolla 8	4,74	3,04	1,29	0,60	0,42	0,22	0,20
Line37-Macolla 10	2,25	1,51	0,85	0,61	0,03	0,02	0,02
Line39-Macolla 11	0,43	0,12	0,07	0,05	0,00	0,00	0,00
Line43-Macolla 12	4,30	2,59	1,42	0,73	0,13	0,06	0,11
Line45-Macolla 13	1,62	0,46	0,20	0,16	0,08	0,08	0,04
Line46-Macolla 14	0,94	0,57	0,23	0,13	0,06	0,04	0,04
Line48-Macolla 15	4,29	4,63	2,14	1,32	0,54	0,40	0,36
Line50-Macolla 16	4,01	2,24	0,74	0,50	0,16	0,10	0,09
Line51-Macolla 17	3,56	2,35	0,94	0,48	0,15	0,14	0,09
Line56-M. Guaicaipuro	3,00	0,69	0,63	0,80	0,87	0,65	0,15
Line59-Macolla 18 y 19	9,09	4,59	2,07	1,29	0,32	0,27	0,12
Line64-Macolla 23	7,45	3,71	2,19	1,07	0,37	0,23	0,15
Line67-Macolla 26	0,79	0,57	0,12	0,06	0,04	0,04	0,01
Linea Carapa I	5,22	1,30	14,08	9,17	3,09	2,03	1,39
Linea Carapa II	5,02	1,83	2,32	0,98	0,33	0,15	0,07



Tabla 4.15. Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración actual luego del filtrado. (Continuación).

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Melen 1	0,89	0,55	0,39	0,07	0,36	0,22	0,26
Melen 2	0,90	0,63	0,51	0,35	0,54	0,33	0,36
T1	0,44	0,27	0,20	0,04	0,18	0,11	0,13
T2	0,44	0,27	0,20	0,04	0,18	0,11	0,13
T3	0,36	0,26	0,22	0,16	0,26	0,17	0,19
T4	0,55	0,38	0,28	0,19	0,28	0,17	0,18
TX1	4,12	0,40	16,06	10,45	3,50	2,28	1,88

Tabla 4.16. Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración de la propuesta 1 luego del filtrado.

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Line4-Macolla 1	5,41	2,11	0,26	0,10	0,19	0,09	0,05
Line5-Macolla 2	2,73	1,51	1,38	0,75	0,04	0,01	0,02
Line15-Macolla 5	0,02	0,02	0,12	0,07	0,02	0,01	0,01



Tabla 4.16. *Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración de la propuesta 1 luego del filtrado. (Continuación).*

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
ID	5	7	11	13	17	19	23
Line22-Macolla 6	1,51	0,81	0,61	0,32	0,09	0,08	0,05
Line24-Macolla 7	0,91	0,47	0,25	0,26	0,13	0,09	0,08
Line29-Macolla 9	2,28	1,70	0,63	0,43	0,11	0,09	0,08
Line30-Macolla 8	6,54	3,21	1,22	0,56	0,38	0,19	0,18
Line37-Macolla 10	2,25	1,49	0,89	0,64	0,03	0,02	0,03
Line39-Macolla 11	4,37	2,54	3,54	2,13	0,44	0,36	0,12
Line43-Macolla 12	3,46	1,50	7,30	5,45	3,30	2,52	1,51
Line45-Macolla 13	1,62	0,46	0,19	0,16	0,08	0,08	0,04
Line46-Macolla 14	0,94	0,57	0,23	0,13	0,07	0,04	0,04
Line48-Macolla 15	3,28	2,18	2,15	1,32	0,56	0,43	0,39
Line50-Macolla 16	4,01	2,24	0,74	0,50	0,16	0,10	0,09



Tabla 4.16. *Distorsión individual de voltaje (THDi(%)) en base a 1 Megavatio, en la configuración de la propuesta 1 luego del filtrado. (Continuación).*

Branch	% Harmonic Current Contents in 1 MVA Base						
	5	7	11	13	17	19	23
Line51-Macolla 17	3,56	2,35	0,94	0,48	0,16	0,15	0,10
Line56-M. Guaicaipuro	2,70	0,92	0,93	1,37	1,96	1,41	0,63
Line57-Macolla Kariña	5,44	1,27	0,44	0,54	1,05	0,87	0,46
Line59-Macolla 18 y 19	4,75	3,06	2,09	1,28	0,27	0,23	0,10
Line64-Macolla 23	6,67	6,08	1,40	0,48	0,20	0,10	0,08
Line67-Macolla 26	0,79	0,57	0,13	0,06	0,04	0,04	0,01
Línea Carapa I	3,64	0,32	11,48	7,88	3,97	2,82	2,01
Línea Carapa II	2,67	1,19	5,82	2,83	0,39	0,44	0,20
Melen 1	0,85	0,55	0,55	0,18	0,22	0,13	0,20
Melen 2	0,89	0,63	0,53	0,32	0,42	0,25	0,31
T1	0,43	0,27	0,28	0,09	0,11	0,06	0,09
T2	0,43	0,27	0,28	0,09	0,11	0,06	0,09
T3	0,36	0,26	0,23	0,14	0,20	0,13	0,16
T4	0,54	0,38	0,30	0,17	0,22	0,13	0,15
TX1	4,05	0,37	16,48	10,66	4,44	3,01	2,42



Seguidamente se muestran las componentes armónicas en el transformador TX1 y en las líneas principales de la subestación, como se muestra en la figura 4.7. Para la configuración actual.

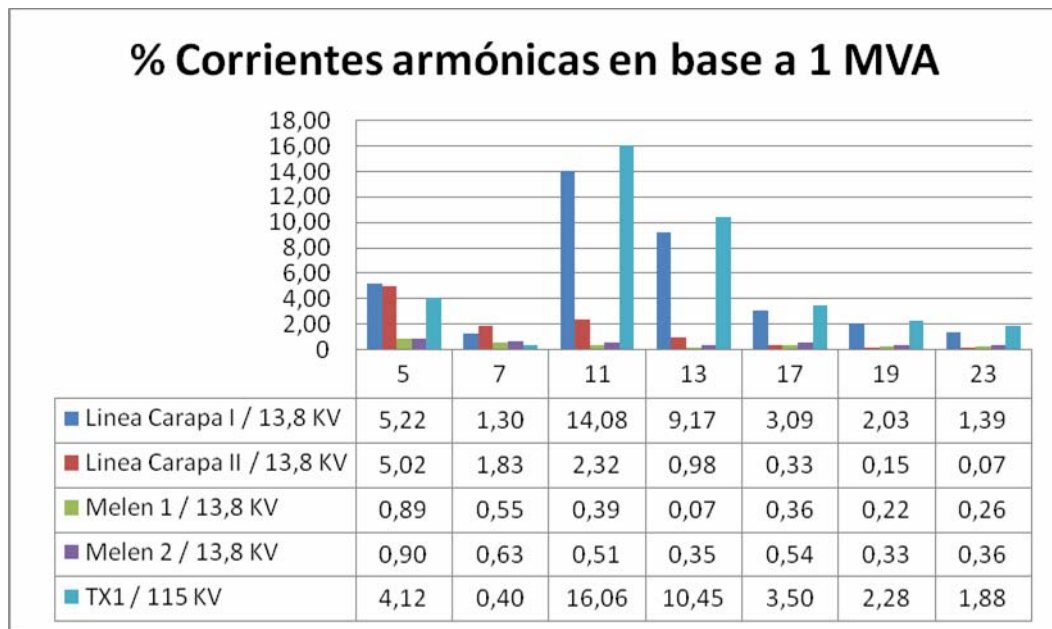


Figura 4.8. Porcentaje de corrientes armónicas después de filtrar en base de 1 MVA en la configuración actual.

En la figura 4.7 se demuestra la eficiencia del filtrado de armónicas donde se denota el bajo porcentaje de armónicas en los circuitos y la resultante que cae sobre el transformador TX1.

En la configuración denominada Propuesta 1, se presenta al igual una disminución en las componentes armónicas resultando similar, mas no igual, estos resultados se pueden apreciar en la figura 4.8.

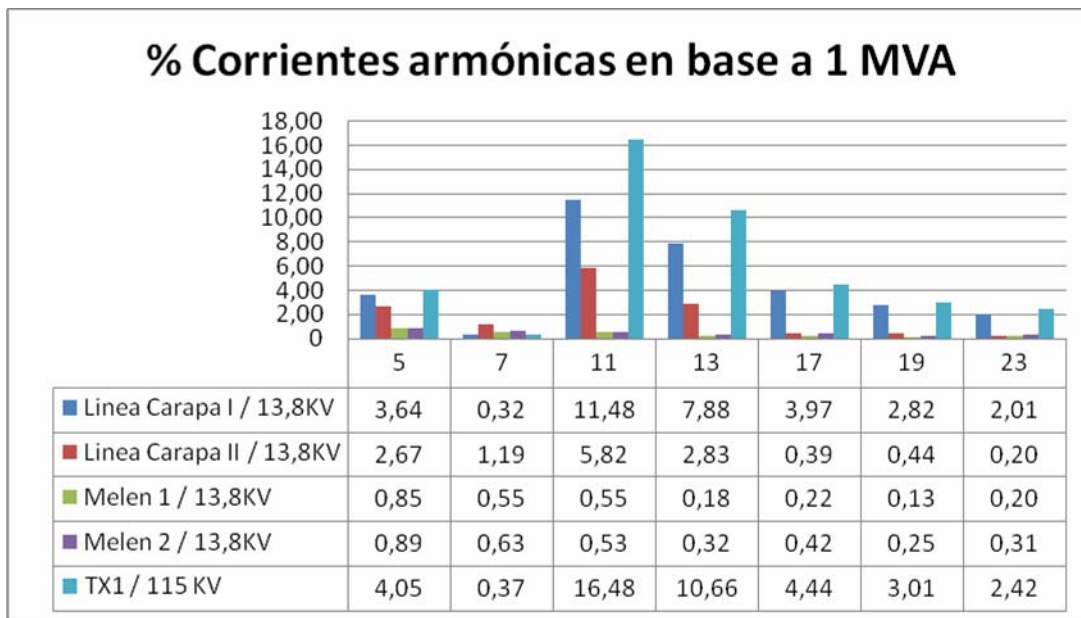


Figura 4.9. Porcentaje de corrientes armónicas después de filtrar en base de 1 MVA en la configuración propuesta 1.

En la figura 4.9 se muestran las corrientes armónicas en porcentaje de la fundamental en el transformador TX1, en la configuración actual.

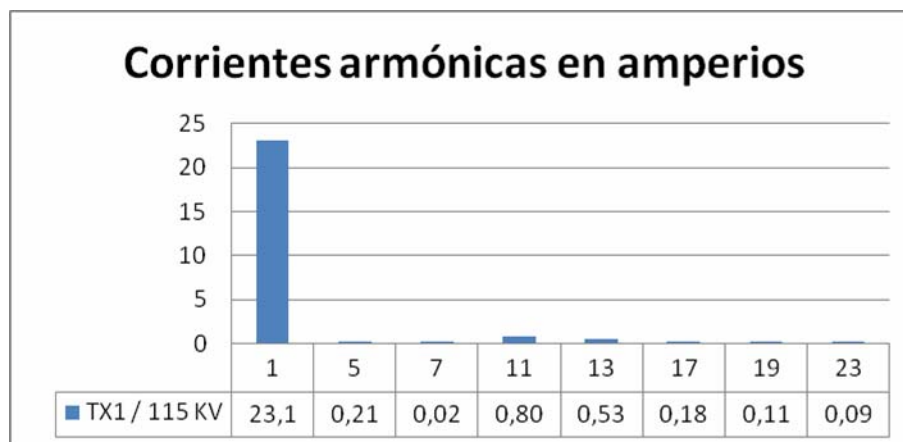


Figura 4.10. Corrientes armónicas en el transformador TX1 después del filtrado en la configuración actual.



La figura 4.10. Muestra los resultados del filtrado armónico en las componentes de corriente individuales del transformador principal de la subestación TX1, en amperios referenciado a la corriente nominal a frecuencia fundamental.

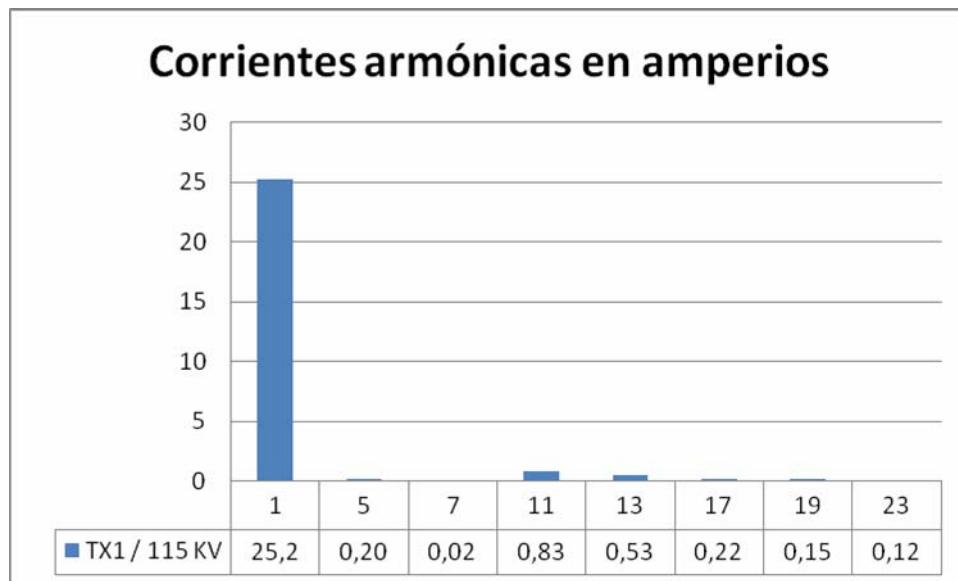


Figura 4.11. Corrientes armónicas en el transformador TX1 después del filtrado en la configuración Propuesta 1.

Para la implementación de estos diseños de filtros sintonizados, diversas empresas están en capacidad de llevar a cabo el mismo, como por ejemplo la empresa ABB cuenta en sus catálogos con filtros de gran y pequeña escala, comprendiendo los diversos tipos de filtros incluyendo el filtro sintonizado, contando con la certificación ISO 9001. Estos se pueden presentar para ser instalados en módulos a la intemperie como se aprecia en la figura 4.11 o como lo propone la empresa Northeast Power system Inc. Que se refiere al montaje en los postes del aparataje como se muestra en la figura 4.12.



Figura 4.12. Filtro de armónico de modo PAD- Mounted.

<http://www.nepsi.com/>



Figura 4.13. Filtros de armónico incorporado al poste. <http://www.nepsi.com/>



4.5. ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS.

Los múltiples resultados presentados anteriormente fueron analizados, destacando lo siguiente.

- A) En las mediciones realizadas se captaron componentes armónicas no características de un variador de frecuencia de seis (6) pulsos, las cuales, se atribuyen a condiciones de operación del equipo, como lo es, el fenómeno de la asimetría en los pulsos de disparo enviados a los tiristores y de las tensiones de la red, sin contar con el hecho del desbalance de las inductancias internas del equipo.

- B) En las mediciones realizadas los valores violatorios de la norma IEEE std 519 se encontraron en las corrientes armónicas excediendo estas el 5% en base a la corriente nominal de carga a frecuencia fundamental. Más para los valores de THD de voltaje se encontraron mediciones bajas lo cual se atribuye a la dimensión del transformador concordando con lo presentado en los cálculos teóricos.

- C) La conexión Δ - Δ de los transformadores de distribución en el sistema de potencia, impiden el paso de las componentes armónicas triples, aportadas por los motores, luminarias, transformadores y como se explica en el primer punto, los variadores de frecuencia.

- D) Los resultados del flujo de carga muestran caídas de voltaje superiores al 95% en muchas barras y nodos del sistema, aún así el nivel de voltaje es suficiente para que los equipos se mantengan en



operación, la caída de voltaje obtenida en la simulación concuerda con resultados de las mediciones.

- E) La integración de la nuevas cargas conocidas como Macolla Kariña, al circuito Carapa I, implican un incremento de la carga del circuito en un 23%, y para su incorporación al sistema según los resultados presentados se escoge la configuración conocida como Propuesta 1, en donde, se realiza una transferencia de carga previo a la incorporación de la nueva macolla.
- F) El flujo de carga armónico realizado mediante la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP), Mostro las distorsiones aportadas por los elementos no lineales al sistema y demás elementos que lo conforman, las simulaciones se realizaron para la configuración actual del circuito y para la configuración de la denominada Propuesta 1, donde se aprecia el incremento de la distorsión total en aproximadamente un 10% con la adición de las nuevas cargas.
- G) Luego de presentado los resultados de las distorsiones armónicas totales e individuales, tanto de corriente como de voltaje, se consiguen que en algunos casos plenamente identificados se sobrepaso el límite establecido por la norma IEEE std 519 de 1992, presentada y descrita en el capítulo 2, en estos casos las componentes armónicas predominantes se presentaron en la 5ta y 7ma armónica, siendo estas componentes armónicas características de los variadores de frecuencia de seis (6) pulsos.



- H) La técnica de filtrado puntal propuesta se implementa en los puntos críticos mostrados anteriormente, enfocado a la quinta 5ta y séptima 7ma armónica. El filtrado se realiza a nivel de distribución, con el fin de filtrar las componentes armónicas antes de que afecten la subestación y al circuito como tal, esto también contribuyó no limitar la escalabilidad de la subestación y de los sistemas de distribución asociados. Siendo así los niveles de voltaje en donde se acoplan los filtros de 13,8 KV y de 4,16KV en el caso de la estación de rebombeo Melen.
- I) En la realización de un nuevo flujo de carga armónico incorporando los arreglos de los filtros puntuales se muestra la disminución de las componentes armónicas en las líneas que alimentan las barras donde se colocaron y el porcentaje de armónico en la subestación disminuye de manera satisfactoria, quedando muy por debajo de los valores admisibles.
- J) Las técnicas de filtrado acopladas funcionan eficientemente en las dos configuraciones predominantes, las cuales son la configuración actual del circuito y la configuración llamada Propuesta 1 donde se incluye las nuevas cargas bajo el nombre de macolla Kariña.
- K) En la incorporación de los filtros de armónicos al sistema no se producen sobre voltajes, gracias a la carga actual del sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

- ✚ El sistema de potencia de la subestación Melones Oeste se ve afectado por contaminación armónica debido a la cantidad de variadores de frecuencia de seis (6) pulsos, cuyas armónicas características fluyen por el sistema disminuyendo la calidad del servicio eléctrico, superando los límites establecidos por la norma IEEE Std 519 de 1992. Especialmente las componentes armónicas de quinto (5^{ta}) y séptimo (7^{ma}) orden de la componentes fundamental.
- ✚ La jornada de medición efectuada cumple con los requerimientos exigidos en las normas IEEE Std 399 y 519 de 1997 y 1992 respectivamente con referencia a las características requerida al equipo y al punto de medición, realizando el registro a una muestra representativa de la carga conectada.
- ✚ El modelado del sistema de potencia de la subestación Melones Oeste de PDVSA , mediante la herramienta computacional Electrical Engineering Software Power System Analysis Software (ETAP), cumple con lo expuesto en la norma IEEE Std 399, permitiendo



mediante el uso de las mediciones tomadas incluir en el modelo de los variadores de frecuencia, como porcentajes de distorsión a inyectar al sistema dependiendo de la capacidad de la carga las componentes armónicas de corriente (de forma porcentual) medidas, dando esto veracidad al dimensionamiento de los filtros.

- ✚ El diseño de los filtros sintonizados a la quinta (5^{ta}) y séptima (7^{ma}) armónica se basa en los resultados promedio conseguidos en las simulaciones del flujo de carga armónico. Diseño que al ser implementado en el sistema demuestra ser efectivo en la disminución de la contaminación armónica, quedando esta muy por debajo de los límites establecidos en las normas IEEE Std 519. Tanto para la configuración actual del circuito como para la configuración propuesta.
- ✚ La técnica de filtrado implementada resulta ser muy eficaz reduciendo significativamente la magnitud de los armónicos en el sistema, permitiendo así la incorporación de nuevas cargas no lineales, sin limitar la escalabilidad del sistema, caso el cual sería si se implementan filtros en las barras de la subestación.
- ✚ La condición de resonancia en las barras ocurren a frecuencias armónicas muy altas, sobrepasando la armónica de orden cuarenta y tres (43), por lo tanto, no se observa los efectos negativos causa de resonancias en el sistema, antes y después del filtrado en las configuraciones estudiadas.



5.2. RECOMENDACIONES.

- ✚ La gerencia de Servicios Eléctricos de PDVSA San Tomé, cuenta con la instrumentación necesaria para ejecutar las mediciones de componentes armónicas tanto de voltaje como de corriente, es por esto que se recomienda incluir entre las mediciones que llevan sobre los relés de las subestaciones, la medición de las componentes armónicas de forma periódica, con el fin, de mantener el control sobre el la cantidad de armónicos inyectado al sistema las cuales no deben exceder lo expuestos en la normativa.

- ✚ Para la inclusión de futuras cargas considerando el crecimiento y exploración de nuevos pozos en la zona, cuyos motores serán controlados por variadores de frecuencia, se plantea el uso de variadores de 18 pulsos, cuya contaminación se presentaría al orden 17 y 19 y a muy bajas magnitudes, más de seguir empleando variadores de 6 pulsos, se aconseja exigir la incorporación de técnicas de filtrado incorporado a la entrada de cada variador.

- ✚ Aun cuando la técnicas de filtrado pasivo propuesta resulta ser eficaz, es posible implementar las técnicas de filtrado activo, ya que, esta técnica permite la eliminación de las componentes armónicas en el momento que son generadas, sin contar que estos son sistemas dinámicos que solo actúan frente la presencia de armónicos y no plantean efectos no deseados al sistema que requiera estudios adicionales.

GLOSARIO DE TERMINOS.

1. Calidad de servicio eléctrico; se refiere a la calidad de la forma de onda de voltaje (intensidad y frecuencia) suministrado por la empresa a los clientes.
2. Componente fundamental; Referido a la forma de onda e intensidad de la señal a la frecuencia original del sistema, la cual es la frecuencia fundamental.
3. Frecuencia fundamental; Esta frecuencia es en la que se basa el diseño del sistema eléctrico de potencia, siendo esta de donde se derivan las frecuencias armónicas.
4. Componente armónica; al igual que la componente fundamental, se refiere a la intensidad y forma de la onda al orden armónico de la frecuencia fundamental.
5. Frecuencia armónica; Es la frecuencia derivada de la fundamental de la componente armónica.
6. PCC; punto de acoplamiento común.
7. K ; número integrador entero positivo y real.
8. P ; número de pulsos en un grupo de conmutación.
9. I_h ; Componente armónica de corriente
10. V_h ; Componente armónica de voltaje.
11. THD; Distorsión armónica total
12. THD_i y THD_v ; Distorsión armónica total de corriente y voltaje respectivamente.

BIBLIOGRAFÍA.

ESP OIL. **“Curso; Armónicas en redes eléctricas: Causas, efectos y soluciones.”** Maracaibo- Venezuela (2005). Dictado por: Dr. Miguel Escalante.

Muhammad H. Rashid. (2004) **“Electronica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones”** Tercera edición. Pearson Education. Cap 5. P.167.

Rodríguez, A. (2005) **“Variadores de Frecuencia y sus Aplicaciones”**. ESP OIL, Engineering Consultants. Manual Capítulo 3. Maracaibo, Venezuela.

Fink, D. y Christiansen, D. (1992) **“Manual de Ingeniería Electrónica”**. McGRAW-HILL, Interamericana de España, Sec. 15, pp. 1-69.

Fernández L. (2002). **“Evaluación de la contaminación de armónicos presentes en las cargas conectadas en la línea N°.2 de la sub-estación morichal PDVSA”**. Trabajo de Grado en Ingeniería Eléctrica presentado en la Universidad De Oriente Núcleo de Anzoátegui, Venezuela.

Giamporcardo A. (2005). **Estudio del efecto de los armónicos en las líneas de transmisión en los niveles de voltaje de 115 kv y 69 kv**. Trabajo de Grado en Ingeniería Eléctrica presentado en la Universidad De Oriente Núcleo de Anzoátegui, Venezuela.



IEEE Std. 399™ (1997) “**Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.**”

IEEE Std. 519™ (1992)“**Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems**”.

Jaramillo S. (2002) “**Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas**”. Tesis Doctoral presentado en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Ramírez E. (2009) “**Distorsión armónica**”. Publicación hecha por la empresa AP&C, Colombia.

Rogers G. Fuentes R. Olgún S. Y Santos J. (2009)“**Diseño preliminar de sistema de filtro para armónicas AC para el proyecto HVDC AYSÉN-SIC**”.

Paice D. “**Power electronic converter harmonics, multipulse methods for clean power.** 1996 Publicación de la IEEE™.

Stefanova E. “**Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía**”. Empresa Eléctrica Matanzas. CUBA (Enero 2005).

Gallego R. (2003) “**Análisis de armónicos en sistemas eléctricos**”. 2003. P.22. Trabajo de investigación publicado en la Universidad de Pereira.

METADATOS PRA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

TÍTULO	Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación Melones Oeste de PDVSA en el distrito San Tome
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Rafael. A. Narváez	CVLAC: 17.359.396 E MAIL: Narvaez01@gmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Estudio de flujo de Carga Armónico

Distorsión Armónica

Filtros de armónicos

Distorsión armónica en la subestación

Simulación en ETAP

Circuitos de distribución

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

El presente trabajo describe el estudio de los fenómenos armónicos a nivel de distribución y transmisión en el sistema de potencia de PDVSA en el Distrito San Tome, enfocado a la subestación Melones Oeste, en donde se emplean técnicas de medición y recolección de datos para alimentar una simulación con el programa ETAP y así determinar el impacto armónico y realizar la propuesta de filtrado, que disminuirá el contenido armónico reestableciendo la calidad del servicio eléctrico a la red.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
	ROL	CA	AS X	TU	JU
Suárez., Luis.	CVLAC:				
	E_MAIL	acerosilicon@gmail.com			
	E_MAIL				
Ezomar., Uzcategui	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	Uzcateguiee@pdvsa.com			
	E_MAIL				
Acosta., Jhon	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Maza, Manuel.	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010 AÑO	10 MES	19 DÍA
-------------	-----------	-----------

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS: Estudio de los fenómenos armónicos en la subestación melones oeste de PDVSA en el distrito san tome.doc	Application/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H
I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u
v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Electricista

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre-Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Electricidad

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente / Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al Concejo Universitario”

Rafael. A. Narváez

AUTOR

Prof. Luis Suárez

TUTOR

Prof. Jhon Acosta

JURADO

Prof. Manuel Maza

JURADO

Prof. Verena Mercado

POR LA SUBCOMISION DE TESIS