

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**ESTUDIO COMPLEMENTARIO DEL ANÁLISIS DE LA
CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL BLOQUE 15
“PETROAMAZONAS” Y ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE
PUESTA A TIERRA.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

QUINGA RAMÓN DANY PATRICIO
dpquingar@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. LUIS TACO VILLALBA
luis.taco@uio.satnet.net

Quito, noviembre del 2010

DECLARACIÓN

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

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

Dany Patricio Quinga Ramón

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Dany Patricio Quinga Ramón, bajo mi supervisión.

Ing. Luis Taco Villalba
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO.

Agradezco a Dios por haberme criado en medio de una gran familia que con su apoyo diario y paciencia han sabido dirigir mi vida hacia el éxito.

A mis queridos padres y hermanos por la confianza depositada en mí en todo el transcurso de estudiante.

Al Ing. Luis Taco por su paciencia y sabios consejos para encaminar esta tesis hacia los objetivos trazados.

Agradezco a PETROAMAZONAS EP por haberme brindado la oportunidad y la confianza de desarrollar la presente tesis. A todo el personal de MANTENIMIENTO por haberme guiado y respaldado en cada una de las actividades necesarias para culminar con éxito el presente trabajo, de manera especial al Ing. Héctor Auz y al Ing. Francisco Checa, quienes supieron guiarme desde el campo, organizar las actividades y al personal para brindarme respaldo técnico en cada una de mis actividades.

A mis abuelitos, tíos y primos que desde niño supieron ayudarme y acogerme. A una persona muy especial que siempre recuerdo por su alegría, ayuda, consejos y vivencias inolvidables.

DEDICATORIA.

Quiero dedicar este esfuerzo a mis padres José y Marcia por haberse mantenido unidos en los momentos más difíciles, buscar soluciones y no desmayar en el arduo trabajo de ser padres, darnos lo mejor a mis hermanos y a mí y brindarnos todo lo necesario para siempre seguir adelante.

A mis hermanos Luis y Berenice quienes me brindaron una amistad sincera y haber compartido conmigo momentos inolvidables.

A las personas que ya no están conmigo pero dejaron marcada mi vida con su amistad incondicional, consejos y ejemplos de superación, Leo, Holger y Paúl.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.	IV
RESUMEN.	X
PRESENTACIÓN.	XI
1. CAPÍTULO 1.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
1.1.1. OBJETIVO GENERAL.	1
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	1
1.2. ALCANCE.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	3
2. CAPÍTULO 2.....	4
ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.	4
2.1. CALIDAD DE ENERGÍA.	4
2.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	7
2.3. IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE ENERGÍA.	8
2.4. ARMÓNICOS.	11
2.4.1. SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS.	13
2.4.1.1. Secuencia directa.....	13
2.4.1.2. Secuencia Inversa.....	14
2.4.1.3. Secuencia homopolar o cero:	14
2.4.2. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS.	14
2.4.2.1. Efecto en los conductores.	15
2.4.2.2. Efecto en los transformadores.	15
2.4.2.3. Efecto en los motores.	17
2.4.2.4. Efectos en bancos de capacitores.	18
2.4.2.5. Efectos en equipo de protección y medición.	18
2.4.2.6. Efectos de resonancia.....	19
2.5. LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS.	20
2.5.1. LOCACIÓN LIMONCOCHA.	20
2.5.2. GENERACIÓN.	21
2.5.3. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	25
2.5.4. TRANSFORMADORES.	26
2.5.5. VARIADORES DE VELOCIDAD (VSD).	29
2.6. EVOLUCIÓN DE LA CARGA.....	31
2.7. NORMAS REGULATORIAS.	32
2.7.1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	33
2.7.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	35
3. CAPÍTULO 3.....	37

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	37
3.1. GENERALIDADES.....	37
3.1.1. CONTINUIDAD ELÉCTRICA DEL CIRCUITO DE TIERRA.	42
3.2. EFECTO EN LAS PERSONAS DE UN MAL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT).	43
3.3. MÉTODOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.....	45
3.3.1. ATERRIZAMIENTO POR MEDIO DE INDUCTANCIAS.	46
3.3.2. PUESTA A TIERRA SÓLIDA.	46
3.3.3. ATERRIZAJE POR MEDIO DE RESISTENCIAS.....	47
3.3.4. NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA.....	47
3.4. OBTENCIÓN DE DATOS.	48
3.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN.	50
3.5. ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA EN LAS LOCACIONES LIMONCOCHA.	52
3.5.1. ESTACIÓN LIMONCOCHA.	56
3.5.1.1. Generadores.....	56
3.5.1.2. Transformadores.....	56
3.5.2. LIMONCOCHA 1.	57
3.5.3. LIMONCOCHA 2.	57
3.5.4. LIMONCOCHA 3.	57
3.5.5. LIMONCOCHA 4.	57
3.5.6. LIMONCOCHA 6.	58
3.5.7. LIMONCOCHA 7.	58
3.5.8. LIMONCOCHA 8.	59
3.5.9. LIMONCOCHA 9.	59
3.5.10. LIMONCOCHA 10.	59
4. CAPÍTULO 4.....	60
ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA.....	60
4.1. PARÁMETROS DE MEDICIÓN.....	61
4.2. IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARGAS NO LINEALES.	62
4.2.1. CONTROLADORES DE MOTORES DE C.A.	63
4.2.1.1. Variador de velocidad de 6 Pulsos.....	64
4.2.1.2. Variador de velocidad de 12 pulsos.....	66
4.2.2. CARGADORES DE BATERÍA.....	69
4.2.3. FUENTES DE PODER EN MODO DE CONMUTACIÓN.	69
4.3. FUENTES TRADICIONALES DE ARMÓNICOS.	71
4.3.1. TRANSFORMADORES.	72
4.3.2. MÁQUINAS ROTATIVAS.....	73
4.3.3. ILUMINACIÓN FLUORESCENTE.....	74
4.4. EQUIPO DE MEDICIÓN.	75
4.4.1. ANALIZADOR DE ENERGÍA HIOKI 3196.....	75
4.5. ANÁLISIS DE DATOS.....	76
4.5.1. ESTACIÓN LIMONCOCHA.	76
4.5.2. SWITCH GEAR A.	77
4.5.1.1. Forma de onda y de voltaje y corriente.	77

4.5.1.2.	Variación del voltaje.....	77
4.5.1.3.	Variación de la corriente.....	78
4.5.1.4.	Variación de la frecuencia.....	79
4.5.1.5.	Armónicos.....	79
4.5.3.	SWITCH GEAR B.....	80
4.5.3.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	80
4.5.3.2.	Variación del voltaje.....	80
4.5.3.3.	Variación de la corriente.....	81
4.5.3.4.	Variación de frecuencia.....	82
4.5.3.5.	Armónicos.....	82
4.5.4.	SWITC GEAR C.....	83
4.5.4.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	83
4.5.4.2.	Variación del voltaje.....	84
4.5.4.3.	Variación de la corriente.....	84
4.5.4.4.	Variación de la frecuencia.....	85
4.5.4.5.	Armónicos.....	85
4.5.5.	LIMONCOCHA 1.....	86
4.5.5.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	86
4.5.5.2.	Variación del voltaje.....	86
4.5.5.3.	Variación de la corriente.....	87
4.5.5.4.	Variación de la frecuencia.....	88
4.5.5.5.	Armónicos.....	88
4.5.6.	LIMONCOCHA 2.....	89
4.5.6.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	89
4.5.6.2.	Variación del voltaje.....	89
4.5.6.3.	Variación de la corriente rms.....	90
4.5.6.4.	Variación de la frecuencia.....	91
4.5.6.5.	Armónicos.....	91
4.5.7.	LIMONCOCHA 3.....	92
4.5.7.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	92
4.5.7.2.	Variación del voltaje.....	92
4.5.7.3.	Variación de la corriente.....	93
4.5.7.4.	Variación de la frecuencia.....	94
4.5.7.5.	Armónicos.....	94
4.5.8.	LIMONCOCHA 4.....	95
4.5.8.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	95
4.5.8.2.	Variación del voltaje.....	96
4.5.8.3.	Variación de la corriente.....	96
4.5.8.4.	Variación de la frecuencia.....	97
4.5.8.5.	Armónicos.....	97
4.5.9.	LIMONCOCHA 6.....	98
4.5.9.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.....	98
4.5.9.2.	Variación del voltaje.....	98
4.5.9.3.	Variación de la corriente.....	99
4.5.9.4.	Variación de la frecuencia.....	100
4.5.9.5.	Armónicos.....	100
4.5.10.	LIMONCOCHA 7.....	101
4.5.10.1.	Forma de onda de voltaje y corriente entrada 1.....	101
4.5.10.2.	Variación del voltaje entrada 1.....	102

4.5.10.3.	Variación de la corriente entrada 1.....	102
4.5.10.4.	Variación de la frecuencia entrada 1.	103
4.5.10.5.	Armónicos entrada 1.....	103
4.5.10.6.	Forma de onda de voltaje de corriente entrada 2.	104
4.5.10.7.	Variación de voltaje entrada 2.....	104
4.5.10.8.	Variación de la corriente entrada 2.....	105
4.5.10.9.	Variación de la frecuencia entrada 2.	106
4.5.10.10.	Armónicos entrada 2.....	106
4.5.11.	LIMONCOCHA 8.	107
4.5.11.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.	107
4.5.11.2.	Variación del voltaje.	107
4.5.11.3.	Variación de la corriente.	108
4.5.11.4.	Variación de la frecuencia.....	109
4.5.11.5.	Armónicos.....	109
4.5.12.	LIMONCOCHA 9.	110
4.5.12.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.	110
4.5.12.2.	Variación del voltaje.....	110
4.5.12.3.	Variación de la corriente.....	111
4.5.12.4.	Variación de la frecuencia.....	112
4.5.12.5.	Armónicos.....	112
4.5.13.	LIMONCOCHA 10.	113
4.5.13.1.	Forma de onda de voltaje y corriente.	113
4.5.13.2.	Variación del voltaje.....	113
4.5.13.3.	Variación de la corriente.....	114
4.5.13.4.	Variación de la frecuencia.....	115
4.5.13.5.	Armónicos.....	115
4.6.	PLANTEAMINETO DE SOLUCIONES.	116
4.6.1.	FILTROS PASIVOS.....	117
4.6.2.	COMPENSADORES ACTIVOS.....	118
4.6.3.	FILTROS HÍBRIDOS.	119
4.6.4.	VARIADORES DE VELOCIDAD DE 12 PULSOS O MÁS.....	120
4.6.5.	FILTROS ACA R992 SPEED STAR 2000.	121
4.6.6.	TRANSFORMADORES DESFASADORES (SHIFT TRANSFORMERS).	123
4.6.7.	TRANSFORMADORES CON FACTOR K.....	124
4.6.8.	CABLE ULTRASHIELD.....	127
4.6.9.	SOPORTE DEL THD DE LOS EQUIPOS.	129
4.6.10.	VSD “POWER FLEX 7000” CON TECNOLOGÍA SGCT FABRICADO POR ALLEN BRADLEY.....	130
4.6.11.	SUPRESORES DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS (TVSS). 131	
4.6.12.	FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS “ACCUSINE” FABRICADO POR SCHNEIDER.....	132
4.6.12.1.	Calculo de la capacidad del filtro ACCUSINE a implementarse en LIMONCOCHA para la corrección de armónicos.	134
CAPÍTULO 5.....		137
ANÁLISIS ECONÓMICO DE UNA BUENA CALIDAD DE ENERGÍA.		137

5.1.	BENEFICIO ECONÓMICO DE CONTAR CON UNA BUENA CALIDAD DE ENERGÍA.	138
5.2.	BENEFICIO ECONÓMICO POR LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.	139
5.3.	CALCULO DE PÉRDIDAS POR ARMÓNICOS EN LA RED.....	141
5.3.1.	PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR ARMÓNICOS EN LA RED DE LIMONCOCHA ANTES DEL VSD.	143
5.3.2.	PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR ARMÓNICOS EN LA RED DESPUÉS DEL VSD.....	144
5.4.	COSTOS TOTALES.....	145
6.	CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES.....	146
6.1.	RECOMENDACIONES	146
6.2.	CONCLUSIONES.....	152
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.....	157
	ANEXO 1.....	160
	DIAGRAMA UNIFILAR DE LA ESTACIÓN LIMONCOCHA.....	160
	ANEXO 2.....	162
	PINZA DE MEDICIÓN DE PUESTAS A TIERRA AEMC 3731.....	162
	ANEXO 3.....	166
	ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA HIOKI 3196.....	166
	ANEXO 4.....	172
	THE 6 AND 12 PULSE VFD SYSTEMS	172
	ANEXO 5.....	176
	CABLE ULTRASHIELD DATA SHEET.....	176
	ANEXO 6.....	179
	VSD DE MEDIA TENSIÓN “POWER FLEX 7000” DE ALLEN BRADLEY	179
	ANEXO 7.....	186
	FILTRO DE ARMÓNICOS “ACCUSINE” DE SCHNEIDER.....	186
	ANEXO 8.....	190
	ARMÓNICOS A LA SALIDA DE LOS VSDS.....	190

RESUMEN.

El presente estudio analiza las condiciones de calidad de energía eléctrica y brinda soluciones para mejorarla. El lugar de estudio fue en las locaciones de LIMONCOCHA, las cuales son las más importantes en el área de explotación del bloque 15 de PETROAMAZONAS con una producción diaria de 12 479 barriles de crudo.

Se ha realizado un análisis preliminar de calidad de energía, basándose en la teoría que los componentes de una mala calidad de energía (armónicos, zags, swells, etc.) recalientan los equipos y los llevan a trabajar en condiciones extremas, restándoles vida útil. Para esto se utilizó una cámara termográfica que evidenció el sobrecalentamiento en los equipos.

Con la evidente presencia de armónicos se utilizó un equipo especializado en monitorear disturbios en redes eléctricas, tomando medidas en puntos estratégicos y en las principales cargas no lineales. Los datos obtenidos se analizaron y se los compararon con las normas especificadas por la IEEE 519 1992, llegando a obtener parámetros demasiado elevados por lo que se procedió a establecer soluciones tecnológicas (filtros, tipos de transformadores y VSDs, calidad de aislamiento de cables, etc.) y soluciones tradicionales (verificar conexiones de transformadores, verificar valores de THD que soportan los equipos, etc.) para minimizar las pérdidas de potencia y dinero que se presentan por este tipo de disturbios.

Se realizó un análisis de los sistemas de puesta a tierra de los equipos presentes en las locaciones de Limoncocha, para esto también se comparó los valores obtenidos con las normas IEEE 142 1991 obteniendo valores bastante satisfactorios lo que indica que se tiene unas buenas instalaciones de puesta a tierra. Brindando también recomendaciones para mantener y mejorar estas condiciones de puesta a tierra.

El análisis económico indica la factibilidad para implementar el presente estudio

PRESENTACIÓN.

El presente estudio realizado para la empresa Petroamazonas se ha dividido en 6 capítulos, analizando dos parámetros importantes como los sistemas de puesta a tierra y la calidad de energía en las locaciones de Limoncocha.

El capítulo 1 contiene los objetivos que ayudarán a mejorar la calidad de energía y los sistemas de puesta a tierra, así como también el alcance de mencionados estudios.

En el capítulo 2 se detalla los componentes y su forma de operación, como preámbulo a esto se hace un levantamiento de equipos y se determina la actual calidad de energía en las locaciones Limoncocha.

En el capítulo 3 se hace una breve introducción de los sistemas de puesta a tierra y los problemas que pueden ocasionar al personal, para esto se lleva a cabo el análisis de los sistemas de puesta a tierra.

El capítulo 4 considerado personalmente como el más complejo comprende el análisis de datos y comparación con valores permitidos por normas para dar soluciones y mejorar la calidad de energía.

Todo estudio debe tener su sustento económico, es por esto que en el capítulo 5 se hace un análisis económico para validar las recomendaciones realizadas para los capítulos 3 y 4.

En el capítulo 6 se hacen las debidas conclusiones y recomendaciones que se obtuvo de todo el proceso de este estudio. Recomendaciones que ayudarán a mejorar los sistemas de puesta a tierra y la calidad de energía en el Bloque 15 de Petroamazonas.

1. CAPÍTULO 1

1.1.OBJETIVOS.

1.1.1. OBJETIVO GENERAL.

Realizar el estudio de la actual Calidad de Energía Eléctrica y proponer soluciones para optimizar el desempeño, confiabilidad y efectividad del costo beneficio de la Energía Eléctrica y del Sistema de Puesta a Tierra en el Bloque 15 “Petroamazonas”.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Diagnosticar la actual Calidad de Energía Eléctrica que se proporciona en el Bloque 15 “Petroamazonas”.

Presentar soluciones para reducir el sobrecalentamiento de transformadores y motores así como también la distorsión que lleva a los equipos a un mal funcionamiento.

Verificar el correcto funcionamiento de la instalación de puesta a tierra y los posibles efectos de las corrientes armónicas sobre dichas instalaciones.

1.2. ALCANCE

En el presente trabajo se analizan causas y se proponen soluciones factibles para mejorar la Calidad de Energía Eléctrica desde los Generadores hacia los variadores de velocidad (VSD), sin dejar de lado la carga que son los motores electro sumergibles. Debido a que anteriormente se realizó un estudio similar pero enfocado a la carga, se denomina al presente como estudio complementario.

En este proyecto se prevé un estudio preliminar de la actual Calidad de Energía, para luego revisar teóricamente, tomar y procesar los datos para proponer las debidas soluciones y cumplir los objetivos trazados, por medio de esto se desea corregir los disturbios existentes en el sistema de suministro de energía eléctrica que afecta a los equipos de control, medición y protección los cuales requieren de cierta confiabilidad, de un bajo nivel de disturbios para su correcto funcionamiento, y de las cuales depende las plantas generadoras, la producción, planificación y sobre todo la seguridad de los seres humanos que trabajan en el bloque 15 "Petroamazonas".

Además se analizarán los Sistemas de Puesta a Tierra y de ser necesario se plantearán soluciones para corrección de desperfectos para mantenerlos inmunes ante la presencia de corrientes y voltajes armónicos y actúen normalmente ante cualquier eventualidad.

1.3.JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

La necesidad del presente trabajo nace a partir de un estudio anterior, el mismo que analizó causas y soluciones de la Calidad de Energía en el Bloque 15 de “Petroamazonas” a partir de un variador de velocidad hacia la carga (bombas electro sumergibles) en la locación Laguna, la misma que se caracteriza por tener varios pozos en funcionamiento y por ende una carga bastante significativa.

La Calidad de Energía Eléctrica tiene repercusiones técnicas y económicas que son muy considerables en la industria, pues una mala calidad principalmente disminuye la vida útil de los equipos y aumenta el consumo de energía y como consecuencia de estos se aumentan considerablemente los gastos económicos en operación, mantenimiento de equipos y generación de energía. Razón considerable para que Petroamazonas EP requiera y necesite un estudio complementario en cuanto a Calidad de Energía se refiere.

El complemento del estudio se lo realiza debido a la proliferación de equipo electrónico cada vez más sofisticado en todos los procesos de producción y planificación en los cuales impacta considerablemente las características principales del suministro de energía. Petroamazonas al ser una empresa líder en extracción de petróleo está a la vanguardia de la tecnología y tiene a su haber nuevos proyectos de perforación y extracción, para lo cual está ya instalando equipo de última tecnología.

La presencia de corrientes armónicas que distorsionan la onda de la energía eléctrica tiene como consecuencia un incremento en los costos de operación del sistema, tales como pérdidas en los conductores, transformadores, motores, deterioro acelerado del equipo debido al calentamiento, además resta confiabilidad al sistema ya que algunas corrientes armónicas hacen disparar en falso ciertas protecciones. Como consecuencia de esto se obliga a paradas no programadas de pozos, lo cual repercute en pérdidas de producción.

2. CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE LA CALIDAD DE ENERGÍA Y SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

2.1.CALIDAD DE ENERGÍA.

La calidad de la energía eléctrica se mide por la calidad de la onda de tensión según la norma IEEE 519 1992 [4]. La obtención de datos sobre los distintos aspectos de la calidad de energía eléctrica implica la medida de un gran número de parámetros y el problema después suele ser, cómo resumir y compactar estos datos de forma reducida a un número de parámetros sea representativo de dicha calidad y a la vez que contengan la máxima información de detalle sobre posibles perturbaciones.

La velocidad de cómputo y la capacidad para almacenar datos que permitan a la vez ver el detalle y registrar durante largos períodos de tiempo son los problemas principales que deben superarse en el diseño de instrumentos destinados a la medida de calidad de red.

Actualmente en Petroamazonas y la estación Limoncocha se tiene una mala calidad de energía, todo esto queda al descubierto en el calentamiento excesivo de los motores y transformadores de la red eléctrica, problemas continuos con los bobinados de los mismos y deterioro acelerado de fuentes de alimentación de algunos de los PLCs.

Para sustentar lo afirmado anteriormente, se presenta una imagen térmica del transformador XFM 57 ubicado en la locación Limoncocha 6 el cual se encuentra trabajando en condiciones anormales de temperatura, lo que provoca pérdidas técnicas y económicas. De acuerdo al catálogo del equipo, el nivel máximo de temperatura para este tipo de transformadores es de 75° C [11].

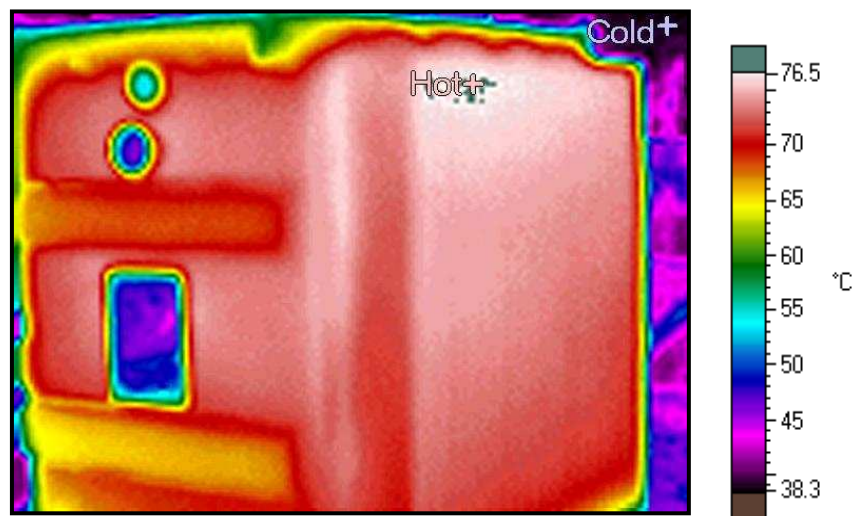


Figura 2.1 Termografía del tanque del transformador XFM 57 de Limoncocha 6.

La tabla siguiente muestra el porcentaje de armónicos de voltaje presentes en la situación actual de la calidad de energía en Petroamazonas. La muestra fue tomada aleatoriamente en la locación de Limoncocha 6.

Orden	(%)	Orden	(%)	Orden	(%)
5ta	40.1 %	7ma	13.6 %	THDV	10.77 %

Tabla 2.1 Armónicos de voltaje

A continuación se presentan los datos de armónicos encontrados en el sistema, nótese que la distorsión armónica total de corriente (THDI) es bastante alta si se hace comparación a la norma IEEE 519 1992 [4] la misma que menciona valores inferiores de THD al 5% para este nivel de voltaje.

Orden	(%)	Orden	(%)	Orden	(%)
5ta	53.4 %	7ma	16.9	THDI	37.73

Tabla 2.2 Armónicos de corriente.

La mala calidad de energía eléctrica no solo afecta a los transformadores y motores, sino también a las líneas de transmisión al crear de igual manera un

sobrecalentamiento. La figura 2.2 muestra el estado de un punto de conexión de una línea a 4160 V ubicada a la salida del transformador XFM 01 de la locación Limoncocha 10.



Figura 2.2 Terminales del transformador XFM 01 a 4160 V de la locación Limoncocha 10

La presencia de perturbaciones eléctricas en el punto de generación se debe a la proliferación de la carga y la inyección de armónicos que generan los VSDs, se podría pensar que los armónicos tendrían que estar presentes únicamente en los VSDs y la carga, pero como se vio en el estudio actual de la calidad de energía los armónicos se reflejan en toda la red ocasionando daño a todos los equipos que están conectados a esta.

La tabla 2.3 indica un resumen del reporte técnico de generación que emite Petroamazonas al estado, en esta tabla se observa el consumo de los combustibles gas y diesel de los generadores para satisfacer la demanda de los pozos aledaños. Con el presente estudio se pretende bajar el consumo de combustible y las pérdidas de energía por armónicos y por medio de esto reducir

costos de consumo de combustible para la generación de energía eléctrica en la estación Limoncocha.

GENERADOR	CONSUMO MENSUAL DE DIESEL [GAL], GAS [kpies ³]	P _{nominal} [kW]	Demanda [kWh-mes]	Carga actual [%]	ESTADO
MG2101-1G	3.168	750	216.000	40,0	OK
MG2101-2G	4.224	750	288.000	53,3	OK
MG2101-3G	0	750	0	0,0	OFF
MG2101-4G	4.224	750	288.000	53,3	OK
MG2101-5G	4.224	750	288.000	53,3	OK
MG2101-6G	3.168	750	216.000	40,0	OK
MG2101-12G	3.750	1.500	446.400	41,3	OK
MG2101-11G	0	1.500	0	0,0	OFF
MG2101-9G	2.822	1.500	252.000	23,3	OK
MG2101-10G	0	1.500	0	0,0	STAND BY
MG2101-1D	0	275	0	0,0	STAND BY
MG-W16	36.596	1.450	396.000	67,0	OK
JENBACHER	7.350	1.044	504.000	67,0	OK
TOTAL DIESEL	36.596	1.725	396.000		
TOTAL GAS	32.930	11.544	2.498.400		
TOTAL		13.269	3.290.400		

Tabla 2.3 Reporte de generación Petroamazonas, diciembre del 2009

2.2.SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Actualmente en los datos medidos de forma aleatoria en la estación Limoncocha se tiene medidas bastante aceptables de resistencia de puesta a tierra (RPT), esto es resultado de una buena adaptación y preparación del suelo en dicha estación.

Se tomaron medidas de RPT en los equipos aleatorios que están trabajando ya que también habían equipos instalados pero que no estaban funcionando. Un

estudio más profundo y detallado de los sistemas de puesta a tierra se lo hace en el capítulo 3.

Según la norma de la IEEE en el artículo Std IEEE 142-1991 [7] el valor de RPT para una sub estación debe ser menor o igual a 1Ω , en este caso el sistema de distribución de la estación Limoncocha es de 13 800 [V], por lo que está dentro de los parámetros permitidos.

2.3.IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE ENERGÍA.

La energía eléctrica es producto de la conversión de energía ya que se la obtiene del principio fundamental de la física que menciona que “La energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma”. Es por esto que por medios principalmente mecánicos (todo medio que produzca o genere movimiento) se puede obtener energía eléctrica.

La expresión y forma natural de la energía eléctrica alterna es de forma senoidal perfecta como indica la figura 2.3, es decir sin ranuras, huecos o cualquier alteración que deforme dicha onda.

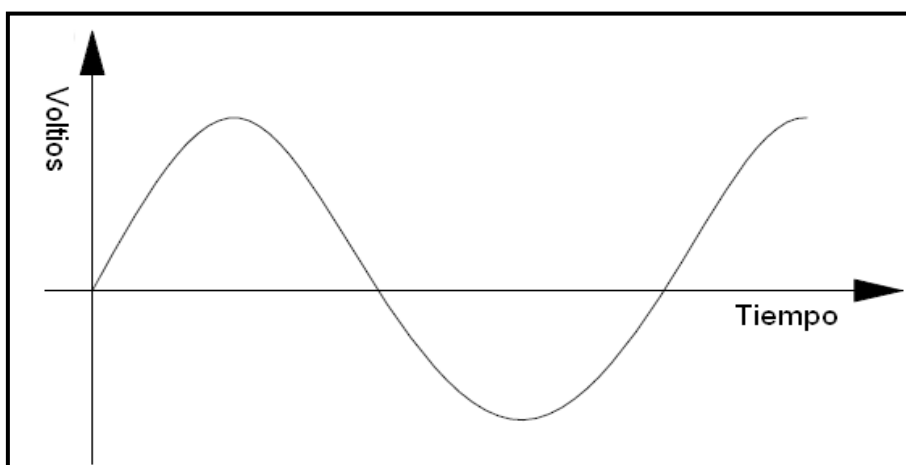


Figura 2.3 Forma de onda de voltaje alterno.

La razón que hace buscar la perfección de dicha onda es que todos los aparatos y dispositivos eléctricos son diseñados para trabajar en condiciones normales con

este tipo de onda senoidal, cualquier alteración que exista en la onda se reflejará en el funcionamiento del dispositivo eléctrico.

Existen diversas razones para la deformación de la onda, tales como, proliferación de equipo electrónico, conexión y desconexión brusca de carga, descargas atmosféricas, ruido, etc. Todas estas razones provocan distintas formas de onda que se filtran en la red y se suman a la forma de onda fundamental (senoidal de 60 Hz) provocando así su deformación.

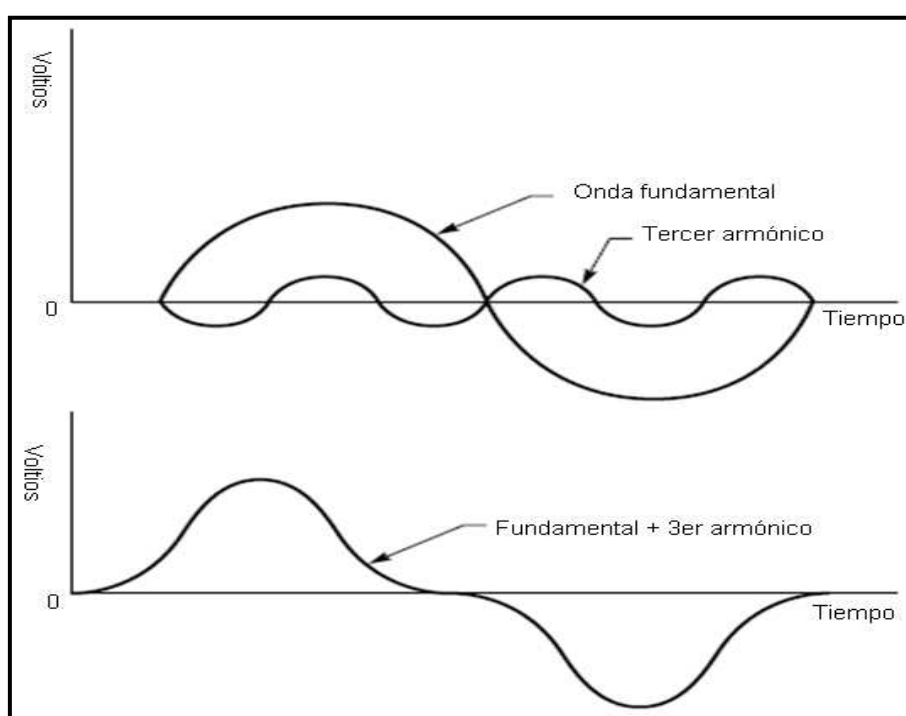


Figura2.4 Distorsión armónica.

Esta deformación de onda (sea voltaje o corriente), afecta a todo el sistema eléctrico, es decir a la generación, transmisión, distribución, y teniendo mayor repercusión en la carga. Los principales efectos de la mala calidad de energía en el consumidor final o carga se presentan en los equipos provocando: calentamiento excesivo, deterioro acelerado, funcionamiento anormal, consumo excesivo de energía eléctrica, entre otras.

En los generadores la repercusión más importante es el consumo excesivo de diesel para la generación de energía eléctrica y el deterioro acelerado del equipo,

todo esto se refleja en gastos de operación y mantenimiento que a largo plazo se vuelven gastos bastante significativos.

Pero el factor más importante para la industria se encuentra en el tema económico, como se mencionó anteriormente el deterioro acelerado, la operación y mantenimiento son gastos en repuestos y mano de obra que a largo plazo se hace bastante significativo. Es por esto que todas las empresas buscan corregir estas perturbaciones.

La figura 2.5 muestra la importancia económica que tiene la calidad de energía eléctrica en los últimos años en los Estados Unidos, similar efecto provoca a nivel mundial. En el Ecuador se está empezando a tomar en serio este grave problema que a los países ya desarrollados ha creado muchos inconvenientes técnicos y económicos y que al corregirlos han logrado una mejora significativa tanto para el nivel residencial e industrial.

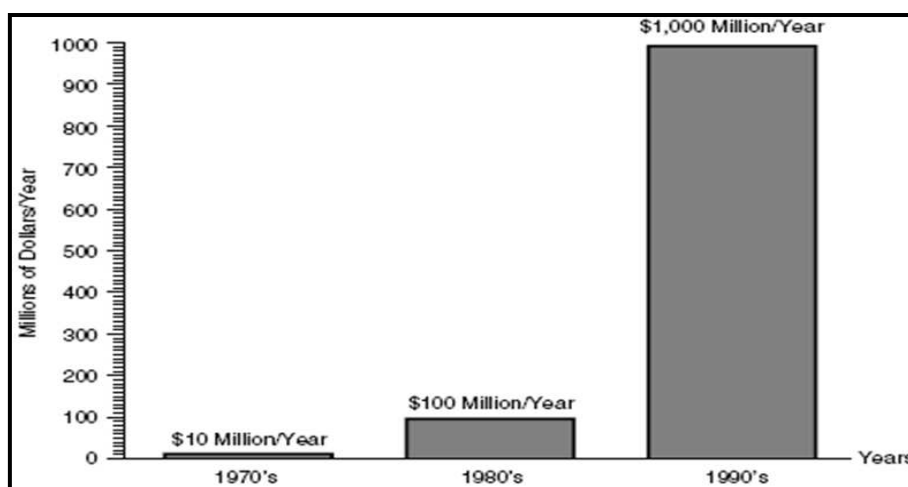


Figura 2.5 Pérdidas económicas debido a la mala calidad de energía en Estados Unidos [3]

Fuente: Curso de Calidad de Energía. Dr. Gabriel Salazar, EPN

En Estados Unidos, los problemas del sistema de potencia asociado con los armónicos comenzaron a ser de interés general en la década de los 70, época del embargo del petróleo, que condujo a incrementos en la electricidad y al ahorro de la energía. Las compañías de distribución de energía y los consumidores

industriales comenzaron a instalar condensadores para el mejoramiento del factor de potencia. Los condensadores reducen la demanda de MVA que exige el sistema eléctrico abasteciendo la porción de reactivos necesarios de forma local (donde se requiere). Como resultado, se reducen las pérdidas eléctricas tanto en la planta industrial como en la red de distribución. Para mejorar el factor de potencia es necesario incrementar significativamente el número de capacitores conectados en el sistema de potencia. Como una consecuencia, ha existido un aumento igualmente importante en el número de circuitos sintonizados (resonantes) en redes de distribución y plantas [3].

La empresa Petroamazonas busca día a día elevar su producción trabajando bajo índices de calidad y normas internacionales en cada uno de sus procesos de trabajo.

Lamentablemente este incremento de carga que en su mayor parte es electrónica repercute directamente en la generación de disturbios y armónicos pero la necesidad de contar con sistemas electrónicos más sofisticados y eficientes es para brindar mayor capacidad, confiabilidad y estabilidad al sistema.

2.4. ARMÓNICOS.

Se definen a los armónicos como la deformación de la forma de onda senoidal de voltaje o corriente por superposición de ondas senoidales de frecuencias múltiplos de la fundamental de 60 [Hz]. Un armónico es un múltiplo entero de la fundamental.

El método de estudio para tratar las corrientes periódicas no senoidales fue propuesto por el matemático francés Jean Baptiste Fourier, que demostró que cualquier función periódica acotada puede descomponerse en una suma de funciones seno y coseno con frecuencias múltiplos enteros de la fundamental [3].

$$f(x) = A + a_1 \text{sen}(x) + a_2 \text{sen}(2x) + \dots + a_n \text{sen}(nx) + b_1 \cos(x) + b_2 \cos(2x) + \dots + b_n \cos(nx) \quad (2.1)$$

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2.2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}(nx) dx \quad (2.3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (2.4)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (2.5)$$

$$\theta_n = \arctan \frac{b_n}{a_n} \quad (2.6)$$

Donde:

$f(x)$ = Función periódica.

A = Valor medio.

a, b = Coeficientes de Fourier.

Además, la existencia de cierta simetría en la onda periódica hace que esta no contenga algunas componentes armónicas. Es importante identificar tales simetrías para conocer que armónicos estarán presentes a la vista de la forma de onda, o incluso como pueden repartirse las cargas para eliminar ciertos armónicos de la red a base de provocar tales simetrías. A continuación se da un resumen de las simplificaciones más importantes.

- ❖ Si las áreas de los semiciclos positivo y negativo son iguales, entonces el término A es cero.

- ❖ Si $f(x + \pi) = -f(x)$, entonces no existen armónicos pares, osea que no hay los 2do, 4to, 6to,...etc.
- ❖ Si $f(-x) = -f(x)$, luego el término $b_n = 0$ lo que significa que no hay la función coseno.
- ❖ Si $f(-x) = f(x)$, luego el término $a_n = 0$ lo que significa que no hay función seno.
- ❖ Cuando es difícil escribir una expresión matemática para $f(x)$, o donde se requiere un análisis de un experimento o forma de onda obtenida por un equipo, el análisis gráfico puede ser desarrollado.

2.4.1. SECUENCIA DE LOS ARMÓNICOS.

2.4.1.1. Secuencia directa.

Denominados también de secuencia positiva, estos son los armónicos fundamentales como los del orden 1, 4, 7, etc.

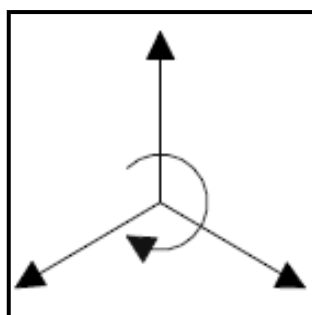


Figura 2.6 Diagrama de secuencia directa

2.4.1.2. Secuencia Inversa.

Denominados también de secuencia negativa, son los que provocan un torque inverso al sentido normal de giro, provocando de esta manera un freno, es decir se opone al campo de la frecuencia fundamental. Estos armónicos son los que producen calentamiento en los equipos.

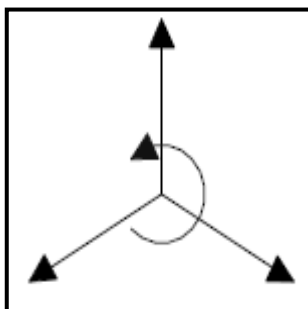


Figura 2.7 Diagrama de *secuencia inversa*.

2.4.1.3. Secuencia homopolar o cero:

Son los denominados terceros armónicos, este tipo de armónicos circula únicamente por el neutro, lugar en el cual se suman.

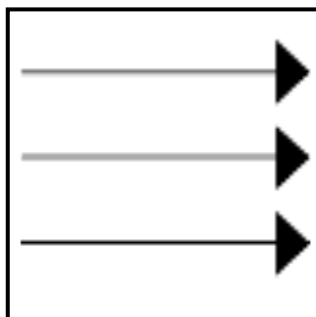


Figura2.8 Diagrama de *secuencia homopolar*.

2.4.2. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS.

Los principales inconvenientes causados por los armónicos se pueden resumir en:

Efectos instantáneos.

- Fallo de interruptores automáticos por efecto di/dt .

- Operación incorrecta de contactores y relés
- Interferencia con sistemas de comunicación (telemandos y sistemas telefónicos).
- Reseteo de ordenadores y errores en PLCs.

2.4.2.1. Efecto en los conductores.

Aumento en las pérdidas $I^2 * R$ por el efecto piel o "skin" fenómeno en el cual la resistencia de corriente alterna (R_{ac}) es mayor que la resistencia de la corriente directa (R_{dc}) debido a la variación de la corriente en la superficie del conductor.

Este efecto es proporcional a la frecuencia, en corriente alterna la intensidad se acumula en los extremos del cable por lo que se reduce la sección efectiva del mismo.

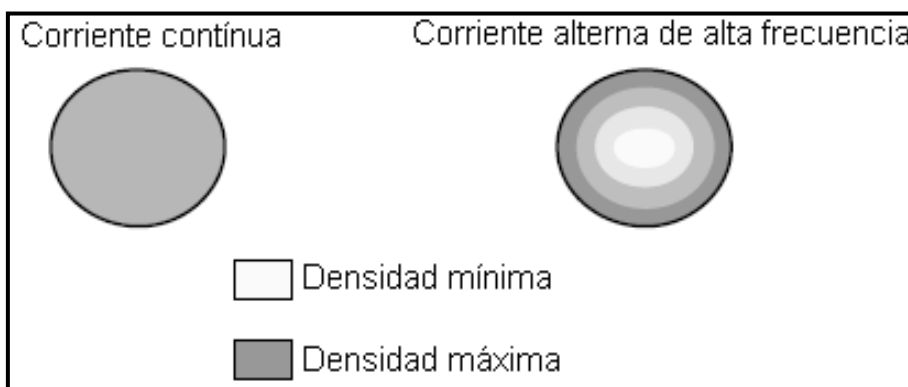


Figura 2.9 Variación del efecto piel en los conductores.

2.4.2.2. Efecto en los transformadores.

Los efectos de los armónicos se reflejan principalmente en las siguientes pérdidas de potencia.

a) Pérdidas por efecto Joule

$$P = I^2 * R \quad (2.7)$$

b) Pérdidas por corrientes de Eddy.

$$P_e = P_{e,n} \sum_{h=1}^{h \max} \left[\frac{I_h}{I_n} \right]^2 h^2 \quad (2.8)$$

c) Pérdidas adicionales.

$$P_{ex} = P_{ex,n} \sum_{h=1}^{h \max} \left[\frac{I_h}{I_n} \right]^2 h \quad (2.9)$$

Donde:

I_h = Corriente de la armónica h. [A]

I_n = Corriente nominal. [A]

$P_{e,n}$ = Pérdidas de Eddy a corriente y frecuencia nominal.

$P_{ex,n}$ = Pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

En conexiones delta – estrella que alimentan cargas no lineales monofásicas se puede tener:

- a) Sobre calentamiento del conductor neutro por la circulación de armónicas “triples”
- b) Sobrecalentamiento del devanado conectado en delta.

En caso de que alimenten cargas no lineales que presenten componentes de corriente directa se puede tener:

- a) Aumento ligero en las pérdidas de núcleo o sin carga.
- b) Aumento en los niveles de ruido audible.
- c) Incremento sustancial de las corrientes de magnetización.

2.4.2.3. Efecto en los motores.

Calentamiento excesivo por el aumento en todas sus pérdidas.

- Pérdidas I^2R en el estator: por el aumento de la corriente de magnetización y por el efecto piel.
- Pérdidas I^2R en el rotor: por el aumento en la resistencia efectiva del rotor debido el efecto piel.
- Pérdidas de núcleo. Aumentan relativamente poco debido al aumento en las densidades de flujo pico alcanzadas.
- Pérdidas adicionales. Aumentan, pero son extremadamente complejas de cuantificar y varían en cada máquina.

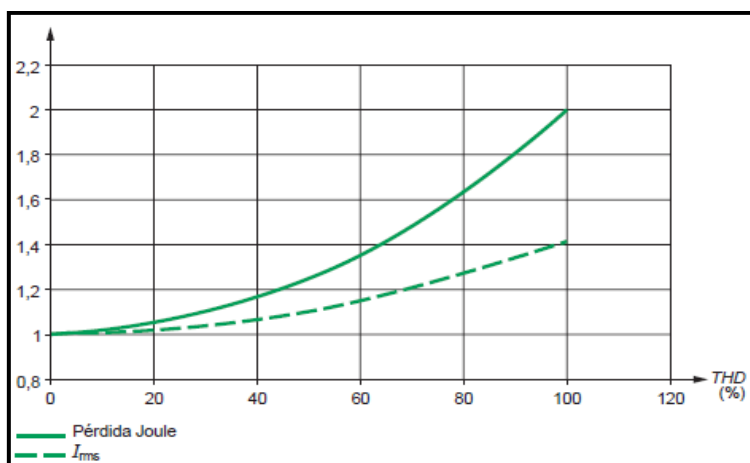


Figura 2.10 Aumento de la corriente rms en las pérdidas Joule en función del THDI [10].

Fuente: *Detección y filtrado de armónicos. Schneider Electric.*

Dependiendo del voltaje aplicado puede haber una reducción en el par promedio de la máquina, se producen torques pulsantes por la integración de las corrientes del rotor con los campos magnéticos en el entrehierro y disminuye la eficiencia y la vida útil de la máquina.

2.4.2.4. Efectos en bancos de capacitores.

Se puede tener problemas de resonancia serie o paralelo al instalar bancos de capacitores en presencia de armónicas, lo que ocasiona la operación de dispositivos de protección y en daño o envejecimiento prematuro de los bancos.

La corriente a través de los capacitores se calcula de la siguiente manera:

$$I = \frac{V}{X_c} \quad (2.10)$$

$$I = \frac{V}{\frac{1}{2 * \pi * f * C}} \quad (2.11)$$

$$I = V * 2 * \pi * f * C \quad (2.12)$$

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia, por lo tanto hasta las más pequeñas frecuencias de tensiones armónicas causarán altas corrientes que perjudicarán a los capacitores.

2.4.2.5. Efectos en equipo de protección y medición.

La exactitud de los sistemas de medición se ve afectada por la presencia de armónicas. Los medidores de energía activa registran exactamente la dirección del flujo de energía a las frecuencias armónicas, pero tienen errores de magnitud que aumentan con la frecuencia.

La exactitud de medidores de demanda y de energía reactiva es aún menor en presencia de armónicas.

La presencia de armónicos influye de manera muy importante en la confiabilidad y estabilidad del sistema, ya que estas corrientes se filtran en la red y muchas veces provocan el disparo de apertura en falso de protecciones eléctricas muy sensibles como los relés de sobre corriente. Esta acción hace que otros equipos

dejen de trabajar provocando en el peor de los casos el apagado total de una locación.

Los interruptores automáticos en la instalación se someten a picos de intensidad producidos por los armónicos. Estos picos producen disparos intempestivos con las consecuentes pérdidas en la producción, así como los costes correspondientes al tiempo necesario para volver a poner en funcionamiento la instalación.

2.4.2.6. Efectos de resonancia.

La impedancia de inductancias y condensadores depende de la frecuencia. La conexión en serie o en paralelo de inductancias y condensadores da lugar a situaciones singulares, denominadas de resonancia, en las cuales la impedancia se hace mínima o máxima.

Errores en equipos de medida:

- ❖ Errores de medición de energía activa, reactiva y factor de potencia.
- ❖ Lecturas erróneas con multímetros basados en el valor medio o con poco ancho de banda.

La magnitud de los costes originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas puede percibirse considerando lo siguiente:

- ❖ Una elevación de sólo 10°C de la temperatura máxima del aislamiento de un conductor reduce a la mitad su vida útil.
- ❖ Un aumento del 10% de la tensión máxima del dieléctrico de un condensador reduce a la mitad su vida útil.

2.5. LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS.

Para el complemento del estudio de la Calidad de Energía Eléctrica en el campamento Indillana, la misma que está bajo la operación y supervisión de Petroamazonas y por petición de la misma empresa, se escogió la locación Limoncocha como centro de estudio y monitoreo. Con esto se espera obtener ahorro económico en mantenimiento preventivo, mantenimiento correctivo y mejorara la eficiencia de los generadores y motores asociados a esta locación.

2.5.1. LOCACIÓN LIMONCOCHA.

Limoncocha es la principal locación de la compañía Petroamazonas, está conformada por 15 sub locaciones llamadas Limoncocha 1, Limoncocha 2, Limoncocha 3, etc., dichas sub locaciones son alimentadas energéticamente desde la locación generadora central llamada "Estación Limoncocha".

Estas sub locaciones se encuentran dispersas a una distancia entre 0,2 km y 3 km, en las cuales se conectan las bombas electro sumergibles que son las encargadas de la extracción de petróleo.

La generación de la Estación Limoncocha se concentra en tres switchgear de 4160 V cada uno, para luego elevar este voltaje a 13 800 V y transportar la energía a cada una de las sub locaciones.

El siguiente levantamiento de equipos consiste en dar a conocer los datos técnicos de los principales componentes de la red de generación, transmisión y consumo de energía eléctrica de la locación Limoncocha.

En la estación Limoncocha además se cuenta con cuartos de control en los que se alojan las protecciones eléctricas del sistema, así como también motores y bombas para rellenar de agua el vacío que queda de la extracción de petróleo en centro de la tierra.

Gracias a la cortesía de Petroamazonas, en la figura 10 se puede apreciar y entender la configuración del sistema de generación de Limoncocha.

2.5.2. GENERACIÓN.

El sistema de generación de energía eléctrica está conformado por un acoplamiento de grupo motor-generador, de los cuales 9 de los motores son de marca Waukesha, un motor marca General Electric, ambos utilizan gas como combustible para la conversión de energía, siendo el General Electric el más moderno y eficiente. Los generadores Waukesha tienen un voltaje de generación alterna de 4160 V a 60 Hz.

En el mismo sistema se tiene dos motores de combustión interna marca Caterpillar, con la diferencia que estos motores utilizan diesel como combustible para la conversión de energía. Estos generadores tienen un voltaje de generación de 480 V y se los utiliza cuando aumenta la demanda en el sistema o cuando algún generador a gas debe salir de línea por daño o mantenimiento programado.

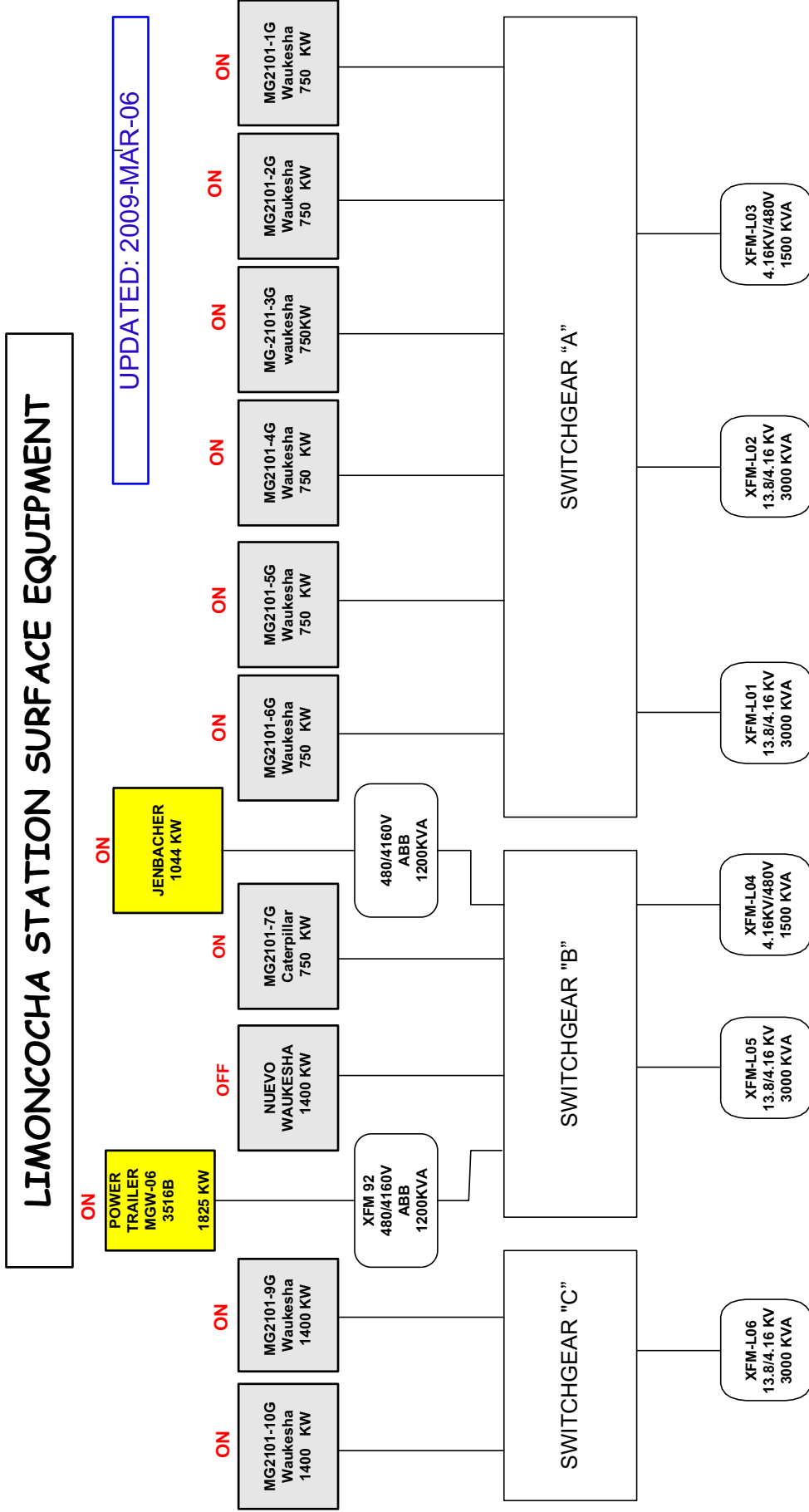


Figura 2.11 Diagrama de bloques de la estación Limoncocha. (Cortesia Petroamazonas)

Para alimentar a los generadores Waukesha y Jenbacher se utiliza el gas que se obtiene en la extracción del crudo, cabe mencionar que en la extracción no solo se obtiene crudo sino también gas, agua y sólidos.

La potencia total instalada en la estación Limoncocha es de 11,769 MW, como producto de la combinación de generación a gas y a diesel.



Figura 2.12 Grupo motor – generador marca Waukesha, 4160 V.
(Cortesía Petroamazonas)

Esta potencia se concentra en un cuarto de control y monitoreo denominado switchgear el cual tiene por objetivo concentrar y repartir la energía a las distintas locaciones de Limoncocha. Este switchgear es de tal importancia para la operación y producción en Petroamazonas que se le ha incorporado un sistema de ventilación con aire forzado y aire acondicionado para ventilar los equipos de control, monitoreo y protección.

A continuación se detalla los datos técnicos más importantes de cada uno de los generadores.

Tag	Motor	Combustible	Generador	Potencia[kW]	Voltaje[V]
MG2101-1G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-2G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-3G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-4G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-5G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-6G	Waukesha	Gas	Kato	750	4160
MG2101-9G	Waukesha	Gas	Leroy Sommer	1500	4160
S/N	Waukesha	Gas	ABB	1500	4160
S/N	Waukesha	Gas	ABB	1500	4160
S/N	Caterpillar	Diesel	Kato	275	480
S/N	Caterpillar	Diesel	Caterpillar	1450	480
S/N	General Electric	Gas	Stamford	1044	480

Tabla 2.4. Grupo de motores - generadores de la “Estación Limoncocha”

A pesar que la potencia instalada es de 11,769 MW, la demanda de la carga (bombas electro sumergibles, compresores, servicios auxiliares, etc.) es de 4,360 MW (de acuerdo al informe emitido al CONELEC en diciembre del 2009), es por esto que los generadores no se encuentran trabajando a su potencia nominal, sino que trabajan a porcentajes, de acuerdo a lo programado y a la necesidad de la carga. Por ejemplo el generador MG 2101 - 9G está en “stand by” con la finalidad que si en algún momento un generador sale de línea este entre en lugar del otro para seguir manteniendo la estabilidad y capacidad y continuidad del sistema.

El anexo 1 contiene información detallada del diagrama unifilar de la estación Limoncocha, en el que se puede apreciar todos los equipos.

2.5.3. LÍNEA DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

La red de distribución es el medio a través del cual se transmite energía y potencia al usuario final, en este caso a la bomba electrosumergible. El sistema de transmisión en su totalidad es aéreo.

La diversidad en los niveles de tensión en las redes se justifica por la diversidad en los tamaños de los consumos y por la necesidad de optimizar las pérdidas óhmicas en líneas, siendo estas menores cuando se tiene mayores tensiones.

El sistema de transmisión de la estación Limoncocha se lo realiza a un voltaje de 13 800 V. Para conseguir este nivel de voltaje se ha creado una subestación (Figura 2.13) dentro de la locación, la cual recepta la energía de los generadores y la reparte a las diferentes sub locaciones.



Figura 2.13 Subestación Limoncocha (cortesía Petroamazonas)

Los principales elementos del sistema de transmisión son los conductores y los transformadores elevadores, en el presente estudio se analizará los transformadores elevadores, los conductores no tienen mayor incidencia en la calidad de energía eléctrica ya que se comportan como cargas lineales. La incidencia importante en los conductores se deriva específicamente al análisis de pérdidas de energía.

2.5.4. TRANSFORMADORES.

El otro elemento importante de análisis es el transformador. En la Estación Limoncocha se tiene ocho transformadores de los cuales seis están en normal funcionamiento, uno se encuentra fuera de línea para entrar a funcionar en caso de falla en algún otro transformador, esto le brinda mayor confiabilidad al sistema, y el otro es un elevador de voltaje utilizado en los generadores Jenbacher para acoplarles al switchgear que está a 4160 [V].

Los transformadores de la sub estación Limoncocha son utilizados para elevar el nivel de voltaje a 13 800 [V], valor al cual se realiza la distribución de energía eléctrica al resto de locaciones.

Todos los transformadores de la subestación Limoncocha son de ventilación ONAN, es decir que tanto el aire como el aceite circulan de manera natural y sin la necesidad de elementos mecánicos para refrigerar los elementos internos del transformador.

Es importante mencionar que además tiene 1 generador y 1 transformador de respaldo para el sistema en caso de falla o aumento de carga entren a funcionar, esto le brinda mayor confiabilidad y estabilidad al sistema.

La tabla 2.5 contiene los parámetros eléctricos de los transformadores de la estación Limoncocha.

Locación	Tag	Potencia [kVA]	Voltaje
Estación	XFML 01	3000	13.8 kV / 4.16 kV
Estación	XFML 02	3000	13.8 kV / 4.16 kV
Estación	XFML 03	1500	480 V / 4.16 kV
Estación	XFML 04	1500	480 V / 4.16 kV
Estación	XFML 05	3000	13.8 kV / 4.16 kV
Estación	XFML 06	3000	13.8 kV / 4.16 kV
Limoncocha 1	XFM 30	520	480 V/1.1-3.8 kV
Limoncocha 1	XFM 66	750	13.8 kV/480 V
Limoncocha 2	XFM 38	850	480/3.8 kV
Limoncocha 2	XFM 55	750	13.8 kV/480 V
Limoncocha 3	XFM 99	750	13.8 kV/480 V
Limoncocha 3	XFM 08	520	480 V/1.1-3.8 kV
Limoncocha 4	XFM SLB 18	850	480V/3.8 kV
Limoncocha 4	XFM SLB 01	850	13.8kV/480 V
Limoncocha 4	XFM SLB 20	850	480 V/3.8 kV
Limoncocha 4	XFM SLB 21	850	480 V/3.8 kV
Limoncocha 4	XFM SLB 32	600	480 V/3.8 kV
Limoncocha 4	XFM SLB 114	850	13.8kV/480 V
Limoncocha 4	XFM SLB 113	850	13.8kV/480 V
Limoncocha 4	XFM SLB112	850	13.8kV/480 V
Limoncocha 4	XFM SLB 122	850	13.8kV/480 V
Limoncocha 6	XFM 42	750	13.8 kV/480 V
Limoncocha 6	XFM 57	750	480 V/4.16 kV
Limoncocha 7	XFM SLB 79	600	13.8 kV/480 V
Limoncocha 7	XFM 82	850	480 V/4.16 kV
Limoncocha 8	XFM SLB 40	520	480 V/1.1-3.8 kV
Limoncocha 8	XFM SLB 03	700	480 V/1.1-4.16 kV
Limoncocha 8	XFM 58	750	480 V/4.16 kV
Limoncocha 8	XFM 32	750	480 V/4.16 kV
Limoncocha 8	XFM SLB 27	520	480 V/1.1-3.8 kV
Limoncocha 9	XFM 83	850	480 V/4.16 kV
Limoncocha 9	XFM 127	600	13.8 kV/480 V
Limoncocha 10	XFM 01	700	480 V/1.1-4.16 kV
Limoncocha 10	XFM 41	750	13.8 kV/480 V

Tabla 2.5. *Parámetros eléctricos de los transformadores en Limoncocha*

Las conexiones de los bobinados del transformador tienen un impacto significativo en el flujo de los armónicos triples generados por las cargas no lineales. Como se puede observar en la siguiente figura.

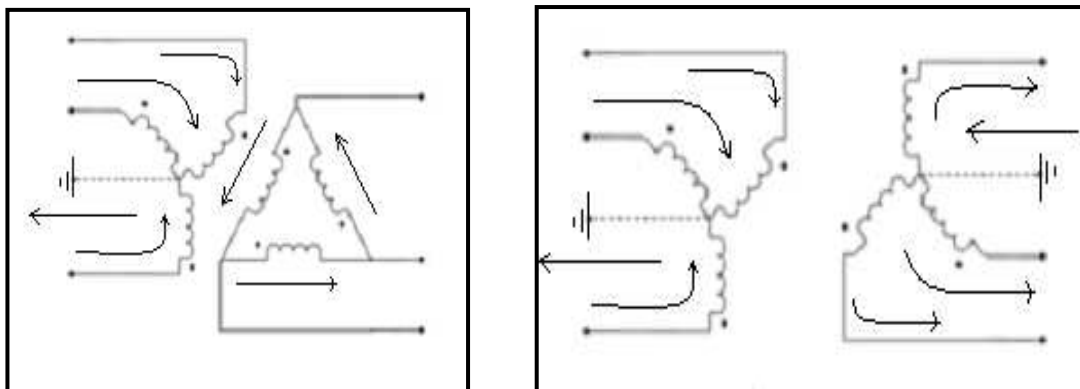


Figura 2.14 Flujo de corriente del tercer armónico en los transformadores.

Los transformadores se encuentran conectados en Dd0 y Ynd1, esta conexión ayuda al sistema cuando las corrientes están desbalanceadas ya que los armónicos de corrientes triples se comportan como corrientes de secuencia cero, la conexión delta provee amperios vuelta balanceados y así los armónicos pueden fluir pero quedan atrapados en la delta y no pueden reflejarse en las corrientes de línea en el otro lado de la delta.

Conexión Yd1.

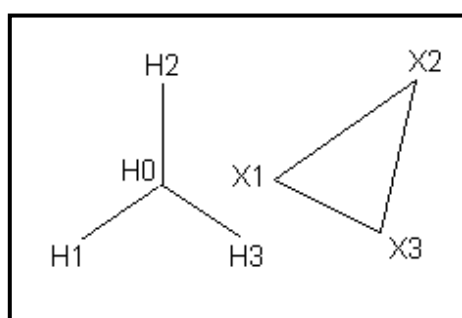


Figura 2.15 Diagrama de la conexión YD1.

2.5.5. VARIADORES DE VELOCIDAD (VSD).

Los variadores electrónicos varían directamente la velocidad del motor. Para variar la velocidad de un motor es necesario cambiar el número de polos del motor, modificar su deslizamiento o variando la frecuencia de alimentación.

Las bombas electro sumergibles utilizadas en Petroamazonas son motores trifásicos de inducción, y la velocidad de estos responde a la siguiente ecuación.

$$\eta_s = \frac{120 f}{\# p} \quad (2.10)$$

Donde:

η_s = Velocidad sincrónica

f = Frecuencia eléctrica (60 Hz)

p = Número de polos (2)

El cambio de número de polos está limitado por los escalones fijos de velocidad que se obtienen. El control del deslizamiento se puede realizar variando el voltaje de alimentación al motor o empleando un rotor de resistencia variable, siendo ambos sistemas ineficientes y de altos costos operativos ó de mantenimiento. El método más eficiente de controlar la velocidad de un motor eléctrico es por medio de un variador electrónico de frecuencia.

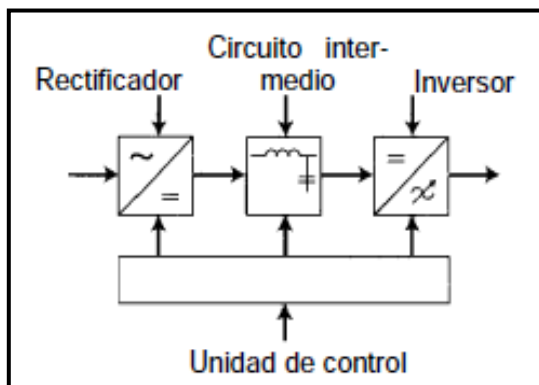


Figura 2.16 Diagrama de bloques de un variador de velocidad (VSD)

El variador de frecuencia regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando con ello modificar su velocidad. Sin embargo, se debe tener presente que el cambio de frecuencia debe estar acompañado por un cambio del voltaje aplicado al motor para no saturar el flujo magnético dentro del rotor.

La salida del rectificador es invertida para producir un voltaje de alterna de frecuencia variable para alimentar al motor. Los inversores utilizados son inversores de corriente y de voltaje. A partir de la variación de la frecuencia se varía la velocidad del motor, como se observa en la ecuación anterior.

El funcionamiento y los componentes principales de un VSD se los analizarán más adelante en la identificación de cargas no lineales.

La siguiente tabla indica los valores a los cuales están trabajando los VSDs durante el levantamiento de los equipos.

Locación	Tag	Voltaje [V]	Corriente [A]	Frecuencia [Hz]
Limoncocha 1	VSD SLB 69	434.8	80.8	61
Limoncocha 2	VSD 28	412.4	103.6	61
Limoncocha 3	VSD 27	350	83	45
Limoncocha 4	VSD SLB 21	429.6	66	62.5
Limoncocha 4	VSD SLB 20	429.2	89.4	68
Limoncocha 4	VSD SLB 24	432.8	75.3	62.5
Limoncocha 4	VSD SLB 25	417.2	83.1	57
Limoncocha 4	VSD SLB 44	444.8	82.4	57
Limoncocha 6	VSD SLB	422.4	27.7	52.5
Limoncocha 7	VSD	467	318.5	60
Limoncocha 8	VSD 28	279.4	402.6	60.1
Limoncocha 9	VSD 28	412.4	103.6	61
Limoncocha 10	VSD 37	366.8	64.8	47

Tabla 2.6. VSDs en las locaciones de Limoncocha.

2.6. EVOLUCIÓN DE LA CARGA.

La necesidad de mayor producción y mejorar los procedimientos día a día han hecho que Petroamazonas explore el terreno y perfore nuevos pozos petroleros.

La perforación y operación del pozo petrolero depende de varios elementos, entre ellos y uno de los más importantes es el variador de frecuencia o velocidad, muy necesario para controlar la bomba electrosumergible que extrae el petróleo de las profundidades de la tierra.

La carga ha ido evolucionando de acuerdo a la producción, ya que cada pozo necesita de una bomba electrosumergible y cada una de estas bombas necesita de un variador de frecuencia para controlar la velocidad.

En el capítulo 4 se especificarán y detallarán que los variadores de velocidad son las principales fuentes de armónicos ya que su característica y estructura electrónica la hacen una carga no lineal.

Todo este aumento de producción y por ende de carga no lineal hacen que cada vez más armónicos se sumen a la red provocando deformación de las ondas de voltaje y corriente pero sobre todo disturbios en equipos de control, monitoreo, comunicación y protección que necesitan de una óptima forma de onda para su buen funcionamiento.

Los variadores de frecuencia se caracterizan de acuerdo al número de pulsos que utilicen para la rectificación de la onda de voltaje, mientras más pulsos tenga será más eficiente y provocará menos armónicos y mientras menos pulsos tenga será menos eficiente y provocará más armónicos.

Actualmente en cada nuevo pozo que se perfore se desean instalar variadores de frecuencia de 12 pulsos, estos variadores de frecuencia tienen la principal característica de eliminar el 3er, 5to y 7mo armónico.

En la pasada década se llevó a cabo considerables procesos en la realización de convertidores de frecuencia para motores de inducción lo que significa que estas unidades son la elección preferida para las aplicaciones de variación de velocidad.

Las mejoras han sido posibles gracias al uso de semiconductores más potentes que pueden conmutar más rápido y abaratan los procesos para control.

Las principales ventajas de estas mejoras son:

- ❖ Reducir costos de generación y consumo.
- ❖ Mejorar el rendimiento, especialmente en control dinámico.
- ❖ Mejor forma de onda, reduciendo el ruido del motor y menores pérdidas.
- ❖ Gran flexibilidad en el control.
- ❖ Mejora en la etapa de entrada del convertidor, reduciéndose los armónicos de la línea, factor de potencia unitario, regeneración y filtrado.
- ❖ Mayor flexibilidad.

2.7. NORMAS REGULATORIAS.

La empresa Petroamazonas se maneja bajo las normas técnicas de la ANSI (American National Standards Institute) y la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la misma que utiliza el término "Power Quality" para referirse a un conjunto de límites eléctricos que permiten a un equipo funcionar adecuadamente sin pérdida significativa de su rendimiento o de su vida útil. Estos límites están relacionados con desviaciones de la tensión y/o de la corriente de la forma ideal (en un tiempo dado y ubicación en el sistema).

La norma IEEE 519 – 1992 [4] define las siguientes categorías de perturbaciones.

- ❖ Transitorios.
- ❖ Variaciones de tensión de corta duración.

- ❖ Variaciones de tensión de larga duración.
- ❖ Desbalance de tensión.
- ❖ Distorsión de forma de onda.
- ❖ Fluctuación de tensión.
- ❖ Variaciones de frecuencia.

Cada fenómeno perturbador es clasificado de acuerdo a los valores típicos de espectro, duración y magnitud de tensión.

2.7.1. CALIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la norma 519: IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas.

La norma IEEE-519-1992 describe las prácticas recomendadas y los requisitos para el control de armónicos en los sistemas de energía eléctrica. El alcance de la IEEE-519-1992 se establece claramente que la intención de establecer metas para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y cargas no lineales.

El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

A continuación se muestra la tabla de valores recomendados por la IEEE para los armónicos de voltaje entre 120 V y 69 000 V.

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

Tabla 2.7. Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal

Fuente: ANSI/IEEE Std 519-1992. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [4].*

Donde:

ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.

IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.

TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.

El segundo conjunto de criterios establecido por IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión del voltaje. Estos rigen la cantidad de distorsión aceptable en el voltaje que entrega la compañía de electricidad en el PCC de un consumidor.

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

Tabla 2.8. Límites de distorsión armónica de voltaje según IEEE 519.

Fuente: ANSI/IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [4].

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todos los voltajes armónicos (THD). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres clases de voltaje; hasta 69 kV, de 69 a 161 kV, y por encima de 161 kV. Se observa que los límites disminuyen cuando el voltaje aumenta, al igual que para los límites de corrientes.

IEEE – Standard -519-1992: “Especifica valores máximos del THD de corriente, este valor debe ser como máximo de 20% de la fundamental, para considerar afectado el sistema el número de datos que sobrepasan el valor máximo (20 %) deben superar el 5 % de las mediciones tomadas.” [13].

2.7.2. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Los sistemas de puesta a tierra (SPT) son uno de los sistemas más antiguos de protección eléctrica. Este consiste en conectar todas las partes metálicas de una instalación eléctrica (por ejemplo tableros, cajas, tomacorrientes, skids, etc.) a un conductor de protección de cobre electrolítico aislado de color verde, que recorre toda la instalación junto a los conductores de energía, siendo firmemente conectado a una toma de tierra que se hincará en la tierra.

Las recomendaciones realizadas por la IEEE en el artículo Std IEEE 142-1991 son las siguientes:

Lugar	Valor [Ω]
Para grandes sub estaciones, líneas de transmisión y estaciones de generación.	1
Para sub estaciones de plantas industriales, edificios y grandes instalaciones comerciales	1 – 5
Para un electrodo simple	25

Tabla 2.9. Valores de resistencia de puesta a tierra [21].

Fuente: *Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra.* MSc.

Miguel Martínez Lozano

3. CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

3.1.GENERALIDADES.

Existen varios parámetros que afectan los voltajes que se producen dentro y fuera de una subestación. Algunos de estos parámetros son: la corriente de falla, duración de la falla, resistividad del terreno, material de la gravilla y la configuración de la malla de puesta a tierra.

En sistemas de potencia, la puesta a tierra mantiene la referencia necesaria. La forma en que el sistema se conecta a tierra puede tener un grado de efecto en la magnitud de los voltajes de línea a tierra que deben ser mantenidos en condiciones normales. En sistemas no puestos a tierra, algunas tensiones pueden provocar fallas en el aislamiento de los equipos y sistemas. La puesta a tierra del neutro del sistema permite la operación de sistemas de protección basados en la detección de corrientes que circulan por la misma, despejándose de esta manera el circuito bajo falla.

Las puestas a tierra de los equipos se refieren a la conexión intencional de las carcasas, bastidores o estructuras metálicas no portadores o transmisores de corriente de los mismos, para lograr los siguientes propósitos:

- ❖ Mantener una diferencia de voltaje baja entre las diferentes estructuras metálicas con lo que se busca resguardar al personal de cualquier choque eléctrico. En el momento de una falla de un elemento energizado a un bastidor, por ejemplo, el voltaje de dicho bastidor tiende a igualarse al del conductor energizado, si el primero no está debidamente conectado a tierra; constituyendo un serio peligro para el personal del área. Por supuesto, esto debe combinarse con buenos relés de protección de falla a tierra.
- ❖ Contribuir a un mejor desempeño de los sistemas de protección.

- ❖ Evitar incendios provocados por materiales volátiles o la combustión de gases al proveer un camino efectivo y seguro para la circulación de corrientes de falla y descargas atmosféricas y estáticas, para eliminar los arcos y elevadas temperaturas en los equipos eléctricos, que pueden provocar tales incendios.
- ❖ Buen desempeño de equipos. En los sistemas una buena instalación a tierra no solo mantiene la seguridad del personal y provee un camino de baja impedancia para las corrientes de falla, sino que también mantiene el mismo nivel de potencial de tierra en todas las unidades del sistema, si estas están conectadas entre sí a tierra al mismo tiempo. Si se tienen varios sistemas de alimentación en ac, cada uno con su tierra separada se puede producir ruido en el sistema de tierra conectado a las computadoras. En este caso se utiliza una malla de referencia de señales para igualar el voltaje en un mayor rango de frecuencia. Las carcasas de las computadoras se conectarán a esta malla y a la barra de tierra del sistema.

Cuando se trata de instalaciones eléctricas para alimentar muchos aparatos eléctricos, fijos y móviles con estructuras susceptibles de deterioro desde el punto de vista eléctrico, es fundamental la protección contra fallas de aislamiento que originan la aparición de tensiones por contactos indirectos.

Las tensiones por contacto indirecto se originan en las estructuras metálicas de los equipos eléctricos, cuando un conductor o terminal energizado, ante la pérdida de aislamiento, establece como contacto con la estructura metálica energiza esta.

Para minimizar los efectos de dichos contactos indirectos, toda instalación eléctrica debe contar con un sistema de protección, el método más efectivo y el que presta mayor seguridad para las personas es el sistema de protección de puestas a tierra.

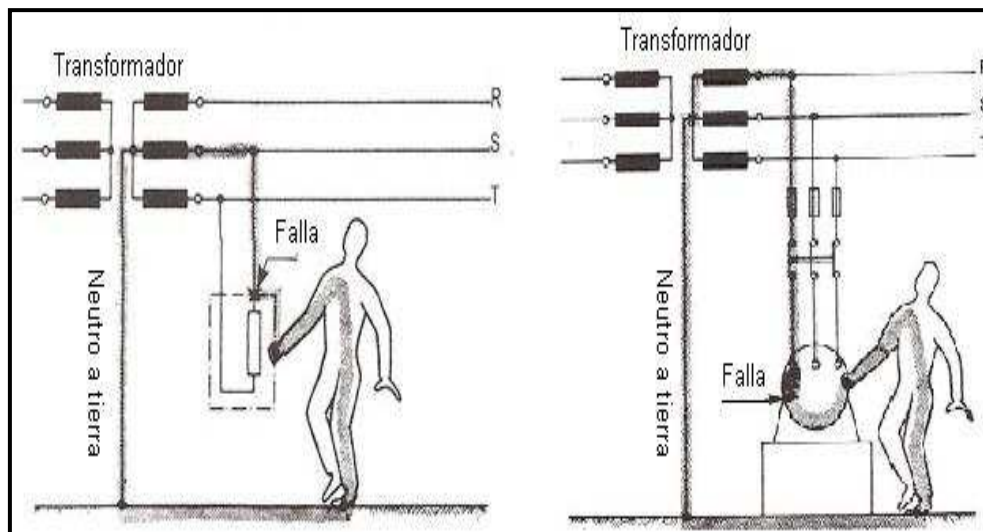


Figura 3.1 Contacto indirecto hombre-metal.

Los objetivos de instalar la puesta a tierra en equipos eléctricos, conductores, materiales y partes de equipos que transportan corrientes eléctricas indeseables son:

- ❖ Conducir a tierra todas las corrientes de fuga, producidas por una falla de aislamiento que haya energizado las carcasas de los equipos eléctricos.
- ❖ Evitar que en las carcasas metálicas de los equipos eléctricos aparezcan tensiones que resulten peligrosas para la vida humana.
- ❖ Permitir que la protección del circuito eléctrico (disyuntor termo magnético), despeje la falla, en un tiempo no superior a 5 segundos.
- ❖ Limitar sobre tensiones debidas a descargas atmosféricas y fenómenos transitorios.
- ❖ Limitar la diferencia de potencial a tierra en un circuito durante su operación normal.

Para lograr que una puesta a tierra de protección cumpla con los objetivos previstos, es necesario establecer un medio a través del cual sea posible entrar en contacto con el terreno.

De acuerdo con las dimensiones de terreno a utilizar para la ejecución de un Sistema de Puesta a Tierra, se usan los siguientes tipos de elementos para su construcción.

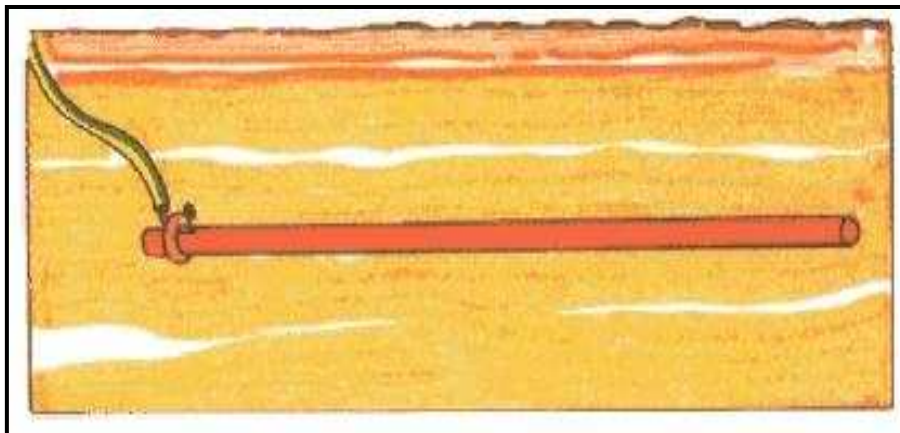


Figura 3.2 SPT con electrodos horizontales.

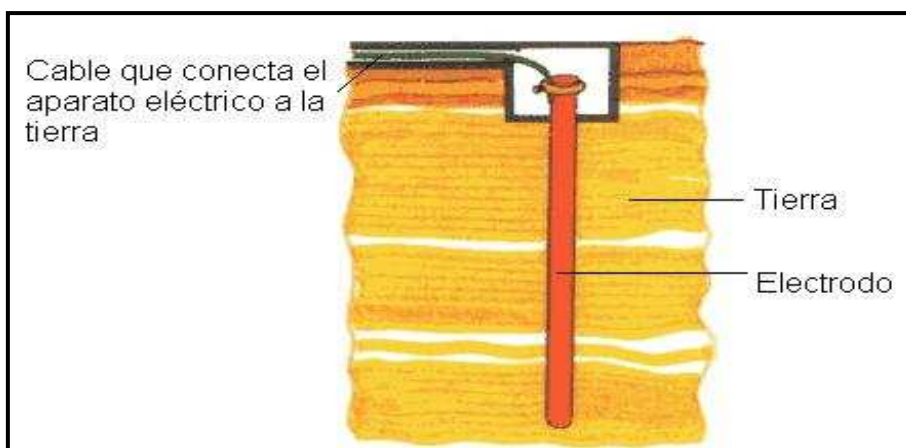


Figura 3.3. SPT con electrodos verticales.

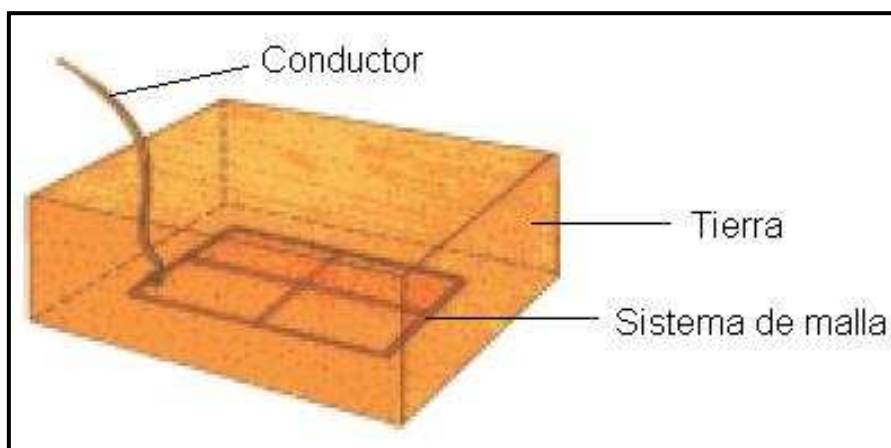


Figura 3.4 SPT con conductores en malla.

Para la toma de tierra se pueden utilizar los electrodos formados por:

- ❖ Barras o tubos.
- ❖ Pletinas, conductores desnudos.
- ❖ Placas
- ❖ Anillos o mallas metálicas constituidos por los elementos anteriores o combinaciones.
- ❖ Armaduras de hormigón enterradas, con excepción de las armaduras pretensadas.

El tipo de profundidad de enterramiento de de las tomas de tierra deben ser tales que la posible pérdida de humedad, la presencia de efectos climáticos no aumenten la resistencia de la toma a tierra por encima del valor previsto. La profundidad en ningún caso deberá ser inferior a 0.5 metros [19].

Los materiales utilizados y la realización de las tomas de tierra deben ser tales que no se vea afectada la resistencia mecánica y eléctrica por efecto de la corrosión de forma que comprometa las características de diseño de la instalación.

La sección de los conductores de tierra tiene que satisfacer las prescripciones del aparato, pero en cualquier situación la sección no deberá ser inferior a la mínima exigida para los conductores de protección.

Los conductores de protección sirven para unir eléctricamente las masas de una instalación a ciertos elementos con el fin de asegurar la protección contra contactos directos

Debido a que la resistividad del suelo varía notablemente por el tipo de suelo, así como también por las condiciones climáticas, el sistema de puesta a tierra debe ser diseñado para el peor caso posible.

3.1.1. CONTINUIDAD ELÉCTRICA DEL CIRCUITO DE TIERRA.

La continuidad eléctrica de los equipos debe asegurarse por alguno de los siguientes métodos:

- ❖ Punte de unión al conductor de tierra.
- ❖ Mediante conexiones roscadas en tubería rígida y eléctrica.
- ❖ Mediante conectores no roscados que se usan como accesorios de la tubería rígida y la eléctrica.

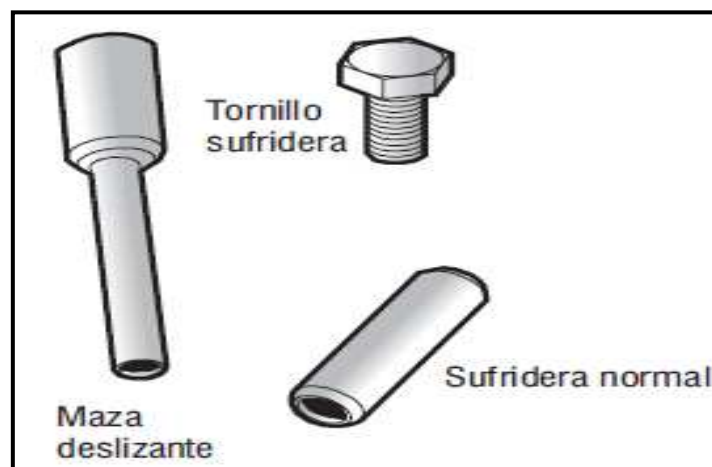


Figura 3.5 Conexión roscada y tubería rígida.

- ❖ Mediante puentes de unión a gabinetes.

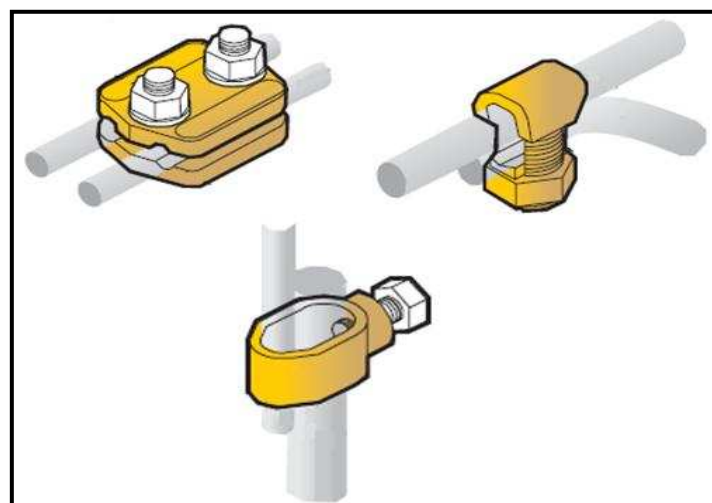


Figura 3.6 Conectores de varillas.

3.2.EFECTO EN LAS PERSONAS DE UN MAL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT).

Los efectos de un mal Sistema de Puesta a Tierra repercuten en el peligro de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano, estas corrientes dependen de lo siguiente:

- ❖ Magnitud de la corriente eléctrica en el cuerpo.
- ❖ Duración de la exposición.
- ❖ Resistencia eléctrica del cuerpo.

Con respecto a la resistencia eléctrica del cuerpo, esta puede variar según las condiciones físicas y psíquicas y del estado de su piel (seca o mojada.)

Estudios especializados estiman que la resistencia eléctrica del cuerpo humano con piel seca puede ser de 100.000 a 300.000 Ohm por cm^2 [18], pero la resistencia de la piel húmeda puede abatirse hasta el 1% de estos valores. Las corrientes más débiles que pueden producir inesperados e involuntarios accidentes, este tipo de corrientes se denominan corrientes de reacción.

Una de las formas de analizar la corriente eléctrica que circula por el cuerpo humano, está dada por la siguiente ecuación logarítmica inversa, según investigaciones del Dr. Charles Dalziel y que aparece en la norma IEEE-80 y que establece:

Para una persona de 50 kg de peso [18].

$$I = \frac{116}{\sqrt{t}} [mA] \quad (3.1)$$

Para una persona de 70 kg de peso expuesta un voltaje de 60 [Hz], [18].

$$I = \frac{154}{\sqrt{t}} [mA] \quad (3.2)$$

Donde:

t = Tiempo en segundos en que pasa la corriente eléctrica por el ser vivo.

Estas corrientes fueron obtenidas de experimentos con animales cuyo corazón es muy parecido al del hombre, de acuerdo a los estudios del Ing. Ramón Rivero De La Torre Instituto Tecnológico de Cd. Madero [18].

A continuación la figura 3.7 presenta valores en los cuales el cuerpo humano puede soportar las corrientes con riesgos de muerte y sin riesgos de muerte para personas de 50 kg, un aspecto importante es el tiempo.

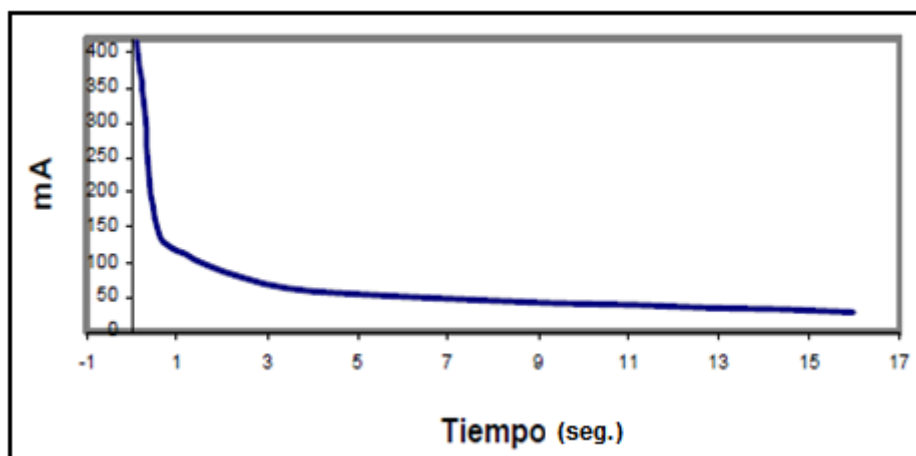


Figura 3.7 Valores de soporte de corriente del cuerpo humano [18].

Fuente: Rivero Ramón. La electricidad y el cuerpo humano.

Se observa que lo que produce daño son las altísimas corrientes (miles de amperes en tiempos pequeñísimos (microsegundos)), o bien, pequeñísimas corrientes (mili-amperes) en tiempos relativamente altos (segundos o minutos).

En la siguiente tabla se describe los efectos de las corrientes de reacción en el cuerpo humano.

Corriente eléctrica I [mA]	Efectos
Hasta 1	Imperceptible para el hombre.
2 a 3	Sensación de hormigueo.
3 a 10	La persona consigue generalmente desprenderse o liberarse del contacto, la corriente no es mortal.
10 a 50	La corriente no es mortal si se aplica durante intervalos decrecientes a medida que aumenta su intensidad. De lo contrario los músculos y la respiración se ven afectados por calambres que pueden provocar la muerte.
50 a 500	Corriente muy peligrosa en función del tiempo de contacto, causa fibrilación cardíaca (funcionamiento irregular con contracciones muy frecuentes a ineficaces) que llevan a la persona a la muerte.
Más de 500	Decrece la posibilidad de la fibrilación, pero aumenta el riesgo de muerte por parálisis de los centros nerviosos o causas de fenómenos secundarios.

Tabla 3.1 Efectos de la corriente en el cuerpo humano. [18]

3.3.MÉTODOS DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

La mayoría de sistemas de puesta a tierra emplean un aterrizaje del neutro en uno o más puntos. Estos métodos pueden ser divididos en dos categorías:

- ❖ Puesta a tierra sólida.
- ❖ Puesta a tierra con impedancia.

La puesta a tierra con impedancia a su vez puede ser dividida en las siguientes sub categorías:

- ❖ puesta a tierra con inductancias.
- ❖ puesta a tierra resistiva y

- ❖ neutralizador de falla a tierra.

3.3.1. ATERRIZAMIENTO POR MEDIO DE INDUCTANCIAS [19].

Se define como un sistema que esta aterrizado a través de inductancias en el neutro, transformadores a tierra u omitiendo conexiones a tierra en algunos de los transformadores de un sistema con múltiples tierras.

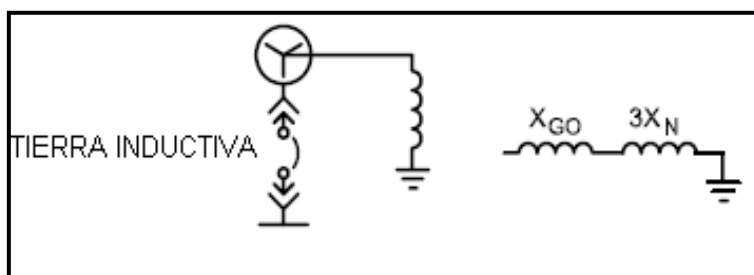


Figura 3.8 Aterrizaje por inductancias.

Cuando se utiliza este tipo de aterrizaje la reactancia de secuencia cero vista desde la falla es inductiva más que capacitiva, y la resistencia de secuencia cero es relativamente pequeña. Por consiguiente, las tensiones fase – tierra a frecuencia natural, no excederán las tensiones línea – línea durante la falla y las tensiones neutro – tierra no excederán a las tensiones línea – neutro.

3.3.2. PUESTA A TIERRA SÓLIDA [19].

Tierra sólida se refiere a la conexión de un conductor del sistema, normalmente conectado al neutro de un transformador, generador de energía, o simplemente de una conexión del transformador directamente a tierra, sin ningún tipo de impedancia de intervenir.

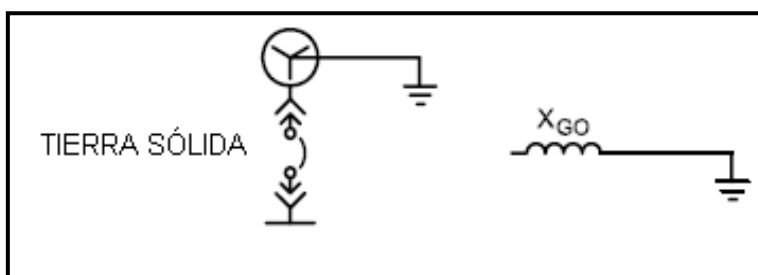


Figura 3.9 Tierra sólida.

Sin embargo, tanto la impedancia de la fuente y la impedancia no intencionales en la conexión a tierra debe ser considerado en la evaluación de la puesta a tierra.

3.3.3. ATERRIZAJE POR MEDIO DE RESISTENCIAS [19].

Este método se define como un sistema que está aterrizado en su mayoría por medio de resistencias.

Cuando un sistema de encuentra aterrizado por medio de resistencias, la reactancia de secuencia cero vista desde la falla puede ser inductiva o capacitiva, dependiendo del tamaño, número y localización de resistencias del neutro puestas a tierra, y de la capacitancia a tierra del sistema resultante.

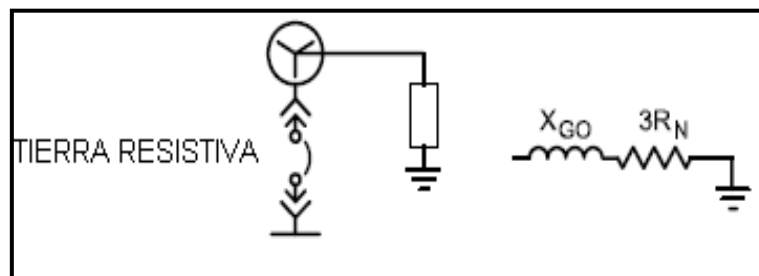


Figura 3.10 Aterrizaje con resistencias.

Si un sistema es aterrizado a través de una resistencia de bajo valor óhmico, las tensiones a la frecuencia se reducen significativamente al comienzo de una falla a tierra. Las tensiones de fase son esencialmente tensiones a frecuencia nominal (60 Hz). Estas tensiones son generalmente mayores a las tensiones a frecuencia nominal obtenidas en con valores similares de aterrizaje con reactancia inductiva.

3.3.4. NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA [19].

Un neutralizador de falla a tierra esta creado de tal manera que el reactor X_1 está especialmente seleccionado o sintonizado en resonancia con la capacitancia distribuida del sistema X_C de modo que la corriente de falla a tierra obtenga un camino de baja resistencia.

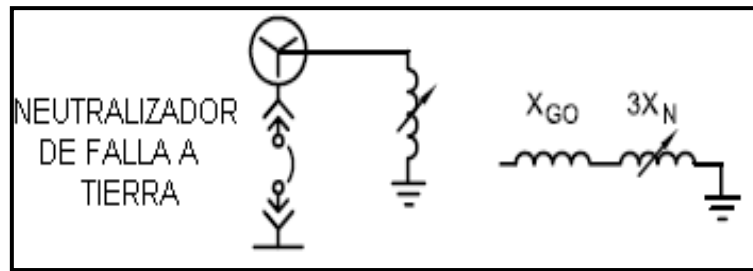


Figura 3.11 Neutralizador de falla a tierra.

La resultante de la corriente de falla a tierra está en fase con el voltaje línea a neutro, por lo tanto la corriente de secuencia cero y el voltaje de secuencia cero ocurren simultáneamente.

Donde:

X_{G0} = Reactancia de secuencia cero.

X_N = Reactancia de la puesta a tierra.

R_N = Resistencia de la puesta a tierra.

3.4.OBTENCIÓN DE DATOS.

Para la obtención de datos se ha basado en la metodología que impulsa a tener ciertos criterios de medición y colocación de la pinza de acuerdo a los equipos a medir, ya que no es lo mismo medir datos de transformadores colocados en postes o estructuras aéreas que transformadores colocados en la superficie.

En el presente estudio se hizo mediciones en equipos que están a la superficie del terreno ya que no existen equipos en instalaciones aéreas, y a continuación se detalla el método de este tipo de mediciones.

Primeramente se debe localizar y contar todos los electrodos de puesta a tierra (normalmente se tiene un solo electrodo simple). Si el electrodo está dentro del gabinete del equipo a medir, se sigue el montaje de la figura.

Si un electrodo simple se encuentra dentro del gabinete, la medida debe ser tomada en el conductor justo aguas arriba de la conexión con el electrodo.

A menudo puede encontrarse más de un conductor de conexión con el electrodo, haciendo un lazo con el gabinete del neutro. Luego de esto se debe encontrar un conductor que tenga un solo retorno con el neutro.

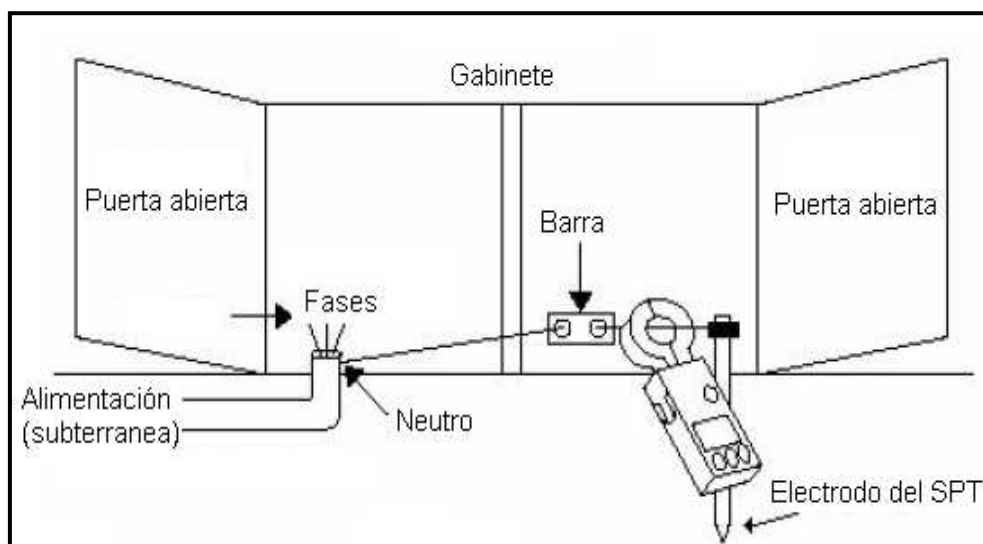


Figura 3.12 Medición interna de equipos de superficie [22].

Fuente: Manual de la pinza de medición de puestas a tierra AEMC 3731

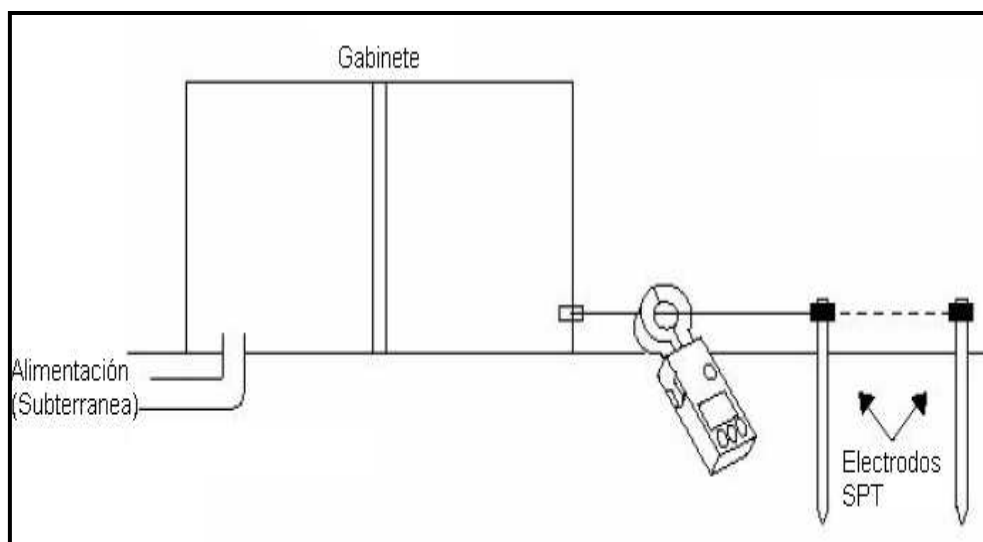


Figura 3.13 Medición externa de los equipos de superficie [22].

Fuente: Manual de la pinza de medición de puestas a tierra AEMC 3731

En muchos casos, la mejor medición se logra colocando la pinza en el propio electrodo de puesta a tierra, aguas abajo de la conexión de todos los cables que se conectan; de modo tal que solo se mida la resistencia del mismo.

3.4.1. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN [22].

Los probadores de resistencia de tierra de pinza son usados en sistemas de tomas de tierra múltiples sin desconectar la toma de tierra bajo prueba. Esta pinza se coloca alrededor del conductor de tierra o de la barra y mide la resistencia de toma de tierra y los enlaces.

Además la pinza AEMC 3731 incluye una función de medida de corriente. La alta sensibilidad del sensor permite medir la corriente de goteo circulando a una toma de tierra o circulando en bucles de tierra hasta 1 mA y corrientes neutras hasta 30 Arms. Esta opción proporciona información adicional, que se está transformando en vital a medida que las redes de toma de tierra de distribución transportan niveles de ruido más altos y armónicos que afectan la calidad de la alimentación.

La pinza AEMC utiliza el siguiente principio de funcionamiento, simulando en el siguiente circuito:

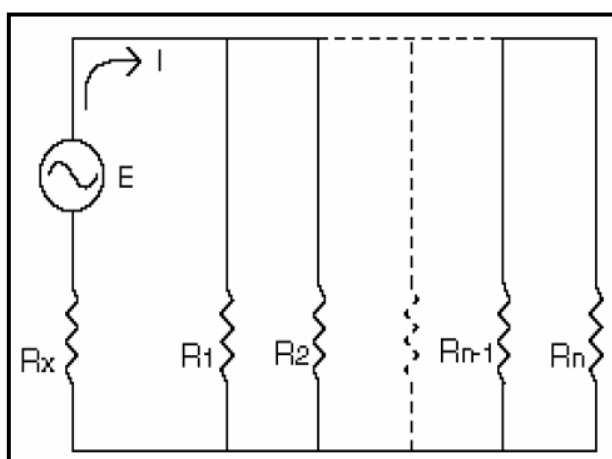


Figura 3.14 Circuito de operación del equipo de medición del SPT.

Circuito equivalente:

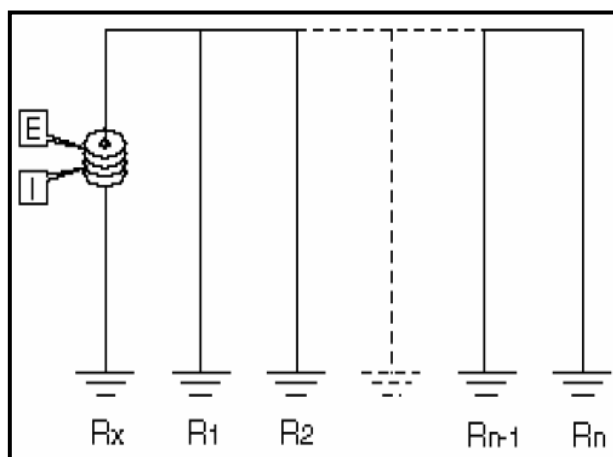


Figura 3.15 Circuito equivalente de operación del equipo de medición del SPT.

Donde:

R_x = Resistencia en el punto de medición.

R_1, R_2, \dots, R_n = Resistencias aledañas al punto de medición.

La relación entre el voltaje y la corriente es determinada por el instrumento y desplegada en forma digital. El método está basado en la suposición de que la impedancia del neutro del sistema multiaterrizado, excluyendo el electrodo bajo medida, es muy pequeña y puede ser asumida igual a cero.

- ❖ La aplicación es limitada a electrodos conectados a sistemas multiaterrizados de baja impedancia.
- ❖ Conexiones corroídas o partidas del neutro del sistema (o cable de guarda) pueden influenciar las lecturas.
- ❖ No es aplicable a sistemas de puesta a tierra aterrizados en múltiples puntos (torres de transmisión o mallas de subestaciones).
- ❖ Ruido de alta frecuencia en el sistema podría influenciar las lecturas.
- ❖ El cable de conexión con el electrodo abierto.

El anexo número 2 especifica valores técnicos en detalle.

3.5. ANÁLISIS DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA EN LAS LOCACIONES LIMONCOCHA.

Las Resistencias de Puesta a Tierra deben ser aptas para funcionar en las condiciones de servicio que se estipulan a continuación, tomando en cuenta los siguientes aspectos del ambiente.

La atmósfera tiene una salinidad particularmente agresiva y características de zonas costeras.

El contenido de humedad es elevado y pueden existir condiciones ambientales que provoquen condensación en superficies.

Los datos característicos serán los siguientes:

- ❖ temperatura máxima del aire 40°C
- ❖ temperatura media diaria. 27°C
- ❖ temperatura mínima: 23 °C
- ❖ humedad relativa ambiente máxima 80%
- ❖ altitud menor a: 1000 m

Lo que se pretende con un método de puesta a tierra es derivar toda corriente de fuga que pudiese ocurrir en los casos de accidentes por contactos directos e indirectos, y de esta forma hacer que la tensión de paso por las personas o animales no supere los 24 V, evitando el choque eléctrico, produciéndose el disparo de los fusibles de protección o los interruptores termo magnéticos y disyuntores diferenciales del tablero correspondiente.

Petroamazonas tiene establecida su propia metodología para la comprobación de sistemas de puesta a tierra, la misma que se detalla a continuación:

“Las tomas de la instalación serán siempre de tres patas y certificados.

El conductor de tierra deberá conectarse directamente en la pieza de trabajo con una abrazadera o terminal con perno, y la conexión deberá estar limpia y segura para eliminar chispas.

Los siguientes elementos no deberán ser usados como conductores a tierra:

- ❖ Tubería de trabajo con líquido o gas inflamable.
- ❖ Cadenas o cables de alambre.
- ❖ Andamios.

No anular la tercera pata de la toma de tierra, utilizando adaptadores, esto haría que ese artefacto quede sin protección a tierra corriendo el riesgo de electrocución.

Bajo cualquiera de las siguientes condiciones, las partes metálicas que no conduzcan electricidad y que estén expuestas y puedan quedar energizadas, serán puestas a tierra:

- ❖ Donde el equipo está localizado a una altura menor a 2.4 m y a 1.5 m horizontalmente de objetos aterrizados y al alcance de una persona que puede hacer contacto con alguna superficie u objeto aterrizado.
- ❖ Si el equipo está en un lugar húmedo y no está aislado, o está en contacto con partes metálicas.
- ❖ Si el equipo está en un lugar peligroso o, donde el equipo eléctrico es alimentado por cables con cubierta metálica.
- ❖ Si el equipo opera con alguna terminal a más de 150 V a tierra, excepto en:
- ❖ Cubiertas de Interruptores automáticos que no sean el interruptor principal y, que sean accesibles a personas calificadas únicamente.

- ❖ Estructuras metálicas de aparatos calentadores, exentos mediante permiso especial y si están permanente y efectivamente aisladas de tierra.
- ❖ Carcasas de transformadores y capacitores de distribución montados en postes de madera a una altura mayor de 2.4 m sobre nivel del piso.

Todas las partes metálicas no conductoras de corriente de las siguientes clases de equipos, no importando voltajes, deben ser puestas a tierra, observando que no obstante se corran cables en paralelo por diferentes canalizaciones, el calibre de todos los cables de puesta a tierra dependen únicamente de la protección.

- ❖ Carcasas de Motores, transformadores, paneles metálicos.
- ❖ Gabinetes de controles de motores, excepto los que van unidos a equipos portátiles no aterrizados.
- ❖ Equipos eléctricos de elevadores y grúas.
- ❖ Equipos eléctricos en talleres mecánicos automotrices, excepto luminarias colgantes en circuitos de no más de 150 V a tierra.
- ❖ Anuncios luminosos y equipos asociados.
- ❖ Generadores y motores eléctricos.
- ❖ Armazones de tableros de distribución y estructuras de soporte, exceptuando las estructuras de tableros de corriente directa aislados efectivamente.
- ❖ Bombas de agua, incluyendo las de motor sumergible.

Las siguientes partes metálicas de equipos no eléctricos deberán ser puestos a tierra:

- ❖ Estructuras y vías de grúas operadas eléctricamente.
- ❖ La estructura metálica de elevadores movidos no eléctricamente, a las que están sujetos conductores eléctricos.
- ❖ Estructuras metálicas de vehículos que cargan o descargan combustible.

Estructura metálica de “vacuums” (tanques succionadores) cuando cargan o descargan hidrocarburos.

- ❖ Cintas de aforo en tanques que contienen líquidos combustibles.
- ❖ Partes metálicas de subestaciones de voltajes de más de 1 kV entre conductores.
- ❖ Campers y contenedores.

Equipos conectados por extensión eléctrica:

- ❖ Exceptuando los aparatos que tienen doble aislamiento o conectados mediante un transformador de aislamiento con secundario a no más de 50 V, todas las partes metálicas que puedan llegar a estar energizadas de equipos conectados mediante extensión deben ser puestas a tierra en:
 - ❖ Áreas clasificadas.
 - ❖ Cuando operan esos equipos a más de 150 V a tierra.
 - ❖ Herramientas manuales eléctricas y lámparas portátiles de mano.
 - ❖ Los aparatos motorizados como: podadoras y limpiadoras de pisos.
 - ❖ Herramientas que se usen en ambientes húmedos o mojados o por personas que trabajan dentro de tanques metálicos.

También las estructuras metálicas, incluyendo postes de alumbrado, las canalizaciones metálicas, los marcos, tanques y soportes del equipo de líneas.

Se consideran aterrizados satisfactoriamente los equipos fijos, como cajas, gabinetes y conectores, cuando:

- ❖ Están metálicamente conectados a una pantalla aterrizada de un cable o, a un gabinete aterrizado.
- ❖ Están aterrizados mediante un cable desnudo o de color verde que está bien conectado a tierra.

El anexo número 2 indica algunas otras recomendaciones que tiene Petroamazonas para los SPT.

3.5.1. ESTACIÓN LIMONCOCHA.

3.5.1.1. Generadores.

Es importante que en lugar que se encuentran los generadores se tenga un buen sistema de puesta a tierras, ya que una pequeña chispa o recalentamiento del conductor podría desatar un incendio, tomando en cuenta que trabajan a gas.

Generador	Corriente P.T. (A)	Resistencia P.T. (Ω)
GG 2101 1G	0.89	1.3
GG 2101 2G	0.22	1.5
GG 2101 3G	0.29	1.8
GG 2101 4G	0.94	2.1
GG 2101 5G	0.27	1.5
GG 2101 6G	0.27	1.2
GG 2101 9G	0.35	1.2
GG 2101 10 G	0.06	2.3
Jenbacher	0.8	4.6
MG W16	0.4	2.8

Tabla 3.2 Estación Limoncocha, datos del SPT de los generadores.

3.5.1.2. Transformadores.

Los siguientes datos son de los transformadores ubicados dentro de la subestación y están conectados a la misma malla de de los generadores.

Transformador	Corriente P.T. (A)	Resistencia P.T. (Ω)
XFML 06	1.13	1.1
XFML 02	1.115	0.5
XFML 01	0.851	0.7
XFML 03	5.15	0.34
XFML 04	0.344	0.68
XFML 05	0.316	0.85
XFML 92	6.1	0.78
XFML 101	5.95	1.3
XFML 07	0.61	1.2

Tabla 3.3 Estación Limoncocha, datos del SPT de los transformadores.

3.5.2. LIMONCOCHA 1.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 30	0.371	2.27
XFM 66	0.151	2.5

Tabla 3.4 Limoncocha 1, datos del SPT de los transformadores.

3.5.3. LIMONCOCHA 2.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 38	0.06	1.37
XFM 55	0.16	1.38

Tabla 3.5 Limoncocha 2, datos del SPT de los transformadores.

3.5.4. LIMONCOCHA 3.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 99	0.306	1.6
XFM 08	0.9	2.26

Tabla 3.6 Limoncocha 3, datos del SPT de los transformadores.

3.5.5. LIMONCOCHA 4.

A diferencia de los pozos anteriores, Limoncocha 4 cuenta con varios pozos en la misma locación.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM SLB 18	0.538	1.1
XFM SLB 01	3.82	1.5
XFM SLB 20	2.74	2.6
XFM SLB 21	3.88	1.6
XFM SLB 32	0.411	1.6
XFM SLB 67	0.306	2.5
XFM SLB 121	0.448	1.8
XFM SLB 114	4.8	1.5
XFM SLB 113	4.46	2.2
XFM SLB112	2.88	1.5
XFM SLB 122	0.496	2.4

Tabla 3.7 Limoncocha4, datos del SPT de los transformadores.

3.5.6. LIMONCOCHA 6.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 42	0.42	2.4
XFM 57	1.88	6.1

Tabla 3.8 Limoncocha 6, datos del SPT de los transformadores.

3.5.7. LIMONCOCHA 7.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM SLB 79	0.175	2.5
XFM 82	0.456	1.75

Tabla 3.9 Limoncocha 7, datos del SPT de los transformadores.

3.5.8. LIMONCOCHA 8.

A diferencia de los pozos anteriores, Limoncocha 8 cuenta con varios pozos en la misma locación.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM SLB 40	0.433	0.95
XFM SLB 03	0.705	0.8
XFM 58	0.328	1
XFM 32	0.4	0.9
XFM SLB 27	0.356	0.9

Tabla 3.10 Limoncocha 8, datos del SPT de los transformadores.

3.5.9. LIMONCOCHA 9.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 83	0.879	1.5
XFM 127	0.878	1.5

Tabla 3.11 Limoncocha 9, datos del SPT de los transformadores.

3.5.10. LIMONCOCHA 10.

Tag	Corriente [A]	Resistencia [Ω]
XFM 01	0.112	3.4
XFM 41	0.659	2.8

Tabla 3.12 Limoncocha 10, datos del SPT de los transformadores.

4. CAPÍTULO 4

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE LA CALIDAD DE ENERGÍA.

Para la adquisición de datos se tomó en cuenta que la presente tesis está enfocada a corregir los disturbios a desde los generadores hacia el lado de los VSDs. Debido a que anteriormente se realizó un estudio similar pero enfocado a la carga, se denomina al presente como estudio complementario.

Las mediciones de las perturbaciones se las ha realizado en un rango de 1 a 24 horas en las condiciones en las que el sistema ha sido más vulnerable, es decir mientras un generador va a salir de línea para darle mantenimiento o mientras se aumenta o se disminuye carga, luego de esto el sistema es estable y no presenta mayores variaciones de potencia. Por esta razón se ha decidido establecer el mencionado tiempo de toma de datos, poniendo mayor énfasis y cuidado en los generadores que son el principal motivo de estudio.

El tiempo de medición está en función de la variación de la carga, como se mencionó en el capítulo 2 la generación de Limoncocha es independiente del SNI y la variación y conmutación de carga es muy baja, el sistema es estable y confiable, por lo que se estima que no es necesario prolongar los tiempos de medida de disturbios ya que estos permanecen constantes en la red.

La recomendación de la IEEE para los tiempos de toma de datos es que este tiempo dependerá de la vulnerabilidad y estabilidad del sistema eléctrico de potencia [4].

Para esto se ha tomado datos en los siguientes componentes de la red:

- ❖ Generadores.
- ❖ Switchgears.
- ❖ Transformadores elevadores de voltaje.

- ❖ Transformadores reductores de voltaje.
- ❖ Alimentación de los VSDs.
- ❖ Salida de los VSDs.

Debido a que el presente estudio busca controlar y verificar los disturbios aguas arriba del VSD (generadores, switchgears, transformadores y VSDs) se ha puesto mayor énfasis monitoreando estos equipos.

Para la adquisición de datos se ha tomado en cuenta las siguientes recomendaciones y parámetros:

- ❖ Medida de valores de tensión, basados en el valor eficaz de medio ciclo, indicando intervalos de sobretensión (“swell”), baja tensión (“dip”) e interrupción.
- ❖ Medida de la frecuencia, promediando cada 3 segundos.
- ❖ Medida de la corriente, voltaje y factor de potencia, promediando cada 3 segundos.
- ❖ Desfasamiento angular entre armónicos de corriente y voltaje.
- ❖ Medida de armónicos de tensión, según ANSI/IEEE 519.

4.1.PARÁMETROS DE MEDICIÓN.

En la recopilación de datos se debe tener en cuenta principalmente la seguridad de las personas que están interactuando en el sistema de la red de energía eléctrica, es por esto que las mediciones se las realizó bajo la supervisión de técnicos calificados y con mucha experiencia en el tema.

Otro parámetro importante de la recopilación de datos es la seguridad del equipo, se debe tomar en cuenta que no todos los equipos están protegidos del polvo, ruido, humedad, etc. En sí de factores ambientales que puedan modificar de

alguna manera los datos recopilados. Para esto se esperó las mejores condiciones del medio ambiente ya que la mayor parte de los equipos a monitorearse se encuentran a la intemperie.

Una vez que se ha cumplido con las anteriores disposiciones y previo a la correcta capacitación y familiarización con el equipo se procedió a reconocer cada uno de los parámetros eléctricos de los puntos a medir. Por ejemplo en la salida de generación se tiene niveles de voltaje de 4160 [V] y 460 [V], sabiendo que el voltaje máximo de medida del equipo HIOKI 3196 es 600 [V] se procedió a tomar medidas en los transformadores de corriente utilizados para los equipos de comunicación, control y protección, para proteger al equipo.

4.2.IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARGAS NO LINEALES.

Las principales fuentes de corriente armónicas en la actualidad son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase. Estos se pueden agrupar en las siguientes áreas:

- ❖ Grandes convertidores de potencia
- ❖ Convertidores de mediano tamaño
- ❖ Rectificadores de baja potencia de fuentes monofásicas

Existen también cargas tradicionales que son fuentes de armónicos como motores, ups, transformadores, etc. que por naturaleza contribuyen a la presencia de armónicos, siendo estas cargas en comparación con las anteriores de menor magnitud de aporte.

En Petroamazonas la principal carga no lineal son los VSDs de 6 y de 12 pulsos, los cargadores de baterías, controladores de motores de c.a., iluminación fluorescente, reguladores de voltaje, entre otras que se detallan a continuación.

4.2.1. CONTROLADORES DE MOTORES DE C.A.

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 c.a. 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.

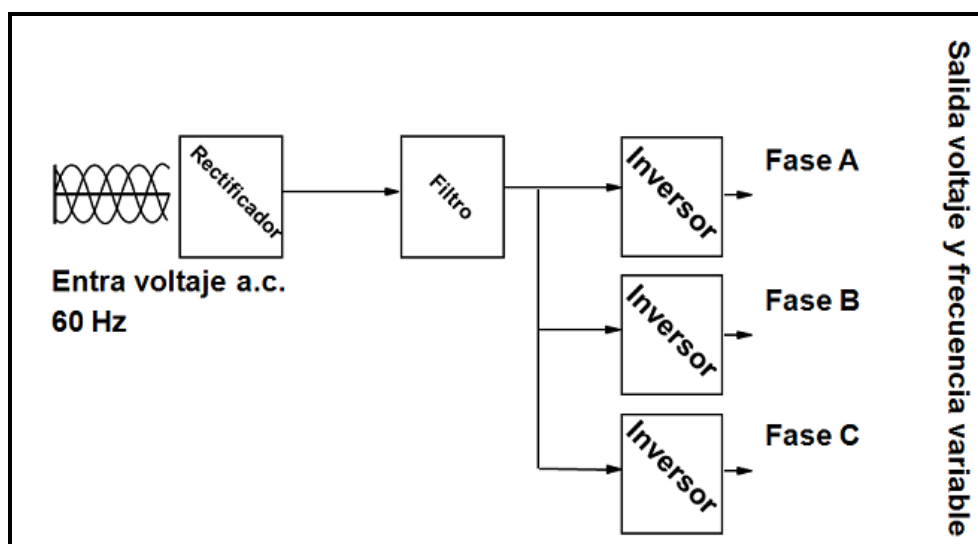


Figura 4.1 Diagrama de bloques de un controlador de motores c.a.

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 y frecuencia ajustables”.

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.

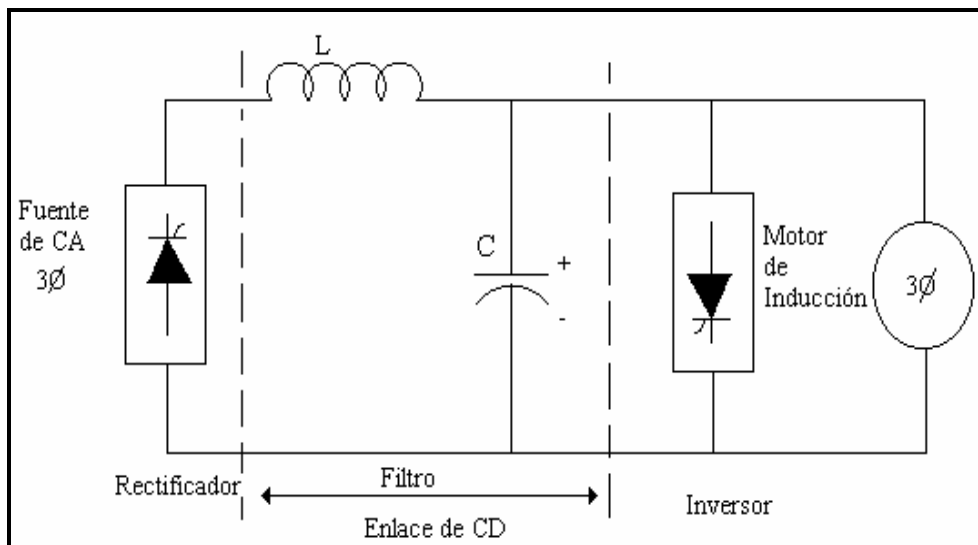


Figura 4.2 Esquema del controlador trifásico de voltaje y frecuencia ajustables.

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.

4.2.1.1. Variador de velocidad de 6 Pulsos.

Un variador de velocidad de 6 pulsos es aquel que rectifica la onda de voltaje continuo a voltaje alterno en forma de 6 pulsos, tal como lo muestra la figura 4.5

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.

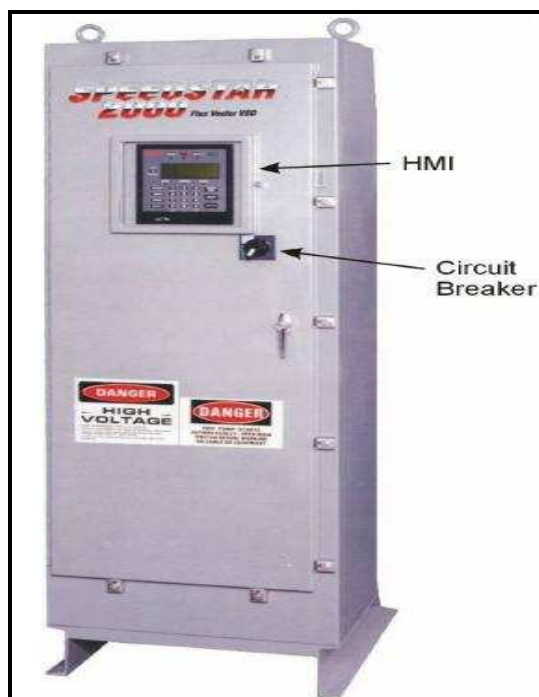


Figura 4.3 VSD de 6 pulsos (Cortesía de Schlumberger). [6]

En la figura 4.4 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 es incluido en el enlace de c.d. 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.

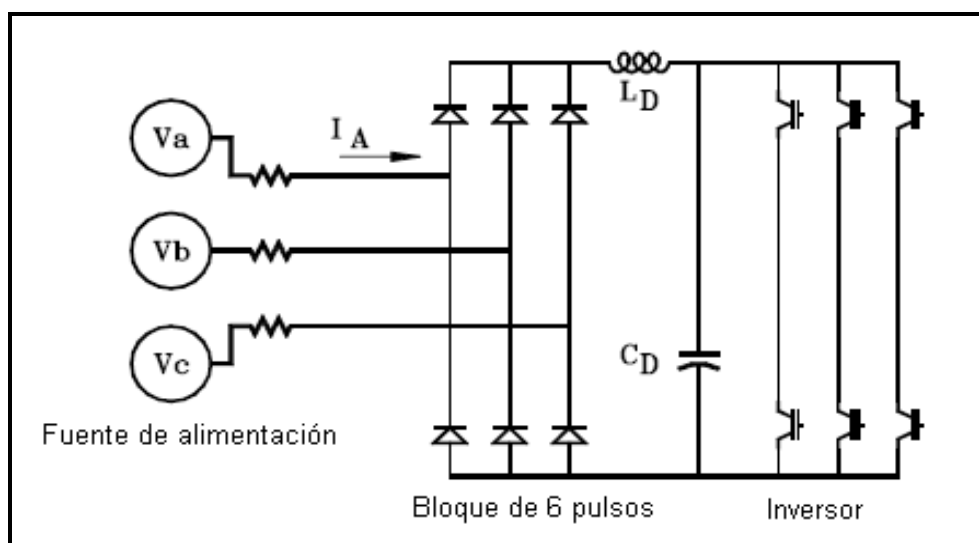


Figura 4.4 Esquema de VSD de 6 pulsos

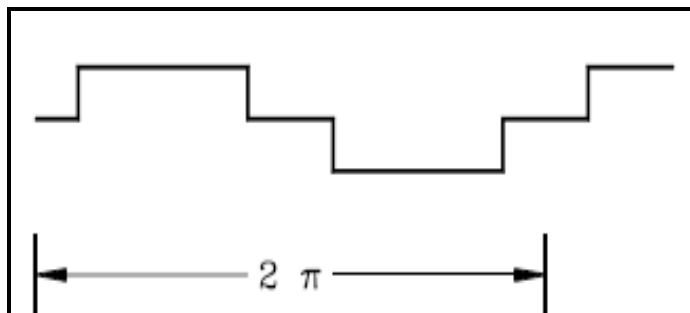


Figura 4.5 Forma de onda modulada de 6 pulsos.

4.2.1.2. Variador de velocidad de 12 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° entre ellos.

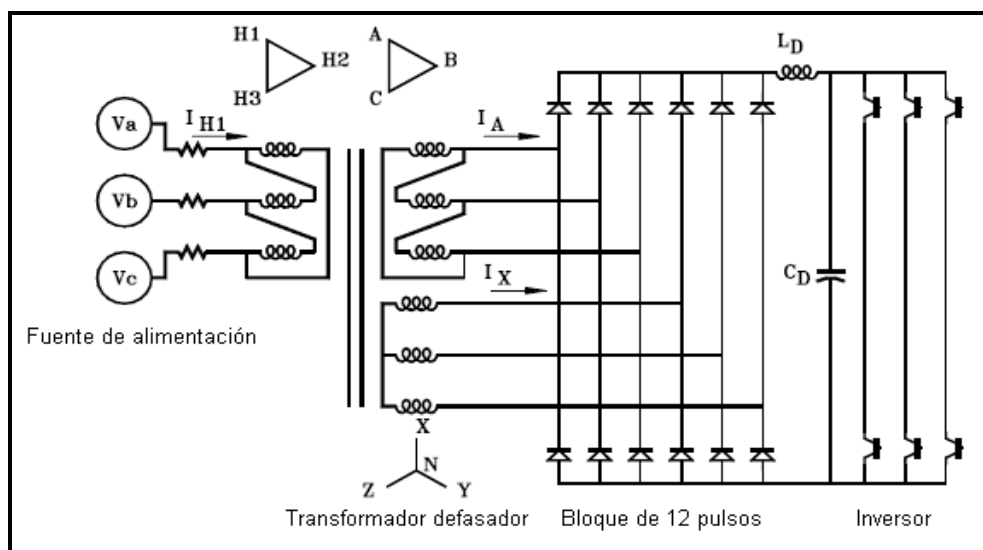


Figura 4.6 Esquema de un VSD de 12 pulsos[6]

Fuente: Schlumberger, VSD de 12 pulsos.

La rectificación de la forma de onda en los VSDs de 12 pulsos es mejor que en los de 6 pulsos, esto hace que este tipo de variadores provoquen menos armónicos, al ser de mayor eficiencia su costo es mayor que un variador de 6 pulsos.

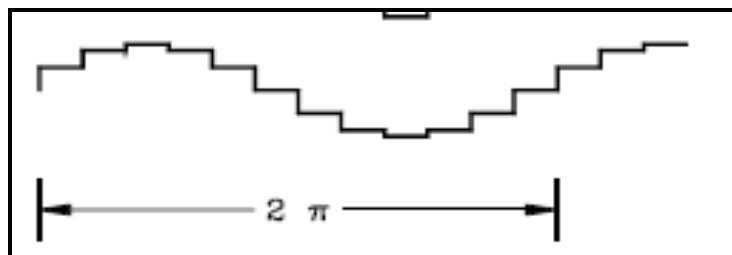


Figura 4.7 Forma de onda de característica de un VSD de 12 pulsos.

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 transformadores convertidores pero no penetran la red de c.a.



Figura 4.8 VSD de 12 pulsos de 910 kVA (Cortesía de Schlumberger).

Otra observación importante al hacer un análisis de Fourier en estos convertidores es que la inclusión de la impedancia del sistema reduce el contenido armónico de la forma de onda de la corriente, siendo el efecto mucho más pronunciado en el caso de una rectificación sin control. Con ángulos de disparo grandes, los pulsos de corriente prácticamente no se ven afectados por la reactancia del sistema de c.a.

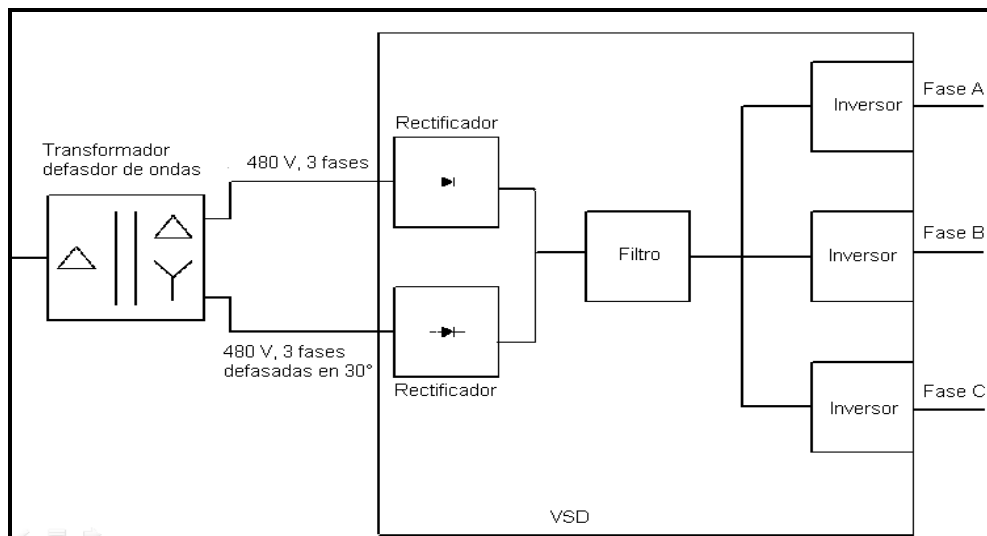


Figura 4.9 Diagrama de bloques de un VSD de 12 pulsos. [6]

Fuente: Schlumberger, VSD de 12 pulsos.

La descomposición armónica de corriente mediante series de Fourier para el convertidor # 1 y el convertidor # 2 del VSD de 12 pulsos, se describe en las ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente, como:

$$I_A = \frac{2\sqrt{3}}{2N\pi} I_D \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \right. \\ \left. 113\cos 13\omega t \dots \right) \quad (4.1)$$

y

$$I_X = \frac{2\sqrt{3}}{2N\pi} I_D \left(\cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \right. \\ \left. 113\cos 13\omega t \dots \right) \quad (4.2)$$

Donde:

I_A : Corriente armónica en el convertidor # 1 de 6 pulsos. [A]

I_X : Corriente armónica en el convertidor # 2 de 6 pulsos. [A]

I_D : Corriente circulante por el bus de DC del VSD. [A]

N: Relación de transformación.

4.2.2. CARGADORES DE BATERÍA.

La necesidad de dar mayor confiabilidad y seguridad al sistema eléctrico hace necesario la presencia de baterías con sus respectivos cargadores para la operación de relés, PLCs, y otros dispositivos electrónicos de control, protección y comunicación.

Las armónicas individuales que generan el circuito en un cargador de baterías dependen del voltaje inicial en la misma y el contenido armónico global varía de acuerdo al tiempo e involucra probabilidad aleatoria.

Así como en televisores, radios, estéreos y otros artículos que emplean corriente directa, los cargadores de baterías producen corrientes de secuencia cero de armónicas triples, las cuales sobrecargan al circuito neutro. Para empeorar las cosas, la luz fluorescente también produce armónicas triples con la misma relación de fase. Más aún, el ángulo de fase de la tercera armónica no varía lo suficiente como para sumar cancelación de armónicas al operar varios cargadores de baterías, de tal manera que las terceras armónicas se suman casi algebraicamente.

4.2.3. FUENTES DE PODER EN MODO DE CONMUTACIÓN.

La mayoría de los equipos electrónicos tales como computadores personales, máquinas copadoras y fax, cuentan con una fuente regulada por conmutación (switch-mode power supply).

Estas fuentes demandan corriente en un pulso corto de cada medio ciclo. Cuando el voltaje se encuentra cerca de su valor máximo. La corriente demandada por estas fuentes tiene alta la distorsión armónica total y un alto contenido de tercera armónica. La figura 4.10 muestra las formas de onda de corriente de una fuente en modo de conmutación empleada en computadoras, así como su espectro típico.

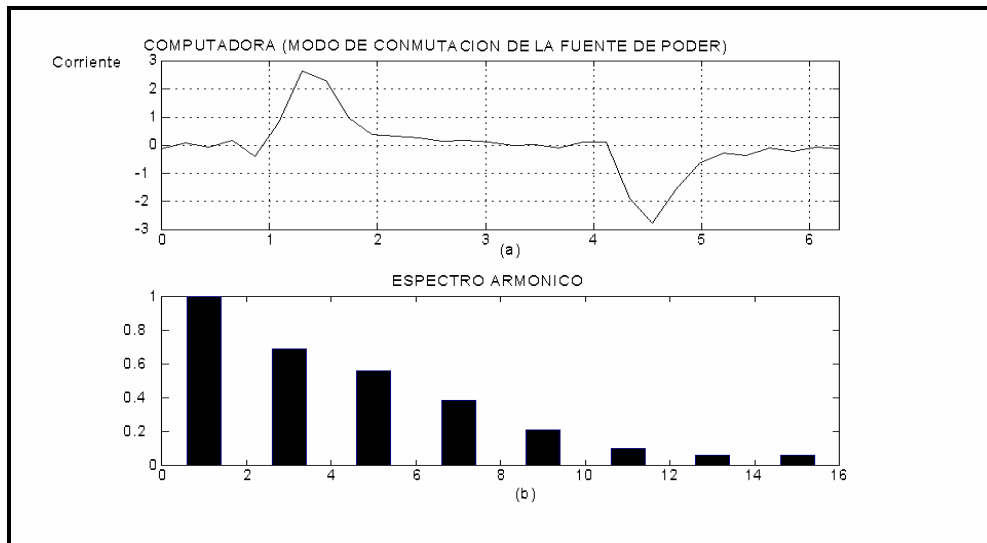


Figura 4.10 Fuente de poder de computadora, a) Corriente, b) Espectro armónico
[15]

Fuente: www.deltax.cl/PDF/FUENTES-DE-ARMONICAS.pdf

El espectro típico de frecuencias de las fuentes en modo de conmutación se muestra en la tabla 4.1

Orden del armónico	Secuencia	Valor en p.u.
1	+	1.0
3	0	0.810
5	-	0.606
7	+	0.370
9	0	0.157
11	-	0.024
13	+	0.063
15	0	0.079

Tabla 4.1 Armónicos comunes de fuentes conmutadas [15].

Fuente: www.deltax.cl/PDF/FUENTES-DE-ARMONICAS.pdf

Las armónicas con secuencia (+) tienen la misma rotación de fases que el voltaje trifásico aplicado. Aquellas con secuencia negativa (-) tienen rotación de fases opuestas, mientras que las de secuencia cero (0) son llamadas armónicas triples. Si se conectan cargas idénticas en cada fase se tiene un sistema balanceado, y

en ausencia de componentes de secuencia cero se logra cero corriente en el hilo neutro. Sin embargo, las componentes de secuencia cero de cargas idénticas con voltajes balanceados tienen la misma magnitud y ángulo de fase, de tal manera que se suman en el hilo neutro y se producen componentes de secuencia cero iguales al triple de las componentes de cada fase.

4.3.FUENTES TRADICIONALES DE ARMÓNICOS.

Existe un gran número de dispositivos que distorsionan el estado ideal de las redes eléctricas. Algunos de ellos han existido desde la formación de los sistemas de potencia, y otros son producto de la aplicación de dispositivos de electrónica de potencia utilizados para el control moderno de las redes eléctricas. Como ejemplo se puede mencionar el convertidor de línea. Este dispositivo se utiliza tanto como rectificador (ac - dc) como inversor (dc - ac) y en aplicaciones de alta y baja potencia. Otra fuente principal de armónicas, particularmente en áreas metropolitanas, es la iluminación a base de gas (fluorescente, arco de mercurio, sodio de alta presión, etc.).

Las fuentes de armónicas las podemos clasificar en:

- ❖ Fuentes tradicionales
- ❖ Nuevas fuentes de armónicas
- ❖ Futuras fuentes armónicas

Antes del desarrollo de los convertidores estáticos, la distribución armónica se asociaba con el diseño y la operación de máquinas eléctricas y transformadores. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días. De hecho la principal fuente de armónicas en esos días era la corriente de magnetización de los transformadores de potencia.

Los transformadores y máquinas rotatorias modernas bajo operación en estado estable no ocasionan por sí mismas distorsión significativa en la red. Sin embargo, durante disturbios transitorios y cuando operan en rangos fuera de su estado normal, entonces pueden incrementar su contenido en forma considerable.

Otras dos cargas lineales que conviene considerar debido a su contribución armónica son los hornos de arco y la luz fluorescente.

4.3.1. TRANSFORMADORES.

En un núcleo ideal sin pérdidas por histéresis, el flujo magnético y la corriente de magnetización necesaria para producirlo están relacionados entre sí mediante la curva de magnetización del acero utilizado en las laminaciones. Aún en estas condiciones, si se grafica la corriente de magnetización vs el tiempo para cada valor de flujo, la forma de onda dista mucho de ser senoidal.

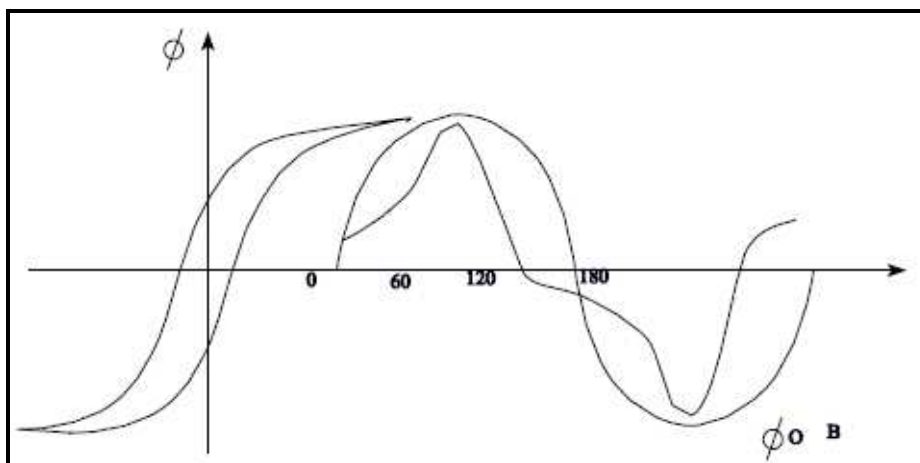


Figura 4.11 Formas de onda de magnetización, flujo y corrientes de un transformador.

Fuente: Schlumberger, VSD de 12 pulsos.

Cuando se incluye el efecto de histéresis, esta corriente magnetizante no senoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo. La distorsión que se observa se debe a las armónicas triples (3a., 9a., 12a., etc.), pero principalmente a la 3a. Por lo que para mantener una alimentación de voltaje necesario proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples, lo que generalmente se logra con el uso de devanados conectados en delta.

Las armónicas debidas a la corriente de magnetización se elevan a sus niveles máximos cuando el sistema tiene muy poca carga y el nivel de tensión es alto.

Al desenergizar un transformador, es posible que tenga flujo magnético residual en el núcleo. Cuando se reenergiza la unidad, la densidad de flujo puede alcanzar niveles de pico de hasta tres veces el flujo de operación normal.

Esto puede llevar al núcleo del transformador a niveles extremos de saturación y producir amperes-vuelta excesivos en el núcleo. Este efecto da lugar a corrientes de magnetización de 5 a 10 p.u. de la corriente nominal.

4.3.2. MÁQUINAS ROTATIVAS.

Si tomamos el devanado trifásico de una máquina rotatoria suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, en un análisis de Fourier de la distribución de las fuerzas magneto motrices (f.m.m.'s) se observa que la f.m.m. fundamental es una onda viajera moviéndose en la dirección positiva, las armónicas triples están ausentes; y la quinta armónica es una onda viajera en la dirección negativa, la 7a. armónica viaja en la dirección positiva, etc.

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m. se producen armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estas armónicas inducen una f.e.m. (fuerza electromotriz) en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

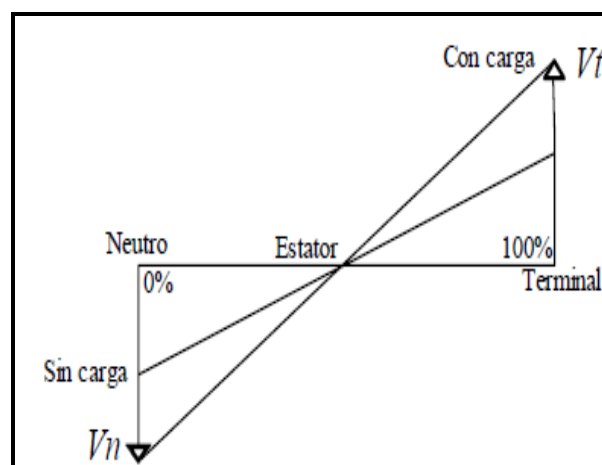


Figura 4.12 Tensión de tercer armónico en el estator de un generador, ante circunstancias normales de operación [13].

La tensión generada por la máquina, medida en los terminales del estator, contiene componentes armónicas, debido a que las bobinas no están exactamente distribuidas en el estator. Entre los armónicos existentes solo se encuentran los de tercer orden debido a la simetría del semiciclo positivo y negativo de la onda.

4.3.3. ILUMINACIÓN FLUORESCENTE.

Los tubos de la luz fluorescente son altamente no lineales y dan lugar a corrientes armónicas impares de magnitud importante. En una carga trifásica de 4 hilos, las armónicas triples básicamente se suman en el neutro, siendo al 3a. la más dominante, en la figura se muestra el espectro típico de una lámpara fluorescente con balastro magnético.

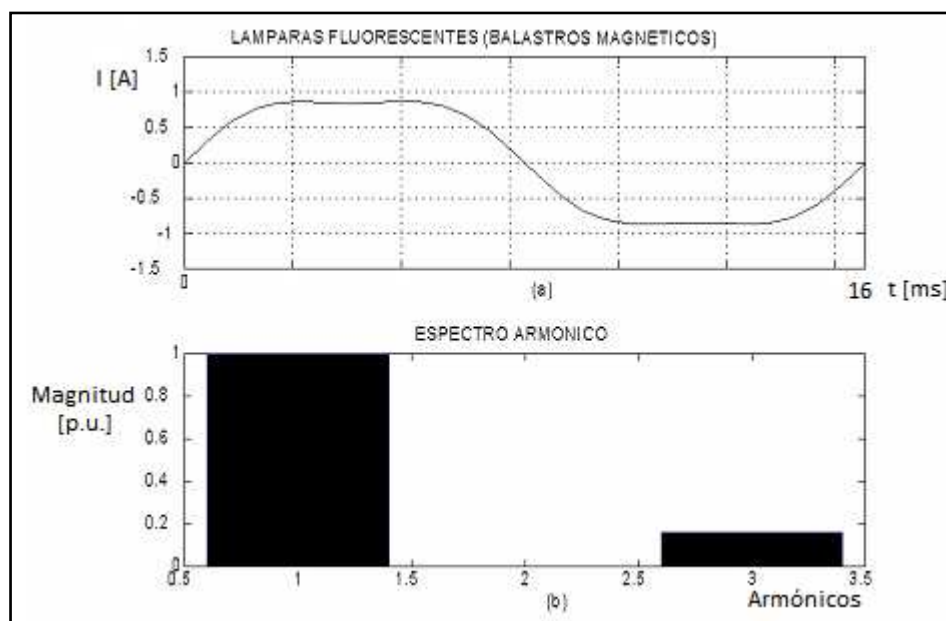


Figura 4.13 Lámpara fluorescente, a) Forma de onda típica, b) Espectro armónico [15].

Fuente: www.deltax.cl/PDF/FUENTES-DE-ARMONICAS.pdf

4.4.EQUIPO DE MEDICIÓN.

4.4.1. ANALIZADOR DE ENERGÍA HIOKI 3196.

El Hioki 3196 es un equipo diseñado específicamente para la medición de calidad de energía eléctrica y las perturbaciones que en ella podrían existir. De igual manera la marca Hioki es reconocida a nivel mundial por este y otros equipos de similares características. Razón por la cual el equipo utilizado es muy confiable en la adquisición y procesamiento de datos.



Figura 4.14 Analizador de energía Hioki 3196.

Este equipo cuenta con 12 canales de entrada, los cuales se especifican a continuación:

- ❖ 4 canales de voltaje (canal 1, canal 2, canal 3, canal 4 para voltaje AC) cada uno de estos con su respectiva conexión a neutro, en total 8 canales.
- ❖ 4 canales de corriente.

El Hioki cuenta con una pantalla que visualiza las conexiones realizadas, formas de onda, configuración del equipo, parámetros de medición, espectros, etc.

Entre las principales características del equipo se puede decir que tiene la capacidad de medir perturbaciones eléctricas como armónicos (hasta el 50avo), interarmónicos, flicker, variaciones de corta y larga duración de voltaje, corriente, frecuencia, potencia, factor de potencia por cada fase y valores promedios, interrupciones instantáneas, etc. Se puede realizar mediciones en sistemas de una, dos y tres fase con neutro.

El equipo cuenta con su propio software para análisis más estrictos con la ayuda de una PC, en el mismo se puede calcular demandas, valores de THD de voltaje y corriente, y visualizar de mejor manera las formas de onda así como también todos los parámetros eléctricos del sistema.

Estas y otras especificaciones técnicas se detallan en el anexo número 3.

4.5.ANALISIS DE DATOS.

Se analizará detalladamente los valores tomados en los equipos ubicados antes del VSD, puesto que el objetivo de la presente tesis es controlar los disturbios desde los generadores hacia el VSD. Otra razón para profundizar en los equipos antes del VSD es que la parte del sistema que está luego de los VSDs está bajo la responsabilidad de la empresa Schlumberger y ellos toman sus propias acciones para controlar los disturbios eléctricos. También se ha tomado datos en los equipos a la salida del VSD y se presentará un resumen de estos en el anexo 8.

4.5.1. ESTACIÓN LIMONCOCHA.

Para la estación Limoncocha se ha tomado medición únicamente en uno de los generadores, ya que los demás se encuentran en paralelo y los disturbios que afecten a uno de ellos serán los mismos para los demás.

4.5.2. SWITCH GEAR A.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin	Fecha
11:05	2009/08/14	11:00	2009/08/15

4.5.1.1. Forma de onda y de voltaje y corriente.

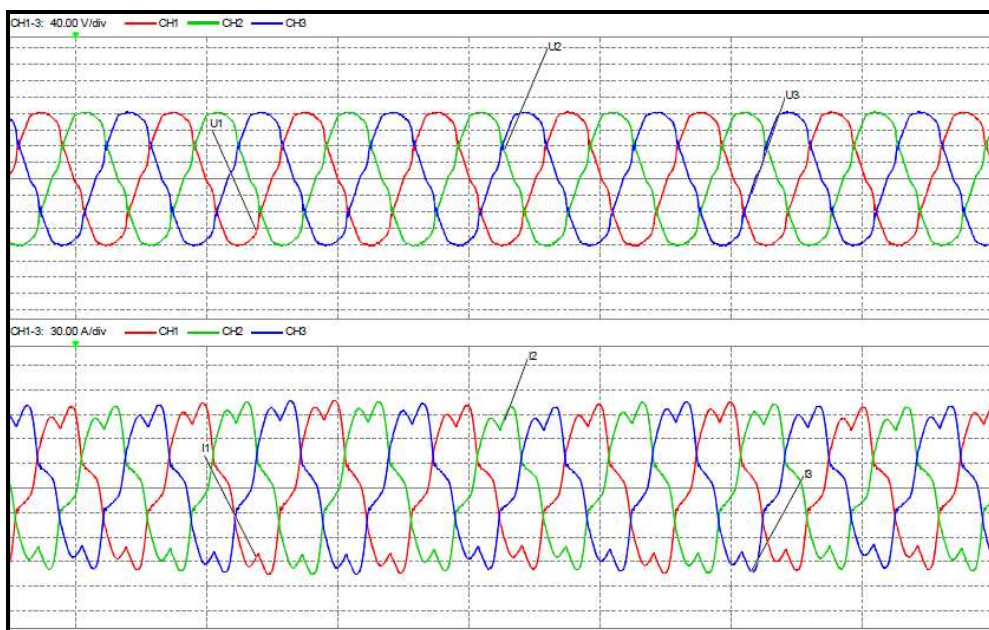


Figura 4.15 Switchgear A, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.1.2. Variación del voltaje.

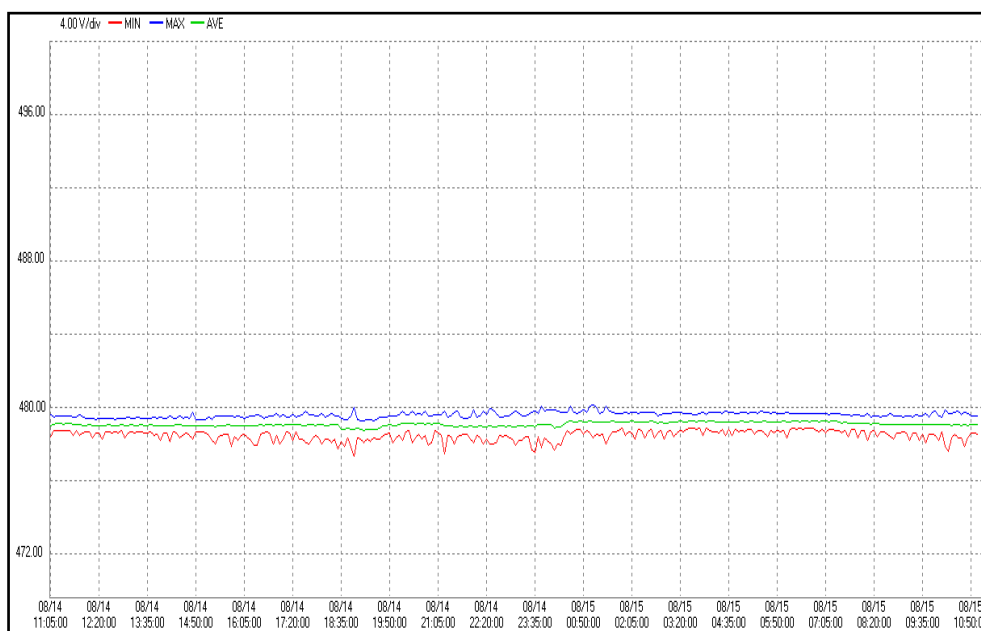


Figura 4.16 Switchgear A, variación de voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	478.8	480.1	2009/08/14
CH 2	479.0	480.0	2009/08/14
CH 3	478.9	480.1	2009/08/14

4.5.1.3. Variación de la corriente.

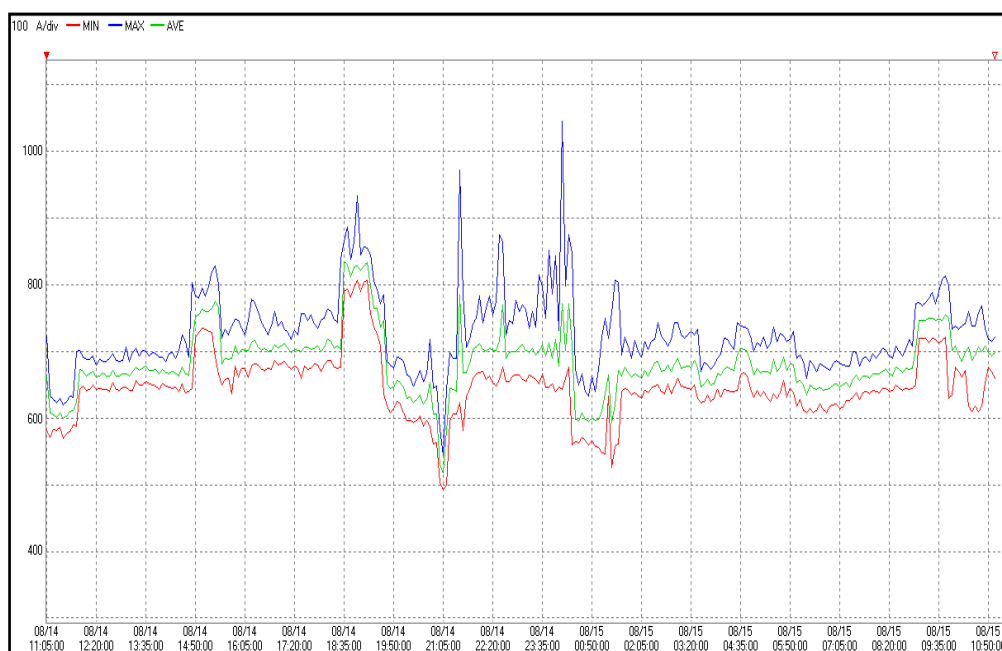


Figura 4.17 Switchgear A, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	493.4	1045.6	2009/08/14
CH 2	491.5	1044.5	2009/08/14
CH 3	496.8	1045.2	2009/08/14

4.5.1.4. Variación de la frecuencia.

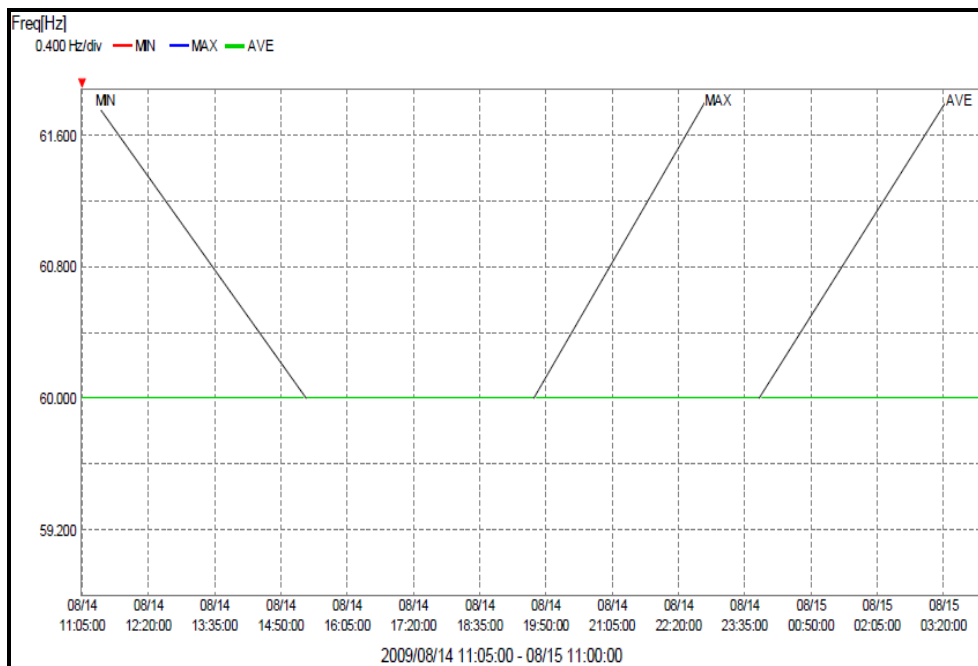


Figura 4.18 Switchgear A, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	60.002	60.002	2009/08/15

4.5.1.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	5.74 %	16.46 %	5 ta
2	5.72 %	16.45 %	5 ta
3	5.63 %	16.57 %	5 ta

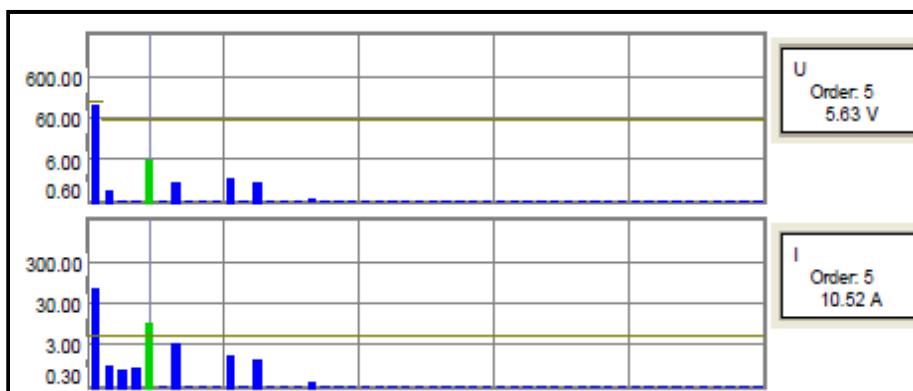


Figura 4.19 Switchgear A, espectro armónico.

4.5.3. SWITCH GEAR B.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin	Fecha
11:05	2009/08/14	11:00	2009/08/15

4.5.3.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

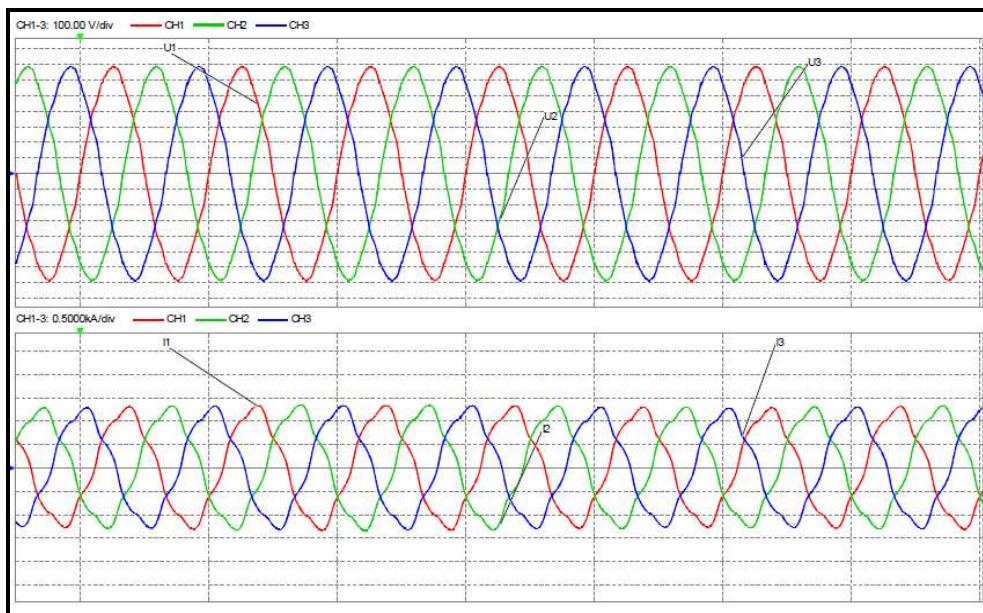


Figura 4.20 Switchgear B, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.3.2. Variación del voltaje.

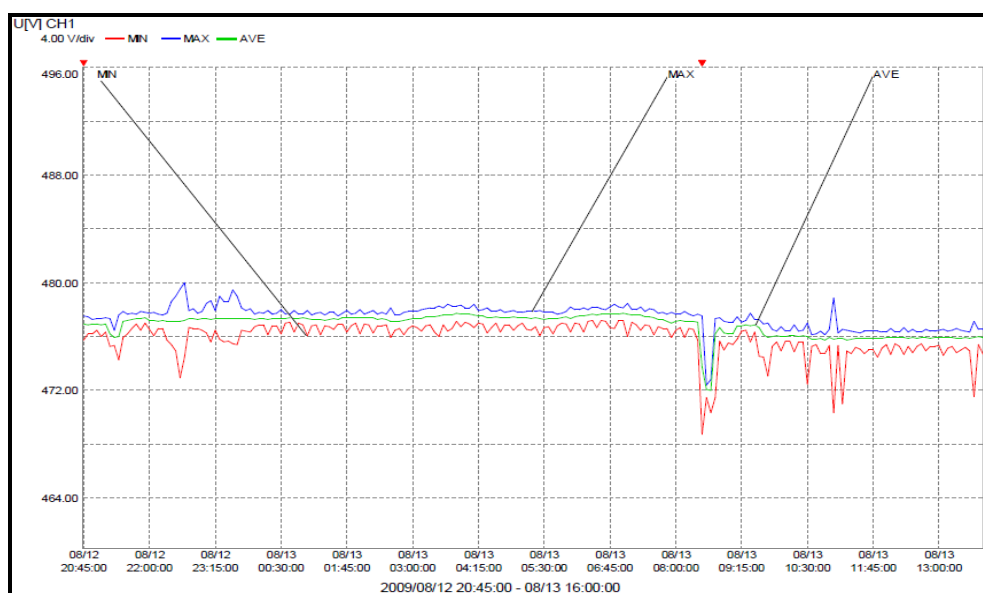


Figura 4.21 Switchgear B, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	468.74	480	2009/08/13
CH 2	469.25	480.06	2009/08/13
CH 3	468.99	479.88	2009/08/13

4.5.3.3. Variación de la corriente.

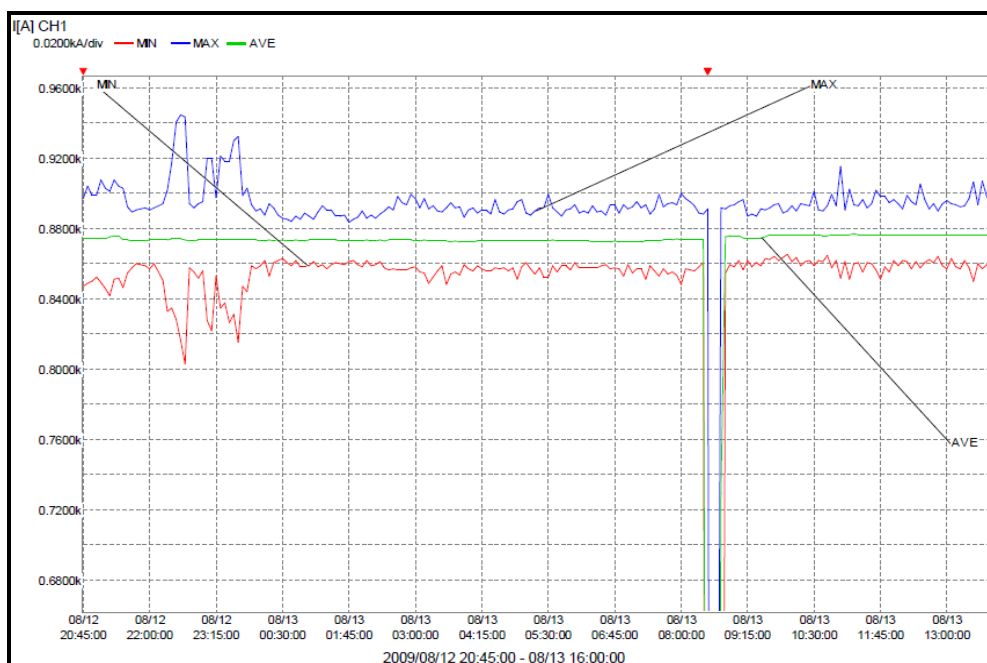


Figura 4.22 Switchgear B, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	8.3	945	2009/08/13
CH 2	8.5	949.3	2009/08/13
CH 3	8.9	941.4	2009/08/13

4.5.3.4. Variación de frecuencia.

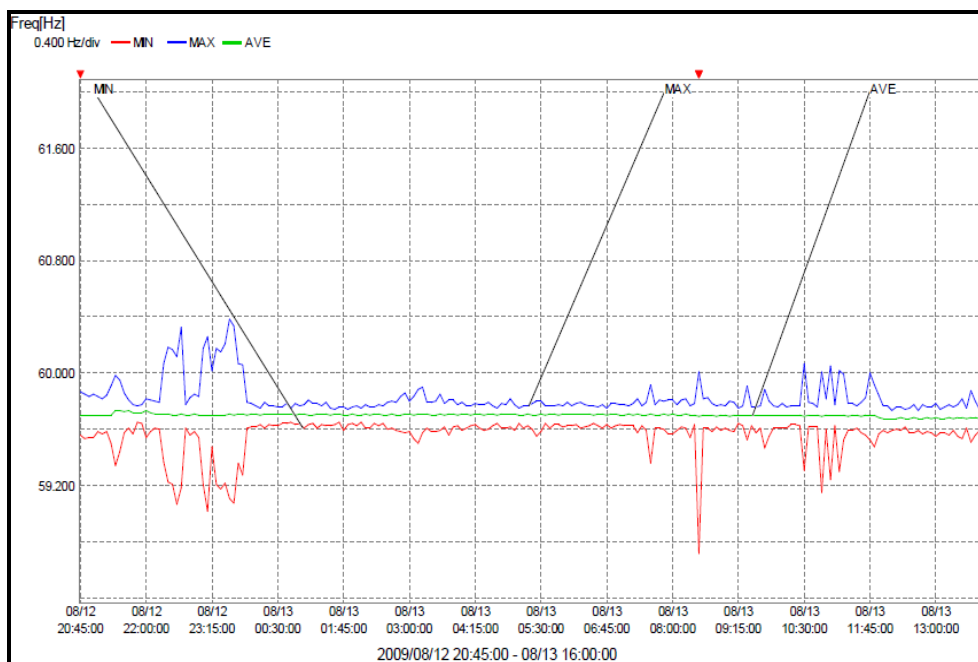


Figura 4.23 Switchgear B, variación de frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	58.717	60.384	2009/08/13

4.5.3.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	2.89 %	8.89 %	5 ta
2	2.92 %	8.87 %	5 ta
3	2.90 %	8.98 %	5 ta

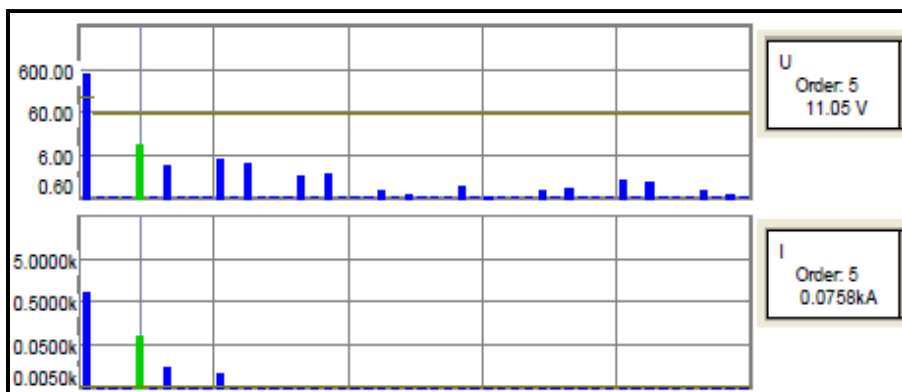


Figura 4.24 Switchgear B, espectro armónico.

4.5.4. SWITC GEAR C.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin	Fecha
11:05	2009/08/14	11:00	2009/08/15

En el “SWICTHGEAR C” se monitoreó la calidad de energía a nivel del MCC que está a 4160 [V], debido a las dificultades físicas y por la seguridad del personal para conectar el equipo.

Para reflejar los valores de 4160 [V] a los 480 [V] que es el nivel de voltaje de los switchgears se obtiene la siguiente relación de transformación.

$$R_T = \frac{4160 V}{480 V} = 8.7$$

Con esta relación obtenemos el valor de la corriente en el lado de 480 V.

4.5.4.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

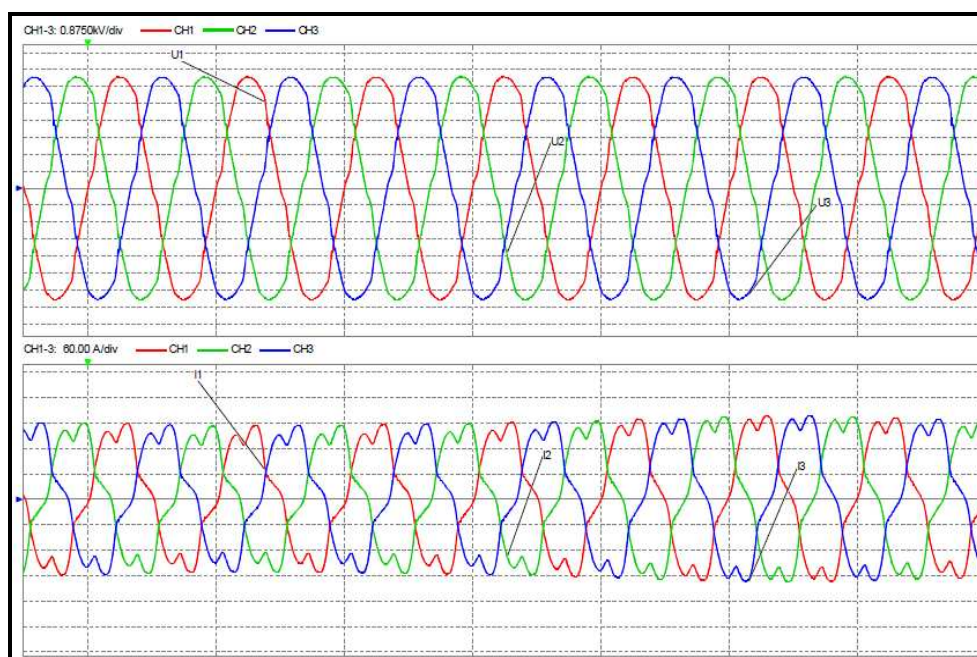


Figura 4.25 Switchgear C, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.4.2. Variación del voltaje.

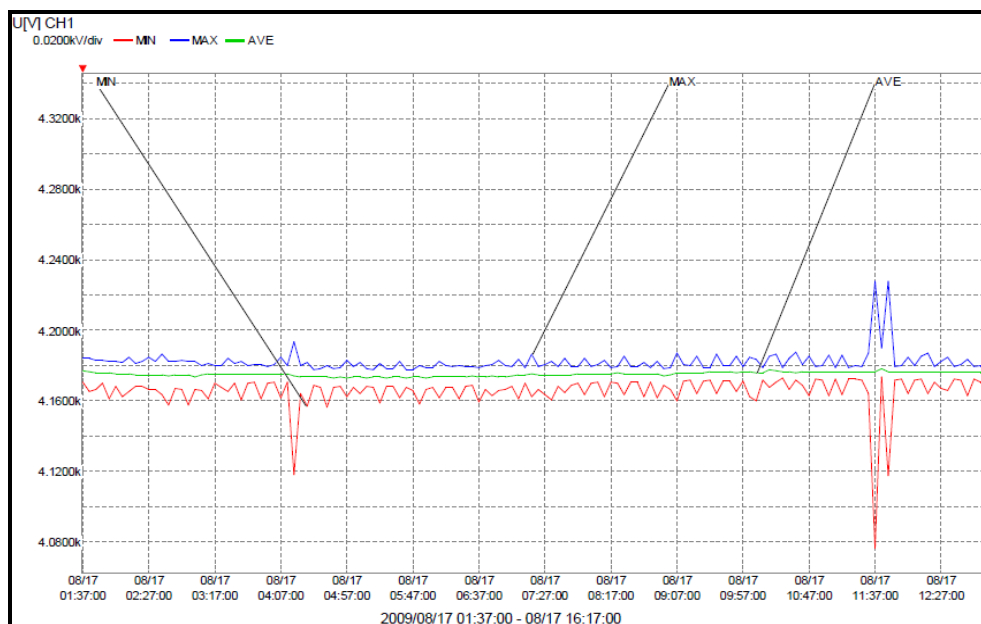


Figura 4.26 Switchgear C, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	407.62	422.78	2009/08/17
CH 2	407.57	422.96	2009/08/17
CH 3	407.36	422.64	2009/08/17

4.5.4.3. Variación de la corriente.

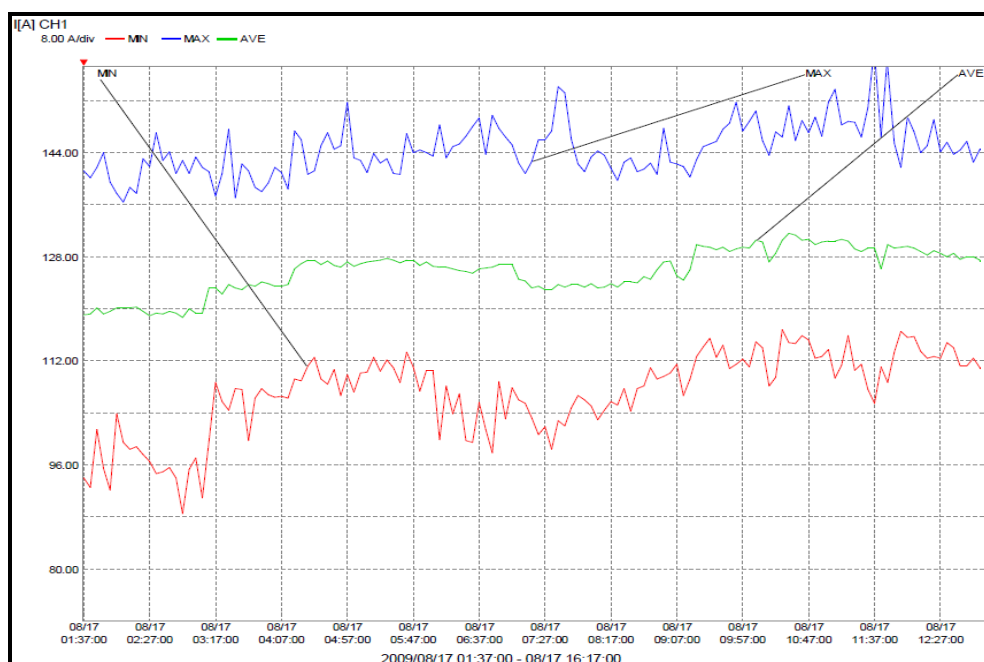


Figura 4.27 Switchgear C, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	88.53	159.75	2009/08/17
CH 2	88.95	159.8	2009/08/17
CH 3	88.36	159.57	2009/08/17

4.5.4.4. Variación de la frecuencia.

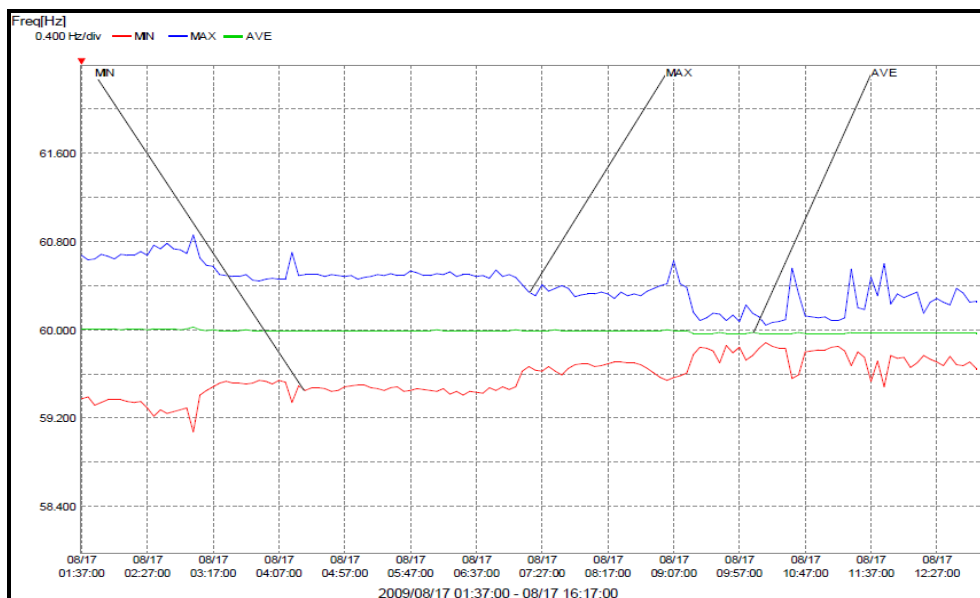


Figura 4.28 Switchgear C, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.071	60.854	2009/08/17

4.5.4.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	4.72 %	16.31 %	5 ta
2	4.70 %	16.48 %	5 ta
3	4.70 %	16.33 %	5 ta

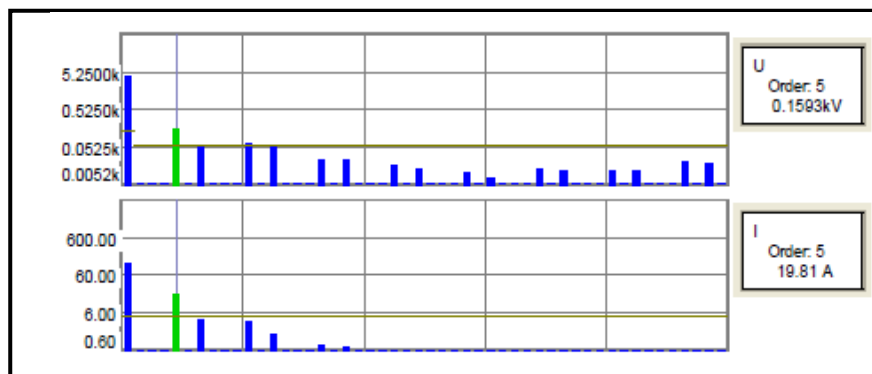


Figura 4.29 Switchgear C, espectro armónico.

4.5.5. LIMONCOCHA 1.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin	Fecha
8:44	2010/02/05	11:24	2009/08/15

4.5.5.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

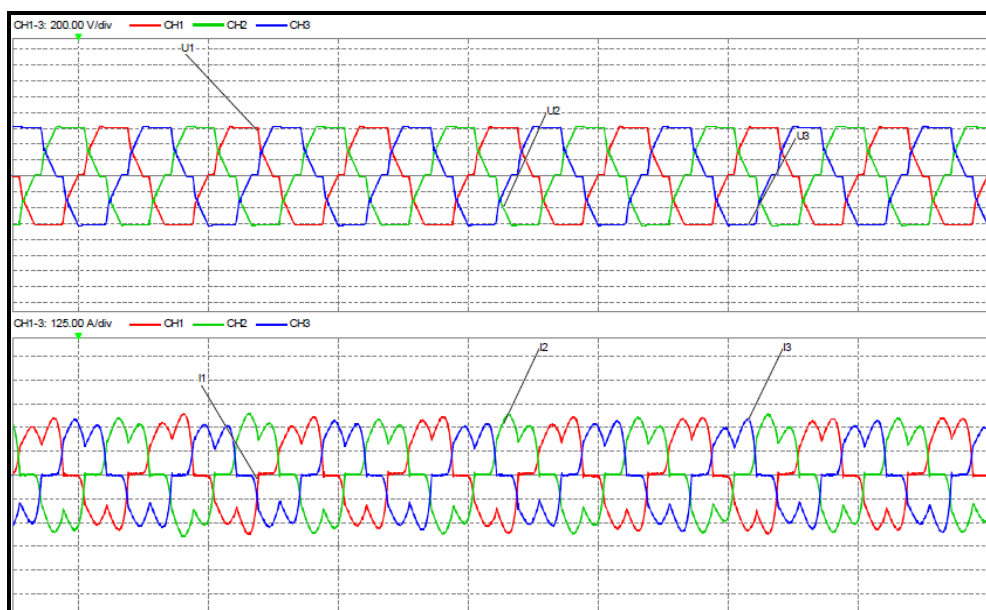


Figura 4.30 Limoncocha 1, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.5.2. Variación del voltaje.

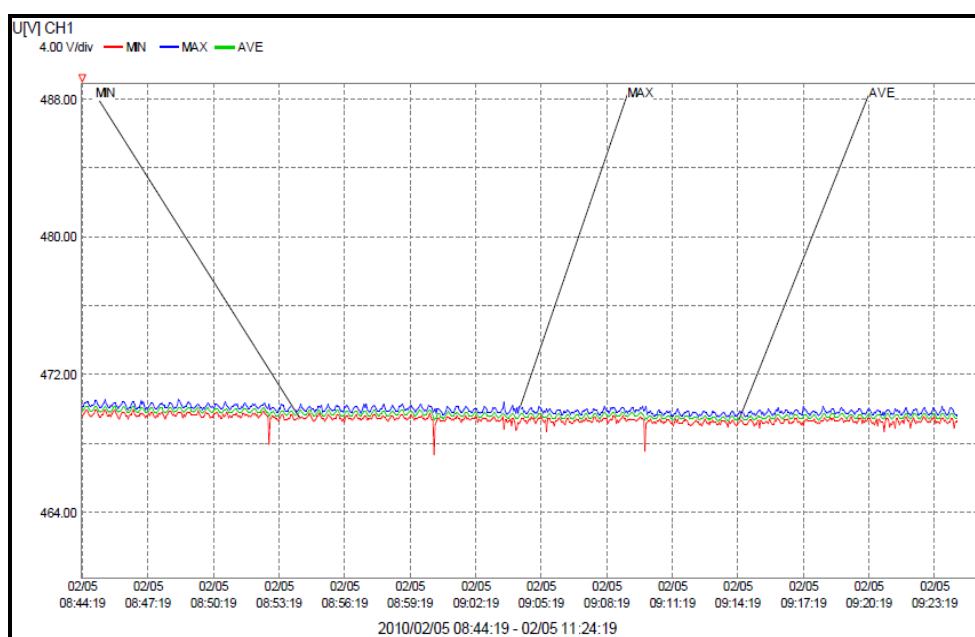


Figura 4.31 Limoncocha 1, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	467.30	470.51	2009/12/26
CH 2	467.34	270.71	2009/12/26
CH 3	467.23	470.48	2009/12/26

4.5.5.3. Variación de la corriente.

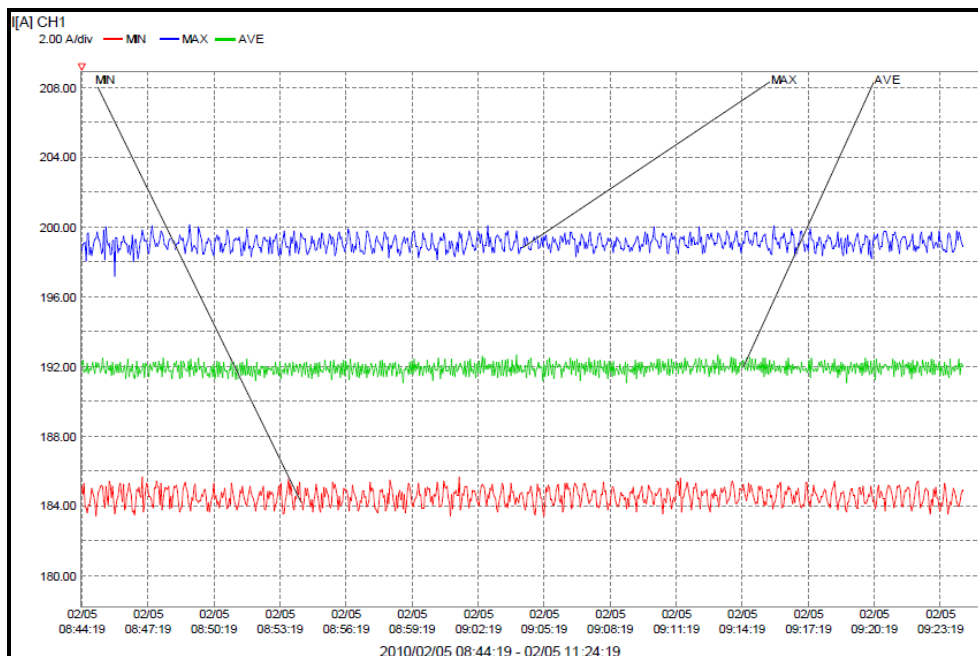


Figura 4.32 Limoncocha 1, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	183.42	200.12	2009/12/26
CH 2	183.46	201.03	2009/12/26
CH 3	184.08	202.11	2009/12/26

4.5.5.4. Variación de la frecuencia.

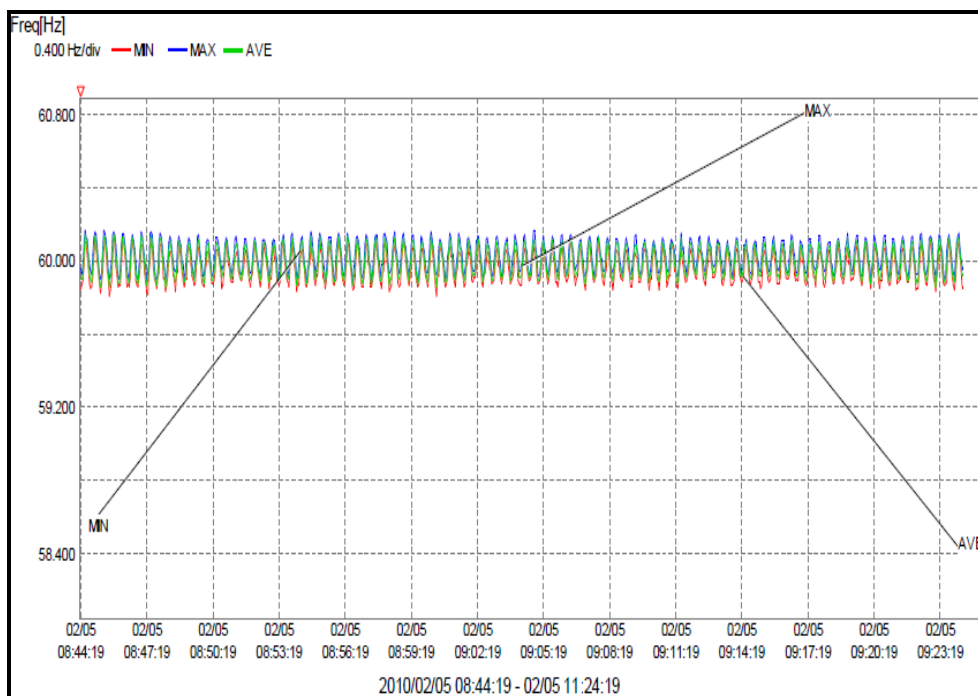


Figura 4.33 Limoncocha 1, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.809	60.167	2009/12/26

4.5.5.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	11.66 %	26.54 %	5 ta
2	11.71 %	28.07 %	5 ta
3	11.75 %	29.21 %	5 ta

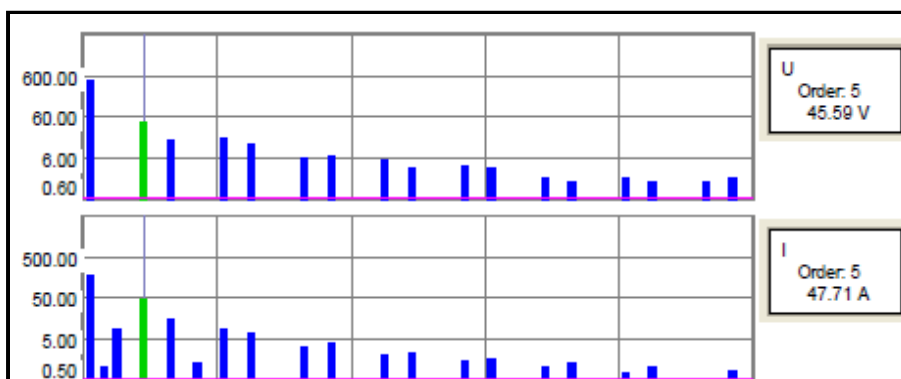


Figura 4.34 Limoncocha 1, espectro armónico.

4.5.6. LIMONCOCHA 2.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
09:45	2010/02/02	15:48

4.5.6.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

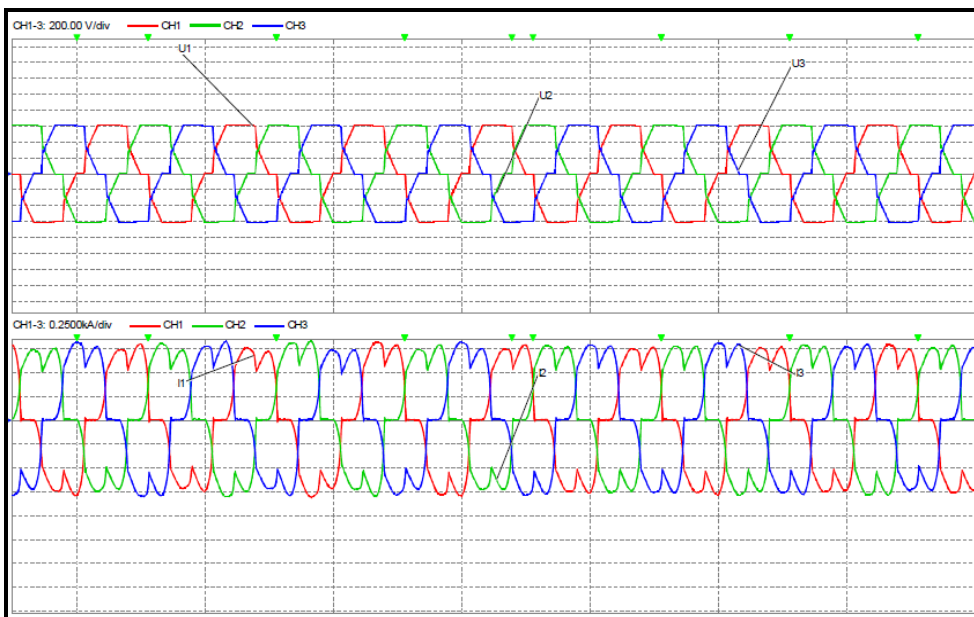


Figura 4.35 Limoncocha 2, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.6.2. Variación del voltaje.

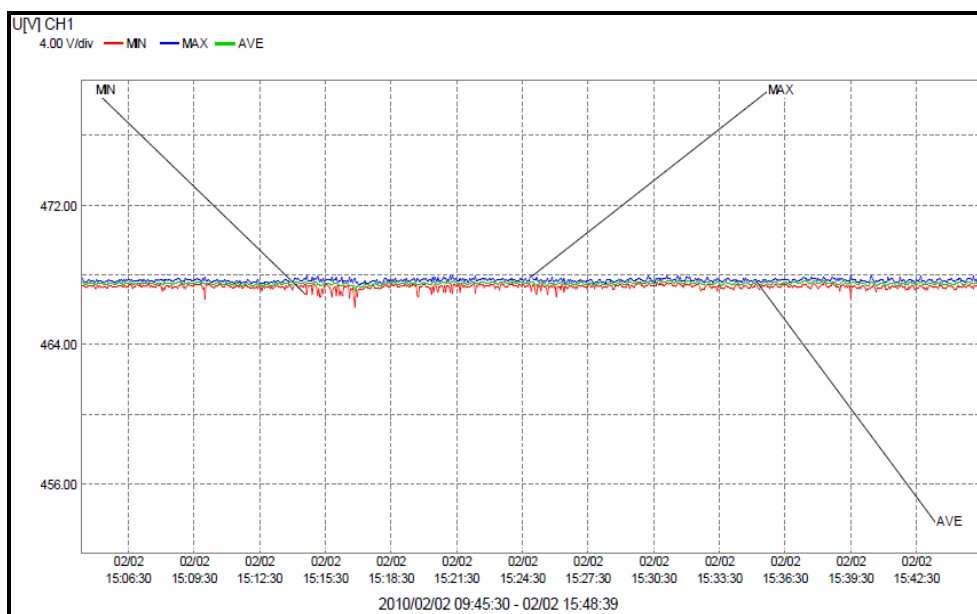


Figura 4.36 Limoncocha 2, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	466.11	467.98	2010/02/02
CH 2	466.2	468.15	2010/02/02
CH 3	465.98	467.80	2010/02/02

4.5.6.3. Variación de la corriente rms.

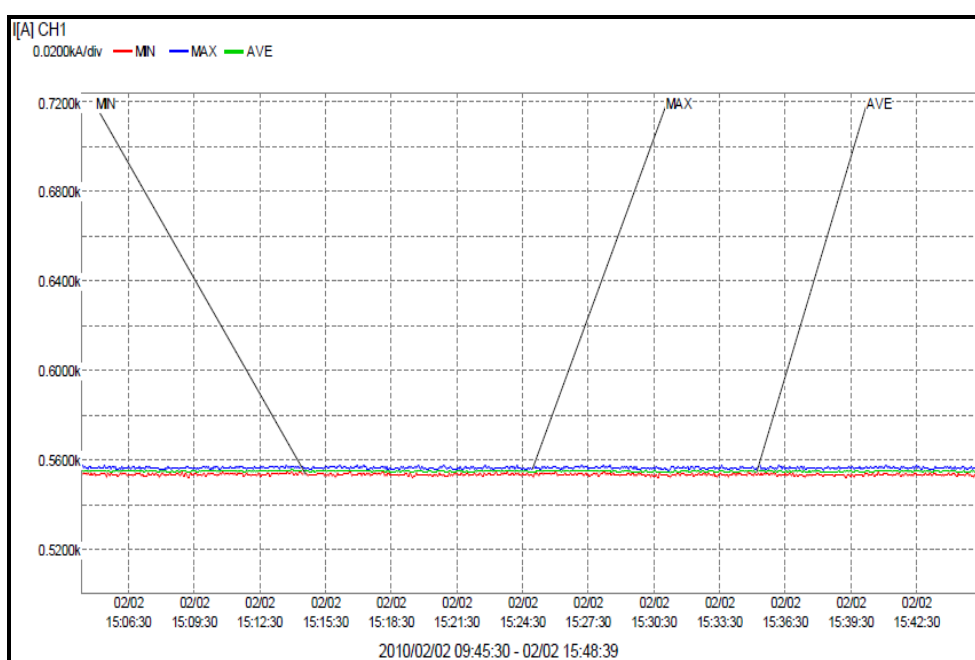


Figura 4.37 Limoncocha 2, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	552.2	557.9	2010/02/02
CH 2	552.7	559.2	2010/02/02
CH 3	559.1	564.6	2010/02/02

4.5.6.4. Variación de la frecuencia.

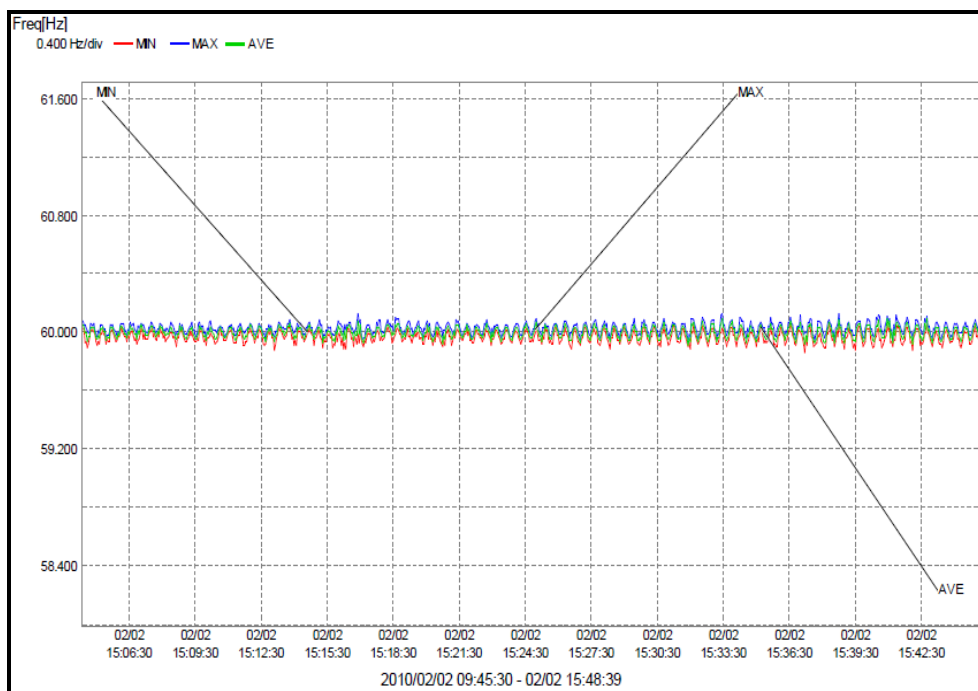


Figura 4.38 Limoncocha 2, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.878	60.127	2010/02/02

4.5.6.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	13.8 %	23.97 %	5 ta
2	13.75 %	24.04 %	5 ta
3	13.75 %	23.94 %	5 ta

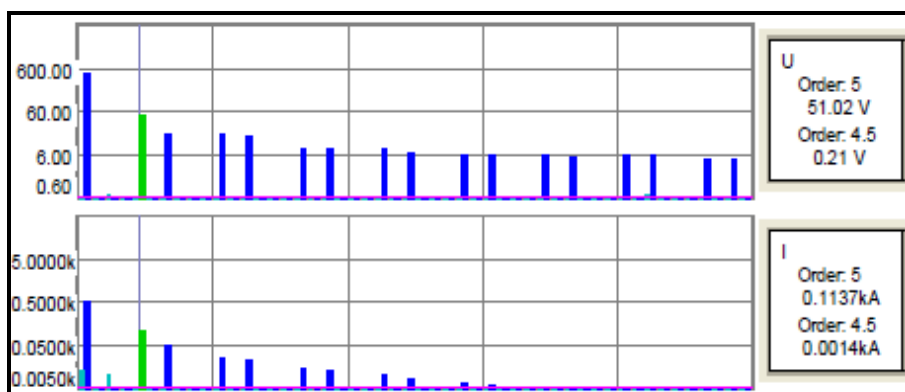


Figura 4.39 Limoncocha 2, espectro armónico.

4.5.7. LIMONCOCHA 3.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
09:21	2010/02/13	13:36

4.5.7.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

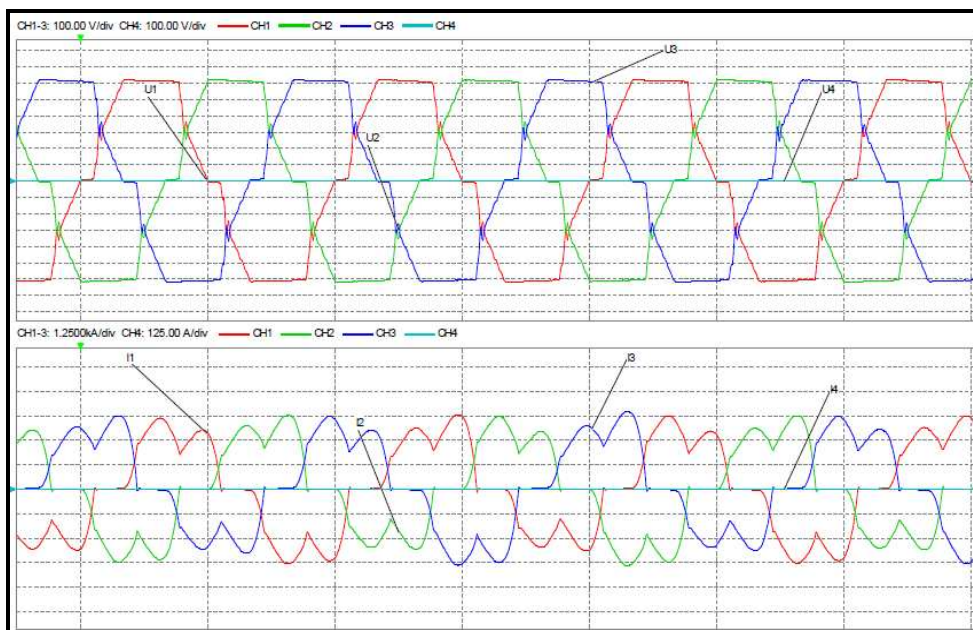


Figura 4.40 Limoncocha 3, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.7.2. Variación del voltaje.

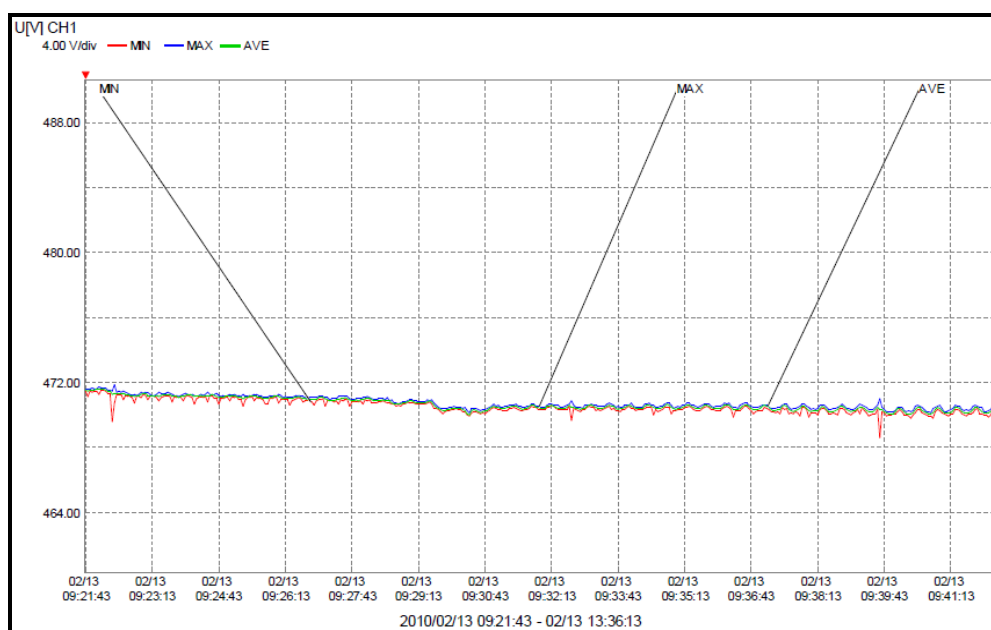


Figura 4.41 Limoncocha 3, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	468.61	471.89	2010/02/13
CH 2	468.56	471.85	2010/02/13
CH 3	468.39	471.83	2010/02/13

4.5.7.3. Variación de la corriente.

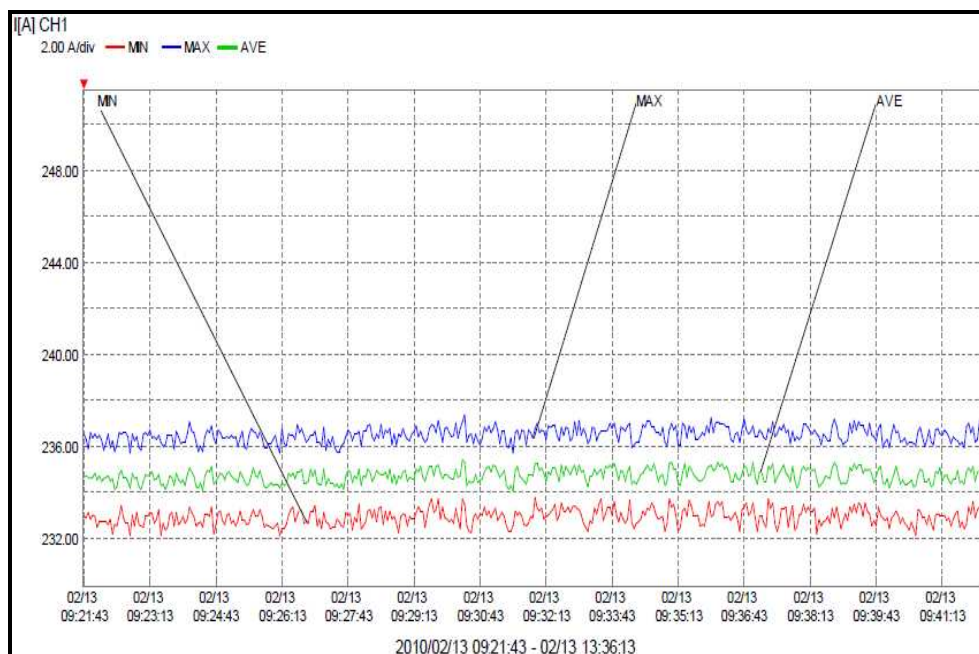


Figura 4.42 Limoncocha 3, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	231.87	237.34	2010/02/13
CH 2	226.14	231.65	2010/02/13
CH 3	228.0	233.2	2010/02/13

4.5.7.4. Variación de la frecuencia.

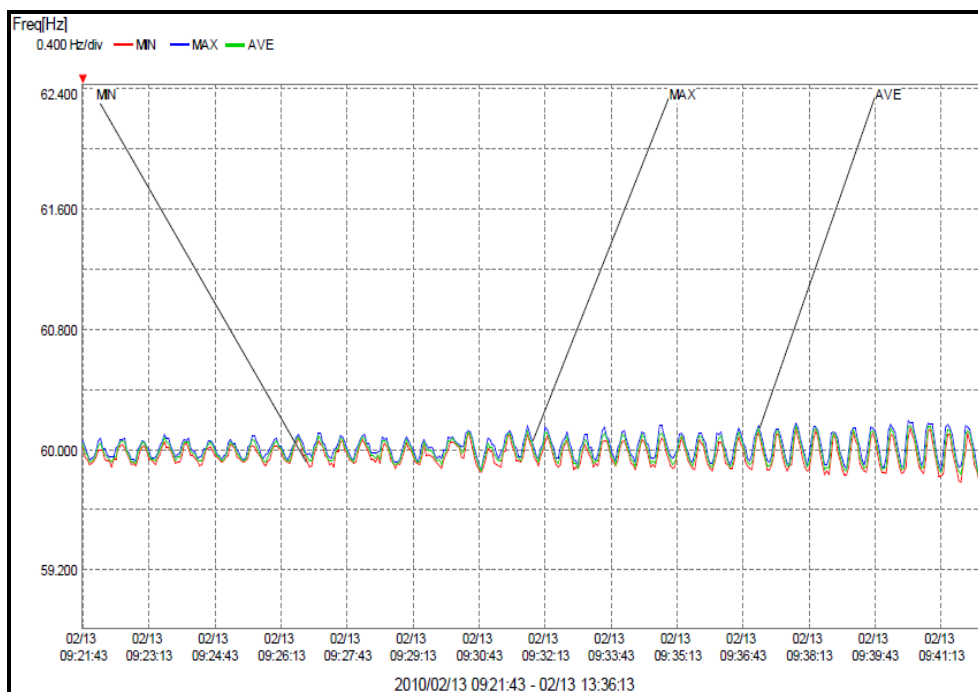


Figura 4.43 Limoncocha 3, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.786	60.204	2010/02/13

4.5.7.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	13.8 %	27.76 %	5 ta
2	13.75 %	28.69 %	5 ta
3	13.75 %	28.20 %	5 ta

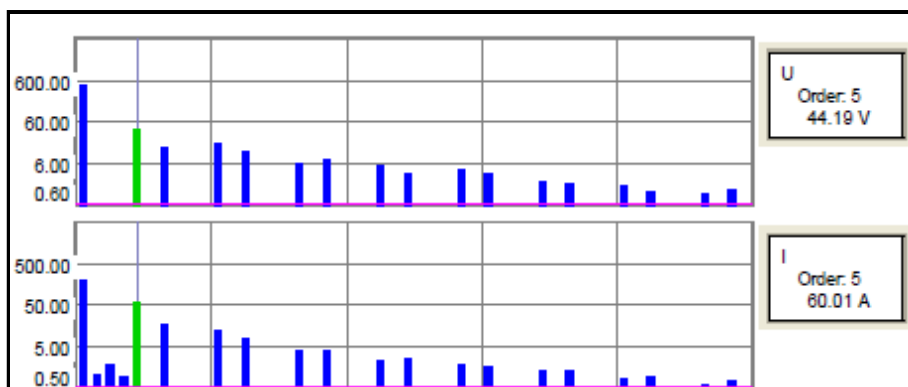


Figura 4.44 Limoncocha 3, espectro armónico.

4.5.8. LIMONCOCHA 4.

En Limoncocha 4 se tiene 7 VSDs de los cuales 5 se encuentran operando, las mediciones en esta locación se realizaron en un solo VSD ya que los demás son de iguales características y se encuentran en paralelo, por lo que la contaminación armónica será los mismos en todos los transformadores de los VSDs.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
10:33	2009/12/02	11:03

4.5.8.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

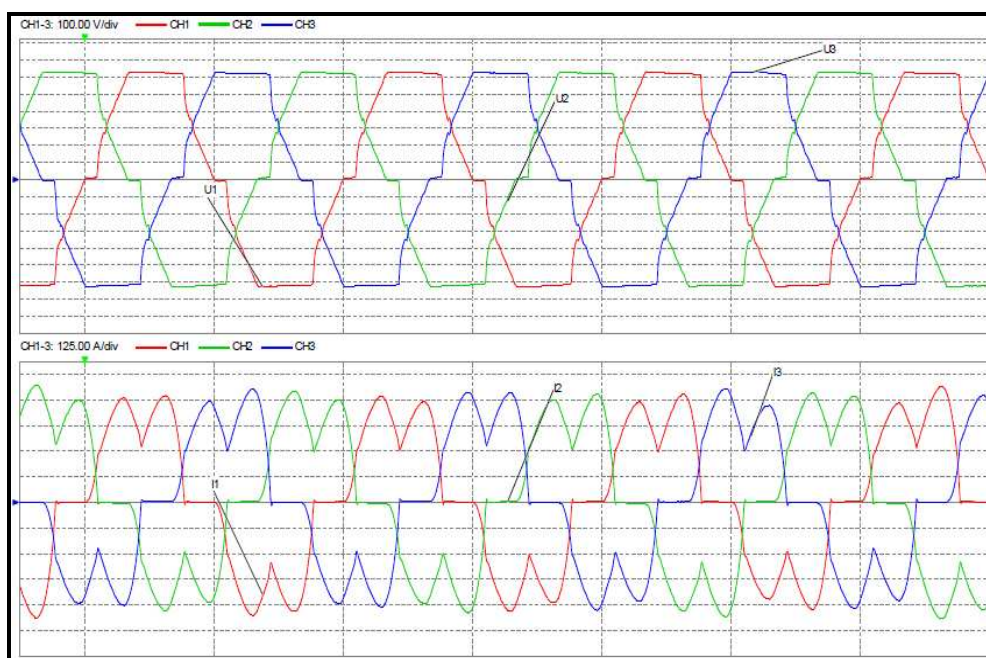


Figura 4.45 Limoncocha 4, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.8.2. Variación del voltaje.

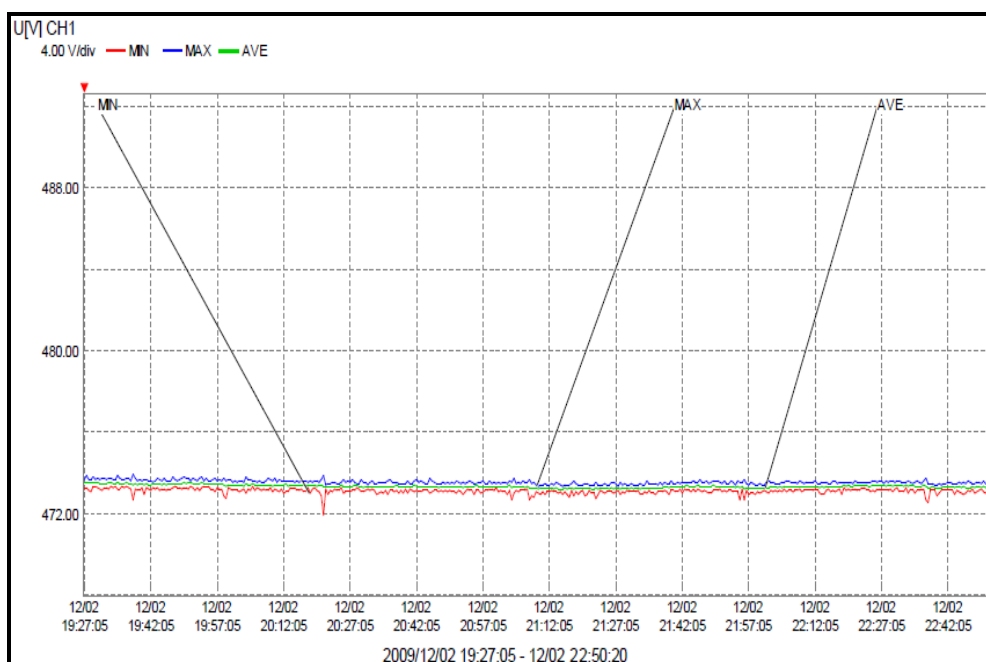


Figura 4.46 Limoncocha 4, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	471.91	473.89	2009/12/02
CH 2	472.28	474.33	2009/12/02
CH 3	471.48	473.58	2009/12/02

4.5.8.3. Variación de la corriente.

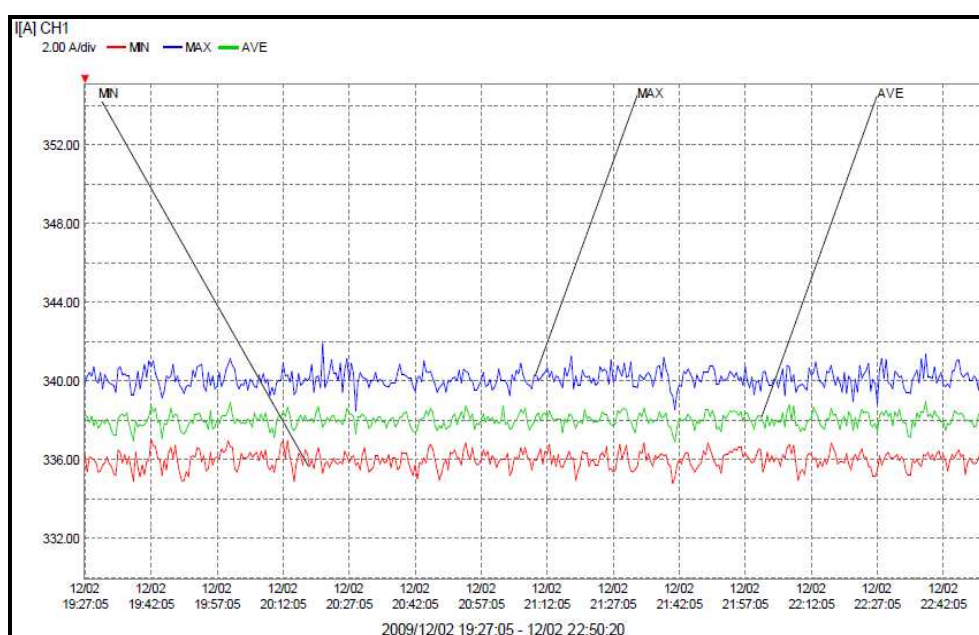


Figura 4.47 Limoncocha 4, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	334.56	341.9	2009/12/02
CH 2	345.57	352.45	2009/12/02
CH 3	334.94	341.72	2009/12/02

4.5.8.4. Variación de la frecuencia.

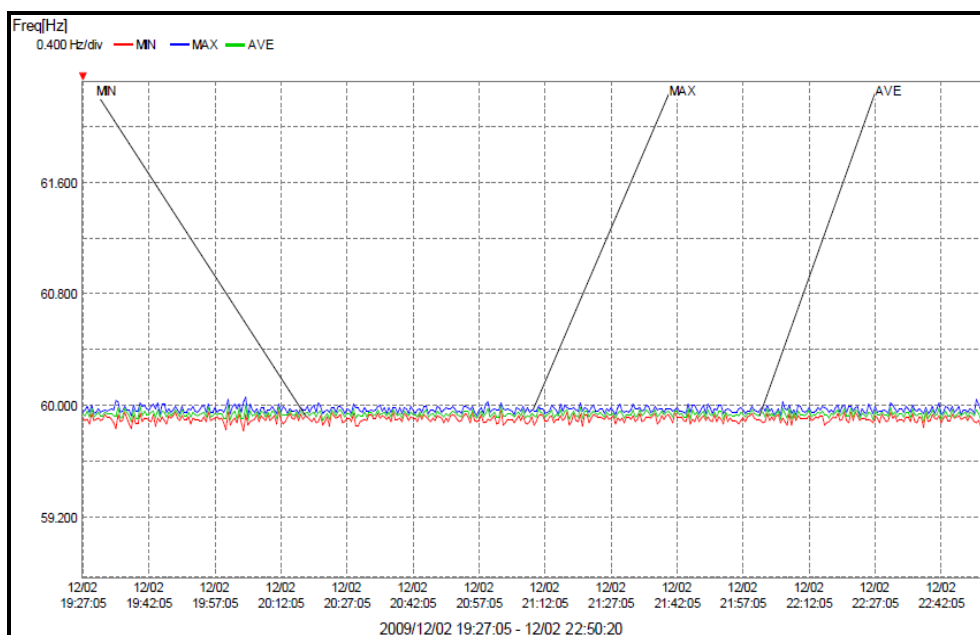


Figura 4.48 Limoncocha 4, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.816	60.284	2009/12/02

4.5.8.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	10.7 %	29.73 %	5 ta
2	10.67 %	29.64 %	5 ta
3	10.79 %	30.79 %	5 ta

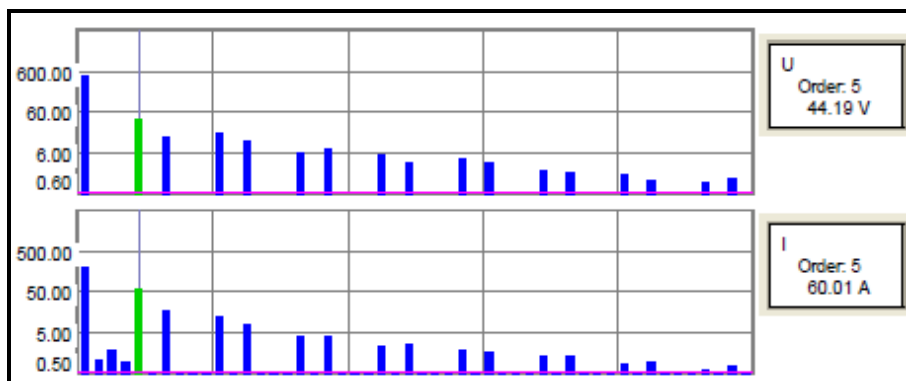


Figura 4.49 Limoncocha 4, espectro de armónicos.

4.5.9. LIMONCOCHA 6.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
9:23	2009/12/02	13:37

4.5.9.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

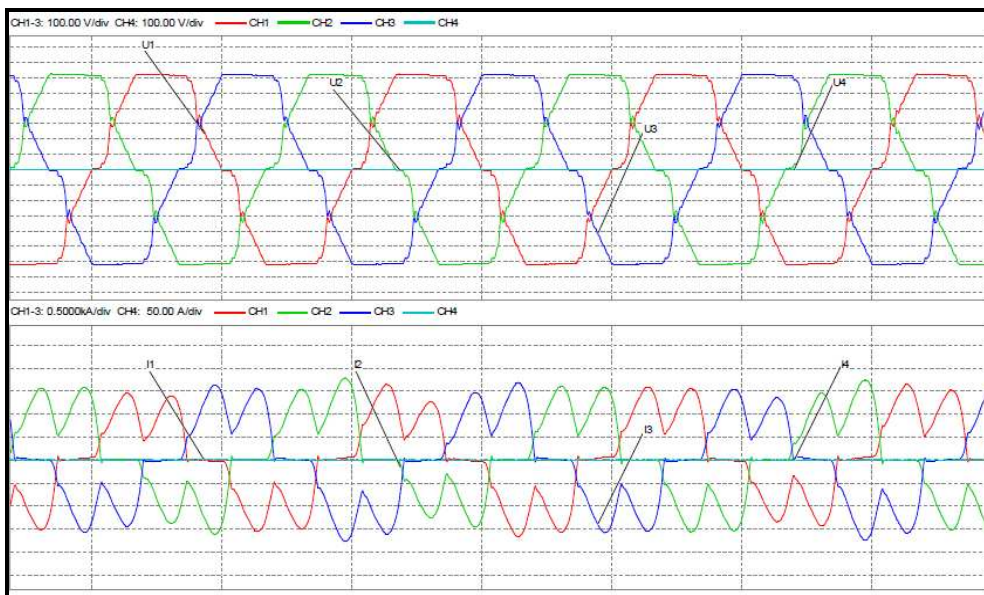


Figura 4.50 Limoncocha 6, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.9.2. Variación del voltaje.

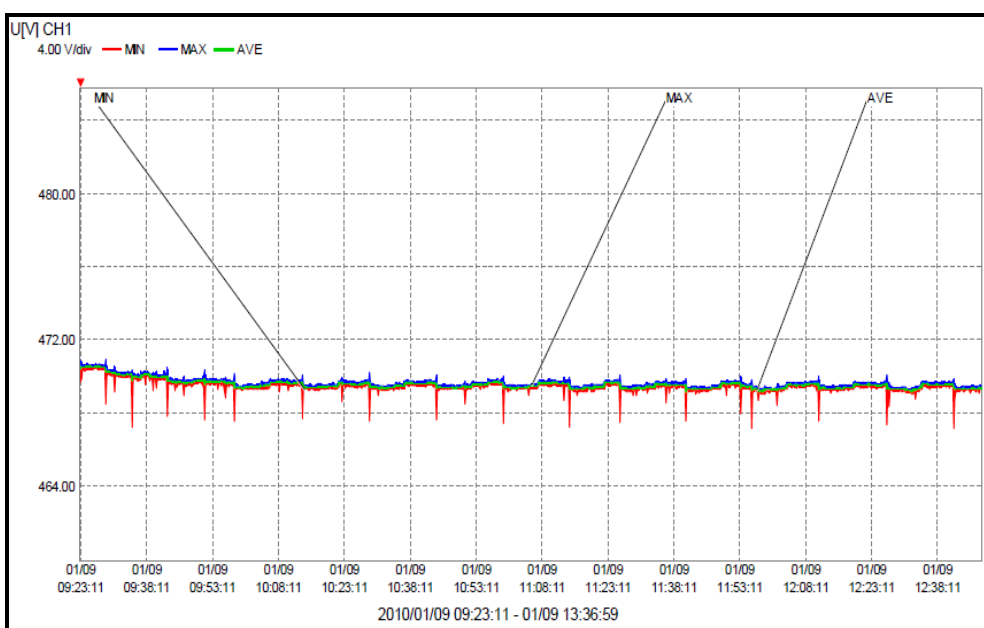


Figura 4.51 Limoncocha 6, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	467.45	469.92	2010/01/09
CH 2	467.85	470.35	2010/01/9
CH 3	467.35	469.8	2010/01/9

4.5.9.3. Variación de la corriente.

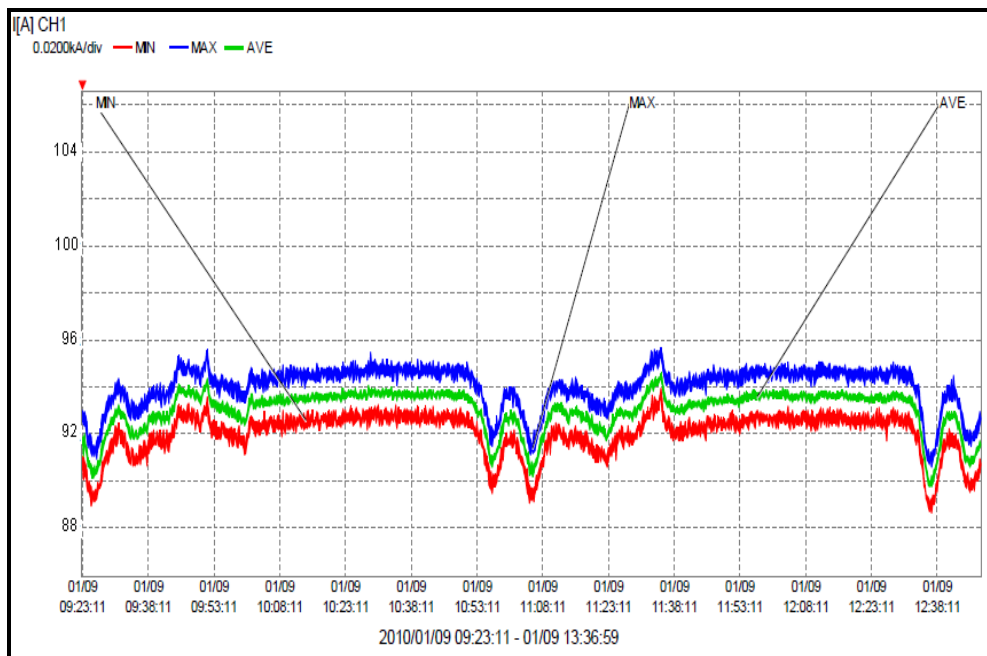


Figura 4.52 Limoncocha 6, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	91.43	95.65	2010/01/09
CH 2	91.08	95.55	2010/01/9
CH 3	93.38	97.58	2010/01/9

4.5.9.4. Variación de la frecuencia.

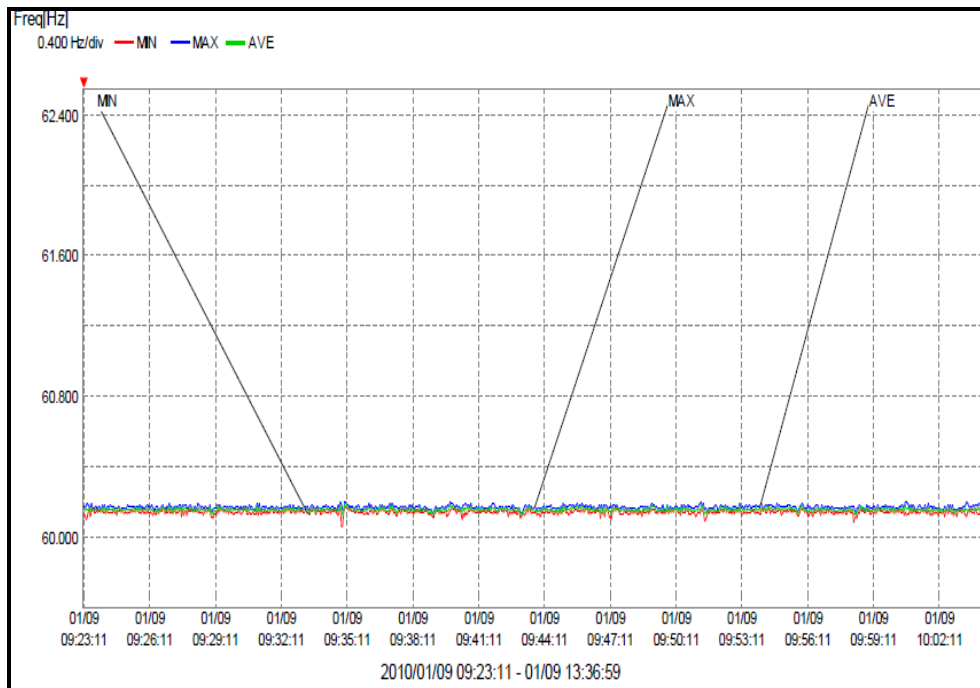


Figura 4.53 Limoncocha 6, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	60.099	60.206	2010/01/09

4.5.9.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	10.7 %	37.71 %	5 ta
2	10.65 %	38.98 %	5 ta
3	10.59 %	36.39 %	5 ta

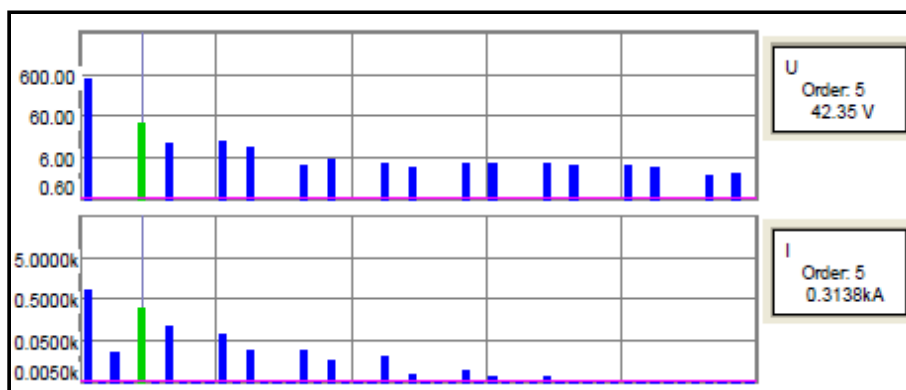


Figura 4.54 Limoncocha 6, espectro armónico.

4.5.10. LIMONCOCHA 7.

Limoncocha 7 es la única locación que tiene un VSD de 12 pulsos con su respectivo transformador desfasador por lo que en esta locación se tiene mejor calidad de energía y se la considera como modelo a seguir para las otras locaciones.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin	Fecha
10:09	2009/11/02	09:09	2009/11/03

4.5.10.1. Forma de onda de voltaje y corriente entrada 1.

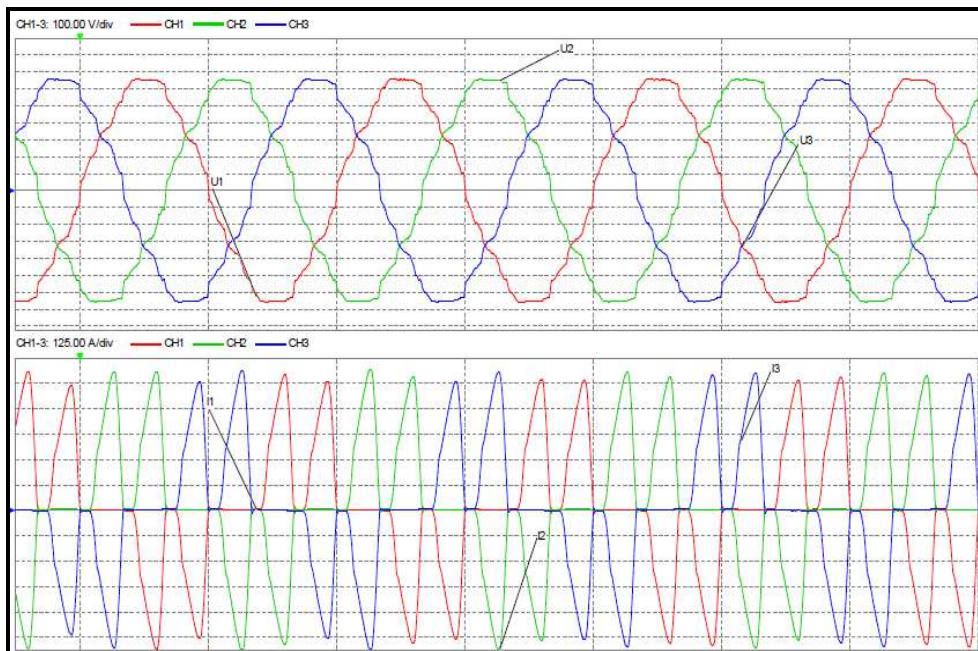


Figura 4.55 Limoncocha 7, forma de onda de voltaje y corriente entrada 1.

4.5.10.2. Variación del voltaje entrada 1.

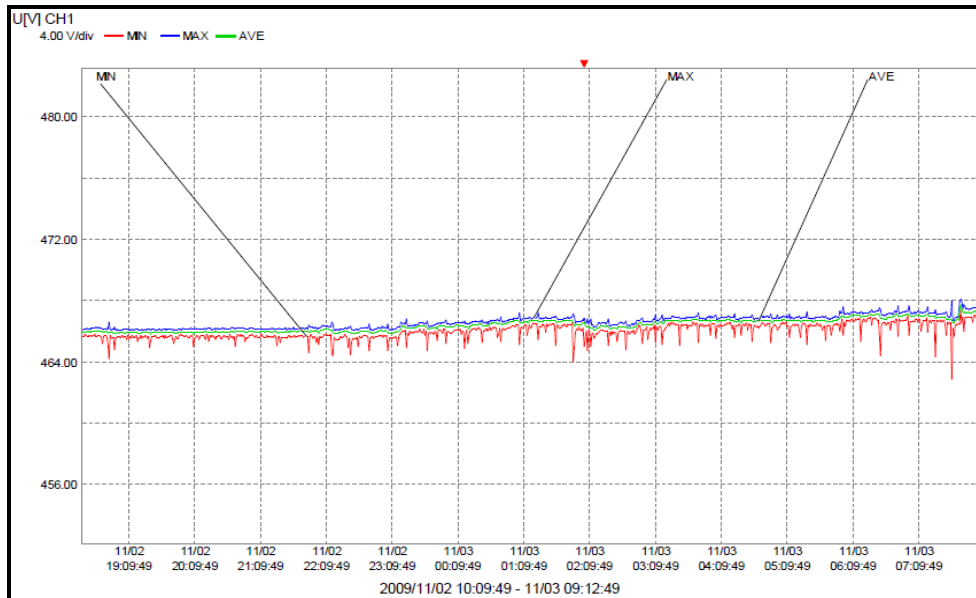


Figura 4.56 Limoncocha 7, variación del voltaje entrada 1.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	462.19	470.23	2009/11/03
CH 2	463.15	470.6	2009/11/03
CH 3	461.96	469.82	2009/11/03

4.5.10.3. Variación de la corriente entrada 1.

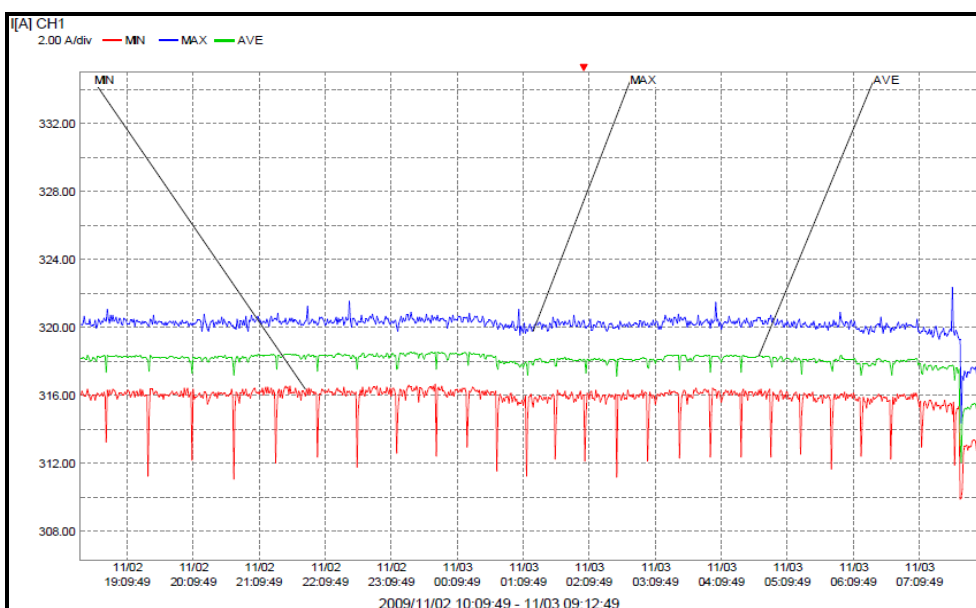


Figura 4.57 Limoncocha 7, variación de la corriente entrada 1.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	193.66	202.63	2009/11/03
CH 2	194.48	204.08	2009/11/03
CH 3	188.37	199.57	2009/11/03

4.5.10.4. Variación de la frecuencia entrada 1.

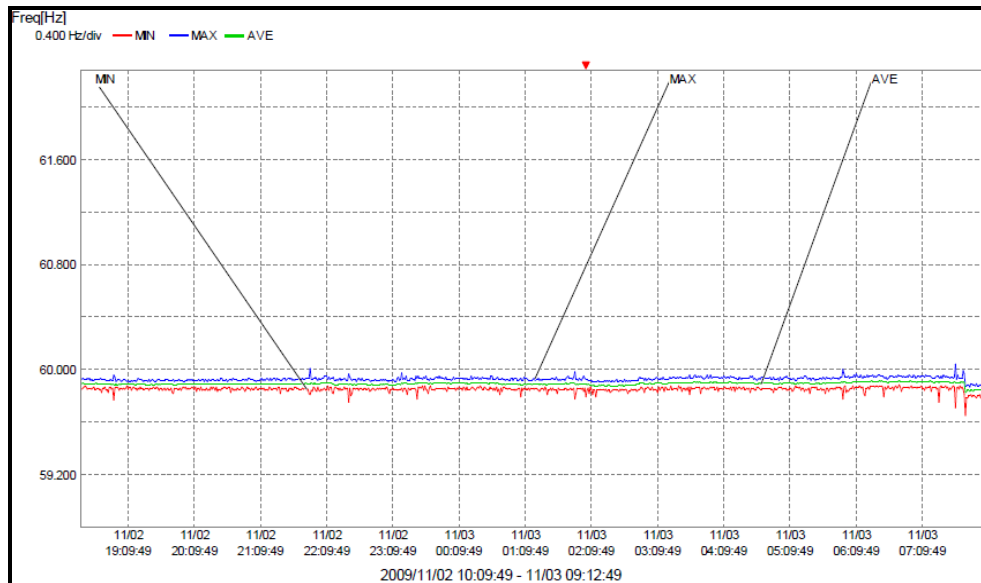


Figura 4.58 Limoncocha 7, variación de la frecuencia entrada 1.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.211	60.14	2009/11/03

4.5.10.5. Armónicos entrada 1.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	5.74 %	65.24 %	5 ta
2	5.8 %	65.03 %	5 ta
3	5.8 %	64.92 %	5 ta

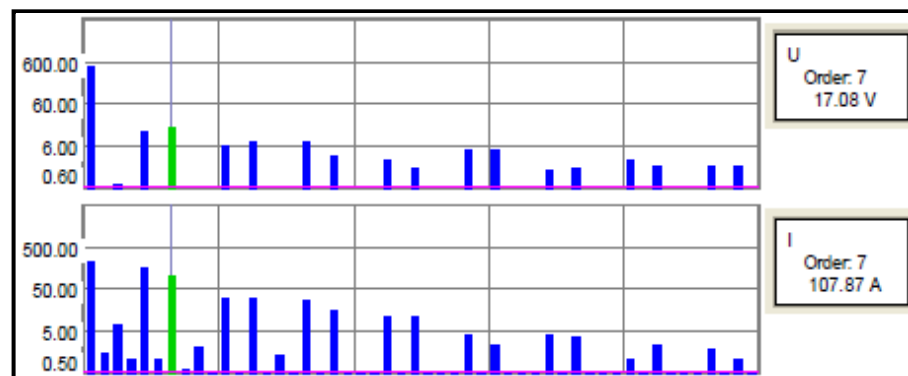


Figura 4.59 Limoncocha 7, espectro armónico entrada 1.

4.5.10.6. Forma de onda de voltaje de corriente entrada 2.

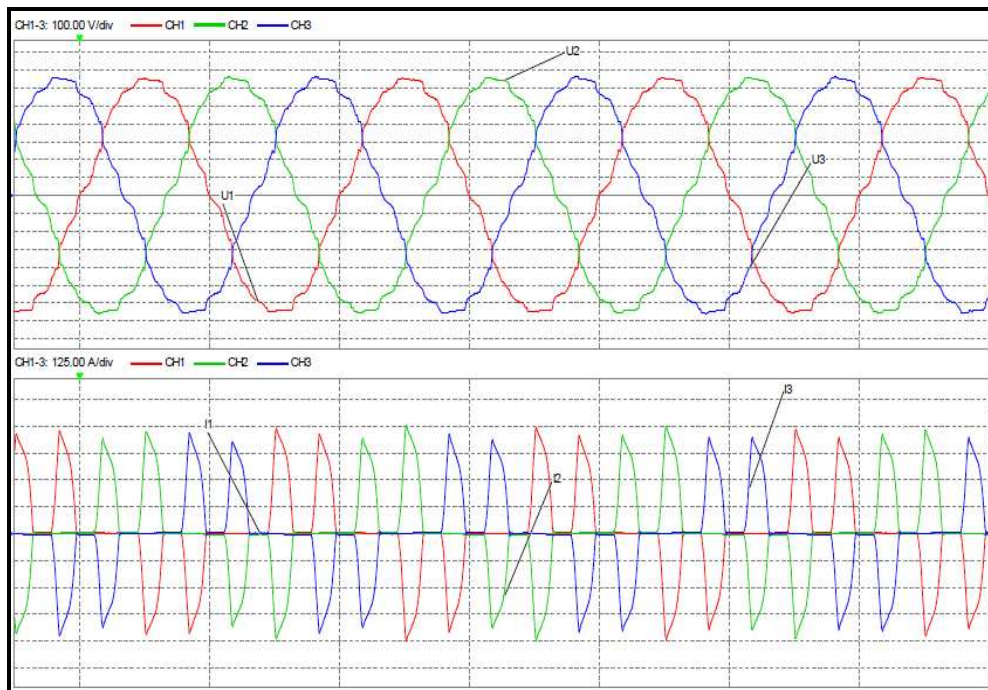


Figura 4.60 Limoncocha 7, forma de onda de voltaje y corriente entrada 2.

4.5.10.7. Variación de voltaje entrada 2.

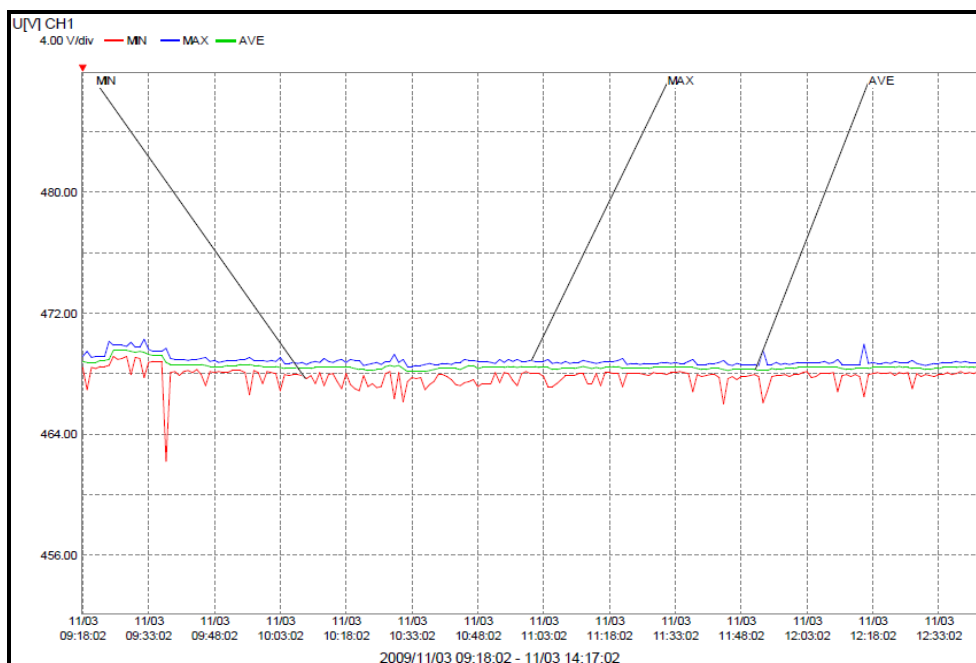


Figura 4.61 Limoncocha 7, variación de voltaje entrada 2.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	462.19	470.23	2009/11/03
CH 2	463.15	470.6	2009/11/03
CH 3	461.96	469.82	2009/11/03

4.5.10.8. Variación de la corriente entrada 2.

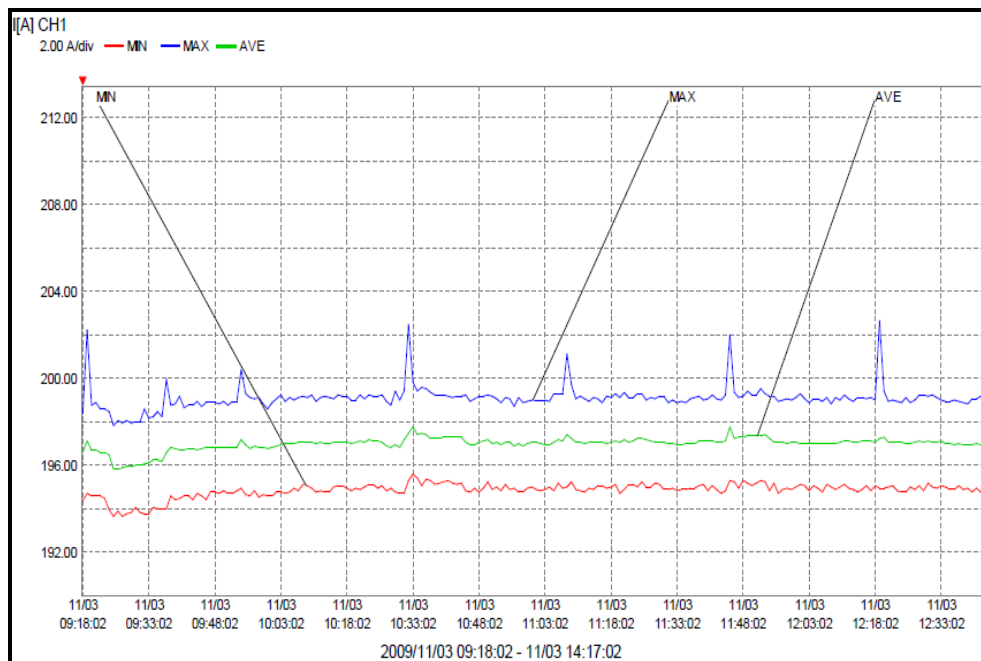


Figura 4.62 Limoncocha 7, variación de la corriente entrada 2.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	193.66	202.63	2009/11/03
CH 2	194.48	204.08	2009/11/03
CH 3	188.37	199.57	2009/11/03

4.5.10.9. Variación de la frecuencia entrada 2.

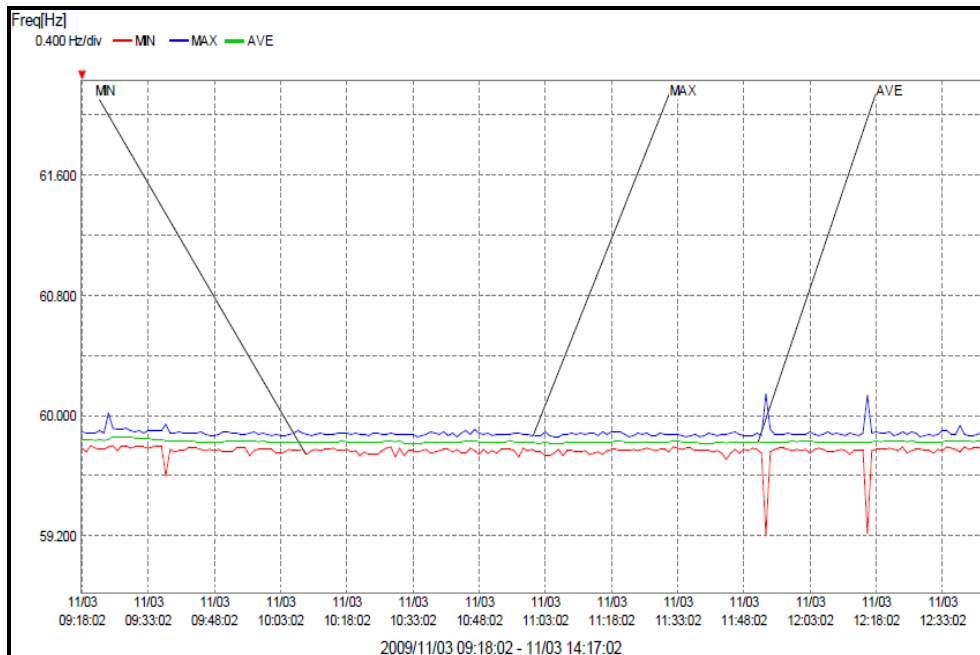


Figura 4.63 Limoncocha 7, variación de la frecuencia entrada 2.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	59.211	60.14	2009/11/03

4.5.10.10. Armónicos entrada 2.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	5.63 %	73.67 %	5 ta
2	5.71%	73.19 %	5 ta
3	5.69 %	73.19 %	5 ta

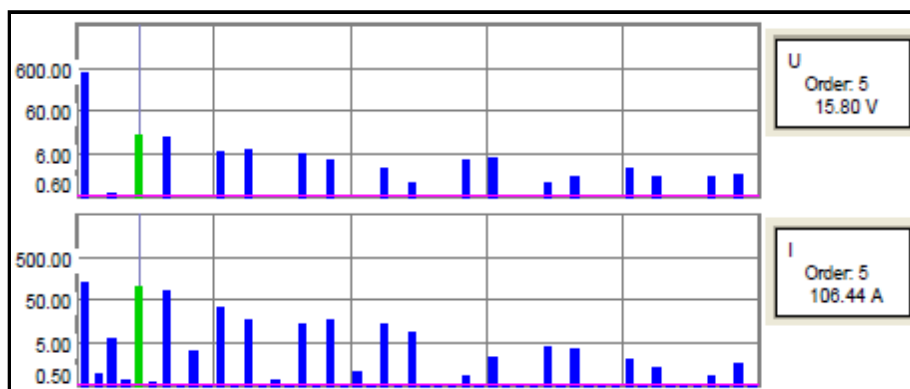


Figura 4.64 Limoncocha 7, espectro armónico entrada 2.

4.5.11. LIMONCOCHA 8.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
9:29	2009/12/26	10:10

4.5.11.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

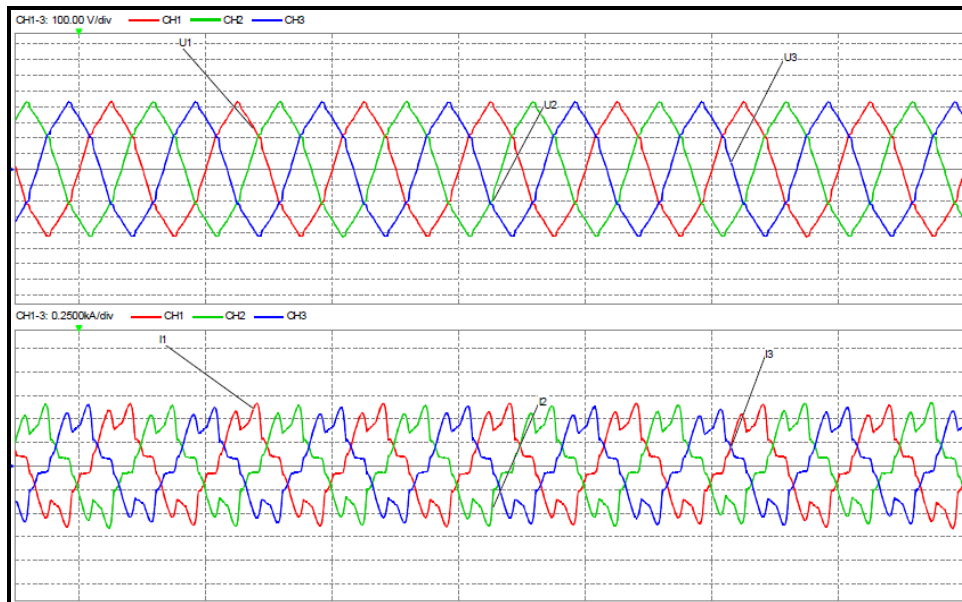


Figura 4.65 Limoncocha 8, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.11.2. Variación del voltaje.

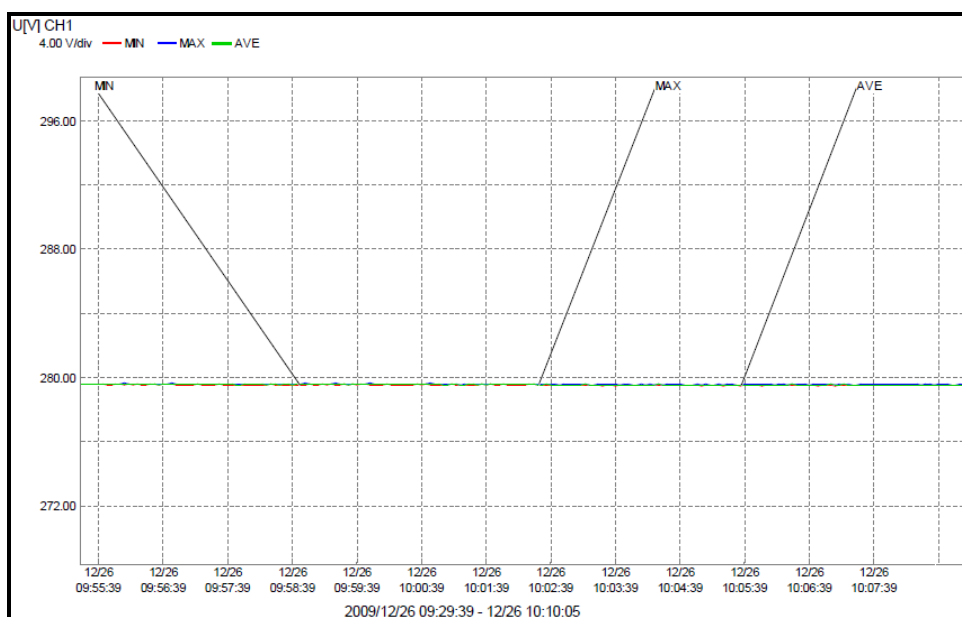


Figura 4.66 Limoncocha 8, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	279.51	279.65	2009/12/26
CH 2	278.81	278.95	2009/12/26
CH 3	279.76	279.89	2009/12/26

4.5.11.3. Variación de la corriente.

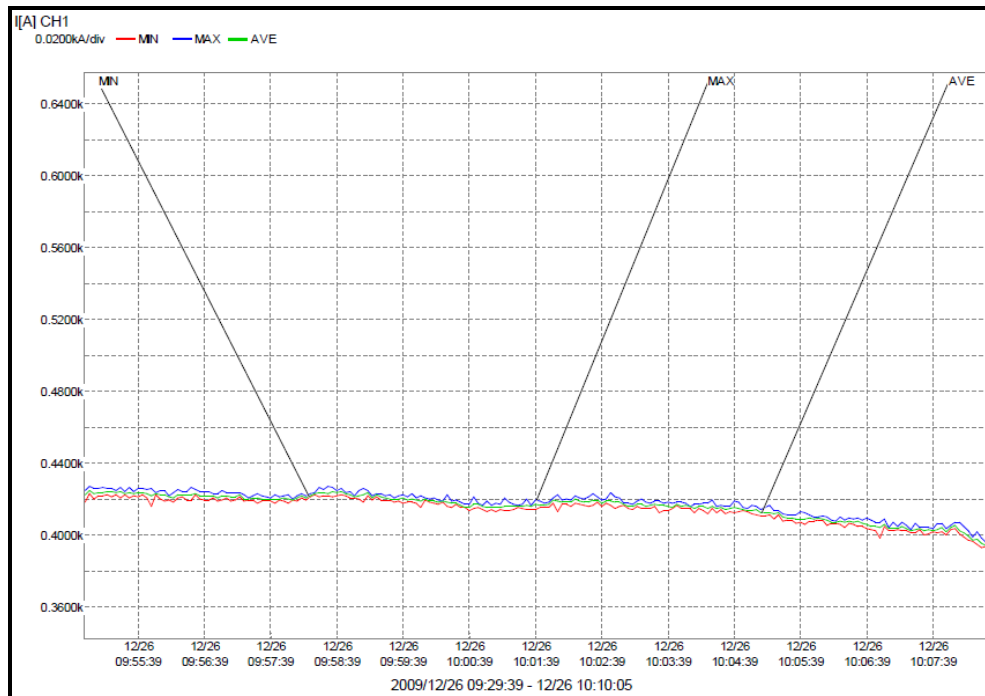


Figura 4.67 Limoncocha 8, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	415.4	432.8	2009/12/26
CH 2	399	418.4	2009/12/26
CH 3	392.2	411.7	2009/12/26

4.5.11.4. Variación de la frecuencia.

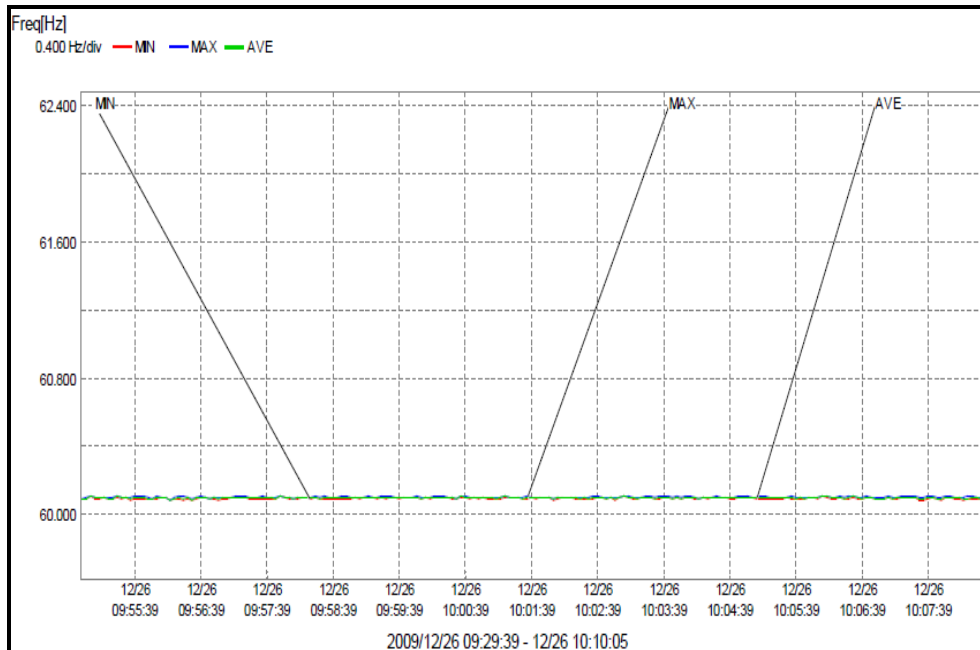


Figura 4.68 Limoncocha 8, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	60.079	60.112	2009/11/03

4.5.11.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	5.24 %	23.68 %	5 ta
2	5.23 %	25.06 %	5 ta
3	5.22 %	24.31 %	5 ta

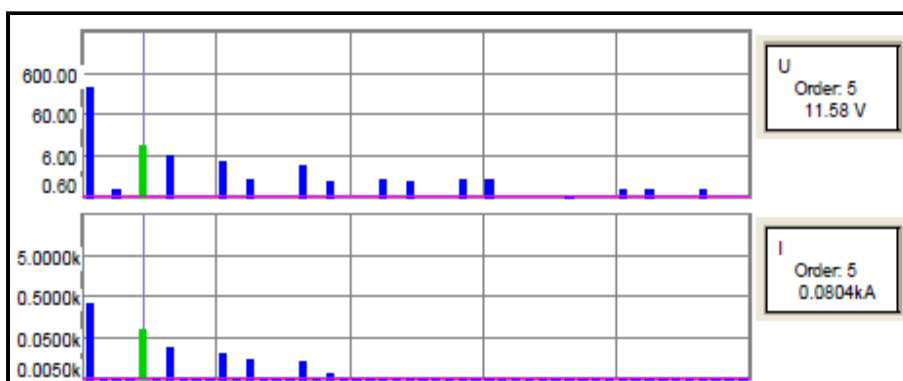


Figura 4.69 Limoncocha 8, espectro armónico.

4.5.12. LIMONCOCHA 9.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
15:21	2010/01/11	15:54

4.5.12.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

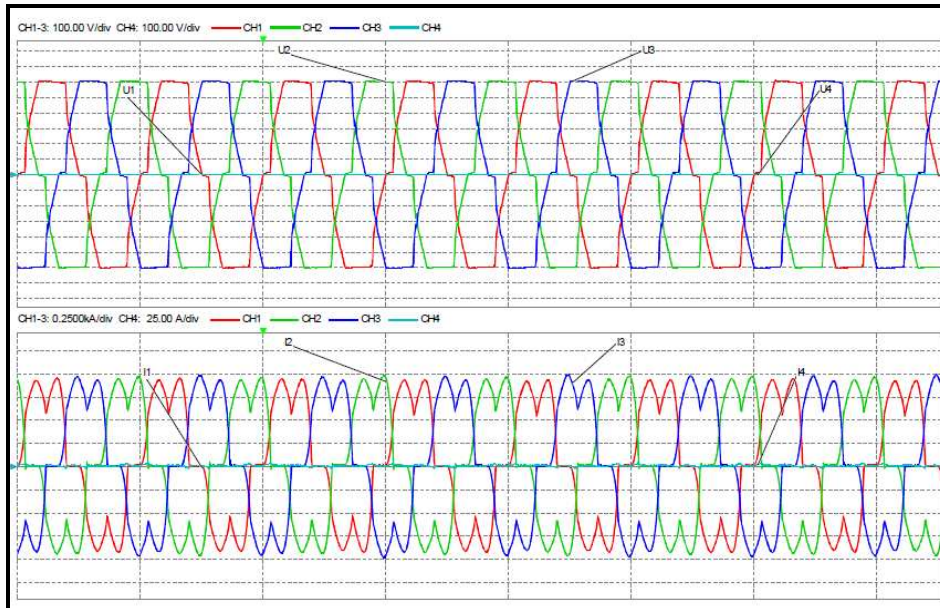


Figura 4.70 Limoncocha 9, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.12.2. Variación del voltaje.

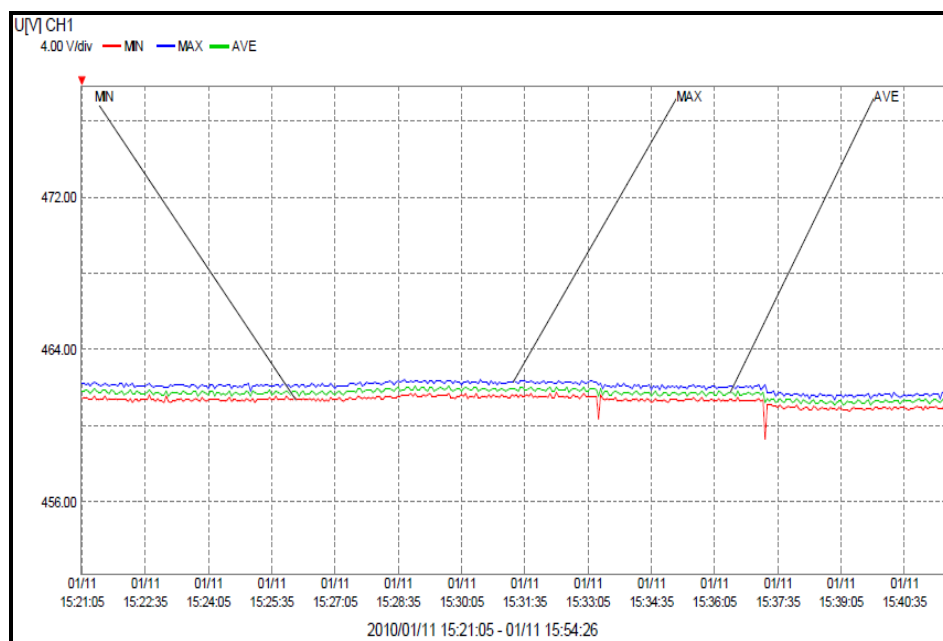


Figura 4.71 Limoncocha 9, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	459.27	462.36	2010/01/11
CH 2	458.85	462.79	2010/01/11
CH 3	458.83	462.6	2010/01/11

4.5.12.3. Variación de la corriente.

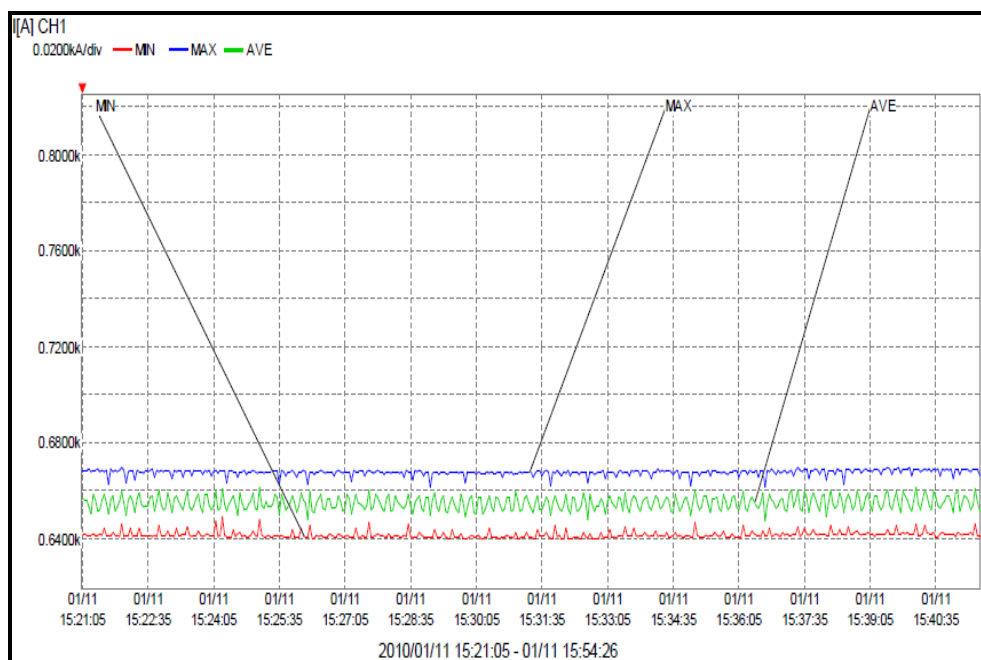


Figura 4.72 Limoncocha 9, variación de la corriente.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	639.7	669.7	2010/01/11
CH 2	630.2	660.5	2010/01/11
CH 3	646.2	676	2010/01/11

4.5.12.4. Variación de la frecuencia.

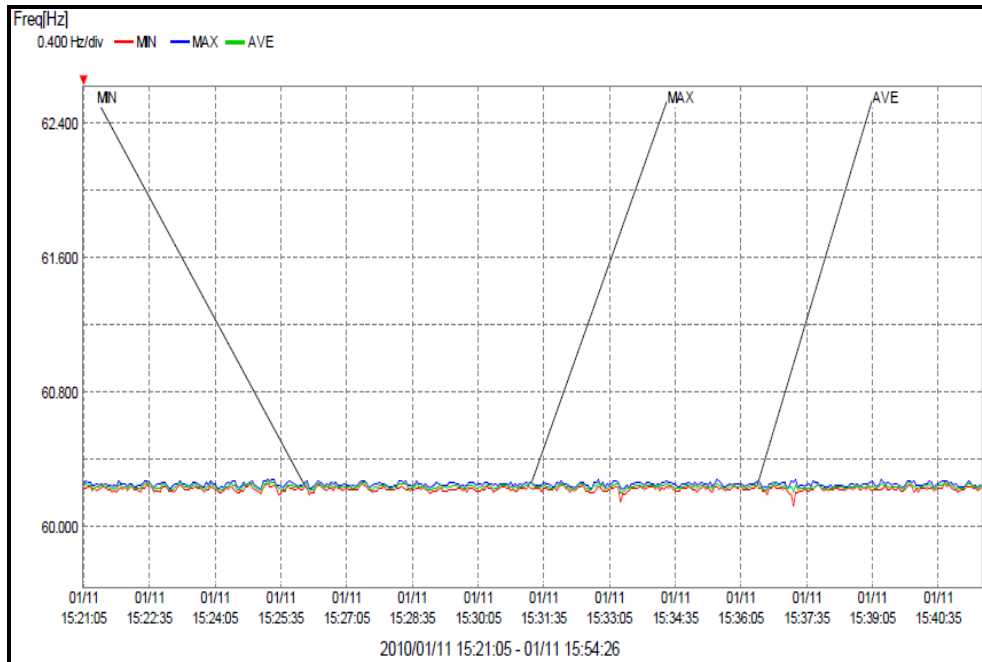


Figura 4.73 Limoncocha 9, variación de la frecuencia.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	60.117	60.284	2010/01/11

4.5.12.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	12.27 %	26.3 %	5 ta
2	12.43 %	27.14 %	5 ta
3	12.12 %	25.44 %	5 ta

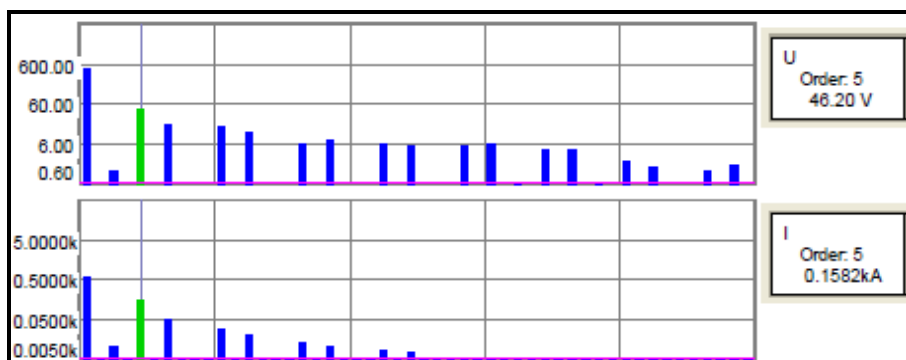


Figura 4.74 Limoncocha 9, espectro armónico.

4.5.13. LIMONCOCHA 10.

Hora inicio	Fecha	Hora Fin
9:06	2010/01/15	10:16

4.5.13.1. Forma de onda de voltaje y corriente.

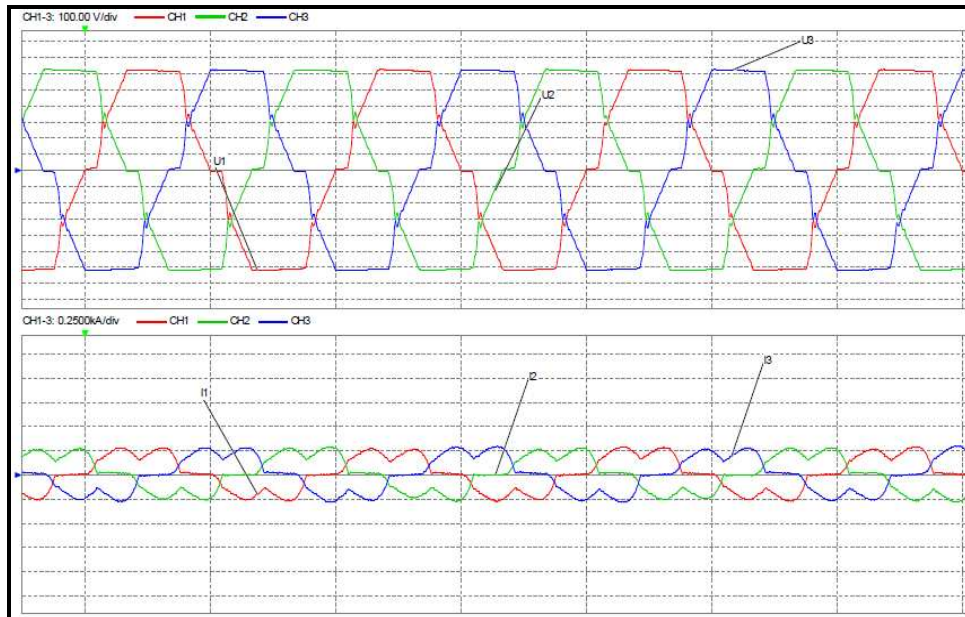


Figura 4.75 Limoncocha 10, forma de onda de voltaje y corriente.

4.5.13.2. Variación del voltaje.

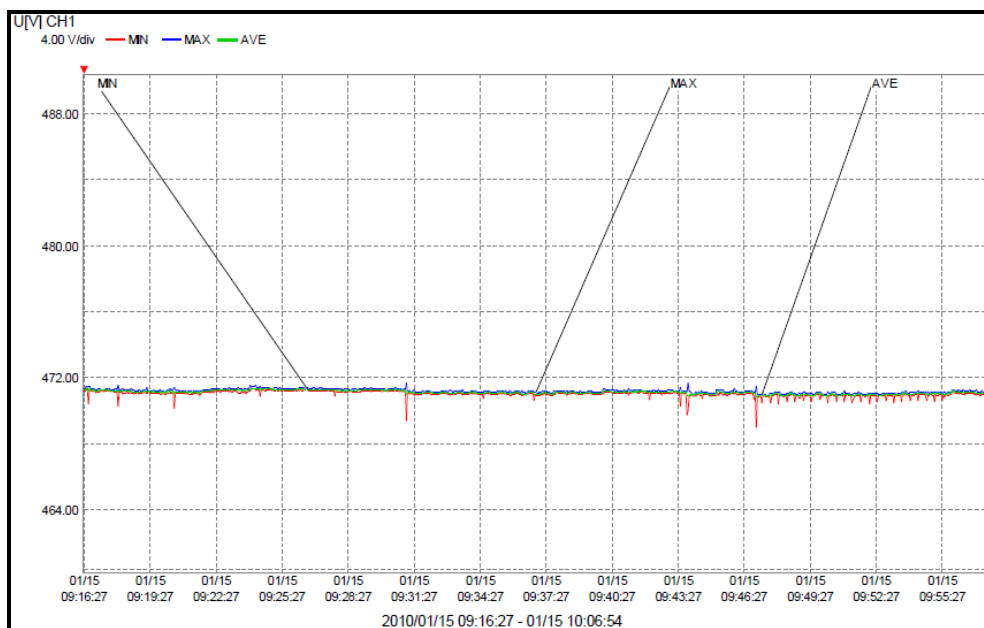


Figura 4.76 Limoncocha 10, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [V]	Máximo [V]	Fecha
CH 1	469.01	471.63	2010/01/15
CH 2	469.01	471.69	2010/01/15
CH 3	468.71	471.4	2010/01/15

4.5.13.3. Variación de la corriente.

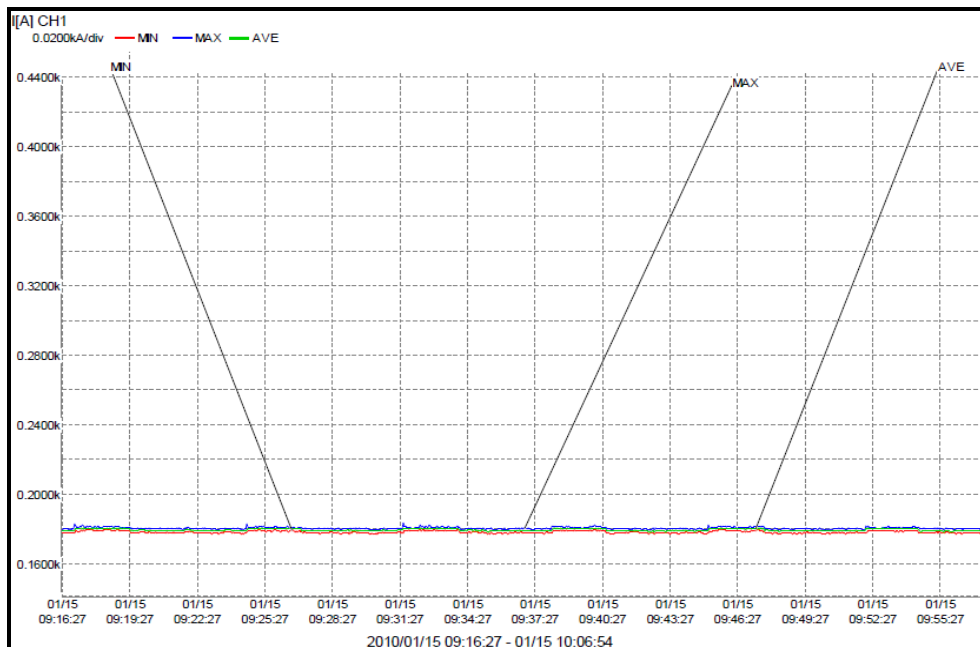


Figura 4.77 Limoncocha 10, variación del voltaje.

Fase	Mínimo [A]	Máximo [A]	Fecha
CH 1	177.2	182.7	2010/01/15
CH 2	172.6	176.8	2010/01/15
CH 3	181	185.1	2010/01/15

4.5.13.4. Variación de la frecuencia.

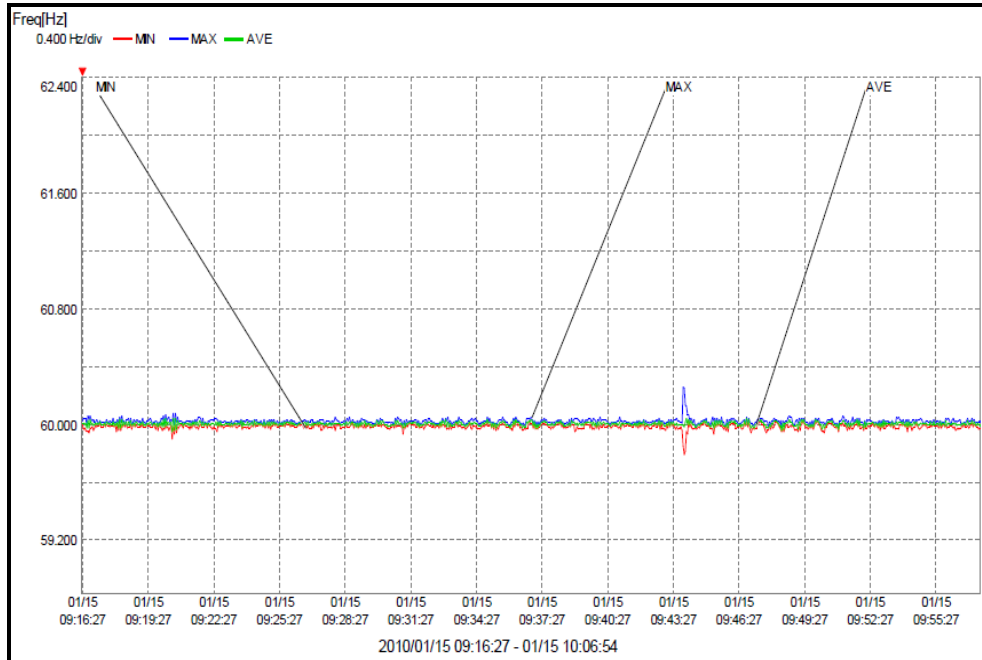


Figura 4.78 Limoncocha 10, variación de la corriente.

Frecuencia	Mínimo [Hz]	Máximo [Hz]	Fecha
	60.117	60.284	2010/01/11

4.5.13.5. Armónicos.

Fase	THD V [%]	THD I [%]	H mayor
1	12.27 %	28.53 %	5 ta
2	12.43 %	28.99 %	5 ta
3	12.12 %	28.14 %	5 ta

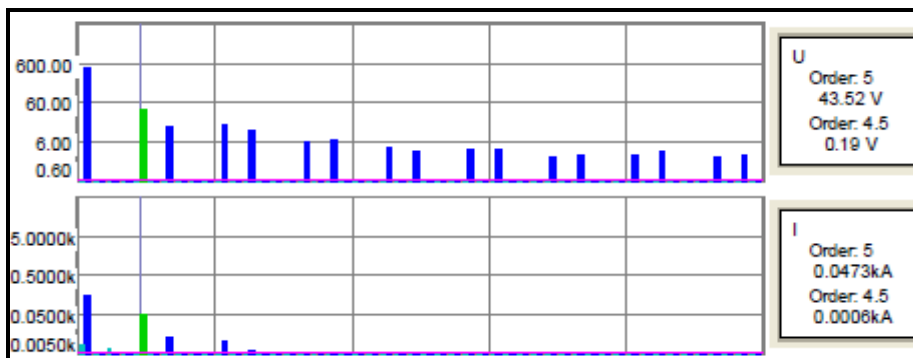


Figura 4.79 Limoncocha 10, espectro armónico.

4.6. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES.

Luego de revisar los datos obtenidos se evidencia un alto contenido de armónicos en el sistema eléctrico de Limoncocha. Esto se refleja en el calentamiento excesivo de motores y transformadores de todas las locaciones y se evidenciará más aún en el poco transcurso del tiempo cuando los equipos lleguen a funcionar ineficientemente o se averíen. Para evitar estos penosos resultados se propone la utilización de filtros, usar los respectivos transformadores defasadores para los VSDs de 12 pulsos, y utilizar transformadores de un correcto factor K, entre otras que se detallan más adelante.

Otra solución es la correspondiente a los compensadores activos, dispositivos electrónicos que aportan un gran nivel de funcionalidades. Una nueva solución de filtrado asocia la tecnología activa y pasiva: el filtro híbrido, tecnología que une las ventajas de las soluciones precedentes y ofrece óptimos resultados económicos.

La figura 4.12 indica la conexión de un filtro en la barra de generación, con esta conexión y un filtro adecuado, se disminuye la contaminación de armónicos para todo el sistema, también se puede conectar un filtro para cada carga pero el costo de implementación es elevado.

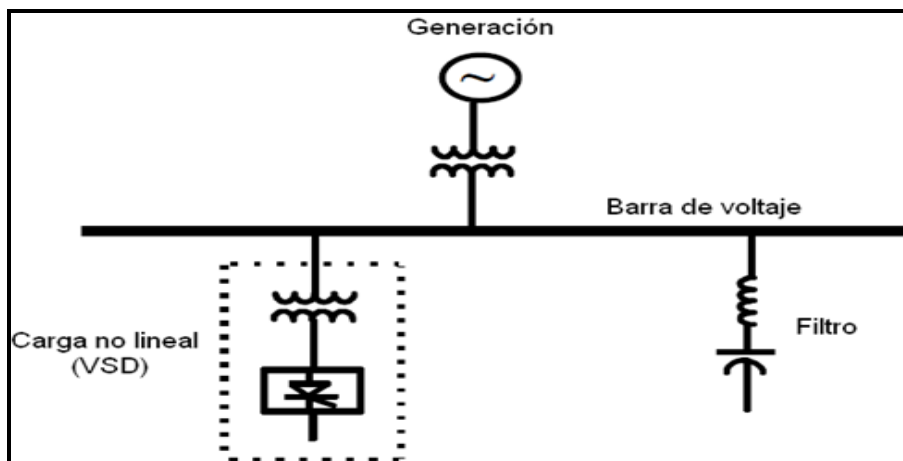


Figura 4.80 Posición del filtro para mejorar la calidad de energía aguas arriba del VSD.

Las corrientes armónicas que circulan en las redes generan una gran cantidad de perturbaciones con consecuencias perjudiciales: envejecimiento prematuro y destrucción de equipos, sobredimensionamiento de las instalaciones, disparos de las protecciones en forma intempestiva. Todas estas consecuencias tienen un impacto económico importante: costo de equipos, pérdidas adicionales de energía, y pérdida de productividad.

Los filtros son las mejores soluciones para disminuir el nivel de armónicos en las locaciones de Limoncocha debido a su costo y utilidad. A continuación se menciona los tipos de filtros que podrían implementarse.

4.6.1. FILTROS PASIVOS.

El principio de los filtros pasivos se ilustra en la siguiente figura:

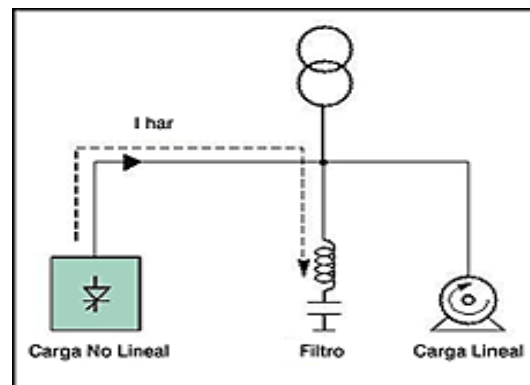


Figura 4.81 Esquema del filtro pasivo.

Los componentes principales del filtro pasivo son las inductancias y condensadores, conectados en una configuración de circuito resonante, sintonizados en el orden de las frecuencias armónicas a ser eliminadas. Estos dispositivos se conectan en paralelo con el generador de armónicos. Este circuito paralelo absorberá las corrientes armónicas, evitando su circulación en el circuito de alimentación. Un equipo puede incluir varios dispositivos para eliminar los armónicos según el orden correspondiente.

Las funcionalidades son satisfactorias en la mayoría de los casos, pero esta tecnología permite solo una reducción parcial de las corrientes armónicas. Además, la acción se limita solo a unos pocos órdenes (típicamente: 5, 7, y 11).

Las aplicaciones típicas para los filtros pasivos son las instalaciones de potencia media o de potencia alta (pocos cientos de kVA) lo que incluye variadores de velocidad, hornos de inducción, hornos de arco y rectificadores, y también aquellas que requieren corrección del factor de potencia.

4.6.2. COMPENSADORES ACTIVOS.

El principio de los compensadores activos se ilustra en la siguiente figura:

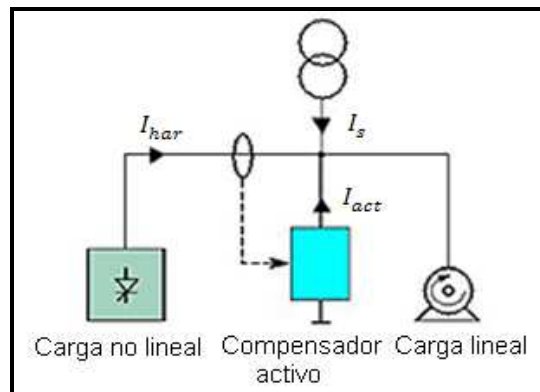


Figura 4.82 Esquema del filtro activo.

El compensador activo es un equipo de electrónica de potencia, con control digital. Los sensores de corriente se usan para la medición de la corriente de carga de la línea. El circuito de control digital calcula el contenido de la corriente armónica I_{har} de estas corrientes de carga y genera las señales del orden adecuado en la unidad de potencia. La unidad de potencia genera la corriente I_{act} en oposición a las corrientes armónicas de la carga.

La corriente resultante I_s tiene un contenido de corrientes armónicas muy reducida. Esta reducción puede estar en el orden de 10 a 20 dependiendo del tipo de carga, así como también si la corriente nominal del compensador es suficiente.

La compensación armónica cubre el rango desde el orden 2 al orden 25, o desde el orden 2 al orden 50 según el compensador usado, con posibilidades de compensar parcial o totalmente.

Las aplicaciones típicas de los compensadores activos están en instalaciones de potencia baja y potencia media (desde pocas decenas de kVA a pocos cientos de kVA), incluyendo equipos de computación, UPS, variadores de velocidad e iluminación fluorescente, entre otras.

4.6.3. FILTROS HÍBRIDOS.

Para extender el rango de aplicación de los compensadores activos, y mejorar las funcionalidades de los filtros pasivos, las nuevas técnicas permiten combinar ambas tecnologías dentro del mismo equipo.

El principio del filtro híbrido se ilustra en la siguiente figura:

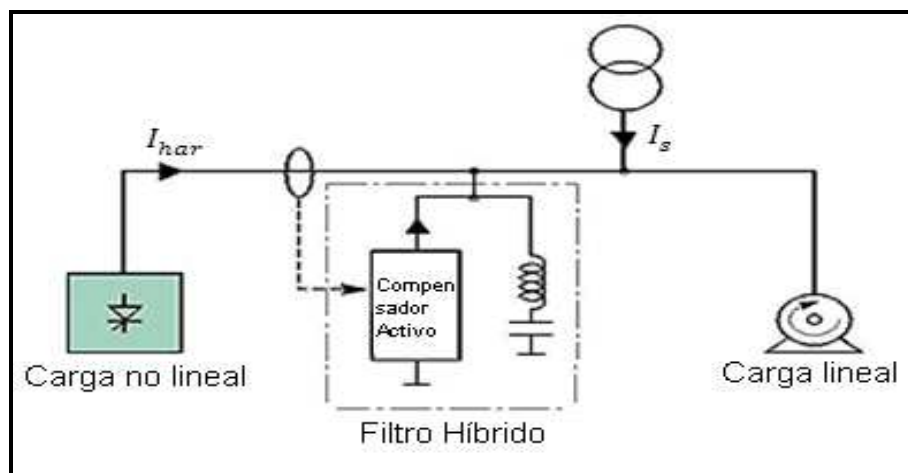


Figura 4.83 Esquema del filtro híbrido.

El filtro pasivo se sintoniza en la frecuencia armónica predominante, y entrega la energía reactiva requerida. El compensador activo se dedica al resto de los armónicos.

Las aplicaciones típicas de los filtros híbridos son las mismas aplicaciones de los filtros pasivos, es decir, para instalaciones de potencia media y potencia alta (pocos cientos de kVA), aplicaciones que demandan corrección del factor de potencia, además de la funcionalidad de eliminar el resto armónicos de orden diferente.

Con la reducción de la sección activa y la alimentación natural de la energía reactiva, la tecnología híbrida ofrece una solución óptima y económica para la mayoría de las instalaciones de alta potencia.

El filtro híbrido combina las ventajas de ambas tecnologías básicas: el filtro pasivo es una solución de bajo costo y el compensador activo es una solución de alta funcionalidad.

4.6.4. VARIADORES DE VELOCIDAD DE 12 PULSOS O MÁS.

Se recomienda la utilización de VSDs de 12 pulsos o más por dos cosas.

La primera es para obtener una forma de onda más definida y más cercana a la senoidal que es lo óptimo para el funcionamiento de los equipos.

La segunda es para eliminar los armónicos 3, 5, 7 y 9 que son los más dañinos, puesto que un VSD de 12 pulsos presenta armónicos de los siguientes órdenes.

$$h = np \pm 1 \quad (4.3)$$

$$h = 12 \pm 1$$

$$h = 11 \text{ y } 13$$

Esto quiere decir que para un VSD de 12 pulsos los armónicos 11 y 13 serán los más representativos y los de mayor conflicto. De esta manera los 3, 5, 7 y 9 se eliminarán en su mayoría.

La tabla 4.2 indica la reducción del nivel de armónicos en un VSD de 12 pulsos, esta tabla se la elaboró en un estudio de pruebas de la empresa Schlumberger con un VSD de 200 kVA conectado a un pozo.

I armónica	VSD Speedstar 6 pulsos	VSD Speedstar 12 pulsos
1	100 %	100 %
5	26.0 %	3.2 %
7	9.5 %	2.0 %
11	6.7 %	6.2 %
13	4.3 %	3.4 %
17	2.9 %	0.8 %
19	2.3 %	0.6 %
23	1.25 %	0.9 %
25	1.24 %	0.7 %

Tabla 4.2 Contenido de armónicos de un VSD de 6 pulsos y un VSD de 12 pulsos. (Cortesía de Schlumberger)

Se observa que no existe una eliminación total de los armónicos sino una disminución de los mismos, dicha disminución es considerable y está sujeta a las normas planteadas por la IEEE, ayuda notablemente al rendimiento de los equipos.

El anexo 4 muestra las ventajas de un VSD de 12 pulsos haciendo un estudio de comparación entre este y uno de 6 pulsos.

4.6.5. FILTROS ACA R992 SPEED STAR 2000.

El filtro ACA R992 de Schlumberger proporciona ondas de voltaje y corriente senoidales para sistemas con ESP (Electrical Submersible Pump) usando un VSD de tecnología PWM con cables de alimentación prolongados. Ubicado entre el paso del transformador y la caja de conexión de fondo de pozo. Como se muestra en la figura 4.84.

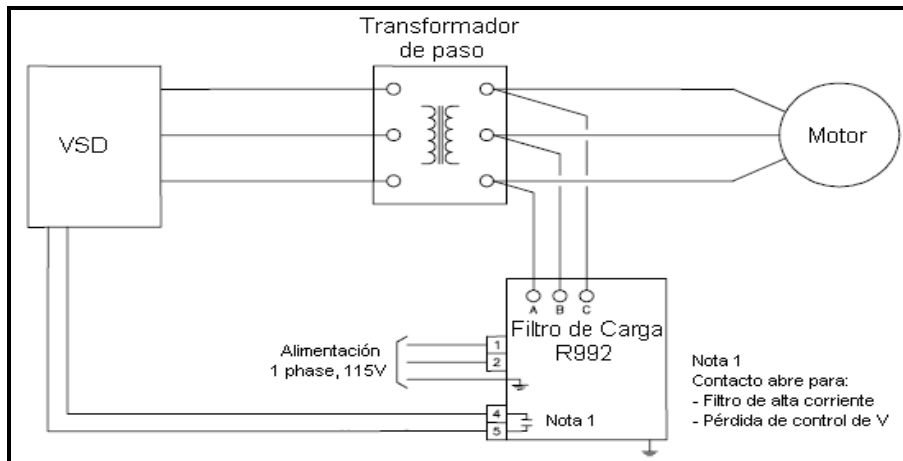


Figura 4.84 Conexión del filtro R992 (Cortesía de Schlumberger)

La capacitancia requerida para el filtro depende del transformador, la longitud del cable, impedancia del motor instalado, y todas las impedancias de los equipos que aporten al sistema.



Figura 4.85 Filtro ACA R992 conectado en Limoncocha. (Cortesía de Schlumberger).

Estos filtros están ya implementándose en todas las locaciones de Limoncocha para la mitigación de armónicos por parte de la empresa Schlumberger.

4.6.6. TRANSFORMADORES DESFASADORES (SHIFT TRANSFORMERS).

El transformador desfasador (PST por sus siglas en inglés Phase Shift Transformer) es fundamental en el funcionamiento de un VSD de 12 pulsos o más. Este transformador tiene la función principal de desfasar la onda de voltaje en 30° y así alimentar a dos VSDs, cada uno de 6 pulsos, que funcionando conjuntamente conforman dicho VSD de 12 pulsos.

El transformador desfasador es modelado de la siguiente manera:

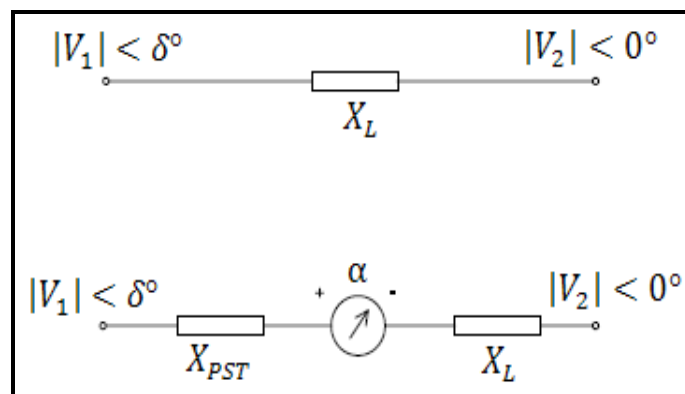


Figura 4.86 Modelo del transformador desfasador.

Donde:

$V_1 < \delta$: Magnitud y ángulo de voltaje inicial.

$V_2 < 0$: Magnitud y ángulo de voltaje final.

X_L : Reactancia de la línea de alimentación.

X_{PST} : Reactancia del transformador defasador.

α : Magnitud de ángulo adicional.

Se observa que el PST aumenta la impedancia de la línea que lo alimenta mediante la reactancia X_{PST} e incrementa el ángulo de fase δ mediante la adición de un ángulo α .

Por lo que la ecuación de la potencia quedaría determinada de la siguiente manera:

$$P = \frac{|V_1| |V_2|}{X_L + X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \quad (4.4)$$

Esta ecuación indica que la potencia activa P puede variar en función del ángulo δ , por lo que es posible transmitir mayor o menor potencia mediante la variación de dicho ángulo.

El PST al contar con su propia reactancia aumenta la impedancia del sistema, limitando de esta manera la circulación de ciertas corrientes armónicas, pero la potencia del mismo disminuye al ser inversamente proporcional a la impedancia. A continuación la figura 4.87 indica la variación de la potencia activa en función del ángulo para un PST y un transformador sin desfasador de voltaje.

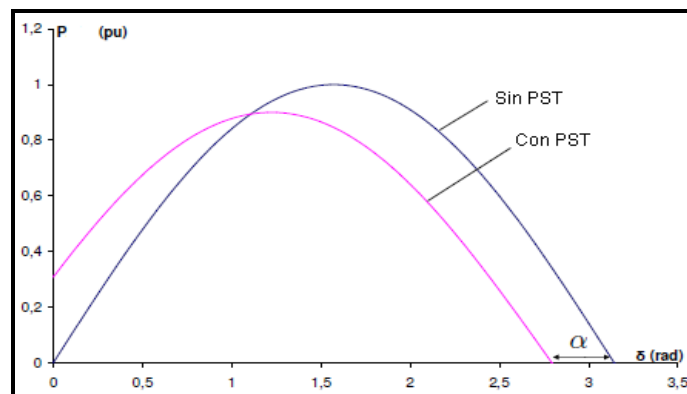


Figura 4.87 Potencia activa P en función del ángulo δ para transformadores con y sin desfasamiento de onda.

4.6.7. TRANSFORMADORES CON FACTOR K

El factor “ K ” se define como aquel valor numérico que representa los posibles efectos de calentamiento de una carga no lineal sobre el transformador. Inicialmente se consideró llamara este número “ C ”, de constante, pero se temió que hubiese confusión con la unidad grado centígrado y se optó por utilizar la letra “ K ”.

El factor K del transformador nos da una idea del nivel de aislamiento ó del tipo de aleación que tienen los conductores de los bobinados de el transformador, para tener el mínimo consumo de potencia armónica cuando se tienen corrientes

distorsionadas circulantes ó simplemente para soportar los voltajes y corrientes armónicas de la red.

La potencia equivalente de un transformador es la correspondiente a la sinusoidal que provoque las mismas pérdidas que las producidas con la corriente no sinusoidal aplicada. Esta potencia equivalente es igual a la potencia basada en el valor eficaz de la corriente no sinusoidal multiplicada por el factor “K” [1].

El factor K del transformador relacionado con la Calidad de Energía es definido en términos de los armónicos de corriente de acuerdo a las normas ANSI/IEEE C57.110-1986, como se indica en la ecuación 4.5.

$$K = \frac{\sum(I_h^2 * h^2)}{\sum I_h^2} \quad (4.5)$$

Donde:

I_h : Valor de corriente armónica [A]

h : Orden del armónico. (1, 3, 5, 7,..etc.)

Los transformadores tipo K presentan algunas peculiaridades constructivas respecto de los transformadores convencionales.

- ❖ Sobredimensionamiento de los conductores primarios para soportar las corrientes de circulación reflejadas de los armónicos “triples”
- ❖ Las secciones del neutro y sus conexiones se dimensionan para una corriente doble de la de línea.
- ❖ El núcleo está diseñado para una menor densidad de flujo. Se emplea menor cantidad de material, pero de mejor calidad, por ejemplo acero magnético M6.

- ❖ Las pérdidas por corrientes de Foucault en los conductores de los transformadores se pueden reducir empleando varios conductores paralelos aislados entre sí. A veces se utilizan conductores de tipo fleje y otras técnicas de interpolación y transposición de conductores.
- ❖ Tienen una capacidad térmica especial.

Es preferible utilizar un transformador con un adecuado factor K en lugar de un transformador convencional sobredimensionado. Un transformador K es equipado con un neutro del 200 % de la corriente nominal y es probable que sea más pequeño y menos caro. Un transformador sobre dimensionado requiere rangos más grandes de corrientes de cortocircuito para los breakers y además absorberá una mayor corriente en el arranque [12].

Este tipo de transformadores puede ser usado con equipos generadores de armónicos (cargas no lineales) para limitar los efectos en el sistema de baja tensión. Los transformadores tipo K serán de mucha utilidad para Petroamazonas al soportar daño por esfuerzo y sobrecalentamiento.

La tabla 4.3 indica los valores calculados de valor K que deberían tener los transformadores de las locaciones de Limoncocha.

Locación	Factor K antes del VSD	Factor K después del VSD
Estación Limoncocha	1.25	
Limoncocha 1	4.34	3.88
Limoncocha 2	4.49	1.09
Limoncocha 3	4.01	262.23
Limoncocha 4	4.32	672.7
Limoncocha 6	6.50	1327
Limoncocha 7	21.56	1.18
Limoncocha 8	3.79	1.15
Limoncocha 9	3.69	2.66
Limoncocha 10	4.09	47.15

Tabla 4.3 Factores K calculados para los transformadores en las locaciones.

Los valores de esta tabla se calcularon con los datos de los armónicos obtenidos con el equipo Hioki 3196, los cálculos se encuentran disponibles en el anexo 4

La tabla 4.4 muestra los factores k disponibles en el mercado para los transformadores

Factores K

$$K = 4$$

$$K = 9$$

$$K = 13$$

$$K = 20$$

$$K = 30$$

$$K = 40$$

Tabla 4.4 Factores K disponibles de los transformadores

Como se observa en la tabla 4.4 se indica que existen factores K con valores de hasta 40, y por lo que también se observa en la tabla 4.4 algunos valores de factores K calculados sobrepasan este valor. Esto se debe a la exagerada presencia de armónicos en la red y su alto valor.

4.6.8. CABLE ULTRASHIELD.

Recientes estudios de campo han descubierto que los bobinados de los motores que están controlados por VSDs sufren mayores daños en conducción y aislamientos que los motores que no están controlados por VSDs.

El aislamiento del motor es afectado por los cambios bruscos de voltaje, así como también por los sobre voltajes. Un voltaje con altos rangos de cambio tiende a ser distribuido en los bobinados del motor de manera desigual. Esta distribución desigual causa un significativo esfuerzo entre las vueltas de las bobinas, dando como resultado un deterioro en el aislamiento.

Los cambios bruscos de voltaje se deben a la alta frecuencia de conmutación de los elementos de electrónica de potencia que conforman el PWM (modulador por ancho de pulsos).

La calidad del barniz alarga la vida útil de los bobinados del motor. El barniz es un elemento esencial en los bobinados de los motores y máquinas eléctricas. El barniz ayuda a dar solidez e integridad a los bobinados, aislarlos y disipar el calor.

Las propiedades eléctricas del conductor ultra shield han sido comprobadas y actualmente usadas en equipos de última tecnología como:

- ❖ Inversores de giro de motores.
- ❖ Máquinas rotativas.
- ❖ Motores herméticos
- ❖ Motores c.d.
- ❖ Herramientas eléctricas.
- ❖ Generadores.
- ❖ Transformadores secos.

El cable ultra shield a pasado la prueba de trabajar con voltaje alterno de ondas senoidales y de ondas de voltaje alterno distorsionadas (no senoidales), además es capaz de trabajar en óptimas condiciones en altas temperaturas, estas condiciones se asemejan a las condiciones de trabajo de motores con presencia de armónicos en la red.

La figura 4.88 indica la relación entre la vida útil del cable ultra shield 18 AWG que fue sometido a 575 [V] en los bobinados de un motor a la salida de un inversor de voltaje.

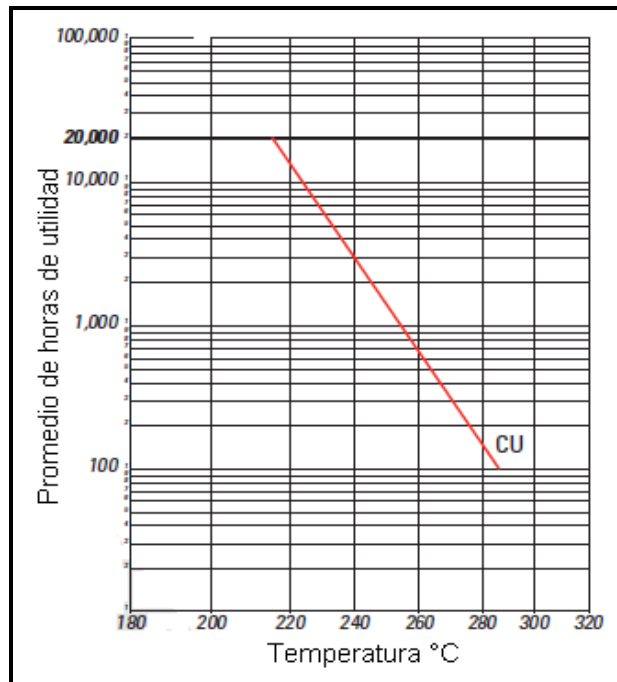


Figura 4.88 Vida útil del cable ultra shield [14].
Fuente: Essex Group, Product and application data sheet.

El anexo 6 indica datos específicos y detallados del cable ultra shield.

4.6.9. SOPORTE DEL THD DE LOS EQUIPOS.

Los equipos ante la inminente presencia de armónicos en la industria vienen reforzados o sobre dimensionados para ser capaces de soportar un cierto valor de THD. En base a esta propuesta de los fabricantes de equipos es necesario conocer los valores de THD que se maneja en la industria y en base a esto escoger el mejor equipo y evitar deterioro inmediato del mismo o evitar problemas con equipos consecuentes a este.

Este rango de soporte de THD nos indica la capacidad del equipo para soportar la distorsión armónica y trabajar en condiciones normales.

Es por esto que se recomienda que al adquirir un nuevo equipo se tome en cuenta el nivel de armónicos de la red y solicitar uno adecuado para adaptarlo sin problemas y trabaje normalmente garantizando su función y vida útil.

4.6.10. VSD “POWER FLEX 7000” CON TECNOLOGÍA SGCT FABRICADO POR ALLEN BRADLEY

Esta nueva tendencia de tecnología es aplicada en los últimos modelos de VSDs. SGCT (Simetric Gate Commutated Thyristor) o tiristor simétrico de puerta conmutada, se caracteriza por tener una alta frecuencia de conmutación y enfriamiento en ambas caras, estas características lo hacen un interruptor semiconductor de potencia ideal para aplicaciones de Variadores de Frecuencia de media tensión.

En este nuevo tiristor se optimiza un patrón de conmutación de la Modulación por Ancho de Pulsos (PWM) para los SGCT a fin de lograr la menor pérdida posible de conducción y conmutación, dando como resultado un diseño inversor eficiente y compacto.

La figura 4.89 muestra el símbolo electrónico del mencionado tiristor.

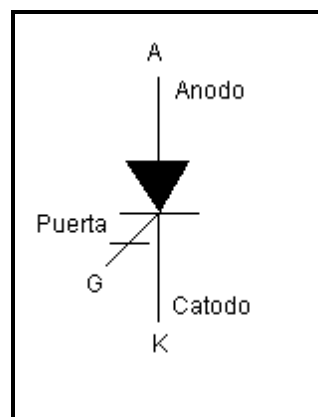


Figura 4.89 Símbolo del SGCT.

Las características únicas del SGCT hace que sea posible aplicarlo con eficacia en función de los costos este versátil componente tanto en el inversor PWM como en el rectificador PWM.

Existen diversos fabricantes que se inclinan por la aplicación de este tiristor, por lo que para futuras adquisiciones de VSDs se debe exigir este tipo de tecnología, este tiristor no ayuda a la eliminación de armónicos, sino que ayuda al VSD en

conjunto a optimizar su trabajo con menor consumo de energía para reducir la magnitud de dichos armónicos además brinda la posibilidad de ahorrar tiempo y dinero en la configuración, integración y mantenimiento del sistema.

Cabe mencionar y como ventaja adicional que los VSDs con tecnología SGCT son capaces de controlar motores hasta una distancia de 15 km desde el VSD hasta el motor [16].

El anexo 6 indica otras ventajas que ofrece un fabricante para los VSDs basados en esta tecnología.

4.6.11. SUPRESORES DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS (TVSS) [6].

Los supresores de transitorios TVSS (Transient Voltage Surge Suppressors) o dispositivos de protección contra sobretensiones transitorias (DPS) están conceptualizados por las normas internacionales como equipos destinados a proteger las instalaciones eléctricas contra aquellas sobretensiones (elevaciones de voltaje) generadas por fenómenos transitorios. Estos fenómenos inesperados traen consigo consecuencias dramáticas para las instalaciones y cargas sensibles. Por esta razón, su importancia dentro del sistema de protecciones.

Prácticamente todas las conmutaciones en las redes industriales, y particularmente las de elevada potencia, producen sobretensiones. La apertura de circuitos de protección o de mando compuestos por contactores y relés, en aplicaciones de transferencia de redes, bancos de condensadores, puesta en marcha de motores de gran potencia, encendido de soldadores y balastros. Estas maniobras generan sobretensiones de tipo oscilatorio, de alta frecuencia y con tiempos de amortiguación rápida.

Las sobretensiones exceden el valor nominal de aislamiento del material eléctrico lo que provoca la degradación del mismo. Esta degradación del aislamiento se traducirá en una reducción de la fiabilidad y, posiblemente, la destrucción del

equipo. Si la tensión se eleva en la zona de fiabilidad "deterioro", el MTBF se reducirá proporcionalmente. El resultado será que el equipo tendrá que ser reemplazado más a menudo, el aumento de costes de explotación netos. Si la tensión se eleva por encima de la zona de alteración a continuación, la destrucción inmediata se producirá, de nuevo aumento de los costes de explotación netos. La mayoría de estas sobretensiones se pueden reducir o incluso eliminar con la instalación de un TVSS.



Figura 4.90 TVSS conectado a un VSD de 815 kVA (Cortesía de Schlumberger).

4.6.12. FILTRO ACTIVO DE ARMÓNICOS “ACCUSINE” FABRICADO POR SCHNEIDER.

El filtro activo “ACCUSINE” es la primera opción que maneja Petroamazonas para la mitigación de armónicos y corrección del factor de potencia. Este filtro tiene la característica de poder conectarse a nivel de carga para reducir el contenido de armónicos en forma individual o a nivel de generación para corregir a nivel general y para todas las cargas.

El filtro AccuSine mide la corriente total de carga del sistema, determina la componente fundamental e inyecta a la red la componente armónica en fase opuesta, de tal forma que los armónicos quedan cancelados.

El sistema de corrección de potencia del filtro AccuSine inyecta corriente armónica y reactiva para limitar la distorsión y mejorar el factor de potencia total para el sistema de distribución de energía eléctrica en cualquier instalación. Es decir que no solo elimina los armónicos sino que también corrige el factor de potencia.

Limita los armónicos de corriente de orden 2do hasta 50avo para alcanzar un TDD <5% en cada punto de instalación. Los niveles armónicos para las órdenes armónicas individuales son de conformidad con los niveles respectivos establecidos en ANSI/IEEE 519-1992.

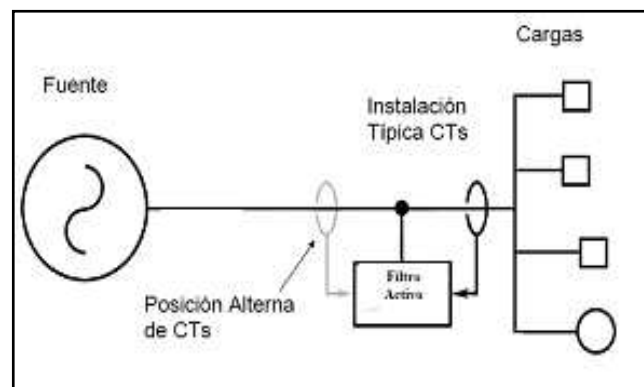


Figura 4.91 Ubicación del filtro Accusine

Este filtro supervisa la carga a través de transformadores de corriente montados en la línea de alimentación de la carga. Esta información es analizada por el sistema lógico para determinar la magnitud de la corrección a inyectar por el equipo en las líneas de AC.

El anexo 9 contiene los datos técnicos más importantes del filtro.

4.6.12.1. Cálculo de la capacidad del filtro ACCUSINE a implementarse en LIMONCOCHA para la corrección de armónicos.

De acuerdo al presente estudio se recomienda la utilización de este filtro y conectarlo a nivel de generación para que los disturbios se los corrija en toda la red, instalar un filtro por cada carga (pozo) resulta demasiado costoso.

Por esta razón se procede al cálculo de la capacidad del filtro. Para esto se ha tomado la referencia de los propios fabricantes del filtro quienes mencionan que la capacidad del filtro se obtiene de la siguiente expresión.

$$I_F = \sqrt{I_R^2 + I_H^2} \quad (4.6)$$

Donde

I_F : Capacidad de corriente del filtro

I_R : Corriente consumida por elementos reactivos.

I_H : Corriente consumida por los armónicos.

El cálculo de la corriente reactiva es importante ya que la principal cualidad del filtro ACCUSINE es reducir los niveles de armónicos hasta el valor definido por la norma IEEE 519-1992 y además mejorar el factor de potencia, lo que ayudará a reducir las pérdidas por reactivos.

Para obtener la corriente consumida por elementos reactivos se utiliza la siguiente expresión.

$$I_R = \frac{Q_C}{\sqrt{3} * V_{LL}} \quad (4.7)$$

Donde:

Q_C : Potencia reactiva del sistema.

V_{LL} : Voltaje línea a línea del sistema.

Para obtener la corriente armónica se utiliza la siguiente expresión.

$$I_H = \frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} \quad (4.8)$$

Donde:

THDI: Distorsión armónica total en el sistema.

Ejemplo de cálculo:

La capacidad del filtro dependerá de los valores de THDI y de Q_C obtenidos en cada una de las locaciones de, sin embargo la conexión del mismo será en uno de los switchgears ubicados en Limoncocha Central lugar donde se encuentra la planta de generación.

Como ejemplo de cálculo se ha tomado los valores de Limoncocha 1.

Locación	THDI [%]	I_{rms} [A]	Q_C [kVAr]	V_{LL} [V]
Limoncocha 1	26.54	200.1	51.57	470.51

$$I_R = \frac{Q_C}{\sqrt{3} * V_{LL}} = \frac{51.57 \text{ kVAr}}{\sqrt{3} * 470.51 \text{ V}} = 63.28 \text{ [A]}$$

$$I_H = \frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} = \frac{200.1}{\sqrt{\frac{1}{0.2654^2} + 1}} = 41.9 \text{ [A]}$$

Por lo tanto el aporte para la capacidad del filtro por parte de Limoncocha 1 será:

$$I_F = \sqrt{I_R^2 + I_H^2} = \sqrt{63.28^2 + 41.9^2} = 76 \text{ [A]}$$

La capacidad del filtro “Accusine” a implementarse en la estación Limoncocha a nivel de generación es de **1449.3 [A]**.

Debido a que el filtro tiene capacidad máxima de 300 A, se debe acoplar 5 filtros en paralelo para que aumente su capacidad y pueda reducir los armónicos y el factor de potencia en todas las locaciones de Limoncocha.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS ECONÓMICO DE UNA BUENA CALIDAD DE ENERGÍA.

A pesar de no existir ningún tipo de penalización por inyectar armónicos a la red éstos producen pérdidas en receptores y líneas, y estas pérdidas son kWh que se consumen innecesariamente.

En los transformadores se producen pérdidas en vacío y en carga, siendo estas últimas las afectadas por la presencia de armónicos en la corriente del secundario y comprenden tanto pérdidas en los devanados como en el hierro (núcleo, cuba y otras partes de acero).

En los motores también se producen pérdidas similares a parte de vibraciones mecánicas.

A continuación se menciona las pérdidas más significativas que se presentan en Petroamazonas debido a la mala calidad de energía.

- ❖ Pérdidas energéticas: Los armónicos producen pérdidas adicionales (efecto Joule) en los conductores y en los equipos.
- ❖ Sobredimensionamiento de los equipos: La disminución de fuentes de energía (generadores, transformadores) implica que se deben sobredimensionar. Los conductores deben dimensionarse teniendo en cuenta la circulación de intensidades armónicas. Además, debido al efecto pelicular, la resistencia de estos conductores aumenta con la frecuencia. Para evitar pérdidas excesivas debido al efecto Joule, es necesario sobredimensionar los conductores.
- ❖ Reducción de la vida útil de los equipos: Cuando el nivel de distorsión en la tensión de alimentación se aproxima al 10%, la duración de la vida útil del equipo se reduce considerablemente.

5.1. BENEFICIO ECONÓMICO DE CONTAR CON UNA BUENA CALIDAD DE ENERGÍA.

El contar con una buena calidad de energía brinda confiabilidad y estabilidad al sistema eléctrico. Para el presente análisis se toma en consideración los principales eventos que ocurren en sistemas con mala calidad de energía. Eventos que al corregirse ahorrarán cifras significantes de dinero a Petroamazonas.

Petroamazonas no ha llevado un registro de las paradas intempestivas de producción producto de la mala calidad de energía, pero de acuerdo a los resultados obtenidos se pueden considerar dos potenciales eventos que pueden ocurrir.

- ❖ Reducción de la vida útil de transformadores de la subestación y motores del sistema de bombeo debido al calentamiento excesivo los bobinados pueden sufrir averías irreparables como pérdida del aislamiento o fallas por sobre temperatura.
- ❖ En caso de falla en el sistema eléctrico las protecciones eléctricas actuarán incorrectamente.

En base a estas dos potenciales causas se considera que el tiempo estimado en reponer el paro intempestivo y reactivar la producción es de 2 horas y la ocurrencia de estas fallas es 2 veces al año. Al parecer poco tiempo y poca ocurrencia, pero en la industria petrolera este corto tiempo tiene grandes pérdidas como se puede apreciar en la tabla....

LOCACION	Producción [barriles/día]	Costo [\$/barril]	Pérdidas [\$/2 horas]	# de paradas al año	Pérdidas [\$/año]
Estación Limoncocha	13,494	52.64	59,193.68	2	118,387.36

Tabla 5.1 Ahorro económico por una buena calidad de energía.

5.2. BENEFICIO ECONÓMICO POR LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

Es ya reconocido que tener un bajo factor de potencia presenta falencias en el consumo de potencia y energía ya que el sistema consume más de lo que necesita. Al corregir el factor de potencia se reduce la presencia de reactivos en la red y se disminuye la corriente rms.

Para Petroamazonas es necesario corregir el factor de potencia ya que no solamente se mejoraría el consumo de potencia y corriente rms, sino que también se reducirá la potencia y energía en generación. Esta parte es de suma importancia para Petroamazonas ya que el consumo de diesel y gas es elevado y los costos de adquisición de estos combustibles también lo es.

El análisis de pérdidas por bajo factor de potencia (P_{fp}) se lo hace a nivel de generación ya que es ahí donde se pretende mejorar la calidad de energía.

Para esto se ha tomado de referencia los valores de f.p., corriente y potencia obtenidos con el analizador de energía Hioki.

Las pérdidas se obtienen con la corriente resultante de la diferencia entre la corriente con mal f.p. (I_{rms1}) y la corriente con buen factor de potencia (I_{rms2}). Esta corriente elevada al cuadrado y multiplicada por la resistencia del sistema eléctrico de la Estación Limoncocha nos da como resultado las pérdidas de potencia, energía y dinero.

$$P_{fp} = (I_{rms1} - I_{rms2})^2 * R \quad (5.1)$$

De acuerdo a la información del operador de la Estación Limoncocha, esta resistencia es aproximadamente 0.57 [Ω].

BENEFICIO ECONÓMICO POR LA CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA.

LOCACION	f.p. actual			f.p. recomendado			Perdidas [kW]	kWh/año	Costo \$/kWh	Costo anual (usd)
	f.p.	P [kW]	Irms [A]	f.p.	P [kW]	Irms [A]				
SWITCHGEAR A	0.89	772.76	1045.6	0.98	772.76	949.58	7.28	63,810.95	0.0606	3,866.94
SWITCHGEAR B	0.9	658.65	881.3	0.98	658.65	809.36	4.09	35,818.43	0.0606	2,170.60
SWITCHGEAR C	0.9	1,038.98	1390.2	0.98	1,038.98	1,276.71	10.17	89,127.88	0.0606	5,401.15
TOTAL		2,470.39			2,470.39		21.55	188,757.26		11,438.69

Tabla 5.2 Costo de pérdidas por bajo factor de potencia.

Total costo de pérdidas por bajo factor de potencia: 11,438.69 \$/año

Nota: Cabe mencionar que con el mejoramiento del factor de potencia cambian la corriente, la potencia reactiva y la potencia aparente, mientras que el voltaje y la potencia activa permanecen constantes. Ver anexo 9.

5.3. CALCULO DE PÉRDIDAS POR ARMÓNICOS EN LA RED.

Los armónicos al presentarse también como corrientes producen pérdidas de potencia y energía en la red eléctrica debido a las impedancias del mismo.

Para el cálculo de las pérdidas por contenido de armónicos se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros.

PARÁMETRO	MAGNITUD
Magnitud de la corriente rms I_{rms}	Depende de la locación
Valor del THDI.	Depende de la locación
Magnitud de la corriente armónica I_H	Depende de la locación
Calibre del conductor de línea de distribución (L/D). ^U	4/0
Resistencia del conductor 4/0 ^U	0.2689 [Ω /km]
Constante k para la resistencia de bobinados de los motores y cables de conexión ^U	0.58 [Ω]

Tabla 5.3 Parámetros para cálculo de pérdidas por armónicos.

Las magnitudes de la corriente rms y el THDI se obtuvieron en el capítulo 4 con la ayuda del analizador de energía Hioki.

La magnitud de la corriente armónica I_H se obtiene de la siguiente ecuación.

$$I_H = \frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} \quad (5.2)$$

Luego las pérdidas por armónicos se las obtiene de la siguiente ecuación.

$$P_H = I_H^2 * R \quad (5.3)$$

Ejemplo de cálculo.

Locación	THDI [%]	I_f [A]	Longitud de la L/D [km]
Limoncocha 1	26.54	191.16	4

$$I_H = \frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{1}{THDI^2} + 1}} = \frac{191.16 [A]}{\sqrt{\frac{1}{0.2654^2} + 1}} = 40.1 [A]$$

$$P_H = I_H^2 * R = 40.1^2 [A] * (4 * 0.2689 [\Omega] + 0.58 [\Omega]) = 2661.31 [W]$$

La siguiente tabla indica las pérdidas de potencia, energía y dinero por causa de los armónicos en cada una de las locaciones de Limoncocha.

En la misma tabla se ha considerado la longitud aproximada de conductor eléctrico que se ha utilizado para la alimentación de las locaciones desde la sub estación de Limoncocha.

Los valores de los armónicos presentes en la red a la salida del VSD no se detallan en el presente estudio ya que el objetivo es mejorar la calidad desde la generación hasta los VSDs, pero los valores generales se adjuntan en el anexo 8.

5.3.1. PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR ARMÓNICOS EN LA RED DE LIMONCOCHA ANTES DEL VSD.

LOCACION	THDI [%]	If [A]	IH [A]	LONGITUD L/D [km]	Pérdidas [kW]	kWh/año	Costo \$/kWh	Costo Total (usd/año)
LIMONCOCHA 1	26.54	191.1 6	40.1	4	2.66	23,321.06	0.0606	1,413.26
LIMONCOCHA 2	23.97	536.9	103. 8	1	9.15	80,122.66	0.0606	4,855.43
LIMONCOCHA 3	27.76	224.9 1	48.9	2.5	2.99	26,230.88	0.0606	1,589.59
LIMONCOCHA 4	29.73	324.5 6	74.4	3	7.68	67,240.74	0.0606	4,074.79
LIMONCOCHA 6	37.71	95.65	26	2	0.76	6,619.34	0.0606	401.13
LIMONCOCHA 7	65.24	202.6 3	80	2	7.15	62,668.34	0.0606	3,797.70
LIMONCOCHA 8	23.68	432.8	82.9	0.5	4.91	43,011.54	0.0606	2,606.50
LIMONCOCHA 9	26.3	669.7	139. 5	1	16.52	144,713.5 0	0.0606	8,769.64
LIMONCOCHA 10	28.53	182.7	40.6	1.5	1.62	14,199.21	0.0606	860.47
TOTAL					53.44	468,127.2		28,368.51

Tabla 5.4 Pérdidas de potencia, energía y dinero por armónicos antes del VSD.

5.3.2. PÉRDIDAS ECONÓMICAS POR ARMÓNICOS EN LA RED DESPUÉS DEL VSD.

LOCACION	THDI [%]	IF [A]	IH [A]	Pérdidas [kW]	kWh/año	Costo \$/kWH	Costo Total [usd/año]
LIMONCOCHA 1	63.15	296.76	114.87	1.77	15,487.89	0.0606	938.57
LIMONCOCHA 2	5.98	509.02	28.72	0.11	968.35	0.0606	58.68
LIMONCOCHA 3	39.73	405.34	115.25	1.78	15,592.14	0.0606	944.88
LIMONCOCHA 4	67.57	333.63	134.53	2.43	21,244.89	0.0606	1,287.44
LIMONCOCHA 6	88.43	274.1	128.63	2.22	19,423.44	0.0606	1,177.06
LIMONCOCHA 7	6.09	415.1	23.83	0.08	666.50	0.0606	40.39
LIMONCOCHA 8	24.97	518.2	103.54	1.44	12,584.31	0.0606	762.61
LIMONCOCHA 9	8.67	737.6	58.85	0.46	4,065.08	0.0606	246.34
LIMONCOCHA 10	16.47	343.12	48.52	0.32	2,763.50	0.0606	167.47
TOTAL				10.59	92,796.09		5,623.44

Tabla 5.5 Pérdidas de potencia, energía y dinero por armónicos en la red a la salida del VSD

5.4.COSTOS TOTALES.

Los costos totales se obtiene de las pérdidas por armónicos antes y después del VSD, de la buena calidad de energía y de la corrección del factor de potencia.

La tabla 5.6 resume los valores obtenidos en cada uno de los análisis económicos.

Análisis económico	Valor [\$/año]
Beneficio por buena Calidad de energía	118,387.36
Pérdidas por armónicos antes del VSD	11,438.69
Pérdidas por armónicos después del VSD	28,368.51
Beneficio por corregir el factor de potencia	5,623.44
TOTAL	163,818.5

Tabla 5.6 Beneficio económico producto de mejorar la calidad de energía y corregir el factor de potencia en Limoncocha.

El valor obtenido es considerable desde todo punto de vista y se debe mencionar que en el presente estudio económico no se ha considerado el ahorro por disminución de consumo de combustible producto de mejorar el factor de potencia y disminuir la corriente rms.

6. CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

6.1.RECOMENDACIONES

- ❖ Los fabricantes de equipos como transformadores, generadores, tableros de control, etc. han especificado lugares de conexión del cable de puesta a tierra en sus respectivos equipos por lo que se debe respetar dichos lugares y realizar las conexiones únicamente en esos puntos.
- ❖ El conductor de tierra deberá conectarse directamente en la pieza de trabajo con una abrazadera o terminal con perno, y la conexión deberá estar limpia y segura para eliminar chispas y el mal contacto entre ellos.
- ❖ Los elementos como tubería de trabajo con líquido o gas inflamable, cadenas o cables de alambre y andamios no deberán ser usados como conductores a tierra ya que de existir una descarga esta puede caer al personal que esté en contacto.
- ❖ En todos los transformadores y generadores de Limoncocha se debe limpiar los puntos de conexión entre el conductor a tierra y el equipo, ya que estos están a la intemperie y expuestos a polvo, sol y agua factores que aumentan la resistencia de puesta a tierra.
- ❖ Se recomienda utilizar el cable ultra shield para que los bobinados de los motores y generadores (nuevos y rebobinados) que operan dentro del campo de Petroamazonas eviten el recalentamiento excesivo que daña el aislamiento y pueda provocar cortocircuitos entre espiras o fallas a tierra y aumentar la longevidad de los motores y generadores.

- ❖ Para los transformadores que alimentan a cargas no lineales se recomienda no cargarlos hasta su potencia nominal o utilizar transformadores con el conveniente factor k , para no saturarlos.
- ❖ El controlar los disturbios eléctricos luego de los VSDs es responsabilidad de la empresa Schlumberger puesto que ellos alquilan sus equipos para alimentar la bomba electrosumergible que extrae el petróleo, por lo que se recomienda solicitar que corrijan los disturbios en esa parte de la red y evitar de esta manera que afecte a todo el sistema.
- ❖ Es recomendable que se realice una inspección de los equipos electrónicos sensibles a los armónicos, pues llegará un momento en que se averíen por esta causa pudiendo dejar sin funcionar un equipo o en el peor de los casos una locación lo que repercute en pérdidas económicas.
- ❖ Se recomienda abastecerse de equipos electrónicos con un alto valor de soporte de THD para que trabajen de mejor manera, aumente su vida útil, brinde confiabilidad y continuidad de servicio en el sistema.
- ❖ Se recomienda implementar variadores de velocidad de 12 pulsos o más o a su vez filtros para evitar fallas intempestivas en el sistema, para la industria petrolera una hora de para significa grandes pérdidas de dinero. Aparte de esto la onda de voltaje se regenera de mejor manera evitando que los equipos trabajen de manera anormal en condiciones normales.
- ❖ Se recomienda realizar el mantenimiento de las conexiones de puesta a tierra por lo menos cada año, ya que se encontraron algunas conexiones flojas y otras aisladas con pintura lo que no permite tener un buen contacto y tener una baja impedancia en el SPT.



Figura 6.6 Estación Limoncocha XFML 02, conexión de puesta a tierra aislado con pintura.



Figura 6.7 Estación Limoncocha XFML 05, conexión de puesta a tierra aislado con pintura.

- ❖ Se recomienda no anular la tercera pata de la toma de tierra, utilizando adaptadores, esto haría que ese artefacto quede sin protección a tierra corriendo el riesgo de electrocución.
- ❖ Cuando dos o más máquinas de soldadura estén trabajando en la misma estructura o cuando se esté utilizando otro equipo eléctrico, la conexión a tierra deberá ser supervisada por el Supervisor del área eléctrica o su delegado.
- ❖ El cable de tierra de los equipos debe estar conectado a la malla de puesta a tierra para evacuar las corrientes de fuga o desbalance, esta disposición no se cumple en las locaciones Limoncocha 1 y Limoncocha 2, como se muestra en las siguientes figuras. Poniendo en riesgo la descarga en el personal o los equipos.



Figura 6.1 *Limoncocha 1, conductor de puesta a tierra no conectado.*



Figura 6.2 *Limoncocha 2, conductor de puesta a tierra desconectado*

- ❖ Los conductores de puesta a tierra aparte de estar conectado a la malla deben estar enterrados por lo menos 30 cm para evitar el contacto directo con las personas y equipos. En las locaciones Limoncocha 1, Limoncocha 3 y Limoncocha 10, los cables de conexión a tierra se encuentran sobre la superficie del terreno, por lo que se recomienda enterrarlos.



Figura 6.3 *Limoncocha 1, conductor de puesta a tierra no enterrado.*



Figura 6.4 *Limoncocha 3, conductor de puesta a tierra no enterrado.*



Figura 6.5 *Limoncocha 10, conductor de puesta a tierra no enterrado.*

6.2.CONCLUSIONES.

- ❖ Se observa en las tablas del capítulo 3 que los valores del sistema de puesta a tierra son bastante bajos pero un estudio más avanzados realizado el 29 de julio del 2005 por la empresa americana EATON denominado “AUDITORÍA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN LOS EQUIPOS DE SUPERFICIE DE LA LOCACIÓN LAGUNA” [8] realizó el chequeo y medición del sistema de puesta a tierra en todos los equipos de superficie de la mencionada locación. El sistema de puesta a tierra de esta locación es similar al de Limoncocha, ya que ambas fueron diseñadas bajo las normas y exigencias de Petroamazonas que se mencionaron en el literal 3.2. En el informe del mismo estudio se menciona para los valores de resistencia de puesta a tierra de los generadores, VSDs, etc. lo siguiente: “Los valores de resistencia de puesta a tierra medidos con el equipo Extech se indican en el formato adjunto, se consideran aceptables y son menores a dos ohmios.” Por lo que los valores medidos en Limoncocha se respaldan y coinciden con lo mencionado por EATON.
- ❖ En el caso de presentarse un corto circuito en los generadores Waukesha que funcionan a gas en la subestación de Limoncocha las tuberías metálicas que llevan el gas hacia el generador pueden quedar electrificadas. Un sistema a tierra eficiente disminuirá la fuga de corrientes y los posibles arcos que pueden aparecer.
- ❖ Los bajos valores de resistencia de puesta a tierra se deben a un buen procedimiento, el gráfico siguiente indica la forma en que se realiza los SPTs mediante canales subterráneos con agua la cual sirve para refrigerar los conductores y bajar el valor de resistencia de la tierra.



Figura 3.16 *Cableado de potencia y del SPT de Limoncocha 2.*

- ❖ La distorsión de la onda de voltaje y corriente se ve bastante afectada por todos los VSDs que se tiene en las locaciones de Limoncocha, estos VSDs inyectan armónicos y estos se reflejan en todos los puntos de la red, afectando no solamente a las bombas electrosumergibles sino también a servicios auxiliares como equipos de oficina, sistemas de monitores, control y protección.
- ❖ Los límites de distorsión especificados por IEEE 519 se mencionan para condiciones "normales de operación" los cuales duran períodos mayores a una hora. Para períodos más cortos, durante arranques o condiciones inusitadas, los límites pueden ser excedidos hasta un 50%.
- ❖ Se sabe que cuando un transformador trifásico trabaja en vacío o subcargado las pérdidas alcanzan el 55-65%, y cuando el transformador trabaja sobrecargado las pérdidas alcanzan del 8% al 12 %, por lo tanto conviene desde el punto de vista de operación del equipo mantenerlo trabajando sobrecargado (hasta 120%). Pero para el actual sistema de Limoncocha no se puede acoger esta recomendación ya que al tener presencia de armónicos en la red estos sobrecargan demasiado al transformador (hasta 170 % con un

THD del 70%) cuando este se encuentre trabajando a potencia nominal. Por lo que es recomendable siempre tenerlo entre el 70% y 80 % de su potencia nominal.

- ❖ A pesar de que un rectificador de 12 pulsos teóricamente elimina alrededor del 90% del 3er, al 9no armónico dependiendo de los desbalances del sistema, se puede ver que estos armónicos todavía están presentes en la red y en un porcentaje bastante alto. Esto se debe a que los demás VSDs de 6 pulsos y los VSDs de 12 pulsos que trabajan sin su respectivo transformador desfasador siguen contaminando el sistema por lo que una solución es tener todos los VSDs de las locaciones Limoncocha con su respectivo filtro ACA R992 de Schlumberger o cambiarlos por otros VSDs de 12 pulsos o más.
- ❖ Se observa en las figuras de variación de voltaje, corriente y frecuencia que en condiciones normales de operación del sistema, estas variaciones no sufren mayor cambio, es por esto que se mencionó que los disturbios eléctricos como armónicos, sags, swells, etc. permanecerán constantes en la red y los que se detectaron en el tiempo de medición de 2 horas serán los mismos que los que se encuentren si se monitoreara el sistema por semanas o meses. Esta estabilidad del sistema se debe a que la red es independiente del SNI y las cargas no son aleatorias ni impredecibles como si lo son en el SNI.
- ❖ Por más que se use VSDs de 12 pulsos o más, en la red de Limoncocha siempre existirán armónicos, en el literal 4.3 se menciona a los transformadores, motores, iluminación fluorescente, etc. como fuentes tradicionales cuyos armónicos inyectados se eliminarán únicamente con filtros.
- ❖ En la figura 4.27 se observa que la variación de corriente baja hasta cero en un determinado tiempo, esto se debió a que por problemas técnicos se tuvo que parar un pozo, el mismo que se alimentaba desde este switchgear por lo

que la carga bajó a cero restableciéndose luego de un pequeño intervalo de tiempo sin ocasionar daños ni disturbios importantes en la red.

- ❖ Se verificó que el rango de la variación de la frecuencia en las locaciones de Limoncocha es despreciable y esto es importante para los equipos auxiliares como computadores, relés, plc's, etc. trabajan a 60 Hz y la variación de esta dañaría a los equipos. Se observa en la figura 4.18 que la frecuencia varía de 59.992 hasta 60.420 lo que equivale a al 0.713 % de la variación de la frecuencia nominal. Permitiendo trabajar el resto de equipos en condiciones normales.
- ❖ La reducción de armónicos ayudará notablemente a la reducción de sobrecalentamiento de motores y transformadores, esto se vuelve una ventaja técnica y económica puesto que los transformadores en las locaciones Limoncocha 6 y Limoncocha 9 al estar sobrecalentados necesitan ventilación forzada.
- ❖ Es importante y una muy buena elección la estandarización de equipos, ya que esta presenta grandes ventajas, como por ejemplo, la interconexión de varias redes de distribución para apoyarse mutuamente para abarcar mayor potencia y áreas de servicio, es el caso de Limoncocha 4, se aumentó la carga con dos pozos más pero en el Switchgear ya no hubo espacio para acoplar el respectivo disyuntor por lo que se le adaptó una celda proveniente de otra locación, la cual obviamente era de la misma marca comercial.
- ❖ En el presente estudio se ha brindado soluciones técnicas y económicas que ayudarán indudablemente a mejorar la calidad de energía y con esto aminorar daños en equipos, optimizar el consumo de energía y tener un gran beneficio del costo de esta implementación.

- ❖ Los valores del THDV varían entre el 20% y 30 % del valor característico en todas las locaciones, lo que hace notar que los armónicos provocados por los VSDs si se están reflejando en todo el sistema.
- ❖ En la figura 4.15 se observa la forma de onda de voltaje y corriente de uno de los generadores de la estación Limoncocha, en esta se nota que la distorsión de ambas ondas no es tan pronunciada como si lo son en el resto de locaciones.
- ❖ El tiempo de toma de datos en la medición de armónicos es suficiente ya que la carga de la red no es aleatoria, y no estáá conectada al SNI, sino que es planificada y no existen cambios bruscos de cargas no lineales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA

LIBROS.

- [1] RIVERA Pablo. Estudio de Armónicos y Calidad de Energía Eléctrica, Departamento de Automatización y Control. E.P.N. 2008
- [2] AYORA Paúl. Sistemas de Puesta a Tierra. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 2005.
- [3] SALAZAR Gabriel. Curso de Calidad de Energía. Facultad de Ingeniería Eléctrica. 2009.
- [4] ANSI/IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [5] ENCICLOPEDIA CEAC DE LA ELECTRICIDAD. Medidas Eléctricas. 5ta edición. Ediciones CEAC. España 1984.
- [6] SCHLUMBERGER-CENTRILIFT. Sistemas de levantamiento artificial de petróleo utilizando Bomba Electrosumergible.
- [7] IEEE Std 142-2007. Grounding of Industrial and Comercial Power Systems.
- [8] EATON. Auditoría del sistema de puesta a tierra en los equipos de superficie de la locación Laguna. Sucumbios. 2005.
- [9] MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL ECUADOR. Eficiencia energética. Ecuador 2000.

- [10] SCHNEIDER ELECTRIC. Controlling the impact of power factor and harmonics on energy efficiency. 2009

ARTÍCULOS Y DIRECCIONES ELECTRÓNICAS.

- [11] ABB. Operación y Mantenimiento de transformadores de potencia.
- [12] TIRAVANTI Eduardo. Estudio de la calidad de energía eléctrica en planta industrial Mepsa, Lima 2007
- [13] PESSE Gastón, ALVES Roberto. Efectos de las cargas no lineales sobre los turbogeneradores. Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- [14] BEECKMAN Ronald. Ultra shield plus. Essex group. 1998
- [15] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=121&rank=1>
- [16] ALLEN BRADLEY. Variador de velocidad de media tensión Power flex 7000.Canada 2002.
- [17] AUTORIDAD DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE PUERTO RICO. Manual para el diseño y construcción de mallas conectadas a tierra para subestaciones y equipos. Puerto Rico 2004.
- [18] RIVERO Ramón. La electricidad y el cuerpo humano. Instituto tecnológico de CD Madero. México.
- [19] SANZ Jorge, PÉREZ Lucas, OCAMPO Favio. Aterrizaje del neutro para sistemas eléctricos. Colombia 2007.

- [20] BLANCAS Jorge. Diseño y construcción de un filtro supresor de armónicos para la línea eléctrica. México 2004.
- [21] MARTINEZ Lozano Miguel. Técnicas modernas para la medición de sistemas de puesta a tierra. Colombia 2008.
- [22] AEMC. Manual de la pinza de medición de puestas a tierra modelo 3731

TESIS.

- [23] GARRIDO Renán. El Efecto Flicker y su Incidencia en la Calidad de Energía Eléctrica. Tesis de grado E.P.N. 1998.
- [24] MORA Raymundo, QUISHPE Manuel. Análisis de la Calidad de la Energía Eléctrica en el Levantamiento Artificial de Petróleo Bloque 15 Oriente Ecuatoriano, tesis de grado 2003

ANEXO 1

DIAGRAMA UNIFILAR DE LA ESTACIÓN LIMONCOCHA

ANEXO 2

PINZA DE MEDICIÓN DE PUESTAS A TIERRA AEMC 3731

Probador de Pinza de Resistencia de Tierra Modelos 3711 y 3731



www.ariol.com.bo
(591) 2 2480945
La Paz - Bolivia



Los Modelos 3711 y 3731 miden resistencia de barras de toma de tierra y de rejilla en cualquier entorno sin el uso de barras de tierra auxiliares. Los probadores de resistencia de tierra de pinza son usados en sistemas de tomas de tierra múltiples sin desconectar la toma de tierra bajo prueba. Los Modelos 3711 y 3731 simplemente pinzan alrededor del conductor de tierra o de la barra y miden la resistencia a tierra.

Al realizar medidas en sistemas de tierra intactos, el usuario también verifica la calidad de las conexiones de toma de tierra y los enlaces. La

resistencia y la continuidad de los bucles de toma de tierra alrededor de alohadillas y de edificios puede ser también medida.

Los dos modelos incluyen una función de medida de corriente. La alta sensibilidad del sensor permite medir la corriente de goteo circulando a una toma de tierra o circulando en bucles de toma de tierra hasta 1mA y corrientes neutras hasta 30Arms. Esta opción proporciona información adicional, que se está transformando en vital a medida que las redes de toma de tierra de distribución

transportan niveles de ruido más altos y armónicos, que afectan la calidad de la alimentación.

El Modelo 3731 ofrece una función de alarma y una función de memoris (registro). En la modalidad de alarma, el sensor indicará de forma visual y audible si la lectura está más allá de un punto de entrada fijo. El usuario puede también tener la alarma iniciada por encima o por debajo de un punto fijo. Esta opción de alarma permite controles de campo rápidos donde sólo lecturas de "pass" (funciona) o "fail" (fallo) serán suficientes.

Características

- Funcionamiento de pinza rápido y simple – sin cables, sin varillas auxiliares o requerimientos de espacio
- Lectura directa de resistencia de tierra desde 0.01Ω a 1200Ω
- Lectura directa de continuidad y de resistencia de bucle de tierra
- Lectura directa de corriente de tierra de goteo desde 1mA a 30Ams
- Diseño de mandíbula con ventana grande 1.25" (32mm) - acomoda hasta cables de 1000MCM
- Autoapagado para distribución de potencia
- Función de alarma con punto fijo ajustable y timbre para controles de campo rápidos (Modelo 3731)
- Función de memoria para guardar 99 medidas de campo para posterior recuperación y análisis (Modelo 3731)
- Cumple con EN 61010-1, Cat. III y Marca CE y Marca UL
- Construcción Lexan® duradera de cabeza y cuerpo con garantía para un año
- Configuración de alarma e información de memoria guardada, grabada durante el apagado
- Diseño patentado



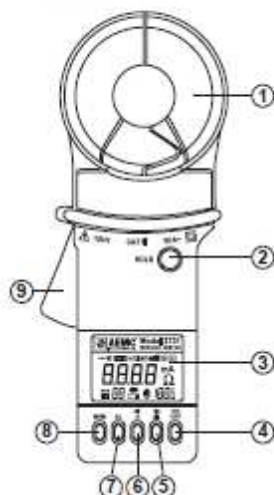
Modelo 3731 haciendo un test a una varilla de toma de tierra.

Aplicaciones

- Medir la resistencia de barra de tierra o de una rejilla pequeña
- Uso en sistemas de toma de tierra múltiple sin desconectar la tierra bajo prueba
- Medir resistencia y continuidad de bucles de toma de tierra alrededor de almohadillas y de edificios
- Medir corriente de goteo circulando a tierra o circulando en bucles de tierra
- Realizar controles de campo rápidos
- Realizar prospecciones de campo y extraer y analizar lecturas más tarde
- Uso en torres de telefonía móvil y en localidades de telecomunicaciones
- Uso en piscinas, manantiales o otras instalaciones del consumidor

FUNCIONES Y CARACTERÍSTICAS		
Modelos	3711	3731
Escala de Ohms	✓	✓
Escala Arme	✓	✓
Función de Retención	✓	✓
Autopruueba	✓	✓
Autoapagado	✓	✓
Indicador de Vida de Batería	✓	✓
Indicador de Ruido	✓	✓
Indicador de Pinza Abierta	✓	✓
Indicador de Bucle Cerrado	✓	✓
Alarma Multitono	✓	✓
Función de Alarma	—	✓
Memoria (Logging)	—	✓

Construcción



1. La pinza está compuesta por dos centros magnéticos independientes.
2. Hold (Retener): Retiene la última medida en la pantalla.
3. Pantalla: 3000-count LCD, indicador de funciones.
4. ON/OFF: Encendido o Apagado, al encender se activa la pantalla en el modo de test.
5. Ω: Medida de Resistencia – Incrementa el punto de la Alarma y la posición de la memoria cuando está en modo de programación.
6. A: Medida de Corriente – Ajuste el punto de Alarma y la posición de la memoria cuando está en modo de programación.
7. AL: (Modelo 3731 solamente): Activar/ Desactivar la función de Alarma. Acceso al valor de la Alarma cuando está en modo de programación.
8. MEM: (Modelo 3731 solamente): Activa la función de memoria o para leer los valores guardados en MR (Recuerdo de Memoria). Borra la memoria cuando esa en modo de programación.
9. Palanca: Abrirocerrar pinzas.

Los cuerpos de los Modelos 3711 y 3731 son hechos de Lexan® (o un policarbonato equivalente) para uso duradero. Las puntas del sensor están encapsuladas en un armazón de pared doble para fuerza extra y reforzados para aumento en la fiabilidad en el campo. Los valores de la construcción total y el diseño mecánico para prueba de caída, choque y vibración, impermeabilización contra proyecciones de agua o polvo, cumplen con o exceden los estándares de IEC (Comisión Electrotécnica Internacional). Los productos han sido diseñados para EN 61010 Cat. III y para cumplir con las aprobaciones de seguridad UL, CSA y GS (no disponibles al imprimir). Los dos modelos tienen la Marca CE. La punta del sensor, o pinza, es un componente clave en la medida y en el funcionamiento total del producto.

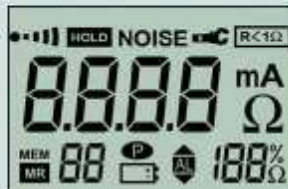
El grosor de la pinza grande permite el uso en conductores de tierra estrechos en postes y en las bocas de inspección. La apertura de 1.25" (32mm) acomoda no sólo barras de tierra, sino también a conductores de tierra mayores (hasta 100MCM) que se encuentran típicamente en edificios de telecomunicaciones o en aplicaciones ferroviarias.

La pinza interior está compuesta de centros magnéticos independientes y cubiertos individualmente, permitiendo la medida sin interferencia de ruido o diafonía común en instrumentos de sensor separado.

Un diseño mecánico minucioso, incluyendo pequeñas "alas", asegura un alineamiento fiable y repetitivo de la pinza para precisión e impide inserciones no deseables dentro del ensamblaje de la muella de la pinza.

El diseño de cuerpo ergonómico permite el funcionamiento con una sola mano. El protector proporciona fuerza adicional, e impide que la mano resbale o que toque los conductores bajo prueba. La tapa de lente del LCD puede ser reemplazada fácilmente si se raya. Los botones de pulsación sellados acceden a todas las funciones de prueba y son operadas fácilmente hasta con manos enguantadas.

OVERVIEW DE FUNCIONES



- Ω Aparecerá cuando se mida resistencia
- mA, A Aparecerá cuando se mida corriente
- BATERÍA Indicador de vida de la batería
- Parpadeo indica batería baja
- P Indica que el auto-off está inactivo
- Indica activa alto (HI) ó Bajo (LO) dependiendo de la dirección que se hace la flecha en la pantalla
- HOLD El pulsador HOLD o sído presionado
- Alarma Símbolo de alarma acústica
- NOISE Ruido en la lectura
- Pinzas de prueba no cerradas correctamente
- Función de Alarma
- MEM Función de Memoria activada
- MEM MR Recuerdo de Memoria y Registro (de 1 a 99)
- RC10 Medida de resistencia es menor que 1Ω



BOTONES


- ON/OFF**
Encendido o Apagado, al encender se activa la pantalla en el modo de test.
- Ω (▶)
Medida de Resistencia. (Incrementa el punto de la Alarma y la posición de la memoria cuando está en modo de programación.)
- A (◀)
Medida de Corriente. (Ajuste el punto de Alarma y la posición de la memoria cuando está en modo de programación.)
- AL (Modelo 3731 solamente)**
Activar/Desactivar la función de Alarma. Acceso al valor de la Alarma cuando está en modo de programación.
- MEM (Modelo 3731 solamente)**
Activa la función de memoria o para leer los valores guardados en MR (Recuerdo de Memoria). Borra la memoria cuando esa en modo de programación.

ANEXO 3

ANALIZADOR DE CALIDAD DE ENERGÍA HIOKI 3196

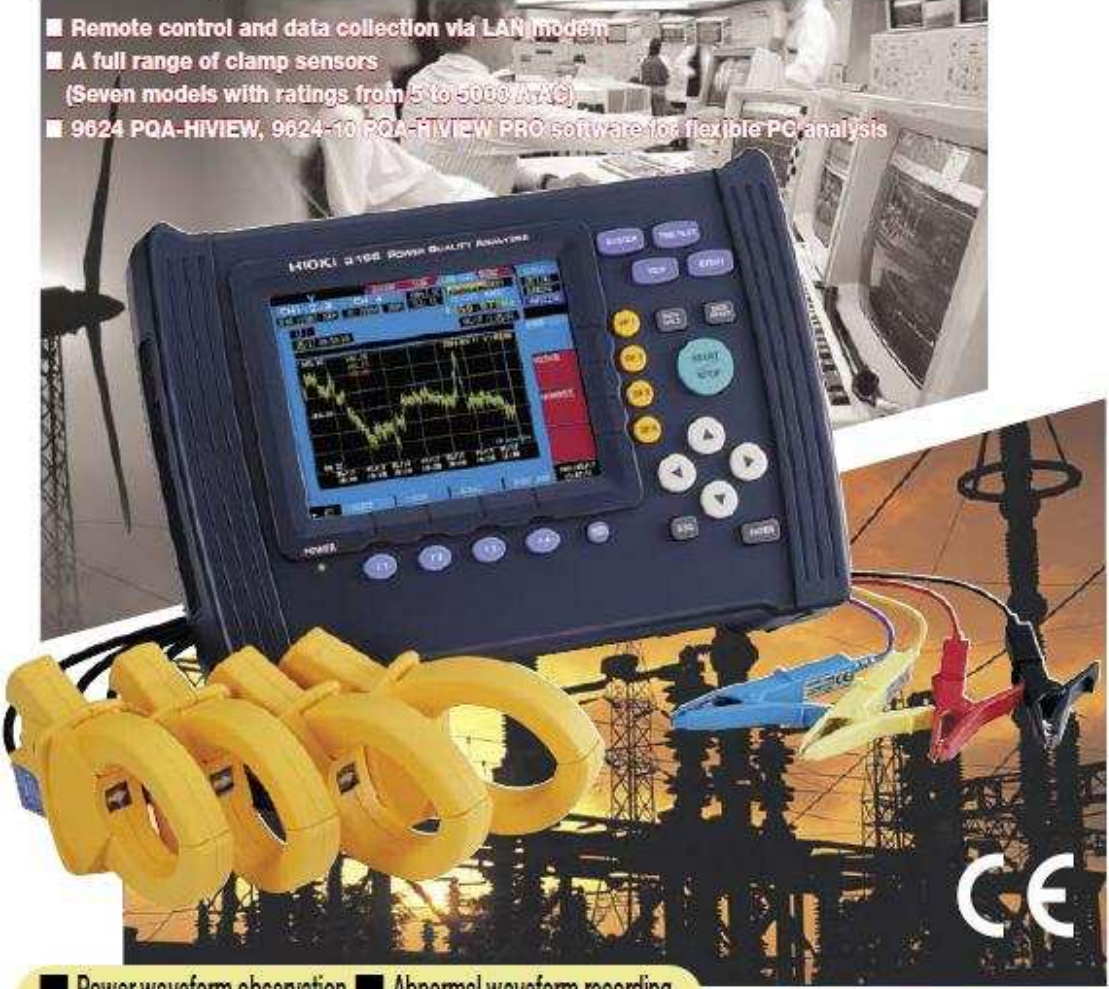


3196 POWER QUALITY ANALYZER

Power Measuring Instruments 

Investigate All Your Power Quality Problems

- Remote control and data collection via LAN/modem
- A full range of clamp sensors
(Seven models with ratings from 5 to 5000 A AC)
- 9624 PQA-HIVIEW, 9624-10 PQA-HIVIEW PRO software for flexible PC analysis



- Power waveform observation
- Abnormal waveform recording
- Harmonic measurement
- Flicker measurement
- Power measurement
- All in a single unit!

EN50160
IEC61000-4-30

Capture all power anomalies without fail!

Problems with power quality are all around us

Have you ever experienced any of the following ?

- Flickering lights
- Light bulbs burn out quickly
- Electronic office equipment does not function properly
- Sometimes devices operate abnormally
- Overheating in facilities using condensers fitted with reactors
- 3E (electrical overload, reverse phase, or phase loss) relays sometimes trip

These types of problems and others are often due to degraded power quality.

Discovering the cause can be difficult

The quickest way to solve power problems is to have a clear understanding of the cause, and be able to determine where the phenomenon occurred. However, it is not always possible to accurately grasp all of the various types of anomalies that may occur on power lines, even when using recording or harmonic analysis devices to investigate them.

Dedicated measuring instruments are required in order to accurately grasp these kinds of anomalies.

Fully identify the many phenomena hiding in your power lines

Overlooking the smallest of power anomalies can lead to enormous financial loss. Checking the quality of your power lines is the best way to prevent problems before they occur.

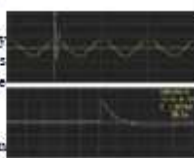
● Transient Overvoltage (Impulse)

Phenomenon :

Occurs due to lightning or circuit breaker/relay contact damage or closure. Often involves radical changes in voltage with high voltage peaks.

Damage :

In the vicinity of the event, high voltage often damages equipment power supplies or causes devices to reset.



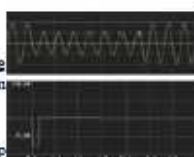
● Voltage Dip

Phenomenon :

Caused by momentary voltage drops resulting from large rush current in loads, such as when starting up a motor.

Damage :

The drop in voltage may cause devices to stop operating or reset.



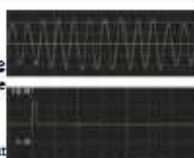
● Voltage Swell

Phenomenon :

Caused by lightning strikes or opening/closing power lines with heavy loads, causing the voltage to swell momentarily.

Damage :

The surge in voltage may damage equipment power supplies or cause devices to reset.



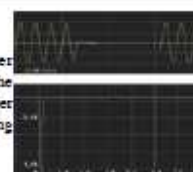
● Instantaneous interruptions

Phenomenon :

An instantaneous or short/long term power supply interruption caused by accidents at the power company (such as interruption of power transmission due to lightning strike) or tripping of breakers due a power supply short.

Damage :

Thanks to the increasingly widespread adoption of uninterruptible power supplies, equipment such as computers is increasingly protected against this problem. However, it may still cause other devices to stop operating or reset.



● Harmonics

Phenomenon :

Often occurs due to voltage/current waveform distortion when a semiconductor control device is used in a device's power supply.

Damage :

When harmonic components become too large, they can cause serious malfunctions, such as overheating in motor transformers, or burn-out of reactors connected to phase advance capacitors.



● Unbalance factor

Phenomenon :

Voltage/current waveform distortion and voltage drops or voltage phase reversals can occur when the load on a particular power line phase increases due to load fluctuations or imbalances.

Damage :

Voltage imbalance, reverse phase voltage, and harmonics can result in events such as uneven motor rotation, tripping of 3E breakers, and overheating due to transformer overloading.



Supports data analysis with a wide range of functions!

The 3196 measures, records and analyzes power line quality

Features

- Supports single-phase 2-wire, single-phase 3-wire, three-phase 3-wire and three-phase 4-wire systems. Further, the unit has an extra input channel providing enhanced analysis capabilities.

An isolated CH4 terminal is provided for AC and DC measurement.

- Neutral line measurement you can use for ground fault detection!
- Analyze DC power supplies
- Performs simultaneous analysis of two isolated systems, such as single phase and three phase lines

- Comes equipped with Δ -Y and Y- Δ conversion functions

Supports Δ -Y voltage conversion for three-phase, 3-wire systems, and Y- Δ voltage conversion for three-phase, 4-wire systems. Selectable display of inter-line voltage and phase voltage.

- Wide selection of clamp on current sensors

In addition to clamp-on current sensors, Models 9660 (100 A), 9661(500 A), 9669 (1000 A), and 9667 (5000 A, flexible), HIOKI also provides the 9694 (5 A) sensor, which is ideal for CT terminal measurement, as well as two other clamps for 5A leak measurement, Model: 9657-10 and 9675, to suit every application need.

- Three-phase voltage wiring adapter (optional)

Use the wiring adapter to simplify voltage wiring procedures.

- 9264-01 for three-phase, 3-wire systems
- 9264-02 for three-phase, 4-wire systems

* The 9264-01/02 Wiring Adapters are designed to reduce voltage cord wiring to a bare minimum for use with specific power lines. Do not use with installations other than those specified.



- External event input/output terminals

Event output :

Outputs a signal when events occur either as an alarm or device control signal.

Event input :

Accepts a trigger signal to initiate measurement.

- Small and Lightweight

Compact A4 size, and weighing only 2.25 kg (79.4 oz).

- Optional printer for easy hard copy output

Connect the optional 9670 printer to the RS-232C terminal for easy hard copy output of screens.



Printing method : Thermal line dot
 Printing width : 72 mm (2.83")
 Printing speed : 47.5 mm/sec (1.87"/sec)
 Power supply : 9671 AC ADAPTER or the BATTERY PACK
 Dimensions and mass : 119 (4.69") x 77 (3.03") x 174 (6.85") mm, approx. 500 g (17.6 oz.)



Full compatibility to 400Hz circuits

(Please specify inspection data sheet requirements for 400-Hz test points at time of order.)

- Simultaneous measurement and continuous processing

All data are measured simultaneously and processing is performed continuously, so important fault data is not missed.

Further, transient overvoltages up to 2000 V with durations as low as 0.5 μ s are captured without fail.

- Seven different display languages

Select a display language from Japanese, English, German, French, Spanish, Italian or Chinese. You can switch between the different display languages to suit your location.

- 6.4-inch color LCD

The unit uses a TFT color LCD screen, providing bright display with a wide viewing angle. The color display provides easy viewing of waveforms, both indoors and out.

- Extended measurement of up to one month with internal memory

The unit's internal memory (13 MB) supports up to one month of continuous recording.

*The amount of time available for continuous measurement can be checked when setting the measurement interval.

*Use a PC card to record at shorter measurement intervals over longer periods in conjunction with the internal memory.

Storage Media	Storage of Events (Usage capacity)	Interval time	Power	P&Harm	ALL DATA
			Saving RMS only	Saving RMS + Harmonic	Save all data
Internal Memory <small>The 3196 540 Flash Drive (8.00) Fixed</small>	Max. 100 (approx. 840)	1 s	2 h 01 m	8 m	5 m
		1 m	5 days 1 hour	8 h 29 m	5 h 45 m
		1 h	31 days	21 days 5 h	14 days 9 h
PC Card <small>(128MB)</small>	When storing 100 (approx. 840)	1 m	31 days (119 days)	8 days 8 h	5 days 16 h
		1 m	31 days (26 days)	2 days 13 h	1 days 17 h
		1 s	14 h 40 m	1 h 1 m	41 m

*When recording Time Series data, select MAX/MIN/AVE

*Refer to the specifications for details regarding the recordable items.

*Max. continuous save: 31 days

*During the measurement period, all dips, swells and interruptions are calculated

- PC card slot

Flash ATA cards up to 528 MB can be used to allow more detailed data collection.

Compact flash cards can also be used with an adapter.

- LAN and RS-232C interfaces

The 3196 features an HTTP server to enable easy configuration and data analysis through a Web browser from a remote location.

- Synchronize the 3196 clock

Connect the optional XD112 GPS Box to make sure the time recorded for measured events is based on the global standard time.



Set includes antenna and RS-232C cable

- Two types of carrying case available (optional)

Choose from the soft (9339) or hard (9340) carrying case and measure while the 3196 is safely stored.



The top side of the case holds the 3196.

Model 9339 soft case



The bottom side of the case holds accessories.

Real-time data display for power supplies

Display waveform, vector, DMM, and harmonic data in real-time

The VIEW screen displays voltage/current waveforms, vector diagrams, DMM values (voltage, current, and power), and harmonic data. All data can be measured and processed simultaneously, and power conditions such as distortion factor, K factor, and the unbalance factor for three-phase lines can be monitored using the various data displays.

Connect the 3196 to a power source to display power line data in real-time

All power line conditions can be monitored from the VIEW screen!

■ Display data in real-time

- 1. Waveform display (voltage/current display, 4-channel voltage display, 4-channel current display)
- 2. Vector display
- 3. DMM display (power, voltage, and current displays)
- 4. Harmonics (graph and list displays)

■ Power management through a rich array of information

- 1. Check the distortion of power waveforms using electronic devices and electrical overloads.
- 2. Manage the phase of power lines. Check the phase and wiring of the VT (PT) and CT terminals.
- 3. Manage, maintain and check the unbalance factor, peak values, and distortion factor of power lines.
- 4. Assess and develop countermeasures to prevent the occurrence of harmonic power flow.

Check for proper instrument connection using the numerical value or vector display

Connect the 3196 to the power line to be monitored while viewing the connection diagram. Upon connection, you can confirm voltage, current, and power values. Further, through the vector display, you can verify proper connection of clamp-on current sensors to the VT (PT) and CT terminals.



View the phases



Waveform display

This displays the voltage and current waveforms for each phase. Waveform display makes it easy to understand distortion conditions that (as with harmonics) are difficult to grasp from numerical values alone.



The cursor value is displayed.

Select a waveform display range of 2, 4, 10, or 12 cycles.

Display either dual screens for voltage and current, or waveforms for individual voltage and current phases.

DMM display

This displays detailed data for voltage, current, and power. View the data necessary for power management or maintenance and inspection of power lines at a single glance.



Detailed values for voltage, current and power are displayed.

Vector display

This displays the voltage and current vectors for each phase, as well as RMS values and phase angles as numerical values. Easily check the phase of three-phase lines and harmonics.



Display the fundamental voltage waveform for the 1st order (U1, U2, and U3) as a phase angle of 360° as a standard. Ideal for checking three-phase power lines.

Displays the unbalance factor when measuring three-phase power lines. (For 3P5W3M and 3P4W settings)

Harmonics display

This displays harmonics and inter-harmonics data in a graph or list. You can also display the phase difference for each harmonic order, and work out the current direction for harmonics.



The harmonic order cursor value is displayed.

You can select all of the connected channels.

Inter-harmonics display (light blue)

Detailed numerical data for up to the 50th harmonic order is displayed in a list.

Capture anomalies while using time series measurement to monitor power lines

Simultaneous time series monitoring for RMS fluctuations, voltage fluctuations, harmonics fluctuations, and flickering

RMS fluctuation, voltage fluctuation, harmonic fluctuation, and flicker (IEC and $\Delta V10$) time series data is displayed on the TIME PLOT screen. In addition to cursor measurement, you can enlarge events that occur in the voltage fluctuation event screen if a voltage dip, swell, or instantaneous interruption event occurs during the measurement period.

Simply set the interval and start time series measurement to display events in the fluctuation graph

Time series fluctuation results are displayed in the TIME PLOT screen

Continuous data calculation processing of all data without fail!

All measurement results are automatically recorded

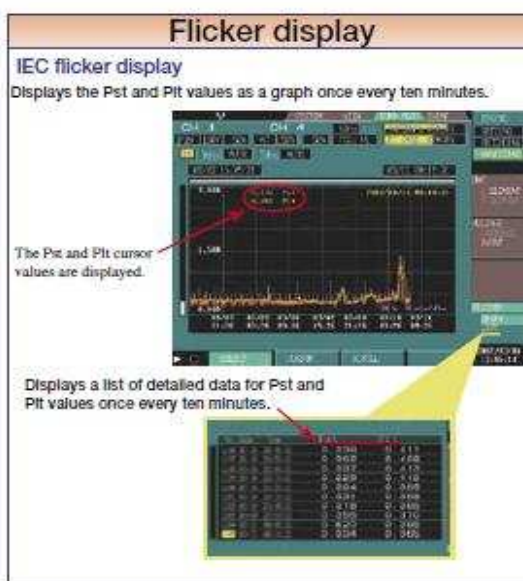
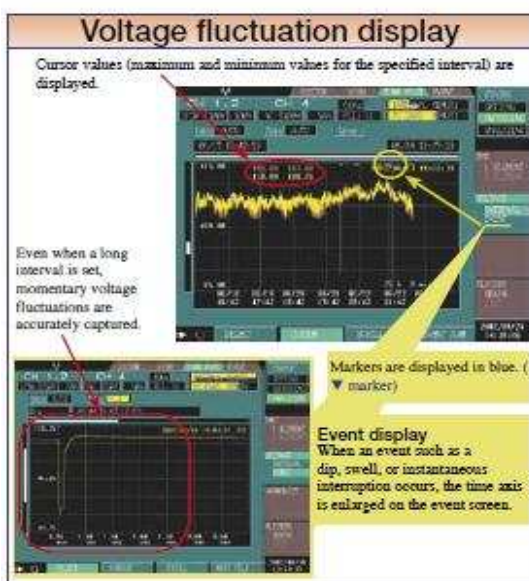
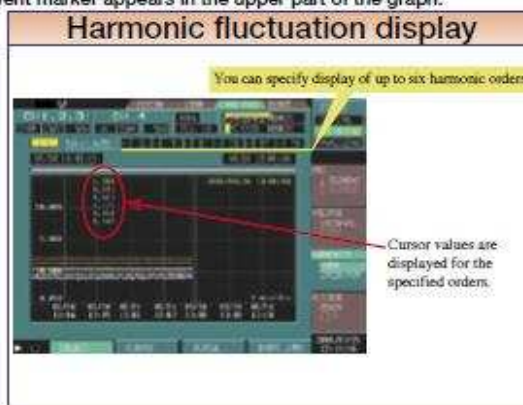
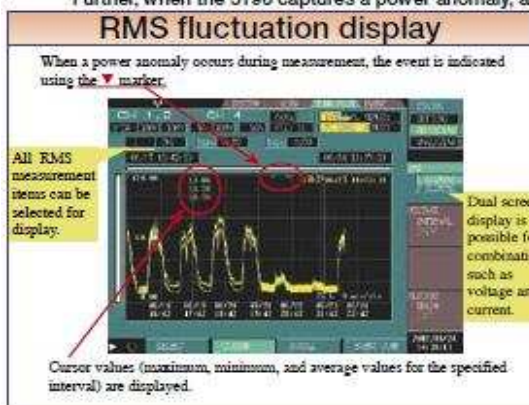
- 1. RMS fluctuation (dual screen display selection)
- 2. Voltage fluctuation (interval and event displays)
- 3. Harmonic fluctuation (harmonics and inter-harmonics displays)
- 4. Flicker (graph and list displays)
 - Pst and Pit measurement conditions according to IEC standards
 - $\Delta V10$ measurement (according to Japanese domestic guidelines)

Calculation method for measured data

- 1. RMS fluctuations/Harmonic fluctuations : Values are calculated continuously every 200 ms. The maximum, minimum, and average values are those applicable within the specified interval.
- 2. Voltage fluctuations : Values are calculated for a single waveform shifted by a half wave. The maximum and minimum values are those applicable within the specified interval. Detailed measurement of voltage fluctuations is possible because values are calculated every half wave.
- 3. Flicker : Values are calculated in accordance using calculation methods defined in the IEC and $\Delta V10$ standards.

In addition to displaying the various measurements in fluctuation graphs, the 3196 also displays the maximum, minimum, and average values for each specified interval.

Further, when the 3196 captures a power anomaly, an event marker appears in the upper part of the graph.



ANEXO 4
THE 6 AND 12 PULSE VFD SYSTEMS

THE 6- AND 12-PULSE VFD SYSTEMS

Xiaodong Liang
 Edmonton Product Center
 Schlumberger Canada Limited
XLiang2@edmonton.oilfield.slb.com
 Tel: (780) 465-9961

1. GENERAL THEORY

The harmonic current components generated at the ac drive input based on the IEEE standard 519-1992 is calculated as follows[1]:

$$h = kq \pm 1 \quad (1)$$

$$q = 6m \quad (2)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3)$$

where h is the harmonic order, k is any positive integer, q is the pulse number of the rectifier circuit, m is any positive integer, I_h is the amplitude of the harmonic current of order h and I_1 is the amplitude of the fundamental current.

For the 6-pulse VFD system, the 5th, 7th, 11th, ..., and $6k \pm 1$ harmonic currents are typical at the drive input. Table 1 gives the characteristic harmonic orders derived from a six-pulse converter, and each of these harmonics is a positive or negative sequence symmetrical component of the total current.

Table 1 The 6-pulse converter harmonics

<i>Harmonic Order</i>	<i>Sequence Network</i>
1	+
5	-
7	+
11	-
13	+
17	-
19	+
23	-
25	+

While for the 12-pulse system, the 11th, 13th, 23rd, 25th, ..., and $12k \pm 1$ harmonic currents are typical, and the 5th, 7th, 17th and 19th harmonic currents etc. are not present. Harmonics are reduced in the 12-pulse system using the method called "Phase Multiplication" technique. Generally, if m six-pulse rectifier sections

- have the same transformer ratios,
- have transformers with identical impedance,
- are phase shifted exactly 60/m degrees from each other,
- are controlled at exactly the same delay angle, and
- share the dc load current equally,

then the only harmonic present will be of the order of characteristic harmonics, $kq \pm 1$, as given in Equation (1). For a 12-pulse system, two six-pulse rectifier sections are phase shifted by 30° with minimum harmonic current being the 11th. A configuration for the 12-pulse VFD system is shown in Figure 1.

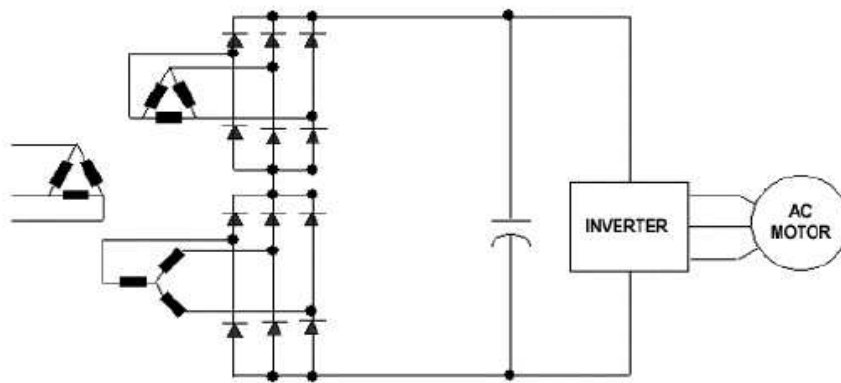


Figure 1 The 12-pulse system configuration

It is worthy to mention here since no two rectifier sections are identical in all these respects, the non-characteristic harmonics will always be present in practice. Therefore, in a 12-pulse system, the 5th and 7th harmonic currents always exist [1].

2. DERIVATION OF THE 12-PULSE SYSTEM HARMONICS

In order to realize a 12-pulse system, three winding transformer or the equivalent two parallel transformers are used together with two identical six-pulse rectifiers as shown in Figure 1. The top transformer is delta/delta (or wye/wye) without phase shift, and the bottom transformer is delta/wye (or wye/delta) with 30° phase shift. To begin the derivation, it is assumed that the current at the top transformer output is the typical 6-pulse wave expressed by Fourier series as follows:

$$\begin{aligned}
 i_{top,secondary}(t) = & I_1 \sin(\omega_0 t) + \frac{I_1}{5} \sin(5\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{7} \sin(7\omega_0 t) + \frac{I_1}{11} \sin(11\omega_0 t + 180^\circ) + \\
 & \frac{I_1}{13} \sin(13\omega_0 t) + \frac{I_1}{17} \sin(17\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{19} \sin(19\omega_0 t) + \frac{I_1}{23} \sin(23\omega_0 t + 180^\circ) + \\
 & \frac{I_1}{25} \sin(25\omega_0 t) + \dots
 \end{aligned} \tag{4}$$

Since the top transformer has no phase shift, the current waveform on the primary winding is the same as that on the secondary, i.e.,

$$i_{top, primary}(t) = i_{top, secondary}(t). \quad (5)$$

On the other hand, when the positive and negative sequence harmonic components of the current through the bottom transformer with delta/wye (or wye/delta) winding connection, their phases are shifted. For a positive sequence harmonic current going through a delta/wye transformer, its phase is shifted $(k-1) \times 30^\circ$; while for a negative sequence harmonic current, its phase is shifted $(k+1) \times 30^\circ$. Thus, the typical 6-pulse harmonic currents (Equation (4)) generated from the rectifier going through the delta/wye (or wye/delta) connected transformer, the current waveform on the primary of the transformer can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} i_{bottom, primary}(t) &= I_1 \sin(\omega_0 t - 30^\circ + 30^\circ) + \frac{I_1}{5} \sin(5\omega_0 t + 180^\circ - 5 \times 30^\circ - 30^\circ) + \frac{I_1}{7} \sin(7\omega_0 t - 7 \times 30^\circ + 30^\circ) + \\ &\quad \frac{I_1}{11} \sin(11\omega_0 t + 180^\circ - 11 \times 30^\circ - 30^\circ) + \frac{I_1}{13} \sin(13\omega_0 t - 13 \times 30^\circ + 30^\circ) + \\ &\quad \frac{I_1}{17} \sin(17\omega_0 t + 180^\circ - 17 \times 30^\circ - 30^\circ) + \frac{I_1}{19} \sin(19\omega_0 t - 19 \times 30^\circ + 30^\circ) + \\ &\quad \frac{I_1}{23} \sin(23\omega_0 t + 180^\circ - 23 \times 30^\circ - 30^\circ) + \frac{I_1}{25} \sin(25\omega_0 t - 25 \times 30^\circ + 30^\circ) + \dots \\ &= I_1 \sin(\omega_0 t) + \frac{I_1}{5} \sin(5\omega_0 t) + \frac{I_1}{7} \sin(7\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{11} \sin(11\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{13} \sin(13\omega_0 t) + \\ &\quad \frac{I_1}{17} \sin(17\omega_0 t) + \frac{I_1}{19} \sin(19\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{23} \sin(23\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{I_1}{25} \sin(25\omega_0 t) + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Adding Equations (5) and (6), the total line current from the input of the 12-pulse system is obtained as follows:

$$\begin{aligned} i_{line}(t) &= i_{top, primary}(t) + i_{bottom, primary}(t) \\ &= 2I_1 \left[\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{1}{13} \sin(13\omega_0 t) + \frac{1}{23} \sin(23\omega_0 t + 180^\circ) + \frac{1}{25} \sin(25\omega_0 t) \right] + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

From Equation (7), it can be found that only $12k \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) order harmonic currents are present for the 12-pulse VFD system.

REFERENCE

- [1] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems".
- [2] Mack Grady, "Understanding Power System Harmonics", September 2000.

ANEXO 5
CABLE ULTRASHIELD DATA SHEET



Essex® ULTRASHIELD® PLUS Magnet Wire/Winding Wire Product and Application Data Sheet

NEMA MW 35-C or MW 73-C

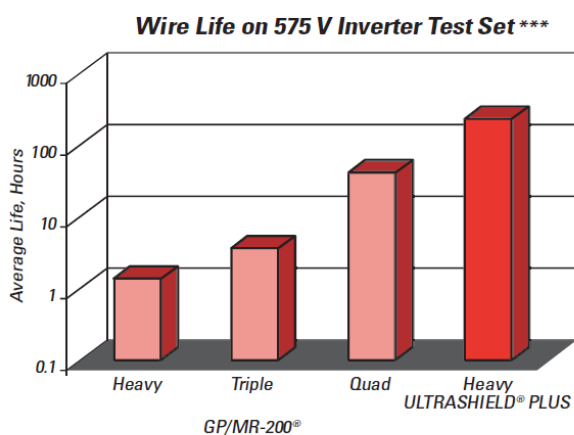
Class 200° Copper - Round Conductor - Polyester/Polyamideimide coated magnet wire/winding wire

APPLICATION

ULTRASHIELD® PLUS magnet wire has been specifically designed for use in motors that may be subjected to higher voltage spikes present in inverter duty applications. The combination of the modified polyester basecoat and amide-imide topcoat provides an insulation system with outstanding toughness and excellent dielectric properties. ULTRASHIELD® PLUS magnet wire has improved voltage endurance and thermal properties, compared to standard NEMA MW 35-C magnet wire, while retaining superior chemical resistance to common solvents and refrigerants. ULTRASHIELD® PLUS conforms to all of the requirements of NEMA MW 35-C and MW 73-C.

ULTRASHIELD® PLUS may be considered but not limited to the following applications :

- Inverter Duty Drive Motors
- Rotating Machines
 - Hermetic Motors
 - DC Motors
 - Power Tools
 - Automotive Alternators and Generators
- Transformers
 - All dry types through Class 200°
- Electronics
 - All types of coils through Class 200°



ENGINEERING HIGHLIGHTS

1. THERMAL CLASSIFICATION

ULTRASHIELD® PLUS magnet wire on copper conductor is UL listed at 200°C, and is recommended for NEMA MW 35-C and MW 73-C wire applications with higher burnout requirements.

2. THERMOPLASTIC FLOW

ULTRASHIELD® PLUS magnet wire has excellent thermoplastic flow (cut-thru) properties, with typical test values of 390°C.

3. WINDABILITY

ULTRASHIELD® PLUS magnet wire has been extensively wound in various motor applications and has been highly commended for its superior windability performance.

4. ELECTRICAL

Voltage endurance is the area where ULTRASHIELD® PLUS magnet wire really excels. Testing with sinusoidal and with inverter waveshapes shows that ULTRASHIELD® PLUS magnet wire lasts many times longer than standard NEMA MW 35-C and MW 73-C insulation (see graph at lower left). While no standards for this type of testing have been universally accepted, our testing shows dramatic improvement in insulation life, especially under severe duty applications at higher temperatures.

5. CHEMICAL

ULTRASHIELD® PLUS magnet wire has been tested for resistance to R-22 refrigerant and the results show it to be compatible for hermetic systems.

Successful results are also seen with samples tested for 24 hours at room temperature in a wide variety of other solvents such as petroleum naphtha, toluene, ethanol, 5% sulfuric acid, 1% potassium hydroxide, butyl acetate, and acetone.

6. TERMINATION

Insulation piercing, mechanical stripping, and flame welding processes can all be used successfully with ULTRASHIELD® PLUS magnet wire. If the connection is to be soldered, it is recommended that mechanical stripping be used to remove the insulation prior to soldering.

7. NORMAL AVAILABILITY

- Round Copper:
9 through 30 AWG, Heavy Build

(Other Sizes and Builds by Special Arrangement)



Quality Systems Registered to ISO 9001, ISO 9002, QS-9000, Cert#QSR-QS-002
©Essex Group, Inc., 1601 Wall Street, Fort Wayne, IN 46802





Essex® ULTRASHIELD® PLUS Magnet Wire/Winding Wire Product and Application Data Sheet

Performance data is representative of 18 AWG heavy build copper. **

THERMAL PROPERTIES

THERMOPLASTIC FLOW

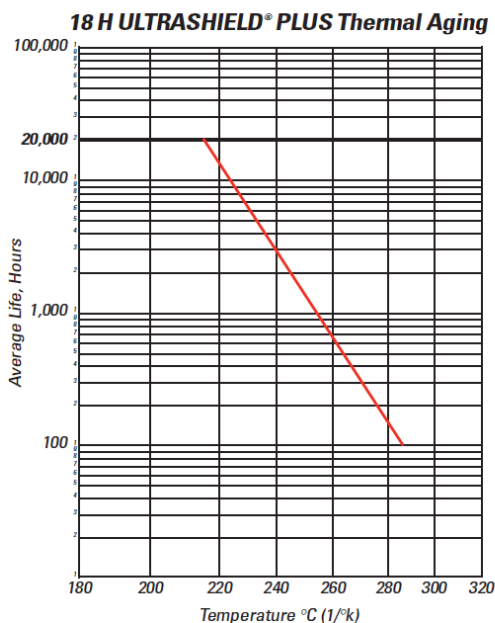
TYPICAL PERFORMANCE: 390°C
REQUIRED PERFORMANCE: 300°C, minimum†

HEAT SHOCK RESISTANCE

TYPICAL PERFORMANCE: No topcoat or basecoat cracks
REQUIRED PERFORMANCE: 20%, 3XD, no cracks†

THERMAL AGING

TYPICAL PERFORMANCE: 215°C
REQUIRED PERFORMANCE: 200°C, minimum†



PHYSICAL PROPERTIES

ABRASION RESISTANCE: UNIDIRECTIONAL

TYPICAL PERFORMANCE: 1966 g., avg.
REQUIRED PERFORMANCE: 1150 g., minimum avg.†

ABRASION RESISTANCE: REPEATED SCRAPE

TYPICAL PERFORMANCE: 250 strokes, avg.*

PHYSICAL PROPERTIES (cont'd)

ADHESION AND FLEXIBILITY

TYPICAL PERFORMANCE: No topcoat or basecoat cracks
REQUIRED PERFORMANCE: 20%, 3XD, no cracks†

COEFFICIENT OF FRICTION

TYPICAL PERFORMANCE: Dry Lube: 0.02 - 0.06*

ELONGATION

TYPICAL PERFORMANCE: 38%
REQUIRED PERFORMANCE: 32%, minimum†

SPRINGBACK

TYPICAL PERFORMANCE: 48 degrees
REQUIRED PERFORMANCE: 58 degrees, maximum†

ELECTRICAL PROPERTIES

DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE

ROOM TEMPERATURE

TYPICAL PERFORMANCE: 12,900 volts, avg.
REQUIRED PERFORMANCE: 5,700 volts, minimum†

RATED TEMPERATURE

TYPICAL PERFORMANCE: 10,982 volts, avg.
REQUIRED PERFORMANCE: 4,275 volts, minimum†

CONTINUITY

TYPICAL PERFORMANCE: ≤ 1 fault/100 ft.
REQUIRED PERFORMANCE: 5 faults/100 ft., maximum†

CHEMICAL PROPERTIES

SOLUBILITY

TYPICAL PERFORMANCE: Passes
REQUIRED PERFORMANCE: 580 g. scrape, minimum†

REFRIGERANT RESISTANCE (R-22)

EXTRACTION

TYPICAL PERFORMANCE: 0.02%, maximum
REQUIRED PERFORMANCE: 0.25%, maximum†

DIELECTRIC BREAKDOWN VOLTAGE

TYPICAL PERFORMANCE: 11,686 volts
REQUIRED PERFORMANCE: 5,700 volts, minimum†

* Tests not indicated as NEMA are Essex® Standards
** The values shown represent typical average results and are not intended to be used as design data or specification limits.
*** Data obtained from standard 18 AWG twisted pairs tested at 150°C, with a 575 volt drive and motor (phase-to-phase).
† Requirements of NEMA MW 1000; Section MW 35-C or MW 73-C, as applicable.



All sales are subject to standard Essex® terms and conditions. Copies are available on request.

Quality Systems Registered to ISO 9001, ISO 9002, QS-9000, Cert#QSR-QS-002
©Essex Group, Inc., 1601 Wall Street, Fort Wayne, IN 46802



ESSEX GROUP®

ANEXO 6
VSD DE MEDIA TENSIÓN “POWER FLEX 7000” DE ALLEN
BRADLEY

PowerFlex™ 7000

POWERFUL
PERFORMANCE

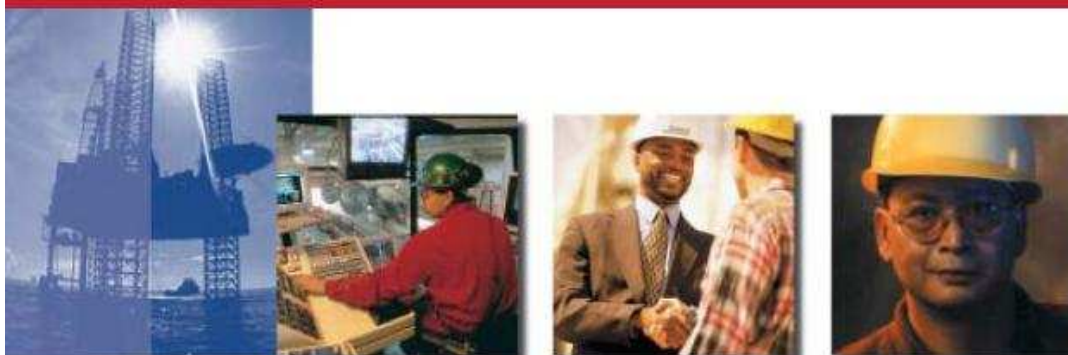
FLEXIBLE
CONTROL

 **Allen-Bradley**

**Aquí es donde
comienza la
confiabilidad.**

PowerFlex^{MR} 7000
Familia de Variadores de
Frecuencia en media
tensión





PowerFlex^{MR} 7000

Su éxito depende de él.

Evolución superior

A medida que los productos evolucionan y la tecnología avanza, nuestros clientes requieren Variadores de Frecuencia que sean más eficaces en función del costo, más confiables, más simples de usar y más fáciles de mantener. Rockwell Automation satisface estos requerimientos con el Variador de Frecuencia de CA de media tensión PowerFlex^{MR} 7000 a partir de la experiencia de la base instalada más grande del mundo de Variadores de Frecuencia, probada tecnología de semiconductores de potencia y uniformidad de diseño en toda la familia de Variadores de Frecuencia PowerFlex^{MR}.

Confiabilidad superior

La mayoría de los Variadores de Frecuencia de media tensión controlan el verdadero ritmo de un proceso industrial. La confiabilidad no es simplemente una expresión de deseo, es un requerimiento. Es por eso que el PowerFlex^{MR} 7000 utiliza avanzados tiristores de potencia simétricos de Media Tensión de compuerta conmutada con control integrado para reducir la cantidad de componentes de la unidad al mínimo de cualquier Variador de Frecuencia de media tensión disponible - para ofrecerle la mejor confiabilidad.





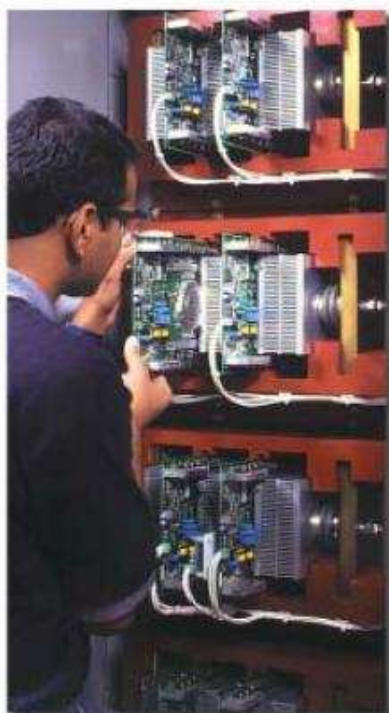
... es simple.

Novedoso Módulo de Potencia PowerCage^{MR} *

En el corazón del variador de frecuencia PowerFlex^{MR} 7000 está la novedosa PowerCage^{MR} que contiene los principales componentes de potencia en un paquete compacto y modular. Un diseño disipador térmico de avanzada trabaja junto con un patrón de flujo de aire a alta presión para asegurar la máxima eficiencia en la transferencia térmica y una disminución en el esfuerzo térmico. Este montaje único significa que los componentes se pueden reemplazar sin retirar el módulo de potencia PowerCage^{MR} y sin ninguna herramienta especial en menos de cinco minutos. El módulo de potencia PowerCage^{MR} es tan solo otro ejemplo de gran confiabilidad, de fácil uso y con un menor costo total de operación.

Poca cantidad de piezas

El PowerFlex^{MR} 7000 solo requiere seis inversores SGCT (a 2300V). Otros Variadores de Frecuencia requieren entre 18 a 36 interruptores semiconductores de potencia si se utiliza IGBT o IGCT. Las características superiores del SGCT combinadas con el requerimiento de menos componentes hacen que el PowerFlex^{MR} 7000 sea intrínsecamente más confiable.



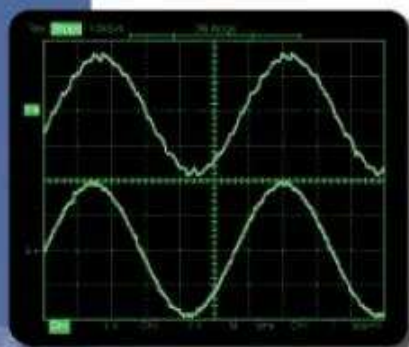
*Los mejores componentes x Menos componentes
= Mayor confiabilidad*



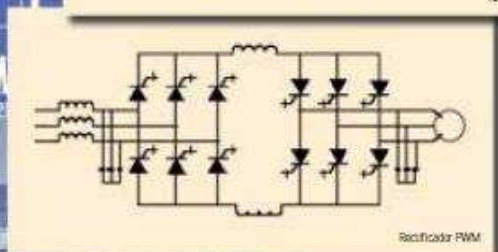
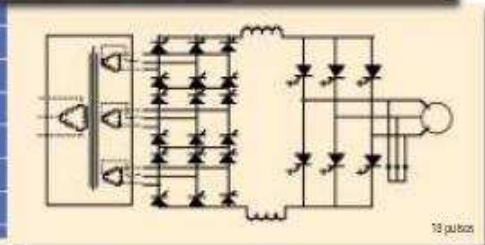
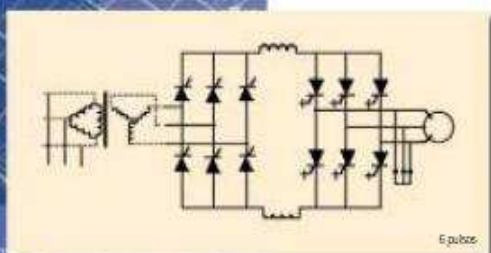
Calidad de potencia . . .

Armónicos de línea interiores sin aumentar la complejidad

La mayoría de los Variadores de Frecuencia de media tensión del mercado actual intentan reducir las armónicas del lado de la línea aumentando el número de pulsos del rectificador a través de rectificadores en paralelo y transformadores de cambio de fase. En la mayoría de los casos, estos Variadores de Frecuencia tienen una mayor cantidad de componentes, una mayor complejidad y un mayor número de conexiones desde el transformador hasta el Variador de Frecuencia. El Variador de Frecuencia de media tensión PowerFlex[®] 7000 tiene diversas soluciones que cumplen con las normas para armónicas de la IEEE 519-1992 sin aumentar la cantidad de componentes o la complejidad.



Formas de onda de entrada con rectificador de 18 pulsos:
Corriente de línea (superior),
Tensión de línea (inferior),
4160V, 933 kW, 60 Hz



Rectificador de 6 pulsos con filtro de armónica opcional

El rectificador de 6 pulsos con un filtro de armónica opcional es la solución más económica para reducir armónicas. Es ideal para las instalaciones donde el Variador de Frecuencia representa un porcentaje pequeño de la carga total de la planta o donde las armónicas no son una preocupación principal. El rectificador de 6 pulsos también está disponible con un reactor de línea de CA para aplicaciones con motores nuevos.

Rectificador de 18 pulsos

El rectificador de 18 pulsos en el PowerFlex[®] 7000 cumple con las normas para armónicas de la IEEE 519-1992 en el punto principal del transformador de aislamiento del Variador de Frecuencia. La baja complejidad, la alta eficiencia del sistema y la facilidad de uso se mantiene con rectificadores en serie y sólo tres devanados secundarios en el transformador.

Rectificador PWM

El rectificador PWM cumple con las normas para armónicas de la IEEE 519-1992, ofrece un factor de potencia cercano a la unidad y optimiza el rendimiento del Variador de Frecuencia. Esta solución de la calidad de potencia está disponible con un reactor de línea de CA o un transformador de aislamiento, dando como resultado máxima flexibilidad.

Eliminación del transformador de aislamiento del Variador de Frecuencia

La eliminación del transformador de aislamiento del Variador de Frecuencia en los diseños de los rectificadores de 6 pulsos y PWM para nuevas aplicaciones del motor da como resultado la máxima solución para el Variadores de Frecuencia, garantizando una alta eficiencia del sistema, un pequeño tamaño y una disminución del costo total de operación.

. . . sabemos que su reputación depende de ésto.

Compatible con motores estándar sin disminuir la potencia

Las formas de onda favorables para el motor han sido la marca registrada de los variadores de frecuencia de media tensión de Allen-Bradley desde 1990. La tercera generación de variadores de frecuencia de media tensión PowerFlex™ 7000 no es una excepción con corriente y voltaje de salida cercanos a una senoide en todas las velocidades y cargas. Los motores de inducción estándar o los sincrónicos son compatibles sin disminuir la potencia. No se requieren motores de gran rendimiento para inversores.

Sin calentamiento adicional o esfuerzo eléctrico para el aislamiento del motor comparado con el funcionamiento a velocidad fija

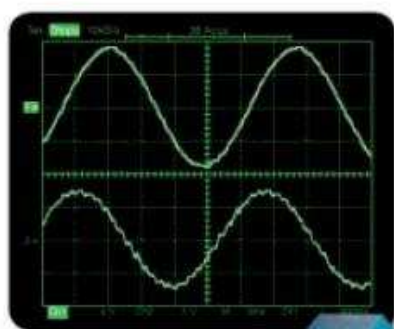
El patrón de conmutación PWM en el PowerFlex™ 7000 sirve para disminuir todas las armónicas que van hacia el motor, especialmente en bajas frecuencias de funcionamiento. El PWM funciona en combinación con un pequeño capacitor integral para disminuir las armónicas de gran magnitud a frecuencias más altas. El resultado final es... que no hay calentamiento adicional o esfuerzo eléctrico para el aislamiento del motor comparado con el funcionamiento a velocidad fija.

La distancia del cable del motor es prácticamente ilimitada

Mientras que algunos Variadores de Frecuencia tienen limitaciones en cuanto a la distancia del cable del motor debido a las altas frecuencias de conmutación o acoplamiento capacitivo, la distancia del cable con el PowerFlex™ 7000 es prácticamente ilimitada. Esta tecnología es capaz de controlar motores hasta una distancia de 15 kilómetros desde el variador de frecuencia a el motor.

Silencioso y suave funcionamiento del motor

Estará sorprendido de cuan silencioso y suave funcionará su motor con el variador de frecuencia PowerFlex™ 7000. La calidad de la tensión y las formas de las ondas de corriente dan como resultado un ruido apenas audible. De hecho, el motor funcionará con un ruido menos audible aun que si se lo conecta a la línea de operación. Una razón más para que el variador de frecuencia PowerFlex™ 7000 sea el más adecuado para sus motores de media tensión.



Formas de Onda al motor @ plena carga y plena velocidad:
Corriente del motor (superior),
Voltaje al motor (inferior),
4160V, 933 kW, 60 Hz



ANEXO 7

FILTRO DE ARMÓNICOS “ACCUSINE” DE SCHNEIDER

CLASS 582C
 ReactiVar™ AccuSine® PCS
 Power Correction System

**Square D® AccuSine® PCS
 stabilizes electrical
 systems:**

- Dynamic current injection for harmonic cancellation and power factor correction
- Reduces harmonics for IEEE 519 (1992) standard compliance
- Decreases harmonic related overheating of cables, switchgear and transformers
- Reduces downtime caused by nuisance thermal tripping of protective devices
- Increases electrical network reliability and reduces operating costs
- Compensates each phase independently
- UL and CSA approved
- Parallel connection allows for easy retrofit and installation of multiple units for large networks
- Filters to the 50th harmonic
- Filters entire network or specific loads depending on installation point
- Response to load fluctuations begins in 40 microseconds with 8 milliseconds for full response to step load changes
- IGBT based power electronic technology
- 50, 100 and 300A models for 208 to 480V, 50/60 Hz three phase networks



Square D AccuSine Power Correction System (PCS) reduces problematic harmonic levels and provides instantaneous power factor correction. Cost savings result from reduced downtime and maintenance. In addition, over-sizing of distribution equipment to provide for harmonics and poor power factor can be avoided. Square D AccuSine PCS dynamically corrects power quality by providing:

- Active Harmonic Filtration
- Resonance Prevention
- Power Factor Correction
- Dynamic VAR Compensation

Federal Pioneer

Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Schneider
 **Electric**

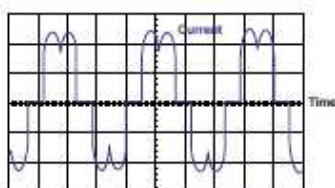


Fig. 1: Non-Linear Current Waveform



50A AccuSine PCS

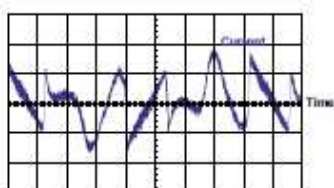


Fig. 2: AccuSine PCS Injection Current

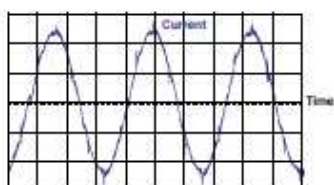


Fig. 3: Corrected Current Waveform

The Harmonic Problem

Although power electronic loads and devices which have rapid and frequent load variations have become abundant due to their many process control related benefits, they have one major drawback in common: they produce harmonics. Harmonics may disrupt other loads and increase operating costs and lower the reliability of the electrical network. The current waveform required by power electronic loads is quite different than the sinusoidal voltage delivered by the utility. This 'non-linear' current draw (Figure 1) results in the creation of harmonics.

Symptoms of problematic harmonic levels include overheating of motors, drives, cables, thermal tripping of protective devices and logic faults of digital devices all of which can result in downtime. In addition the life span of many devices may be reduced by overheating. Furthermore, by reducing harmonic levels, the need to oversize transformers and cables to account for harmonic heating effects is lessened.

With this in mind, the IEEE 519-1992 recommended practice establishes limits on current distortion that individual facilities can feed back on to the utility grid. Many utilities enforce these limits and with the decrease in capital spending due to deregulation of the industry, many more utilities are expected to start to enforce these limits.

Active Harmonic Filtering with AccuSine® PCS

The Square D AccuSine PCS cancels harmonics by dynamically injecting out of phase harmonic current. AccuSine PCS installation will allow for compliance with IEEE 519 – 1992 recommended harmonic limits. Reduced harmonic levels results in improved electrical network reliability and reduced operating costs. Nuisance tripping of protective devices and nuisance clearing of fuses due to harmonic heating effects is greatly reduced. Overheating of motors, transformers, switchgear and cables is also reduced which increases their life expectancy and reduces maintenance costs. For new installations, over-sizing of distribution equipment to reduce harmonic susceptibility can be reconsidered.

AccuSine PCS reduces current distortion that, in turn, reduces voltage distortion. Unlike passive devices, AccuSine PCS is easy to install and cannot be overloaded. When required harmonic compensation exceeds PCS capacity, AccuSine PCS will simply supply its maximum continuously. Multiple AccuSine PCS units can be connected in parallel to increase compensation.

Closed-loop control allows for high accuracy and self-adaptive harmonic control. AccuSine PCS determines the harmonic compensation required by using current transformers to measure the network current. The AccuSine PCS control logic removes the fundamental frequency component (50 or 60 Hz) from this waveform. The remaining waveform is then inverted and AccuSine PCS fires its IGBTs to inject this waveform (Figure 2) on to the network to compensate for the harmonics. The result is a waveform with greatly reduced harmonic content as seen by the upstream electrical system (Figure 3).

The Resonance Problem

The interconnection of a large variety of devices on today's electrical networks can create resonant conditions which magnify harmonic currents (Figure 4). Resonance can cause serious problems such as excessive voltage distortion, nuisance fuse and circuit breaker operation, overvoltage tripping of drives, premature capacitor breakdown and insulation breakdown within motors, transformers and conductors.

AccuSine® PCS Eliminates Resonance

Square D AccuSine PCS cancels harmonic current on the network to eliminate resonance conditions. By dynamically removing harmonics from the network no energy is present at the resonant frequency. The point of installation of AccuSine PCS on the electrical network determines where the harmonic cancellation takes place.

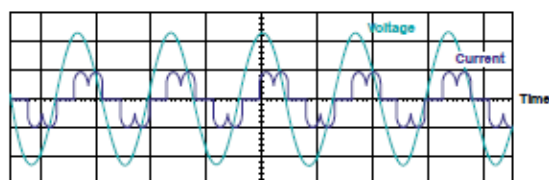


Fig. 5: Non-linear current waveform with poor power factor

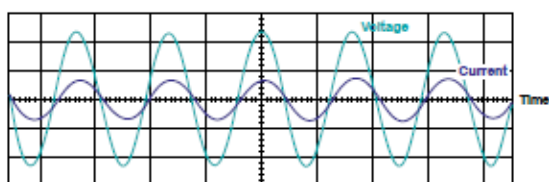


Fig. 6: Corrected Current waveform with improved power factor and reduced harmonic content after AccuSine PCS Installation

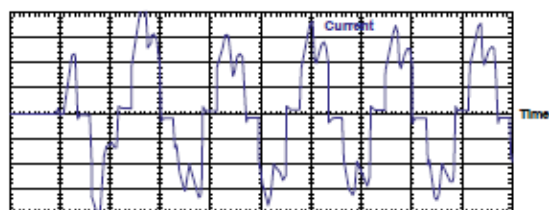


Fig. 7: Inrush Current without AccuSine PCS

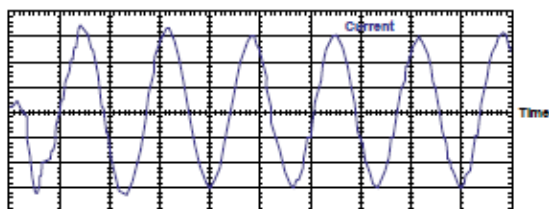


Fig. 8: Inrush Current with AccuSine PCS

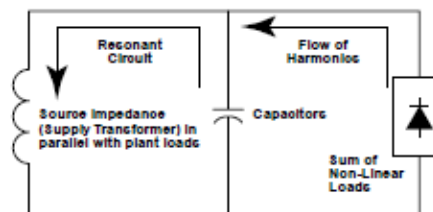


Fig. 4: Resonant Circuit Formed from Capacitor in Parallel with Source Impedance (Supply Transformer)

Power Factor Correction with AccuSine® PCS

Poor power factor results in increased peak currents that reduce system capacity and, in most cases, cause a utility imposed penalty. AccuSine PCS is able to solely correct power factor, or, operate in a dual mode whereby current is injected to reduce harmonics and any excess current capacity is used to improve the power factor. Power factor correction is achieved by injecting current at the fundamental frequency (60/50 Hz). AccuSine PCS is able to correct for either a leading or lagging power factor. The result is a reduction in peak currents which frees system capacity and eliminates utility imposed power factor penalties.

Dynamic VAR Compensation by AccuSine® PCS

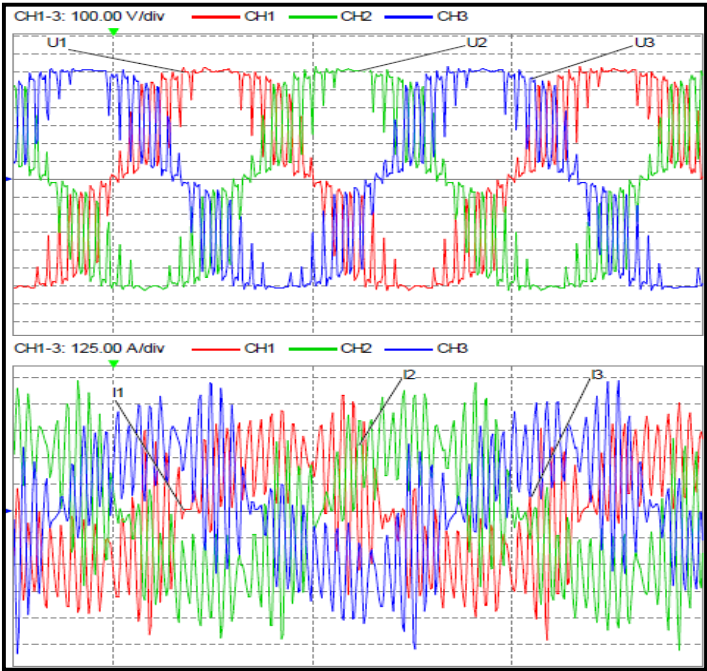
Large inductive inrush currents typically cause voltage sags that result in reduced productivity, poor process quality and possible downtime due to undervoltage tripping of devices.

The Square D AccuSine PCS is able to inject peak current at two and a half times its rms current rating for one cycle. For many applications this level of compensation eliminates visible flicker and improves voltage regulation resulting in better productivity and quality.

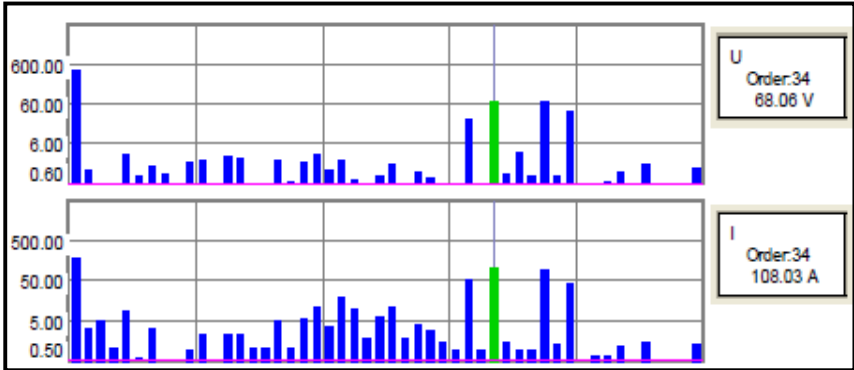
ANEXO 8
ARMÓNICOS A LA SALIDA DE LOS VSDs

RESUMEN DE LOS ARMÓNICOS PRESENTES EN LAS LOCACIONES LIMONCOCHA A LA SALIDA DEL VSD.

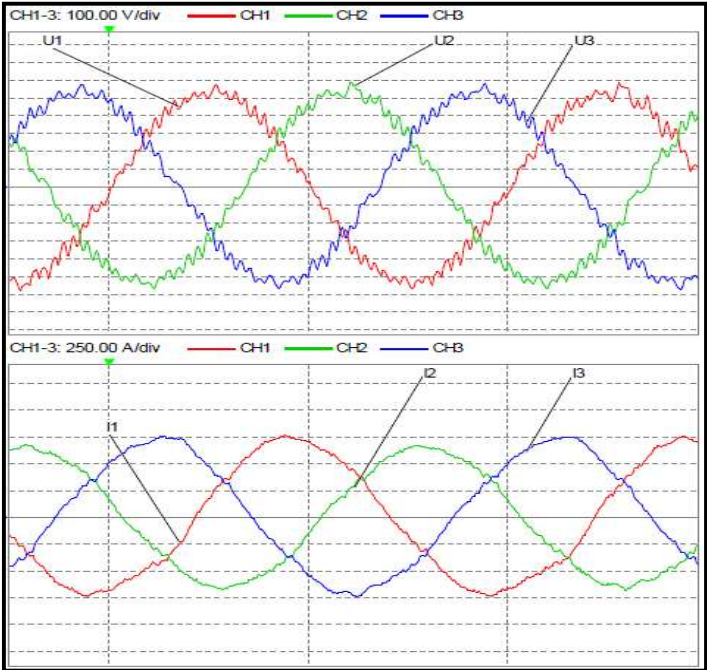
❖ LIMONCOCHA 1.



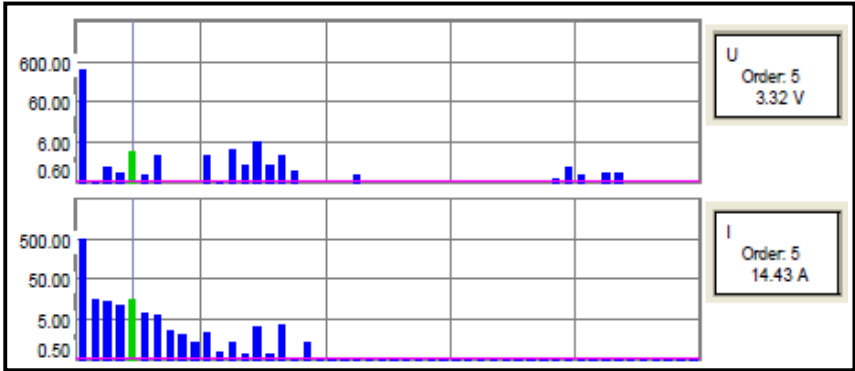
THDI	63.15 %
THDV	25.35 %
TDD	18.59 %



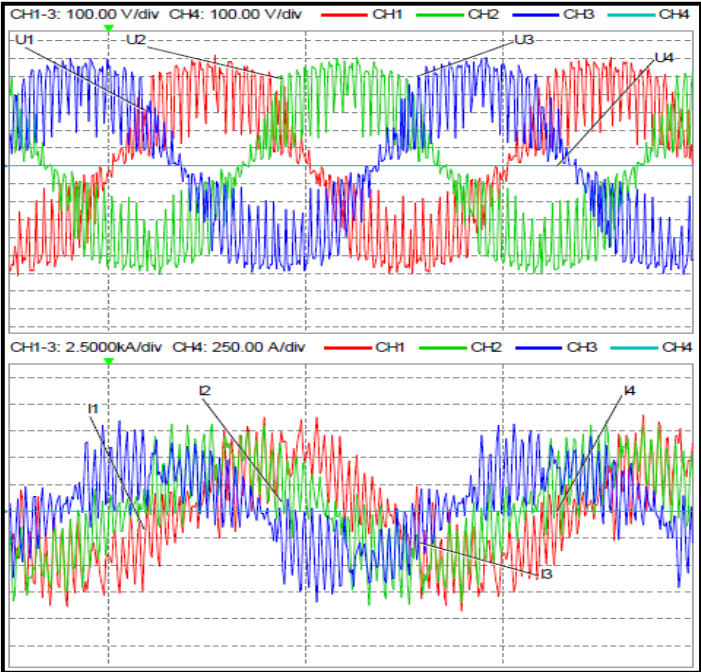
❖ LIMONCOCHA 2.



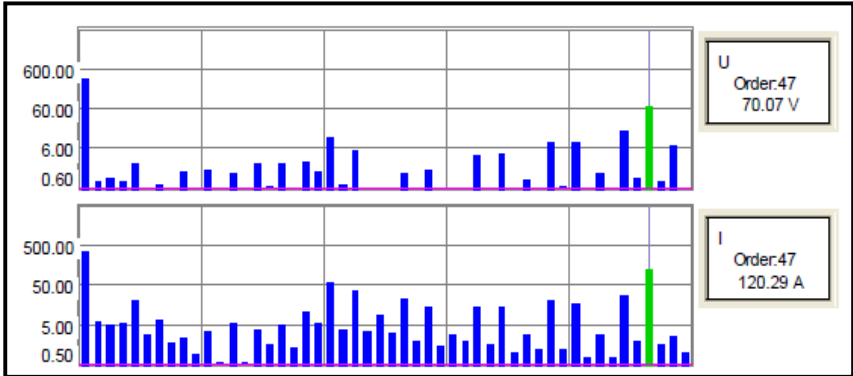
THDI	5.98%
THDV	2.78%
TDD	6.27%



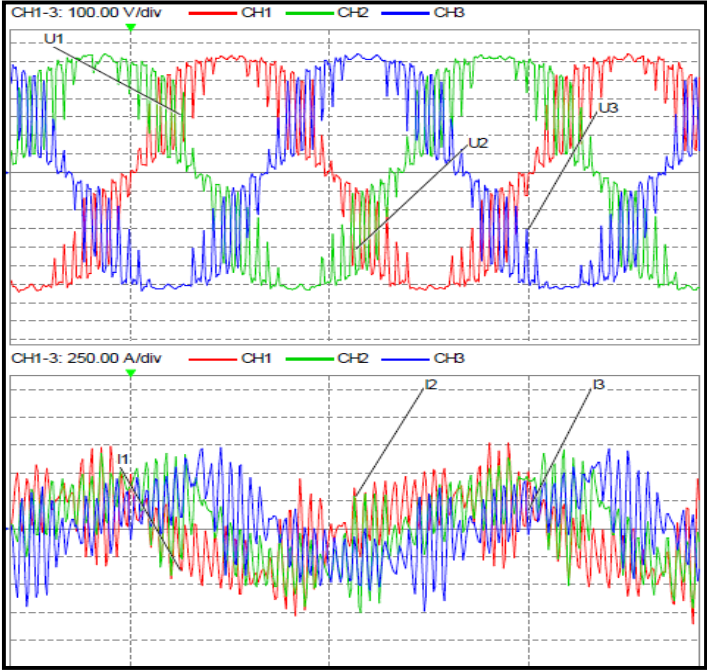
❖ LIMONCOCHA 3.



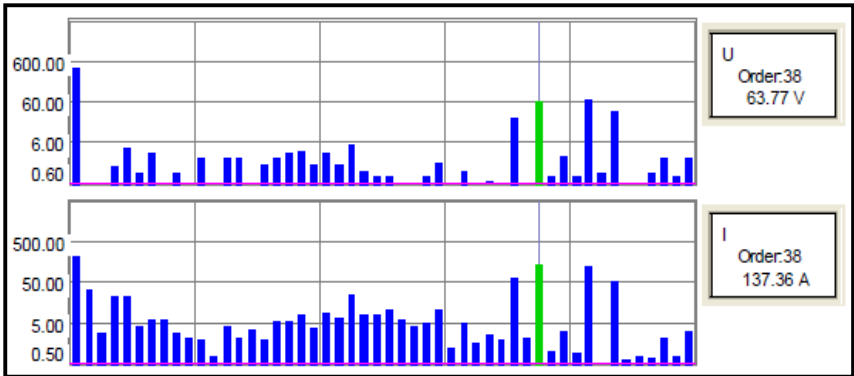
THDI	39.73%
THDV	21.24
TDD	43.87%



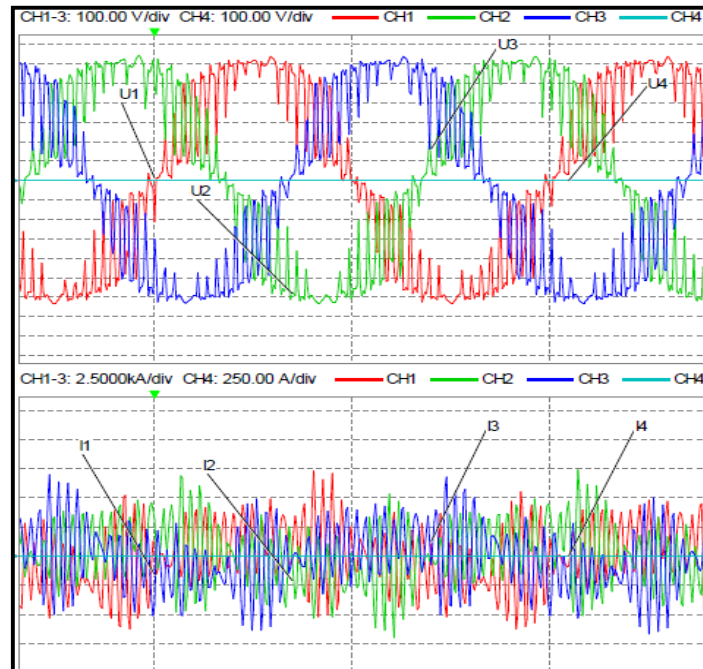
❖ LIMONCOCHA 4.



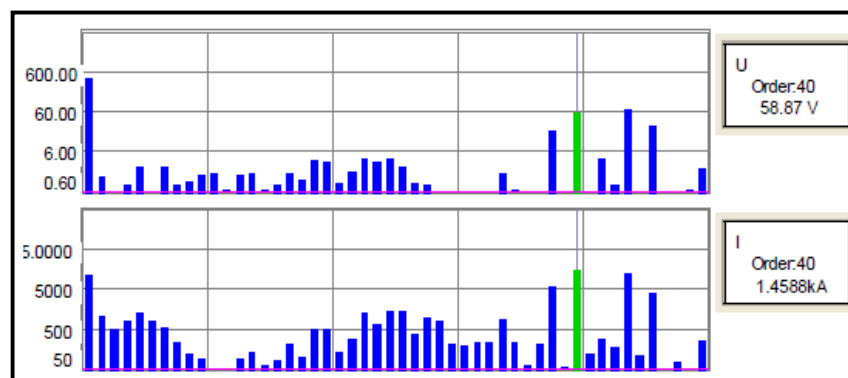
THDI	67.57 %
THDV	23.14 %
TDD	58.75%



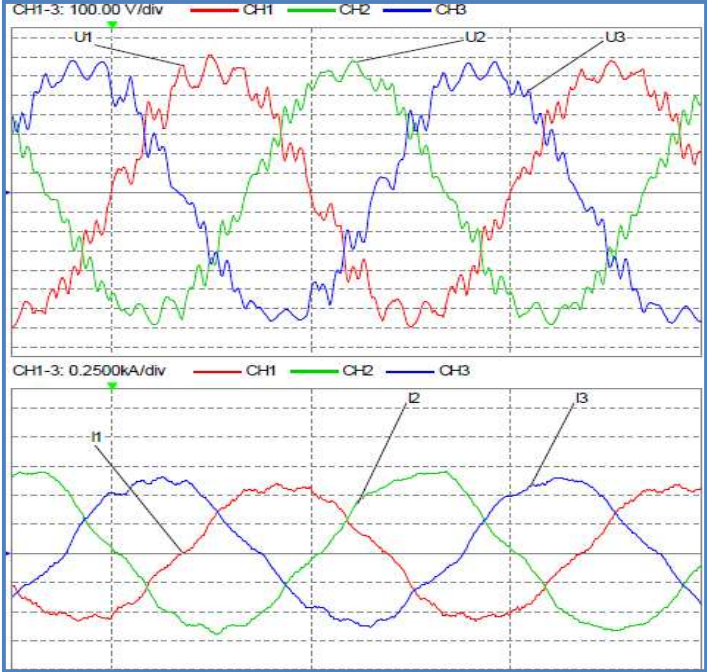
❖ LIMONCOCHA 6.



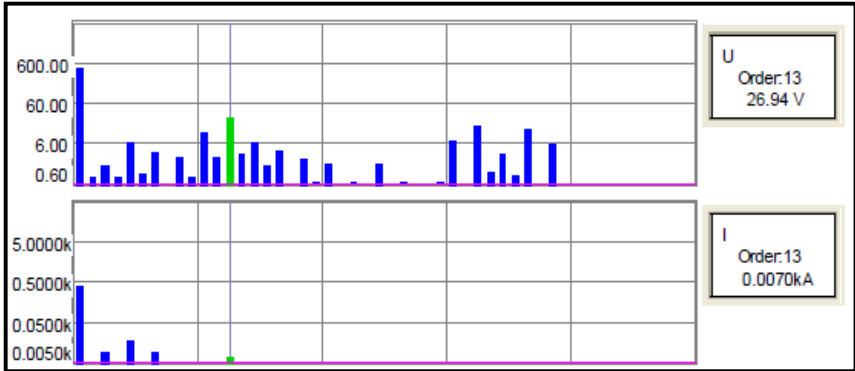
THDI	88.43 %
THDV	22.07 %
TDD	18.46 %



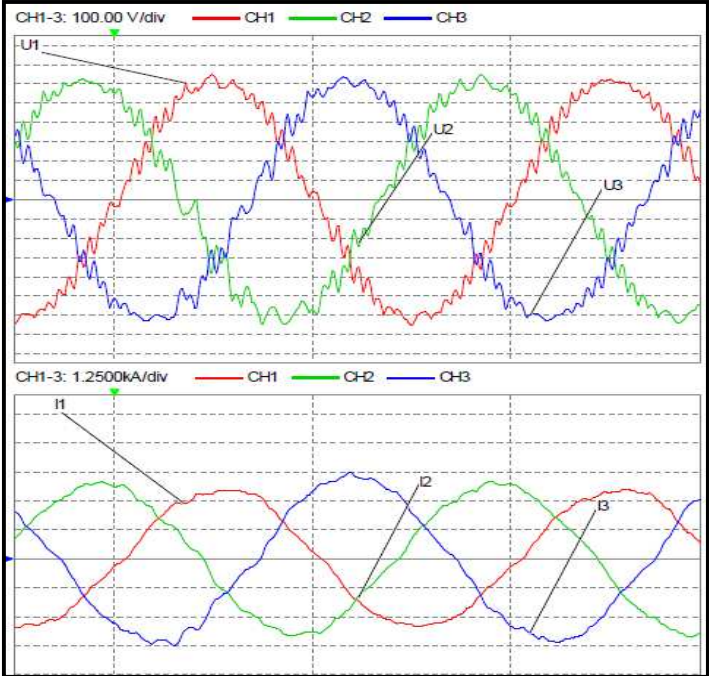
❖ LIMONCOCHA 7.



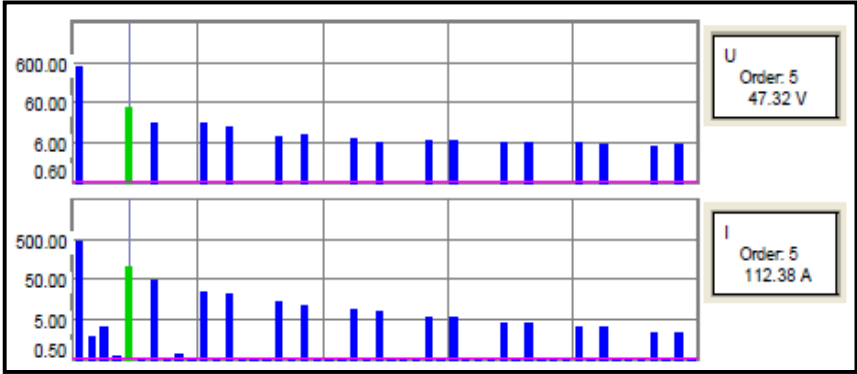
THDI	6.09
THDV	8.66
TDD	5.06



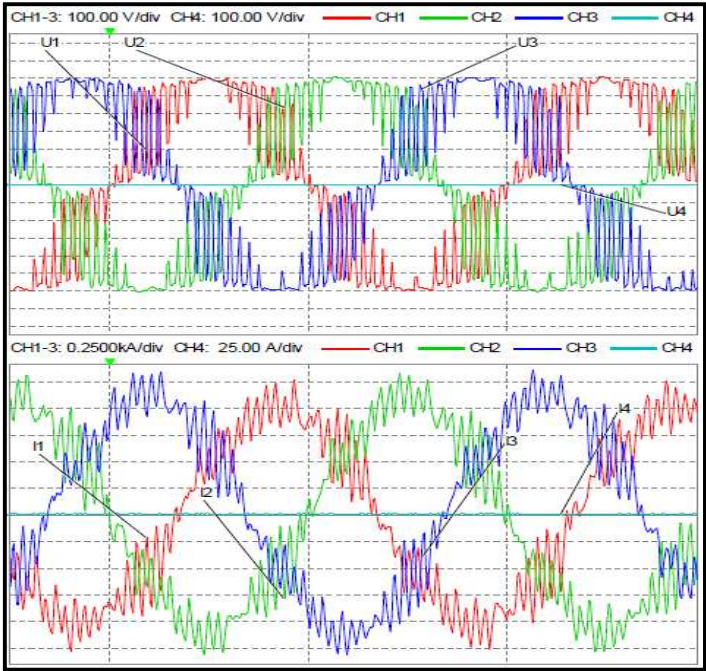
❖ LIMONCOCHA 8.



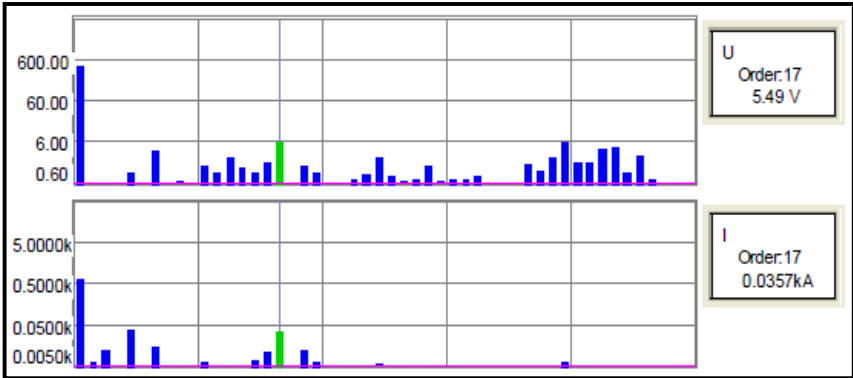
THDI	24.97%
THDV	12.96%
TDD	21.21%



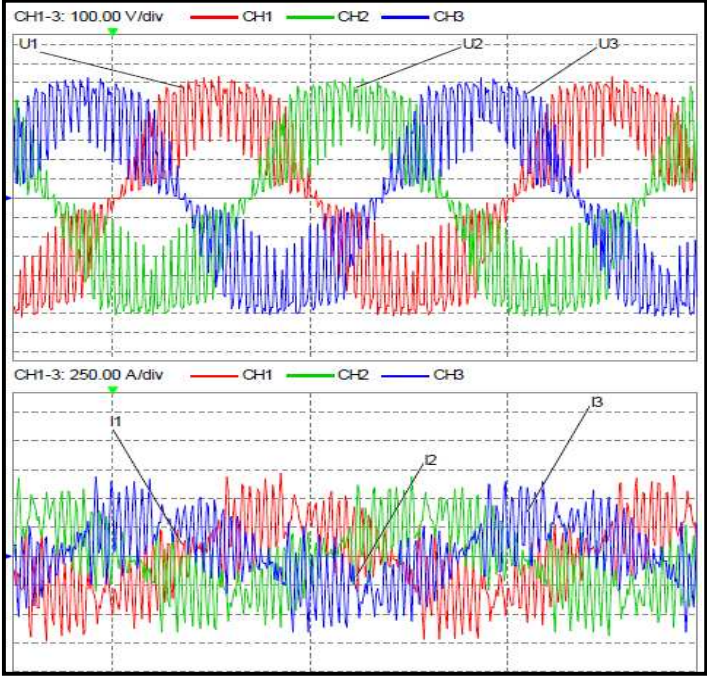
❖ LIMONCOCHA 9.



THDI	8.67
THD	3.31
TDD	9.61



❖ LIMONCOCHA 10.



THDI	16.47%
THDV	5.13 %
TDD	15.44%

