ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CENTRO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN "CENTIC" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Gustavo Alberto Saavedra Peña

Alexander Sandoval Delgado

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CENTRO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN "CENTIC" DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Gustavo Alberto Saavedra Peña

Alexander Sandoval Delgado

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:
Dr. Johann F. Petit Suarez

Co-director:
Dr. Gabriel Ordoñez Plata

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

DEDICATORIA

Cuando las fuertes tormentas aparecen en nuestra vida, borrando los suaves caminos que conducen a nuestros sueños, en el horizonte como el sol, Dios es siempre la señal que nos orienta hacia nuestro destino, mis padres Gustavo Saavedra y Norha Alba Peña son los brazos que me sostienen cuando estoy por caer y mi novia Luz Janet Barrios es la voz que me alienta a continuar.
A todos ellos dedico este logro.

–GUSTAVO

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por ser mi fortaleza, él nunca me ha desamparado y ha sido mi guía en esta lucha.
A mi madre Ana Dolores Delgado Jerez por su constante sacrificio por sus hijos, a mi padre Jaime Sandoval Barajas por su apoyo incondicional.
A mis hermanos Luz Dary, Arley, Aldemar y Cristian, por todos los momentos que hemos compartido desde la infancia.
A mis amigos, por todas las noches de trasnocho y a todos mis compañeros por los buenos momentos en el tercer piso de eléctrica.
A la vida misma por conspirar para hacer realidad este sueño y a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron con este triunfo.

–ALEXANDER

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento al Doctor JOHANN F. PETIT SUAREZ y al Doctor GABRIEL ORDOÑEZ PLATA, por su apoyo, colaboración y acompañamiento durante la realización de este proyecto.

A todo el grupo de trabajo del Centro de Control del CENTIC, Ana Maria Vargas, Edwin Ordoñez, Carlos Andrés Gómez y Carlos Hernando Jauregui, por su disponibilidad y colaboración para brindarnos la información requerida durante el desarrollo del proyecto.

A todos nuestros amigos, Cata, Juan, Omar, Sergio que a lo largo de este proceso nos han brindado su apoyo y colaborado en los momentos en los que necesitabamos de una mano amiga.

A todas las personas que de diversas maneras, participaron en la elaboración de este proyecto.

Índice general

Introducción **1**

1. Calidad de la energía eléctrica **3**

1.1. Centro de proceso de datos CPD (Internet data center IDC) 5

1.2. Huecos de Tensión (*sags*) 6

1.2.1. Causas 6

1.3. Elevaciones de Tensión (*swells*) 7

1.3.1. Causas 7

1.4. Transitorios 7

1.4.1. Causas 9

1.5. Armónicos 9

1.5.1. Causas 10

2. Inspección de la instalación eléctrica **11**

2.1. Descripción general del sistema eléctrico del CENTIC 12

2.1.1. Subestación principal 14

2.1.1.1. Tablero general 1 en baja tensión 16

2.1.1.2. Tablero general 2 en baja tensión 19

2.1.1.3. Banco de condensadores 20

2.1.1.4. Planta eléctrica de emergencia 21

2.1.2. Uninterruptible Power Supply “UPS” 22
2.2. Reconocimiento de la instalación 23
2.3. Selección de puntos a medir en el trabajo de campo 24

3. Sistema de puesta a tierra del CENTIC 26
3.1. Generalidades 26
3.1.1. Definiciones básicas 27
3.2. Inspección del sistema de puesta a tierra 29
3.3. Medición de la resistencia de puesta a tierra 34

4. Análisis de los registros tomados 37
4.1. Registro termográfico 37
4.2. Registros de calidad de la energía eléctrica 41
4.2.1. Transformador A 42
4.2.1.1. Tablero TR1-2 46
4.2.1.2. Tablero TR4-1 49
4.2.1.3. Tablero de iluminación del primer piso TA-1 50
4.2.2. Transformador B 52
4.2.2.1. Tablero RC1-1 57
4.2.3. Tablero enfriadora 1 59
4.2.4. Registros tomados a UPS 62
4.2.4.1. UPS de 5 KVA 62
4.3. Registro auditoria URE 65

5. Modelado y simulación de cargas representativas 70
5.1. Caracterización de equipos de cómputo 70
5.2. Modelado de equipos de cómputo 75
5.3. Cálculo del factor K, pérdidas en el transfomador y conductores 87

6. Recomendaciones **94**

6.1. Sobretensiones en cargas sensibles de la instalación 94

6.2. Capacidad de carga de los transformadores 95

6.3. Banco de condensadores 96

6.4. Balance de la demanda eléctrica 97

6.5. Sistema de puesta a tierra 100

6.6. Capacidad térmica de conductores y breakers 101

6.7. Recomendaciones generales a cerca de la visita URE 102

6.8. Resonancia en la Universidad 103

7. Observaciones y conclusiones **104**

Anexos **107**

A. Análisis de las mediciones **108**

A.1. Transformador A 108

A.2. Tablero TR1-2 110

A.3. Tablero TR4-1 112

A.4. Tablero TA-1 114

A.5. Transformador B 115

A.6. Tablero REC 1-1 118

A.7. Tablero Enfriadora 1 120

A.8. Tablero TR2-2 122

A.9. Tablero TR3-3 126

A.10. Tablero TR3-1 130

A.11. Tablero TR2-1 134

A.12. Tablero TM3-1 138

A.13. Tablero TMS 142

A.14.Tablero de la Bomba 145
A.15.Tablero RC 1-2 149
A.16.Ascensor 152

B. Balanceo de cargas en tableros de la instalación 157
B.1. Tablero TR3-3 157
B.2. Tablero TR4-1 158
B.3. Tablero TR4-2 159

C. Propuesta de solución a la contaminación armónica 160
C.0.1. Propuesta para un Filtro Serie 162
C.0.2. Propuesta para un Filtro en Paralelo 169
C.0.3. Comparación de Resultados de los Filtros Estudiados 175

D. Estudio de resonancia en las instalaciones de la UIS 177

Bibliografía 182

Índice de figuras

1.1. Esquema de la calidad de la energía eléctrica 4
1.2. Hueco de tensión 6
1.3. Elevación de tensión 7
1.4. Transitorio tipo impulso 8
1.5. Transitorio oscilatorio 8
1.6. Señal distorsionada por la presencia de armónicos 9

2.1. Edificio CENTIC, vista exterior 13
2.2. Diagrama unificar del CENTIC 13
2.3. Subestación vista superior 14
2.4. Transformador A de 500 kVA, ubicado en la subestación principal . . . 15
2.5. Transformador B de 500 kVA, ubicado en la subestación principal . . . 16
2.6. Primer gabinete del tablero general 1 17
2.7. Segundo gabinete del Tablero general 1 18
2.8. Tablero general 2 20
2.9. Banco de condensadores ubicado en la subestación principal 21
2.10. Planta de emergencia ubicada en la subestación principal 22
2.11. Diagrama de bloques UPS On-line 23

3.1. Sistema de puesta a tierra del edificio CENTIC 29
3.2. Sistema de puesta a tierra de la subestación 30

3.3. Conexión de la malla a tierra según planos 30
3.4. Conexión Real de la Malla a tierra 31
3.5. Posibles puntos de falla del sistema de puesta a tierra 31
3.6. Conexión del primer gabinete del tablero general uno 32
3.7. Conexión del segundo gabinete del tablero general uno 32
3.8. Diferencia de calibres entre conductores de puesta a tierra 33
3.9. Conexión del neutro y tierra 33
3.10. Tablero de iluminación de cada uno de los pisos 34
3.11. Resistencia de puesta a tierra 35

4.1. Termografía transformador A 38
4.2. Termografía transformador B 38
4.3. Termografía primer gabinete del tablero general 1 39
4.4. Termografía segundo gabinete del tablero general 1 39
4.5. Termografía del tablero general 2 40
4.6. Termografía del banco de condensadores 41
4.7. Diagrama fasorial a 60 Hz de tensiones y corrientes del transformador A 43
4.8. Señales de tensión de fase del transformador A 43
4.9. Espectro armónico de tensiones de fase 44
4.10. Señales de corriente de fase del transformador A 44
4.11. Espectro armónico de corrientes de fase 44
4.12. Espectro armónico de corrientes de fase (valor real) 45
4.13. Tensiones de fase del tablero TR1-2 47
4.14. Corrientes de fase del tablero TR1-2 47
4.15. Tensiones de fase del tablero TR4-1 49
4.16. Corrientes de fase del tablero TR4-1 49
4.17. Tensiones de fase del tablero TA-1 51

4.18. Corrientes de fase del tablero TA-1 51
4.19. Diagrama fasorial a 60 Hz de tensiones y corrientes del transformador B 52
4.21. Espectro armónico de tensiones de fase 53
4.20. Señales de tensión de fase del transformado B 53
4.22. Señales de corriente de fase del transformador B 54
4.23. Espectro armónico de corrientes de fase 54
4.24. Espectro armónico de corrientes de fase (valor real) 55
4.25. Espectro armónico de tensiones de fase 55
4.26. Tensión de fase del tablero RC1-1 57
4.27. Corrientes de fase del tablero RC1-1 58
4.28. Tensiones de fase del tablero enfriadora 1 60
4.29. Corrientes de fase del tablero enfriadora 1 60
4.30. Diagrama de bloques de la conexión de la UPS a la alimentación . . . 62
4.31. Señales de entrada y salida de la UPS, en operación normal 63
4.32. Armónicos de tensión y corriente 64
4.33. Tensiones de entrada y salida de la UPS durante el funcionamiento de la planta 64
4.34. Mangueras de succión sin aislamiento térmico 66
4.35. Empalmes defectuosos y fugas de agua en la terraza 67
4.36. Acometidas en tuberia plástica y empalmes defectuosos en conductores de pararrayos 67
4.37. Iluminación y equipos encendidos sin uso 68
4.38. Temperatura de los aires salas de los Racks 68
4.39. Conexiones indebidas en cuartos de las UPS 69
4.40. Unidad manejadora con fugas de agua 69
4.41. Computadores para realizar reservas 69

5.1. Diagrama fasorial y corriente de un monitor 71

5.2. Tensión y corriente registradas en la medición de un monitor 71
5.3. Espectro armónico de corriente de un monitor 72
5.4. Diagrama fasorial y corriente de una CPU 72
5.5. Tensión y corriente registradas en la medición de una CPU 73
5.6. Espectro armónico de corriente de una CPU 73
5.7. Diagrama fasorial y corriente de un computador 74
5.8. Corrientes de fase de los tres elementos 74
5.9. Espectro armónico de corriente de un computador 75
5.10. Espectro armónico de los tres elementos 75
5.11. Diagrama de bloques de un rectificador 76
5.12. Modelo simplificado de un computador en ATP [27] 77
5.13. Corrientes de un computador 78
5.14. Tensión y corriente registradas en la medición de un computador 78
5.15. Espectro armónico de corriente de un computador 79
5.16. Bloque simplificado del modelo obtenido en ATP 80
5.17. Sistema trifásico con 5 computadores por fase 80
5.18. Corrientes de fase y neutro 81
5.19. Espectro armónico de corriente con 5 computadores por fase en ATP . 81
5.20. Espectro armónico de neutro en sistema con 5 computadores por fase . 82
5.21. Sistema con 1 computador en el extremo de una línea de fase 83
5.22. Corrientes de fase y neutro de un sistema con 1 computador en el extremo de la línea de fase 84
5.23. Simulación de una sala completa con 18 computadores, tablero TR3-1 . 85
5.24. Corrientes de fase del tablero TR3-1 85
5.25. Comparación de los espectros armónicos de la fase B para un sistema medido y simulado 86
5.26. Diagrama de pérdidas en el transformador 87

A.1. Perfil de tensiones de fase 108
A.2. DAT en Tensión del Transformador A 108
A.3. DAT de corrientes del transformador A 109
A.4. Perfil de corrientes de fase 109
A.5. Factor de potencia por fase del transformador A 109
A.6. Potencia total del transformador A 110
A.7. Factor de potencia aritmético y efectivo del transformador A 110
A.8. Perfil de tensiones del tablero TR1-2 110
A.9. Perfil de corrientes del tablero TR1-2 111
A.10.Corriente de neutro del tablero TR1-2 111
A.11.Potencia aparente del tablero TR1-2 111
A.12.Factor de potencia del tablero TR1-2 112
A.13.Perfil de tensiones del tablero TR4-1 112
A.14.Perfil de tensiones del tablero TR4-1 112
A.15.corriente de neutro del tablero TR4-1 113
A.16.Potencia aparente del tablero TR4-1 113
A.17.Factor de potencia del tablero TR4-1 113
A.18.Perfil de tensiones del tablero TA-1 114
A.19.Perfil de corrientes del tablero TA-1 114
A.20.Corriente de neutro del tablero TA-1 114
A.21.Potencia aparente del tablero TA-1 115
A.22.Factor de potencia del tablero TA-1 115
A.23.Perfil de tensiones de fase del transformador B 115
A.24.DAT en Tensión del transformador B 116
A.25.DAT de corrientes del transformador B 116
A.26.Perfil de corrientes de fase del transformador B 116
A.27.Factor de potencia del transformador B 117

A.28.Potencia aparente del transformador B 117
A.29.Potencia activa y reactiva del transformador B 117
A.30.Perfil de tensiones del tablero REC1-1 118
A.31.Perfil de corrientes del tablero REC1-1 118
A.32.Corriente de neutro del tablero REC1-1 118
A.33.Potencia aparente del tablero REC1-1 119
A.34.Factor de potencia del tablero REC1-1 119
A.35.Perfil de tensiones de la enfriadora 1 120
A.36.Perfil de corrientes de la enfriadora 1 120
A.37.Corriente de neutro de la enfriadora 1 121
A.38.Potencia aparente de la enfriadora 1 121
A.39.Factor de potencia de la enfriadora 1 121
A.40.Tensiones de fase del tablero TR2-2 122
A.41.Corrientes de fase del tablero TR2-2 123
A.42.Perfil de Tensiones del tablero TR2-2 124
A.43.Perfil de Corrientes del tablero TR2-2 124
A.44.Corriente de neutro del tablero TR2-2 125
A.45.Potencia aparente del tablero TR2-2 125
A.46.Factor de potencia del tablero TR2-2 126
A.47.Tensiones de fase del tablero TR3-3 126
A.48.Corrientes de fase del tablero TR3-3 127
A.49.Perfil de tensiones del tablero TR3-3 128
A.50.Perfil de corrientes del tablero TR3-3 129
A.51.Corriente de neutro del tablero TR3-3 129
A.52.Potencia aparente del tablero TR3-3 129
A.53.Factor de potencia del tablero TR3-3 130
A.54.Tensiones de fase del tablero TR3-1 130

A.55.Corrientes de fase del tablero TR3-1 131
A.56.Perfil de tensiones del tablero TR3-1 132
A.57.Perfil de corrientes del tablero TR3-1 132
A.58.Corriente de neutro del tablero TR3-1 133
A.59.Potencia aparente del tablero TR3-1 133
A.60.Factor de potencia del tablero TR3-1 134
A.61.Tensiones de fase del tablero TR2-1 134
A.62.Corrientes de fase del tablero TR2-1 135
A.63.Perfil de tensiones del tablero TR2-1 136
A.64.Perfil de corrientes del tablero TR2-1 136
A.65.Corriente de neutro del tablero TR2-1 137
A.66.Potencia aparente del tablero TR2-1 137
A.67.Factor de potencia del tablero TR2-1 138
A.68.Tensiones de fase del tablero TM3-1 138
A.69.Corrientes de fase del tablero TM3-1 139
A.70.Perfil de tensiones del tablero TM3-1 140
A.71.Perfil de corrientes del tablero TM3-1 140
A.72.Corrientes de neutro del tablero TM3-1 141
A.73.Potencia aparente del tablero TM3-1 141
A.74.Factor de potencia del tablero TM3-1 141
A.75.Tensiones de fase del tablero TMS 142
A.76.Corrientes de fase del tablero TMS 142
A.77.Perfil de tensiones del tablero TMS 143
A.78.Perfil de corrientes del tablero TMS 144
A.79.Corriente de neutro del tablero TMS 144
A.80.Potencia aparente del tablero TMS 144
A.81.Factor de potencia del tablero TMS 145

A.82.Tensiones de fase de la Bomba 145
A.83.Corrientes de fase de la Bomba 146
A.84.Perfil de tensiones de fase 147
A.85.Perfil de corrientes de fase 147
A.86.Corriente de neutro 148
A.87.Potencia aparente 148
A.88.Factor de potencia 148
A.89.Tensiones de fase del tablero RC1-2 149
A.90.Corrientes de fase del tablero REC1-2 149
A.91.Perfil de tensiones del tablero RC1-2 151
A.92.Perfil de corrientes del tablero RC1-2 151
A.93.Corriente de neutro del tablero RC1-2 151
A.94.Potencia aparente del tablero RC1-2 152
A.95.Factor de potencia del tablero RC1-2 152
A.96.Tensiones de fase del ascensor 153
A.97.Corrientes de fase del ascensor 153
A.98.Perfil de tensiones de fase del ascensor 154
A.99.Perfil de corrientes de fase del ascensor 155
A.100.Corriente de neutro del ascensor 155
A.101.Potencia aparente del ascensor 155
A.102.Factor de potencia del ascensor 156

C.1. Posibles ubicaciones de un filtro pasivo 161
C.2. Filtro pasivo doblemente sintonizado 162
C.3. Respuesta en frecuencia del filtro 163
C.4. Sistema con 12 equipos y filtro por fase 163
C.5. Corrientes simuladas con filtro y sin filtro en las fases 164

C.6. Tensiones obtenidas de la simulación del sistema 164
C.7. Sistema desbalanceado con filtro en cada fase 165
C.8. Corriente simulada del sistema desbalanceado con filtro en las fases . . 166
C.9. Sistema con 12 equipos y filtro en el neutro 167
C.10. Corrientes de fase sistema con filtro y sin filtro 167
C.11. Tensiones de fase sistema con filtro en el neutro 168
C.12. Sistema desbalanceado con filtro en el neutro 169
C.13. Corriente simulada sistema desbalanceado con filtro en el neutro 169
C.14. Filtro paralelo propuesto para el sistema 171
C.15. Respuesta en frecuencia del filtro 172
C.16. Sistema con 12 equipos por fase y filtro en paralelo 173
C.17. Corrientes y tensiones obtenidas en la simulación 173
C.18. Sistema desbalanceado con filtro paralelo 174
C.19. Corrientes sistema desbalanceado con filtro paralelo 175

D.1. Sistema eléctrico reducido de la UIS 178
D.2. Respuesta en frecuencia sistema eléctrico de la UIS 179

Índice de tablas

2.1. Metodología propuesta para el estudio en CPE 12

2.2. Principales características del transformador A 15

2.3. Principales características del transformador B 16

2.4. Características generales del TG1 17

2.5. Distribución de interruptores del tablero general 1 primer gabinete . . . 18

2.6. Distribución de interruptores del tablero general 1, segundo gabinete . . 19

2.7. Características generales del TG2 19

2.8. Distribución de interruptores del tablero general 2 20

2.9. Características técnicas de la planta eléctrica 22

2.10. Características técnicas de las UPS de 5, 10 y 20 kVA 23

2.11. Tableros a monitorizar 25

3.1. Valores de resistencia de puesta a tierra 35

4.1. Magnitudes de las corrientes de fase y el neutro del transformador A . . 45

4.2. Magnitudes de las corrientes de fase y neutro del transformador B . . . 54

5.1. Magnitud de las componentes armónicas resultantes de la simulación de un computador 79

5.2. Magnitud de las componentes armónicas de un sistema con 5 computadores por fase 82

5.3. Magnitud del espectro armónico de la corriente por el neutro 82

5.4. Comparación de componentes armónicas con sistemas de 1 y 5 equipos 83

5.5. Comparación entre las componentes armónicas de la fase A y B 84

5.6. Magnitud de los armónicos en corriente de una fase para un sistema medido y simulado 87

5.7. Componentes armónicas del transformador A tomadas para el cálculo . 89

5.8. Datos para el factor K 90

6.1. Distribución actual de los circuitos del tablero TR1-2 98

6.2. Distribución ideal de los circuitos del tablero TR1-2 98

6.3. Distribución actual de los circuitos en el tablero TR2-2 99

6.4. Distribución ideal de los circuitos en el tablero TR2-2 99

6.5. Distribución actual de los circuitos en el tablero TR3-1 100

6.6. Distribución ideal de los circuitos en el tablero TR3-1 100

B.1. Distribución actual de los circuitos del tablero TR3-3 157

B.2. Distribución recomendada para los circuitos del tablero TR3-3 158

B.3. Distribución actual de los circuitos del tablero TR4-1 158

B.4. Distribución recomendada para los circuitos del tablaro TR4-1 158

B.5. Distribución atual de los circuitos del tablero TR4-2 159

B.6. Distribución recomendada para los circuitos del tablero TR4-2 159

C.1. Comparación de componentes armónicas en un sistema con filtro y sin filtro 165

C.2. Componentes armónicas de un sistema desbalanceado con filtro 166

C.3. Comparación de componentes armónicas para un sistema con filtro en las fases y filtro en el neutro 168

C.4. Valores de las componentes armónicas 170

C.5. Comparación de componentes armónicas para un sistema sin filtro y con filtro en paralelo 174

C.6. Componentes armónicas de un sistema desbalanceado con filtro paralelo 175

C.7. Comparacion sistema balanceado con los tres filtros 176

RESUMEN

TÍTULO:

ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL CENTRO DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN CENTIC DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER[1]

AUTORES:

GUSTAVO ALBERTO SAAVEDRA PEÑA
ALEXANDER SANDOVAL DELGADO[2]

PALABRAS CLAVE:

Diagnóstico, Distorsión Armónica, Recomendaciones, Filtro Pasivo, Calidad de la Energía Eléctrica, Monitorización, Análisis, Alternative Transients Program.

DESCRIPCIÓN:

Los Centros de Datos o Internet Data Center (IDC) son edificaciones que están creciendo rapidamente en los ultimos años, caracterízados por altas concentraciones de computadores y equipos electrónicos dedicados a satisfacer actividades propias de la nueva economía digital. El CENTIC es un edifico de similares características provisto por una numerosa cantidad de equipos de computo, centro de servidores para los sistemas de información de la Universidad, sistemas de automatización, entre otros. La naturaleza de este tipo de cargas es tal que en algunos casos pueden causar una significativa distorsión en la tensión de suministro, así como otros disturbios relacionados con calidad de la energía.

El diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica para cualquier tipo de instalación requiere de la planeación y ejecución de etapas para la identificación del problema. La evalución del CENTIC se llevo a cabo siguiendo una metodología desarrollada especificamente para el caso en cuestión. Esta se inicio con la valoración de la puesta a tierra de la instalación, posteriormente se tomaron mediciones eléctricas en algunos puntos claves para realizar el analisis en calidad de la energía, con base en dichos analisis se consideraron las posibles soluciones para mitigar el problema en el sistema.

El próposito de la actual investigación es presentar los resultados y analisis de la monitorización de la calidad de la energía en el CENTIC haciendo enfasis en armónicos. Igualmente este caso de estudio servirá como ejemplo para realizar diagnósticos en calidad de la energía en instalaciones con características similares.

[1] Proyecto de Grado

[2] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Johann F. Petit Suarez. Gabriel Ordoñez Plata.

ABSTRACT

TITLE:

ANALYSIS AND DIAGNOSIS_OF POWER QUALITY OF THE INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES CENTER (CENTIC) AT UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER[3]

AUTHORS:

GUSTAVO ALBERTO SAAVEDRA PEÑA

ALEXANDER SANDOVAL DELGADO[4]

KEY WORDS:

Diagnosis, Harmonic Distortion, Recommendation, Passive Filter, Power Quality, Monitoring, Analysis, Alternative Transients Program.

DESCRIPTION:

Internet Data Centers (IDC) or Centros de Datos, are building growing rapidly in the last years, characterized by high concentrations of computers and electronic equipment dedicated to satisfy activities related to the new digital economy.

The CENTIC is a building with similar characteristics supplied with a large quantity of computers, server center of the information system of university, automation system, etc. The nature of this type of loads in some cases can cause an important distortion of the voltage supply and disturbances related to power quality.

Diagnosis of power quality for any type of installation requires planning and implementation of stages for indentification of the problem. The assessment of CENTIC was carried out following a methodology developed especifically for this case. It started with the assessment_of the installed grounding system. Afterwards, electrical measurements were taken in some important points in order to make the analysis of power quality and based on this analysis the possible solutions to reduce the problem on the system were considered.

The main purpose of this research is to present results and analysis of monitoring the power quality of the CENTIC with emphasis in harmonics. Likewise this case study will serve as an example to carry out diagnosis of power quality in installations with similar characteristics.

[3]Degree Project

[4]Faculty of Physical-Mechanic Engieneering. School of Electrical, Electronical and Telecommunications Engineering. Johann F. Petit Suarez. Gabriel Ordoñez Plata.

Introducción

La energía eléctrica es el principal insumo en el desarrollo de la actividad industrial, la dependencia de un gran numero de actividades de tipo social y económico por la continuidad del suministro eléctrico y la calidad de la energía lo convierten en un bien de mayor importancia. Aproximadamente el 33 % de la demanda nacional de electricidad corresponde al sector comercial e industrial, si este insumo no se encuentra dentro de margenes aceptables para la correcta operación de los procesos, la competitividad de las empresas se pone en riesgo, debido a que se incurre en costos superiores a causa de una insuficiente calidad de la energía eléctrica.

A lo largo de los últimos años las condiciones de operación de las redes eléctricas se han modificado como consecuencia del alto desarrollo tecnológico. Cada día se tiene un mayor uso de equipos electrónicos, vinculados al control de procesos, accionamientos, procesamiento, comunicaciones y transmisión de datos, lo cual implica el uso masivo de elementos de estado solido y cargas no lineales, tales como variadores de velocidad, rectificadores, etc. Esto ha ocasionado una variedad de disturbios electromagnéticos que al final se reflejan en desviaciones de las condiciones nominales en la señales de tensión, corriente o frecuencia del sistema eléctrico, generando un problema de perturbaciones eléctricas que pueden afectar el buen funcionamiento o daño de los equipos y procesos.

El Centro de Tecnologías de Información y Comunicación "CENTIC" ubicado en la Universidad Industrial de Santander, es una muestra del creciente uso de sistemas electrónicos, caracterizados por tener un comportamiento no-lineal. La instalación está diseñada bajo el concepto de edificio inteligente, enmarcado como un centro de proceso de datos o *Internet Data Center* (IDC). Cuenta con una red de computo compuesta por 1200 computadores además de una serie de sistemas automatizados como lo son: el control de iluminación, el control de los aires acondicionados, un circuito cerrado de televisión entre otros equipos, que hacen de la instalación un edificio con características eléctricas muy particulares.

Este proyecto tiene como objeto realizar un completo estudio de la calidad de la energía eléctrica (CEL) del CENTIC, para dar solución a una serie de problemas que actualmente ocurren en la instalación, relacionados con perturbaciones eléctricas.

En el primer capítulo de este libro se describen los disturbios más comunes asociados a una mala calidad de la energía eléctrica, base conceptual para el desarrollo del proyecto.

El segundo capítulo corresponde a una descripción detallada de todo el sistema eléctrico presente en la instalación, con ello se busca detectar los puntos críticos para el análisis de la calidad de la energía eléctrica del edificio.

En el tercer capítulo se describe el estado actual del sistema de puesta a tierra del CENTIC, se realiza un análisis para evaluar la efectividad del sistema como una parte fundamental de la correcta operación de los equipos.

El cuarto capítulo corresponde al análisis de los registros tomados con la cámara termográfica y el analizador de redes a cada uno de los transformadores así como a algunos tableros. Asimismo se presenta el resultado de la auditoria energética realizada a la instalación.

En el quinto capitulo se realiza el análisis del comportamiento en tensión y corriente de los componentes de un equipo de computo (CPU y monitor), así como del computador completo. De la misma forma se realiza el análisis de varias cargas correspondientes a equipos de cómputo agrupadas en una sala completa utilizando la simulación en el programa ATP, por medio de esta simulación se plantea una solución al problema de distorsión armónica presentado en la instalación.

El capitulo seis se presentan las recomendaciones adicionales al capítulo cinco correspondientes a cada uno de los problemas detectados en el diagnóstico de calidad de energía eléctrica realizado al CENTIC.

Capítulo 1

Calidad de la energía eléctrica

El concepto de calidad del servicio de la energía eléctrica es un tema que ha venido cobrando importancia recientemente. En Colombia hace algunos años era relacionado únicamente con la continuidad del servicio, sólo se tenían dos tipos de índices que determinaban la calidad del suministro, se calificaba por la frecuencia de las interrupciones por año y por el tiempo promedio por interrupción[1]. No obstante con el incremento en la aplicación de equipos electrónicos para muchos de los procesos residenciales como industriales se han generado problemas asociados a disturbios electromagnéticos. El impacto ocasionado por este tipo de disturbios en los usuarios del servicio, han obligado a modificar el esquema planteado anteriormente acerca de la calidad del servicio. Actualmente la calidad se divide principalmente (ver figura 1.1) en: la atención comercial y la calidad de la potencia suministrada conocido también como calidad de la potencia eléctrica (CPE), a su vez este último se divide en: la continuidad del servicio y la calidad de la onda de tensión y corriente [24].

Una fuente de suministro perfecta es aquella que ofrece una onda libre de toda perturbación, un nivel de tensión y frecuencia aceptables y una disposición en cualquier momento, infortunadamente estas condiciones no pueden ser aseguradas y en cualquier sistema eléctrico va a existir un margen de desviación de esta perfección. El nivel requerido por el usuario dependerá de la aplicaciones, de las características de sus equipos instalados y de la percepción de sus propias necesidades, de ahí que el término CPE pueda tener diferentes concepciones. Ejemplo en actividades que desarrollan dispositivos electrónicos, un disturbio relacionado con la CPE, una interrupción muy breve,

[1]En Colombia estos índices se conocen como Duración Equivalente del Servicio (DES) y Frecuencia Equivalente del Servicio (FES).

puede llegar a ser catastrófica en la fabricación de semiconductores, debido a que la producción de una oblea requiere numerosas etapas que toman varios días, si se llegase a interrumpir el suministro eléctrico por tan solo algunos segundos podria destruir todo el proceso. Por el contrario para otro tipo de usuario la misma interrupción podria ser insignificante o representar un pequeño retraso en sus actividades. Es por eso que de una manera general el concepto de calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un tiempo y ubicación dados actuando sobre un determinado sistema eléctrico [6].

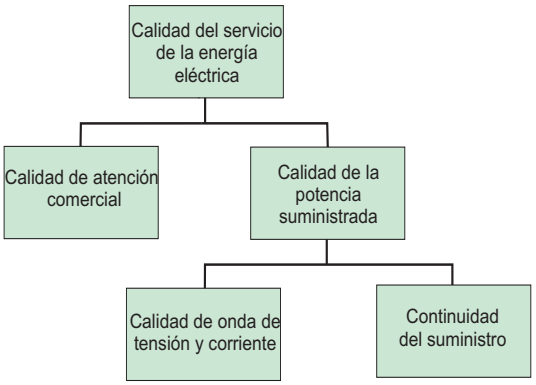


Figura 1.1: Esquema de la calidad de la energía eléctrica

Dentro de los problemas más comunes asociados a una mala calidad de la energía eléctrica se encuentran [14].

- Fallas intermitentes o permanentes en los equipos de cómputo.
- Interferencia con equipo de comunicaciones.
- Reducción de vida útil de condensadores, transformadores y elementos de protección.
- Daño de motores durante el arranque.
- Sobrecarga de cables, banco de condensadores, transformadores.
- Medida inexacta de potencia y energía eléctrica.
- Riesgos de choque eléctrico fatal.
- Disparo repentino de interruptores y circuitos residuales en algunos dispositivos.

Para realizar un estudio de la calidad de la energía en una determinada instalación, se deben considerar ciertos aspectos referentes a las actividades desarrolladas en la misma, con el fin de relacionarse con los equipos que se encuentren en funcionamiento, para posteriormente determinar una posible causa de los fenómenos eléctricos que pueden presentarse y por consiguiente ocasionar un daño en los componentes o equipos de la instalación.

1.1. Centro de proceso de datos CPD (Internet data center IDC)

Un CPD es un edificio con grandes concentraciones de computadores y equipos electrónicos, que entre otras cosas tienen como objeto administrar paginas de internet, almacenar una gran cantidad de información o servir como soporte en actividades propias de la informática [4]. Por ejemplo para un banco de credito un CPD sirve como soporte para llevar registro de todos los clientes y para almacenar todas las operaciones bancarias que estos realicen a diario. Son precisamente este tipo operaciones efectuadas por los CPD en los que se tienen grandes bases de datos y manejo de información critica, que los equipos de comunicaciones e informática deben ser protegidos y la calidad de la potencia eléctrica cobra una importancia, garantizando la operación de este tipo de actividades.

En ese orden de ideas es importante tener en cuenta las perturbaciones más comunes que podrían afectar la operación de un centro de información, como son [11]:

- Huecos de tensión (*sags*)
- Elevaciones de tensión (*swells*)
- Transitorios
- Armónicos
- Sistema de puesta a tierra

1.2. Huecos de Tensión (*sags*)

Conocidos también como dips, se definen como una reducción de voltaje en un corto tiempo. La duración de este evento es de menos de un minuto pero mayor a 1/120 segundos (medio ciclo a 60 Hz). En cuanto a la magnitud de la reducción es entre el 10 por ciento y el 90 por ciento del valor RMS de la tensión nominal. Los huecos de tensión usualmente no son causa de interrupción de las actividades pero pueden afectar gravemente cargas sensibles como equipos de computo. Es posible evitar este tipo de disturbios con la instalación de algún sistema UPS (Uninterruptible Power Supply) u otro equipo de protección [14]. En la figura 1.2 se observa el ejemplo de un hueco de tensión en la onda.

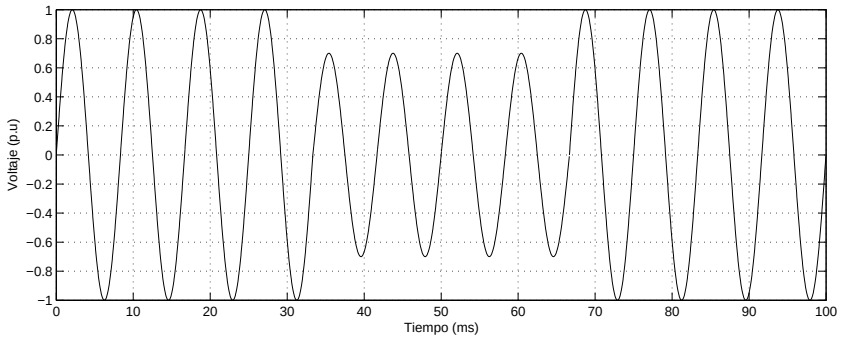


Figura 1.2: Hueco de tensión

1.2.1. Causas

Los huecos de tensión se originan por alguna falla en el sistema eléctrico (corto circuito) o por la conmutación de grandes cargas. Este tipo de disturbio se genera por una gran elevación en la corriente o por un aumento en la impedancia del sistema, si la duración del evento está entre 2 y 5 segundos la razón se debe a una falla de despeje, mientras que si la duración es cercana al minuto o mayor, el motivo es por una falla permanente o por la entrada de una carga considerable [23].

1.3. Elevaciones de Tensión (*swells*)

Como su nombre lo indica es el resultado de la elevación de la tensión en un corto tiempo. Ocurre en el momento en que la tensión se eleva en un 110 por ciento del valor RMS de la tensión nominal, con una duración entre 1/120 segundos (medio ciclo 60 Hz) y un minuto a una frecuencia de 60 Hz [14]. En la figura 1.3 se muestra el ejemplo de una elevación de tensión.

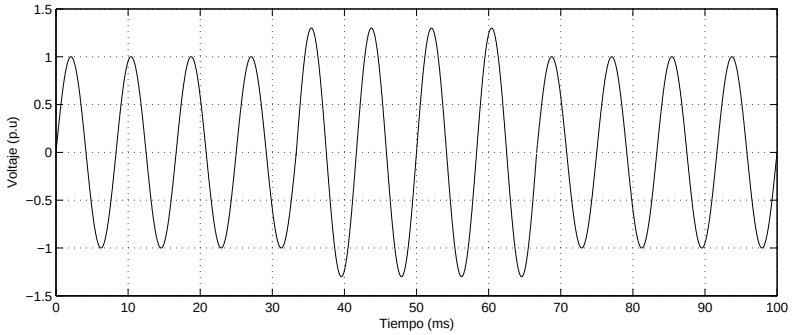


Figura 1.3: Elevación de tensión

1.3.1. Causas

Este tipo de disturbio no es muy frecuente en las instalaciones eléctricas pues sus orígenes normalmente tienen lugar en la redes de distribución y son responsabilidad del operador de red. Por otro lado no existe mucha evidencia del efecto negativo que puede causar este fenómeno en los equipos electrónicos. Una de las principales causas de las elevaciones de tensión se deben a fallas a tierra en sistemas trifásicos, las fases que fallan provocan que las demás se eleven su magnitud con respecto a tierra. Otra situación que puede provocar este tipo de disturbio esta relacionada con la entrada de bancos de condensadores que pueden sobre-compensar el sistema con duraciones que van desde algunos segundos hasta un largo periodo de tiempo [14].

1.4. Transitorios

Los transitorios son fenómenos de naturaleza momentánea que pueden causar daños en equipos electrónicos, provocar el rompimiento del aislamiento, en computadores pueden causar pérdida de información.

Los transitorios se clasifican en dos categorías: los impulsos transitorios y los transitorios oscilatorios [14].

Impulso transitorio: Un transitorio de impulso es un cambio repentino en la onda de tensión o corriente, que varía la condición de estado estacionario y que es unidireccional en polaridad (positivo o negativo). En la figura 1.4 se muestra una gráfica definida de un transitorio tipo impulso causado por una descarga atmosférica.

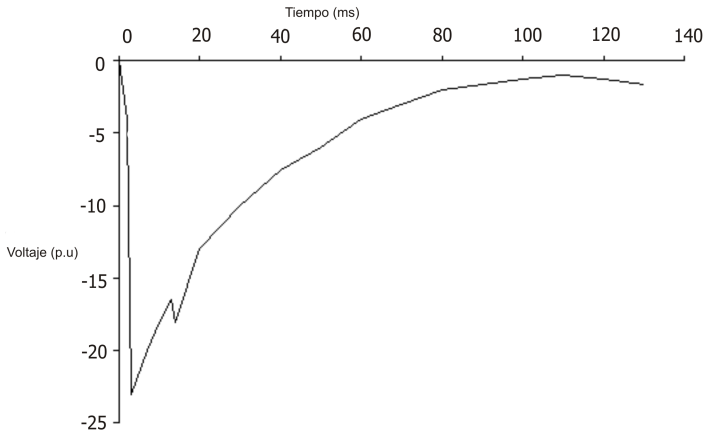


Figura 1.4: Transitorio tipo impulso

Transitorios oscilatorios: Un transitorio oscilatorio es un cambio en la amplitud de la señal u onda de tensión o de corriente o ambas, que incluye tanto valores positivos como negativos, de tal forma que el cambio de polaridad ocurre rápidamente. La figura 1.5 muestra un ejemplo gráfico de un transitorio oscilatorio.

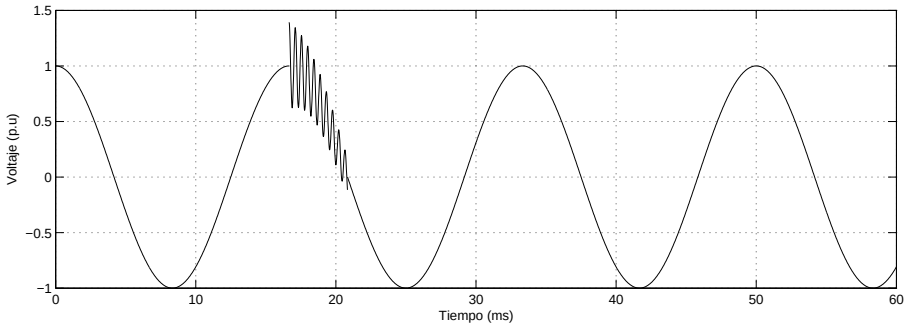


Figura 1.5: Transitorio oscilatorio

1.4.1. Causas

Los transitorios presentan un amplio rango de frecuencias. Para los dos tipos de transitorios las causas están ligadas con descargas atmosféricas o por eventos de conmutación en el sistema. Generalmente una descarga atmosférica provoca un transitorio tipo impulso, sin embargo algunas veces se puede producir un transitorio oscilatorio si se presenta resonancia con los componentes del sistema. El motivo principal para que se produzca un transitorio oscilatorio es la conmutación de cargas (capacitores o equipo electrónico) en el sistema eléctrico.

1.5. Armónicos

Los armónicos son componentes sinusoidales que operan a frecuencias que son múltiplo (2, 3, 4, etc.) entero de la frecuencia fundamental (60 Hz). Cuando se trata de armónicos, son los de corriente los mas importantes pues se generan a la salida de las cargas como corrientes y ocasionan la mayoría de efectos negativos en los demás equipos, adicionalmente la suma de ondas de las componentes armónicas a la onda de corriente fundamental produce una distorsión en la onda de tensión [23]. La magnitud de la desviación de la forma de onda con respecto a una del tipo perfectamente sinusoidal se expresa en términos de porcentajes de distorsión armónica tanto para el voltaje como para la corriente (DAT[2]). La figura 1.6 muestra un ejemplo gráfico de una onda distorsionada por la presencia de armónicos.

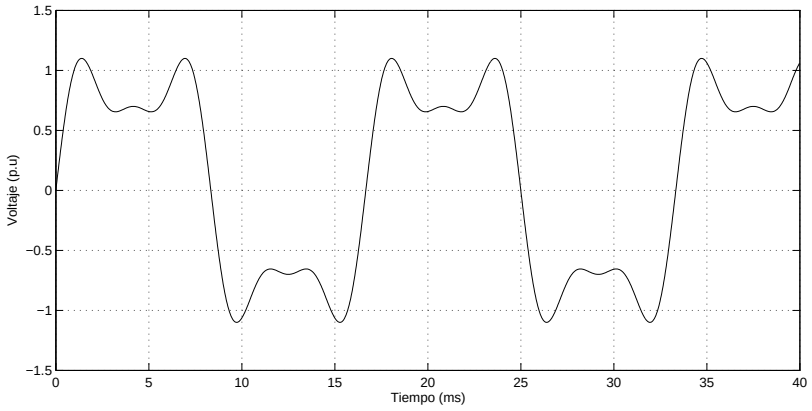


Figura 1.6: Señal distorsionada por la presencia de armónicos

[2]Distorsión Armónica Total o en ingles Total Harmonic Distorsion

1.5.1. Causas

Como se mencionó los armónicos pueden afectar la corriente así como la tensión. El producto de esta distorsión se debe a cargas no-lineales, compuestas en su mayoría por circuitos rectificadores y dispositivos semiconductores tal como diodos y SCR's. Los armónicos de corriente se reflejan en la señal de tensión debido a que son ocasionados cuando una onda de tensión pura se conecta a una carga con características no-lineales, posteriormente la corriente distorsionada pasa a través de una impedancia en serie ocasionando la deformación de la forma de onda de tensión. Es así como la cantidad de equipos que generan armónicos deterioran la calidad de la potencia eléctrica en las redes, por lo cual se debe tener en cuenta la existencia de los armónicos y sus efectos.

En cuanto al sistema de puesta a tierra, es importante garantizar las mejores condiciones debido a que existe una estrecha relación entre los problemas asociados a una mala calidad de la energía y la incorrecta conexión del cableado y puesta a tierra. En el tercer capítulo se describirá detalladamente la conexión actual asi como un análisis del sistema de puesta a tierra del CENTIC.

Capítulo 2

Inspección de la instalación eléctrica

Con el objeto de realizar un completo diagnóstico de la calidad de la energía eléctrica en el CENTIC, se estudiaron varios tipos de metodologías para aplicar a estudios de calidad propuestas por algunas normas especializadas. Normas como la IEEE 11000-2005 [16], la IEEE 1159 [14] y la IEC 61000-2 [17], recomiendan una serie de pasos a seguir para realizar un completo y acertado estudio de calidad de la energía eléctrica a una instalación. Para el presente estudio se estructuró una metología, según las situaciones y eventos propios presentados en la instalación, además de ello se consultó bibliografía relacionada con metodologias para estudios en calidad de la energía [26], [28].

La tabla 2.1 muestra la secuencia de pasos para realizar un estudio de calidad de la energía eléctrica en el CENTIC, la primera etapa trata sobre el conocimiento inicial del problema en la instalación, esta ha sido abordada desde el momento en que se aceptó la realización del proyecto. Las etapas siguientes se verán desarrolladas a lo largo de este libro.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO
Conocimiento del problema: En esta etapa se procede a entrevistarse con el usuario para escuchar la queja sobre los problemas que se están presentando en la instalación, así como revisar datos históricos sobre los problemas causados.
Análisis preliminar: Aquí se procede a realizar una descripción de todo el sistema eléctrico, identificando el tipo de cargas que se tiene en la instalación así como el tipo de alimentación de la misma. Se identifican las cargas con mayor contenido armónico así mismo se hace una revisión del circuito de tierras.
Planificación del trabajo en campo: Es la etapa en la que se realiza el registro termográfico y en la que se monitorea el alimentador principal y los alimentadores secundarios, también se realizan mediciones en los sistemas de puesta a tierra.
Análisis de resultados y modelado del sistema: En esta etapa se analizan los datos obtenidos así como se revisan los límites de los mismos con las normas especializadas, se seleccionan los datos para el modelado y simulación.
Simulación y validación del modelo: Se realizan las simulaciones necesarias y se validan sus resultados.
Conclusiones y recomendaciones: Aquí se plantean las soluciones y las recomendaciones necesarias.

Tabla 2.1: Metodología propuesta para el estudio en CPE

2.1. Descripción general del sistema eléctrico del CENTIC

El área de construcción del CENTIC es de 4.533 metros cuadrados, con 1200 computadores distribuidos en un total de 4 pisos, funcionan veintisiete (27) aulas de informática generales, los equipos restantes se distribuyen en salas de soporte de la instalación; cuenta con un centro de servidores para sistemas de información de la Universidad; un centro de control de seguridad, automatización y sonido. Además las instalaciones contemplan equipos de seguridad (circuito cerrado de televisión), automatización (sistemas de control de activos, control de accesos, control de iluminación, control de aire acondicionado) y red telemática de alta velocidad. También incluye equipos de presión constante para el suministro de agua, planta eléctrica de emergencia, subestación eléctrica, ascensor y un sistema de respaldo de electricidad compuesto por UPS. En la figura 2.1 se puede apreciar una vista exterior del CENTIC.

Figura 2.1: Edificio CENTIC, vista exterior

A continuación se presenta el diagrama general del sistema eléctrico del CENTIC, conformado por una acometida que proviene de la subestación de la biblioteca a los dos transformadores que alimentan las cargas del edificio.

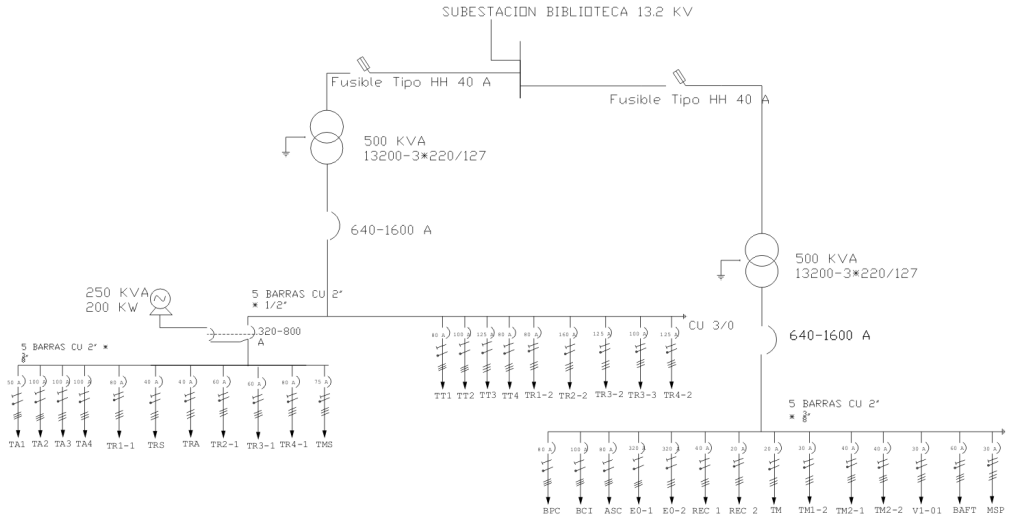


Figura 2.2: Diagrama unificar del CENTIC

Como se puede observar en la figura 2.2 uno de los transformadores alimenta dos barrajes distintos cada uno con varios interruptores termo-magnéticos que a su vez alimentan las cargas más sensibles de la edificación como lo son computadores y servidores. En uno de estos gabinetes se encuentra la barra de transferencia automática con la planta, dando prioridad de suministro a las cargas esenciales. Por su parte el segundo transformador alimenta un solo gabinete correspondiente a todas las cargas del sistema de

ventilación del edificio. A continuación se detallan algunas de las características eléctricas que posee la instalación

2.1.1. Subestación principal

El CENTIC posee una subestación tipo encapsulada, ubicada en el sótano de la edificación, la cual está provista por dos transformadores de 500 kVA c/u encargados de reducir la tensión de 13,2 kV a 208-120 V. En la figura 2.3 se muestra la distribución espacial de la subestación del edificio asi como de la sala de UPS del primer piso.

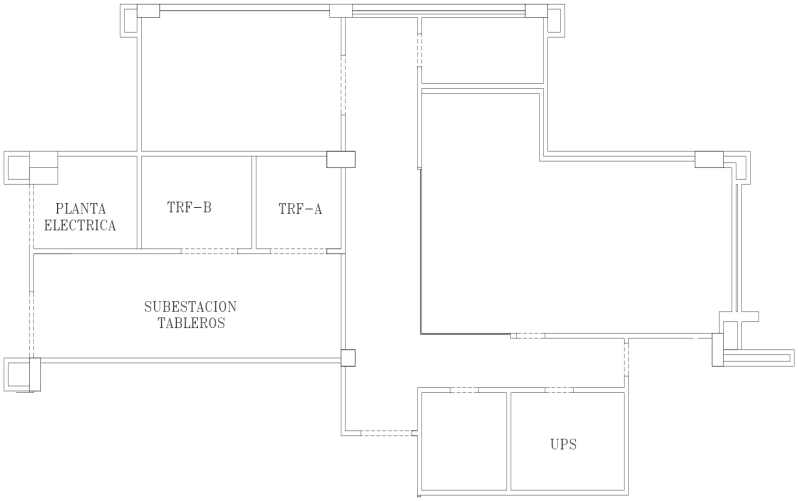


Figura 2.3: Subestación vista superior

Esta subestación se alimenta de una salida no protegida de uno de los seccionadores ubicados en la biblioteca a través de una acometida subterránea Cu 2 AWG XLPE 15 kV monopolar, la cual llega a los dos seccionadores bajo carga de los respectivos transformadores. El transformador A de marca ABB, está destinado a alimentar las cargas sensibles como son los equipos de cómputo, servidores, sistema de automatización e iluminación. En la tabla 2.2 se presentan las características principales del transformador A y en la figura 2.4 se muestra la fotografía del mismo.

Código SIG: 0109	Clase: Encapsulada	Potencia TRF: 500 KVA
Relación TRF: 13200/(228-131.5)V	Grupo Conexión: Dy-5	Tensión cc (Uz): 4.5 %
Corriente cc: 28.14 kA	Año: 2006	Dimensiones TRF: 1.4*1.2*1.5 m
Fabricante TRF: ABB		Taps: Tap actual: 13530 V
Tipo Seccionador: Seccionador bajo	carga para uso interior	13200 V
Tipo fusible: Bayoneta	Tipo Pararrayo: N/A	12870 V
In Fusible: 40 A	Tensión Pararrayo: N/A	12540 V
Tensión Fusible: 24 kV	Id Pararrayo: N/A	12210 V

Tabla 2.2: Principales características del transformador A

Figura 2.4: Transformador A de 500 kVA, ubicado en la subestación principal

El transformador B de marca Siemens está dispuesto para alimentar los motores relacionados con el aire acondicionado, bombas de agua, bomba contra incendios y ascensor entre otros. En la figura 2.5 y en la tabla 2.3 se muestra el transformador B y la tabla con sus principales características respectivamente.

Figura 2.5: Transformador B de 500 kVA, ubicado en la subestación principal

Código SIG: 0110	Clase: Encapsulada	Potencia TRF: 500 KVA
Relación TRF: 13200/(216-124.7)V	Grupo Conexión: Dy-5	Tensión cc (Uz): 3.9 %
Corriente cc: 34.27 kA	Año: 2006	Dimensiones TRF: 1.8*1.1*1.3 m
Fabricante TRF: Siemens		Taps: 13530 V
Tipo Seccionador: Seccionador bajo carga para uso interior		Tap actual 13200 V
Tipo fusible: Bayoneta	Tipo Pararrayo: N/A	12870 V
In Fusible: 40 A	Tensión Pararrayo: N/A	12540 V
Tensión Fusible: 24 kV	Id Pararrayo: N/A	12210 V

Tabla 2.3: Principales características del transformador B

2.1.1.1. Tablero general 1 en baja tensión

La acometida del tablero general 1 en BT proviene del transformador A, este tablero se encuentra distribuido en dos gabinetes. Las características principales de estos gabinetes se muestran en la tabla 2.4.

Código SIG: 01091	Acometida: Cu 4(3#500 MCM THHN+1#500 MCM THHN)+1#3/0 AWGt	
Totalizador: (640-1600) A	Icc Totalizador: 85 kA	Fabricante Tot: ABB
No Barras BT: 5	Barraje: Cu 3 1/8"*3/8"	In Barraje: 1310 A
Dimensiones Tablero: 0.9*0.5*2.0 m	Vn DPS: No	Id DPS: No

Tabla 2.4: Características generales del TG1

En el primer gabinete del tablero se ubican 9 interruptores termo-magnéticos correspondientes a equipos de cómputo y salidas de tomacorrientes, según la nomenclatura existente se tienen tomacorrientes regulados y no regulados, sin embargo estas cargas no tienen respaldo de energía por medio de las unidades UPS (Ver figura 2.6).

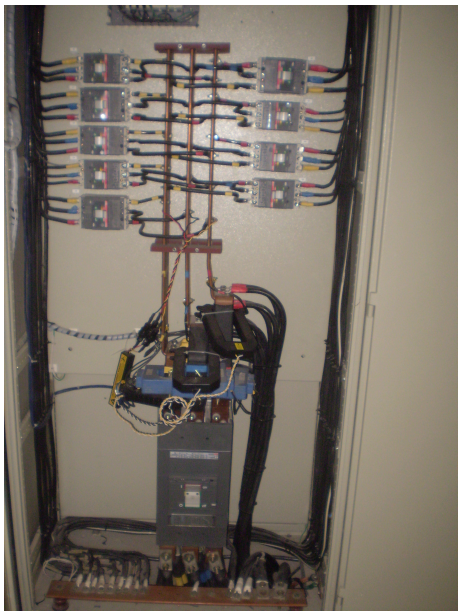


Figura 2.6: Primer gabinete del tablero general 1

La distribución de interruptores del primer gabinete del tablero general 1, según la posición descrita en la tapa del tablero se muestra en la tabla 2.5.

	Posición en el tablero		
Tablero Regulado 3 del Piso 3 (TR3-3)	1	2	Tablero Regulado2 del Piso 2 (TR2-2)
Tablero Regulado 2 del piso 3 (TR3-2)	3	4	Tablero Tomas Piso 1 (TT1)
Tablero Tomas Piso 3 (TT3)	5	6	Tablero Regulado 2 del Piso 1 (TR1-2)
Tablero Tomas Piso 4 (TT4)	7	8	Tablero Tomas Piso 2 (TT2)
Tablero Regulado 2 del Piso 4 (TR4-2)	9	10	

Tabla 2.5: Distribución de interruptores del tablero general 1 primer gabinete

En el segundo gabinete se disponen 12 interruptores termo-magnéticos, correspondientes a las cargas más esenciales de la edificación, las cuales son las únicas que tienen respaldo de energía eléctrica, por medio de la planta de emergencia. Dentro de las cargas más importantes que posee la instalación se encuentran los servidores que habilitan la red universitaria, el sistema de iluminación del edificio, el sistema de automatización y salas con equipos de cómputo, entre otras. En la figura 2.7, se pueden apreciar los interruptores termomagnéticos de este gabinete, al igual que se señala en el recuadro la barra de transferencia del suministro de AC con la planta eléctrica de emergencia.

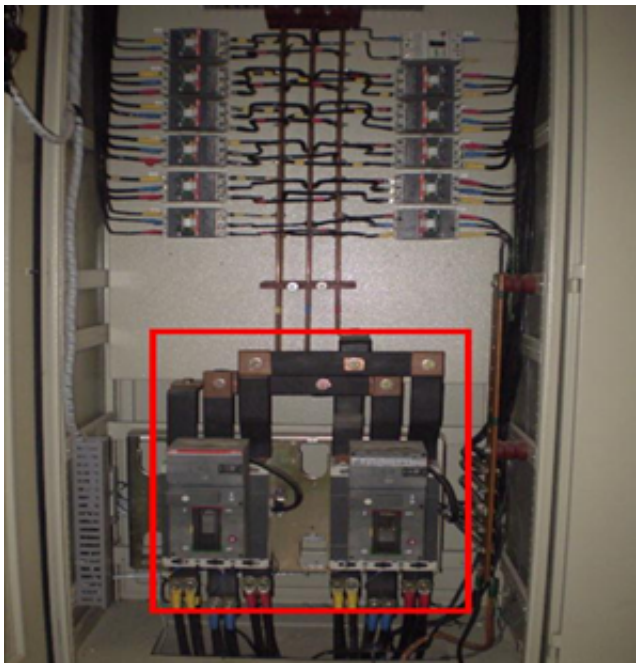


Figura 2.7: Segundo gabinete del Tablero general 1

La distribución de interruptores del segundo gabinete del tablero general 1, se muestra en la tabla 2.6

	Posición en el tablero		
Tablero Alumbrado piso 1 (TA1)	1	2	Tablero Regulado Automatización (TRA)
Tablero Alumbrado piso 2 (TA2)	3	4	Tablero Regulado 1 del Piso 2 (TR2-1)
Tablero Alumbrado piso 3 (TA3)	5	6	Tablero Regulado 1 del Piso 3 (TR3-1)
Tablero Alumbrado piso 1 (TA4)	7	8	Tablero Regulado 1 del Piso 4 (TR4-1)
Tablero Regulado 1 del piso 1 (TR1-1)	9	10	Tablero Manejadora Servidores (TMS)
Tablero Regulado Servidores (TRS)	11	12	Switch Central Red de Datos

Tabla 2.6: Distribución de interruptores del tablero general 1, segundo gabinete

2.1.1.2. Tablero general 2 en baja tensión

La acometida del tablero general 2 en BT proviene del transformador B, las características principales de este gabinete se muestran en la tabla 2.7.

Código SIG: 01101	Acometida: Cu 4(3#500 MCM THHN+1#500 MCM THHN)+1#3/0 AWGt	
In Totalizador: (640-1600) A	Icc Totalizador: 85 kA	Fabricante Tot: ABB
No Barras BT: 5	Barraje: Cu 4"*3/8"	In Barraje: 1670 A
Dimensiones Tablero: 0.4*0.5*2.0 m	Vn DPS: —	Id DPS: —

Tabla 2.7: Características generales del TG2

El tablero está compuesto por 27 interruptores termo-magnéticos de los cuales 7 son de reserva, y 3 son minisplit correspondientes al sistema de refrigeración de las salas de servidores de todos los pisos. Los demás circuitos se destinan a alimentar los motores de la bomba de agua, el sistema de aire acondicionado, bomba contra incendios, ascensor y las enfriadoras de agua ubicados en la parte inferior del tablero, siendo estos interruptores los más robustos del mismo, como se puede apreciar en la figura 2.8 correspondiente a la fotografía de dicho tablero.

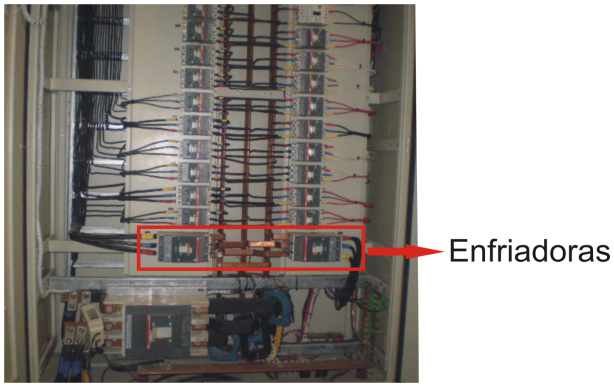


Figura 2.8: Tablero general 2

La distribución de interruptores del tablero general 2 se muestra en la tabla 2.8

	Posición en el tablero		
Reserva	1	2	
Reserva	3	4	Minisplit (MSP)
Reserva	5	6	Minisplit (MSP)
Reserva	7	8	Minisplit (MSP)
Reserva	9	10	Tablero condensadora V1-01
Reserva	11	12	Tablero manejadora 1 piso 1 (TM1-1)
Reserva	13	14	Tablero manejadora 2 piso 1 (TM1-2)
Recuperadora 2 (RCO-2)	15	16	Tablero manejadora 1 piso 2 (TM2-1)
Bomba de Agua (BAFT)	17	18	Tablero manejadora 2 piso 2 (TM2-2)
Recuperadora 1(RCO-1)	19	20	Tablero manejadora 1 piso 3 (TM3-1)
Bomba (BPC)	21	22	Tablero manejadora 2 piso 3 (TM3-2)
Bomba (BCI)	23	24	Tablero manejadora 2 piso 4 (TM4-2)
Ascensor (ASC)	25	26	Tablero manejadora 1 piso 4 (TM4-1)
Enfriadora 1 (EO1)	27	28	Enfriadora 2 (EO-2)

Tabla 2.8: Distribución de interruptores del tablero general 2

2.1.1.3. Banco de condensadores

Junto a los dos tableros generales se encuentra ubicado un gabinete en el que se localiza el banco de condensadores que compensa el factor de potencia de las cargas alimentadas por el transformador B. Este banco de condensadores cuenta con 16 unidades todas conectadas a la tensión de linea, 9 de estas unidades son de 10 kVAR y 7 de 5 kVAR, formando asi 7 pasos de compensación de 15 kVAR que operan automaticamente al

recibir la señal del relé de control y un paso de 20 kVAR que esta siempre en funcionamiento. (Ver figura 2.9). Cada uno de los breakers de protección de los condensadores está seleccionado de acuerdo a la corriente nominal del su respectivo paso conformando asi 7 breakers de 50 A y uno de 75 A para el paso fijo de 20 kVAR.

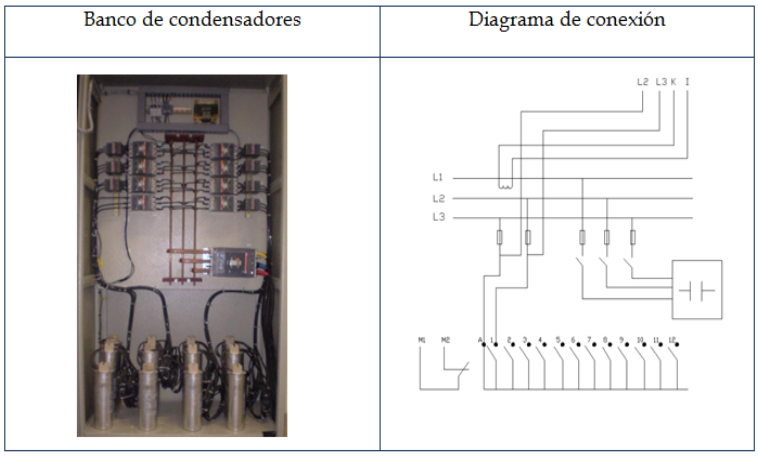


Figura 2.9: Banco de condensadores ubicado en la subestación principal

2.1.1.4. Planta eléctrica de emergencia

La planta de emergencia se usa como respaldo de energía eléctrica en caso de ausencia del suministro de AC, pero como se mencionó anteriormente solo puede alimentar al segundo gabinete del tablero general 1. El tipo de combustible que usa es ACPM y su potencia nominal es de 250 kVA. En la figura 2.10 se muestra la fotografía de la planta eléctrica.

Figura 2.10: Planta de emergencia ubicada en la subestación principal

En la tabla 2.9 se muestran las características principales de la planta eléctrica.

Marca: Cummins Power Generation	Generador: Trifásico
Potencia Nominal: 250/200 (kVA/KW)	Tensión (Vac): 208/120
Eficiencia: 90 %	Factor de Potencia: 0.8
Combustible: ACPM	Tablero de Control Digital: S1468
Velocidad: 1800 rpm	Enfriamiento: Agua

Tabla 2.9: Características técnicas de la planta eléctrica

2.1.2. Uninterruptible Power Supply “UPS”

El sistema UPS instalado en el edificio es tipo On-line, estas unidades se encuentran distribuidas en cada piso del edificio. Sin embargo estas unidades de respaldo no cubren la totalidad de la carga, solamente algunas de las salas de equipos de cómputo. En el caso del primer piso se han instalado cuatro UPS, una de 20 kVA, una de 10 kVA y dos de 5kVA. En el segundo y cuarto piso se tienen dos UPS, una de 10 kVA y una de 5 kVA. Todas las unidades pertenecen al fabricante Proyectos Especiales Ingeniería (PEI) 10. En la tabla 2.10 se describen las principales características técnicas de las UPS presentes en la instalación.

UPS de 5 kVA	
Voltaje de Entrada : 208/120 AC	Voltaje Baterías: 144 DC
Voltaje de Salida: 208/120 AC	Corriente de Salida: 20 A/fase
Potencia: 5 kVA, Fabricante: PEI	Frecuencia: 60 Hz, THD<3 %
	Tecnología on-line, Bifásica
UPS de 10 kVA	
Voltaje de Entrada : 208/120 AC	Voltaje Baterías: 144 DC
Voltaje de Salida: 208/120 AC	Corriente de Salida: 27 A/fase
Potencia: 10 kVA, Fabricante: PEI	Frecuencia: 60 Hz, THD<3 %
	Tecnología on-line, trifásica
UPS de 20 kVA	
Voltaje de Entrada : 208/120 AC	Voltaje Baterías: 144 DC
Voltaje de Salida: 208/120 AC	Corriente de Salida: 55 A/fase
Potencia: 20 kVA, Fabricante: PEI	Frecuencia: 60 Hz, THD<3 %
	Tecnología on-line, trifásica

Tabla 2.10: Características técnicas de las UPS de 5, 10 y 20 kVA

En el tercer piso, no se cuenta con un sistema UPS de respaldo. En el cuarto piso se ubican dos UPS, sin embargo el cuarto de ubicación de las mismas no cuenta con servicio de ventilación para estas unidades. En la figura 2.11 se muestra el diagrama de bloques de una UPS tipo on-line [9].

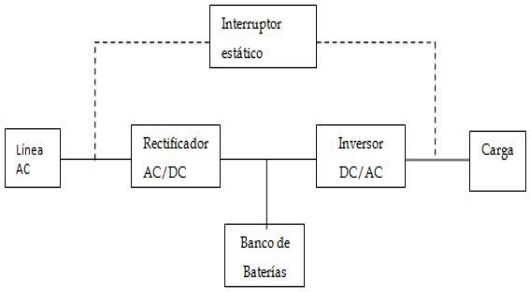


Figura 2.11: Diagrama de bloques UPS On-line

2.2. Reconocimiento de la instalación

Durante la etapa de inspección se realizó un recorrido de toda la instalación, con el fin de identificar cuáles podrían ser las cargas más importantes a la hora de realizar un estudio de calidad de energía eléctrica y al mismo tiempo detectar alguna clase de anomalía en

el conexionado eléctrico. Se encontró que la instalación cuenta con 1200 computadores, un sistema de automatización, servidores, iluminación fluorescente y UPS, cargas en su mayoría con características no lineales. Al igual se observó que la asignación de los computadores es programada y la ocupación de las salas inicia desde el primer piso hasta el último, así hasta llegar a completar todas las salas en su totalidad. También se encontraron diversas anomalías, tales como mal señalamiento de los conductores en los tableros de entrada y salida de las distintas UPS ubicadas en cada uno de los pisos de la instalación. Se hallaron varias inconsistencias entre la información que presentaban algunos de los planos oficiales de la instalación eléctrica del edificio, con la información obtenida de la verificación visual realizada, diferencias en los calibres de los conductores de los tableros, así como diferencias en las posiciones de ubicación de los mismos con respecto a los planos, llevaron a que se tuvieran que realizar maniobras de encendido y apagado de algunos interruptores con el fin de identificar que carga alimentaba cada uno. En cuanto al circuito de tierras se obtuvieron dos planos generales no oficiales de conexión del sistema, cuya veracidad en la información de conexión será comprobada en el capitulo cuatro por medio de las revisiones y medidas necesarias, realizadas al sistema de puesta a tierra en general.

2.3. Selección de puntos a medir en el trabajo de campo

Debido a que en la instalación se cuenta con una gran cantidad de cargas de características eléctricas no lineales como computadores, servidores y alumbrado fluorescente, se efectuará mayor énfasis en la medición del contenido armónico de cada uno de los puntos escogidos para monitorear. Asimismo se observarán situaciones anómalas como desbalances de carga, corrientes por el neutro y sobretensiones, tomando como base la documentación estudiada en las etapas preliminares a la realización del proyecto. El periodo de tiempo escogido para realizar la monitorización, comprende los días entre lunes y viernes, ya que estos son los días en los que se presenta mayor uso de las cargas y menor variabilidad de las mismas. Entre los puntos escogidos para monitorear se encuentran los dos tableros generales correspondientes a los dos transformadores ubicados en la subestación de la instalación. En el caso del transformador A, la medida será tomada en el punto de acople ubicado en el primer gabinete del tablero, antes de la

derivación al segundo gabinete en el que se realiza la transferencia con la planta. Para realizar la medida de los dos tableros generales el equipo que se usará es el AEMC 86 T debido a la flexibilidad que presentan sus pinzas de corriente para medir en lugares con limitaciones de espacio. Los alimentadores secundarios también se monitorizarán desde la subestación del edificio, por periodos de tiempo comprendidos entre un día o una semana dependiendo de las características y variabilidad que presente la carga. Dentro de los tableros escogidos para realizar la medición se encuentran los presentados en la tabla 2.11. Como ya se había mencionado anteriormente, dentro de los equipos más sensibles a las perturbaciones de CPE se tiene el circuito cerrado de televisión, que actualmente presenta daños en algunas de sus cámaras de vídeo. Por esta razón se determinó que era importante realizar mediciones tanto a la entrada como a la salida de la UPS que alimenta dicho circuito. Estas medidas se realizarán en dos etapas, la primera cuando la UPS esté alimentada directamente de la red de distribución y la segunda cuando este alimentada por la planta de emergencia, esta última etapa se realiza debido a que la mayoría de los daños en las cámaras de video se han reportado luego de que ocurra algún tipo de corte en el suministro de energía y la planta ha entrado como respaldo.

TABLERO	DESCRIPCIÓN	UPS
TR1-2	Corresponde a equipos de computo del primer piso, tablero 2	Si
TR2-1	Corresponde a equipos de computo del segundo piso, tablero 1	No
TR2-2	Corresponde a equipos de computo del segundo piso, tablero 2	No
TR3-1	Corresponde a equipos de computo del tercer piso, tablero 1	No
TR3-3	Corresponde a equipos de computo del tercer piso, tablero 3	Si
TR4-1	Corresponde a equipos de computo del cuarto piso, tablero 1	No
TMS	Corresponde a la manejadora del cuarto de los servidores	Si
TM3-1	Corresponde a la manejadora 1 del tercer piso	No
RC1-1	Corresponde a la recuperadora 1	No
RC1-2	Corresponde a la recuperadora 2	No
EO-1	Corresponde a la enfriadora 1	No
BOMBA	Corresponde a la bomba de agua fría	No
TA1	Corresponde al tablero de alumbrado del piso 1	No
TASC	Corresponde al tablero que alimenta el motor del ascensor	No

Tabla 2.11: Tableros a monitorizar

Capítulo 3

Sistema de puesta a tierra del CENTIC

3.1. Generalidades

El sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos conductores de un sistema eléctrico específico, sin interrupciones ni fusibles, que unen los equipos eléctricos con el suelo o terreno. El sistema de puesta a tierra es una parte esencial de las redes de energía, tanto en los niveles de alta como de baja tensión. Se necesita un buen sistema de puesta a tierra para [20]:

- La protección de edificios e instalaciones contra las sobre tensiones atmosféricas.
- La seguridad de vidas humanas y animales, limitando las tensiones de paso y de contacto a valores seguros.
- La limitación de perturbaciones electromagnéticas.
- El correcto funcionamiento de la red de suministro de electricidad y para asegurar una buena calidad de energía.

Todas estas funciones las ha de desarrollar un único sistema de puesta a tierra, que deberá diseñarse para cumplir todos los requisitos. Algunos elementos de puesta a tierra pueden disponerse para que cumplan una finalidad específica, pero sin embargo forman

parte de un único sistema de puesta a tierra [20]. El RETIE[1] [2] exige que todos los elementos de puesta a tierra de una instalación estén conectados entre sí, formando un sistema. Existen tres clases de sistemas de puesta a tierra [25]:

- De servicio: Sirve como referencia para equipos de maniobra, equipos de transmisión, equipos de medición, fuentes de corriente directa y tierras para cables.
- De protección: Se instala para prevenir accidentes de personal en caso de contactos directos o indirectos, con carcasas metálicas o por descargas eléctricas atmosféricas.
- Temporales: Su función principal es como seguridad para casos de mantenimiento.

3.1.1. Definiciones básicas

Puesta a tierra o sistema de puesta a tierra es el conjunto de todos los medios y procedimientos por los que una parte de un circuito eléctrico, las partes conductoras accesibles de los equipos eléctricos (partes metálicas descubiertas) o partes conductoras próximas a una instalación eléctrica (partes metálicas ajenas a la propia instalación eléctrica) se conectan a tierra.

Electrodo de tierra es un conductor metálico, o un sistema de conductores metálicos interconectados, u otras piezas metálicas que actúan del mismo modo empotradas en el suelo y que están en contacto eléctrico con el mismo, o empotradas en hormigón que este en contacto con la tierra en una gran superficie (p.e.j los cimientos de un edificio).

Conductor de puesta a tierra es el conductor que conecta una parte de la instalación eléctrica, las partes accesibles o las masas metálicas ajenas a dicha instalación a un electrodo de tierra, o que interconecta varios electrodos de tierra. El conductor de puesta a tierra se coloca sobre el suelo o si está enterrado está aislado del terreno.

Tierra de referencia es la parte del terreno, en especial sobre la superficie, situado fuera del área de influencia del electrodo de tierra considerado, es decir entre dos puntos cualesquiera entre los que no existe una tensión perceptible, como resultado del flujo de corriente de puesta a tierra a través de este electrodo. Se considera que el potencial de la tierra de referencia es cero.

[1]Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

Tensión de puesta a tierra es la tensión que aparece entre el sistema de puesta a tierra y la tierra de referencia, cuando un determinado valor de corriente de tierra fluye a través del sistema de puesta a tierra.

Resistividad del terreno es la resistencia, medida entre dos caras opuestas de un cubo del terreno de un metro de arista. La resistividad del terreno se expresa en Ω-m.

Potencial superficial de tierra es la diferencia de tensión entre un punto x sobre la superficie del terreno y la tierra de referencia.

Propiedades eléctricas del sistema de puesta a tierra: las propiedades eléctricas de una puesta a tierra dependen esencialmente de dos parámetros:

- Resistencia de puesta a tierra
- Configuración del electrodo

La resistencia de puesta a tierra determina la relación entre la tensión de tierra y la corriente de tierra. La configuración del electrodo determina la distribución del potencial sobre la superficie del terreno que se produce como resultado de la circulación de corriente en la tierra. La resistencia de la puesta a tierra depende mucho de cuan profundo se haya enterrado el electrodo en el terreno. Esto se debe a que el contenido de humedad es mayor y más estable para capas profundas del terreno que para capas más superficiales. Sin embargo no siempre es posible colocar electrodos a la profundidad deseada por motivos geológicos, por ejemplo cuando existen rocas u obstrucciones cerca de la superficie o cuando el sistema de electrodos cubre una gran área. Pueden distinguirse distintos tipos de electrodos de tierra tales como:

- *Electrodos de tierra superficiales sencillos*, formados por platinas o cables desnudos tendidos horizontalmente, ya sea conectados por un solo extremo o cerrados en anillo.
- *Electrodos mallados,* estructurados como unas rejillas colocadas horizontalmente a poca profundidad.
- *Electrodos de tierra en cimientos*, formados por piezas estructurales conductoras, embebidos en los cimientos de hormigón que proporcionan una gran superficie de contacto con el terreno.

3.2. Inspección del sistema de puesta a tierra

Durante la inspección de la instalación se encontraron dos planos del sistema de puesta a tierra, estos planos no eran oficiales así que se debía comprobar la veracidad de la información que estos contenían. En la figura 3.1 se pueden apreciar las conexiones del sistema de puesta a tierra de la instalación encontradas en uno de los planos. Después de realizar un recorrido detallado por todo el circuito de tierras se corroboró que efectivamente existen tres mallas a tierra en la instalación, equipotencializadas entre si.

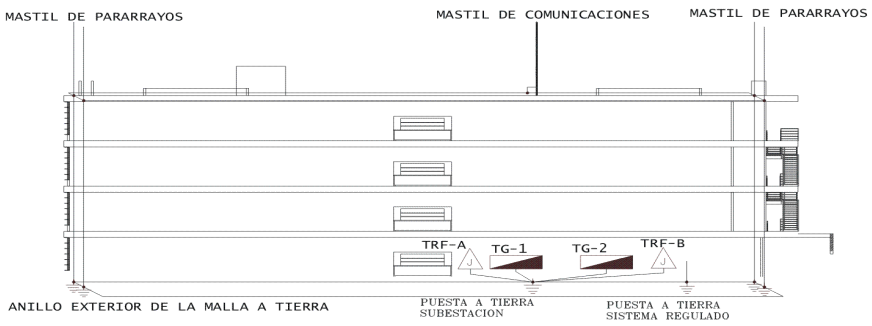


Figura 3.1: Sistema de puesta a tierra del edificio CENTIC

El primero de estos anillos de tierra es el que está enterrado en el perímetro de la instalación, el cual se encuentra conectado a los cuatro electrodos de los pararrayos situados en cada una de las esquinas de la terraza del edificio y al mástil de comunicaciones ubicado en el centro de la misma. La segunda malla de tierra está ubicada debajo de la subestación del edificio, es de esta malla de donde se conecta el neutro de los transformadores, así como la tierra de servicio para todos los equipos de cómputo y de aire acondicionado presentes en la instalación. Por ultimo la tercera malla de tierra de dimensiones menores a la de la subestación, pero equipotencializada con la misma por medio de una bobina de choque como se observa en la figura 3.2, se encuentra ubicada debajo de la sala de servidores del primer piso, esta malla es la tierra de servicio solo de los racks y los sistemas de comunicaciones del edificio.

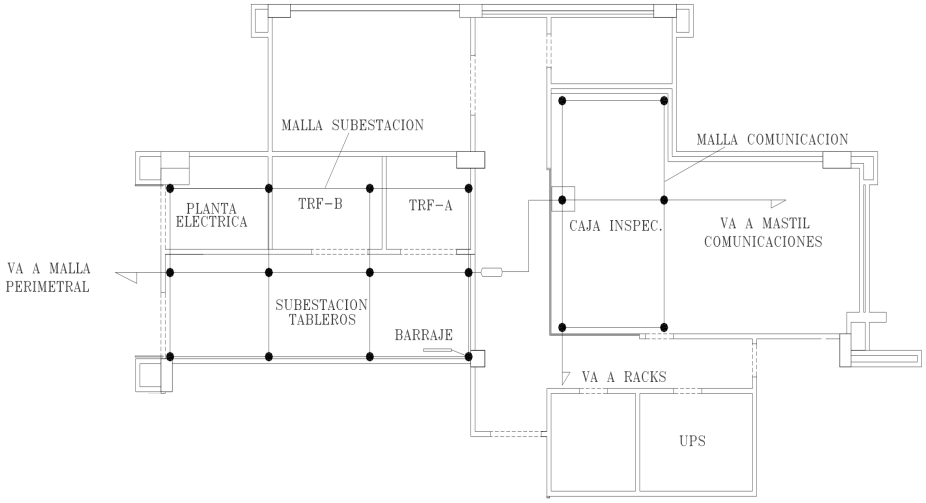


Figura 3.2: Sistema de puesta a tierra de la subestación

Continuando con el recorrido del circuito de tierras se encontraron varias inconformidades entre las conexiones reales y las conexiones mostradas en los planos. Asimismo se descubrieron varias anomalías en cuestión de seguridad en las conexiones del sistema general de puesta a tierra de la edificación. Para empezar, uno de los planos obtenidos del circuito de tierras del CENTIC, muestra una conexión independiente del conductor de puesta a tierra a los tableros generales y a los dos transformadores. Esta situación se puede observar en la figura 3.3.

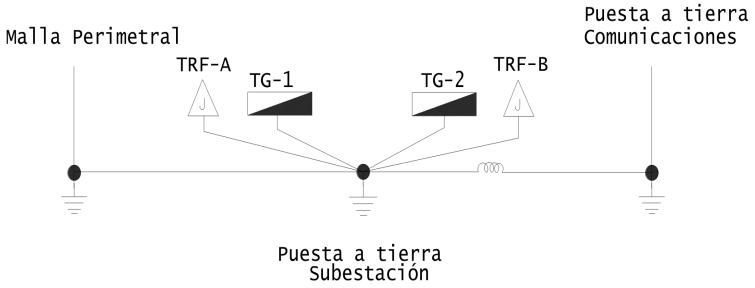


Figura 3.3: Conexión de la malla a tierra según planos

Luego de revisar las conexiones del sistema de puesta a tierra en la subestación se demostró que el verdadero esquema de conexión es el presentado en la figura 3.4.

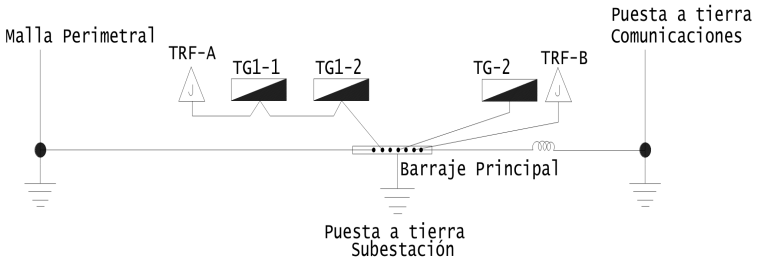


Figura 3.4: Conexión Real de la Malla a tierra

Según figura 3.4, la conexión principal de la malla a tierra tanto a los transformadores como a los tableros generales procede de un único barraje de conexión, ubicado debajo de una de las tapas de inspección presentes en la subestación. De allí se deriva la salida del neutro al transformador B así como al tablero general dos. De este mismo barraje sale la conexión al segundo gabinete del tablero general uno y de este gabinete sale la conexión al primer gabinete de este mismo tablero. El neutro del transformador A no se desprende directamente de la malla a tierra sino que viene de una derivación del primer gabinete del tablero general uno. Este esquema de conexión representa grandes peligros en caso de que cualquiera de los conductores de empalme entre la malla y el barraje de conexión, o los tableros generales y el transformador falle. En la figura 3.5 se señalan varios sitios en las que una falla de alguno de los conductores o alguna desconexión de los mismos podría dejar a una parte de los equipos de la subestación, así como los equipos conectados a la tierra de servicio en ausencia del circuito de tierras.

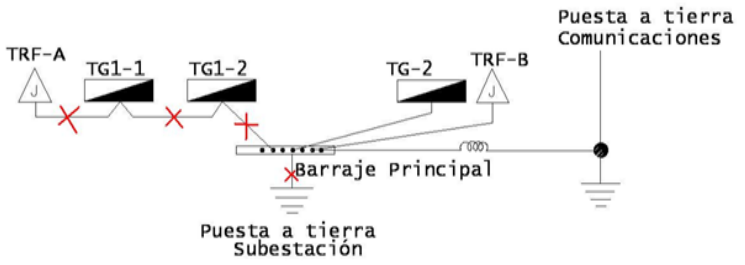


Figura 3.5: Posibles puntos de falla del sistema de puesta a tierra

Además del erróneo esquema de conexión encontrado en el sistema de puesta a tierra de la edificación, también se encontraron inconformidades en la unión física del conductor puesto a tierra y sus derivaciones. Se corroboró que varios de los tornillos que aseguraban

las conexiones del conductor puesto a tierra al transformador B y a los dos tableros generales estaban sueltos, también se observó que el punto señalado en la figura 3.6, que sirve de empalme entre el transformador A y el primer gabinete del tablero general uno, se encontraba suelto.

Figura 3.6: Conexión del primer gabinete del tablero general uno

Otra inconformidad observada en la revisión al circuito de tierras de la edificación tiene que ver con la diferencia de calibre existente entre el conductor de unión de los dos gabinetes del tablero general uno y los conductores que van de estos gabinetes tanto a la malla de tierra como al transformador A, esta situación se puede observar en la figura 3.7.

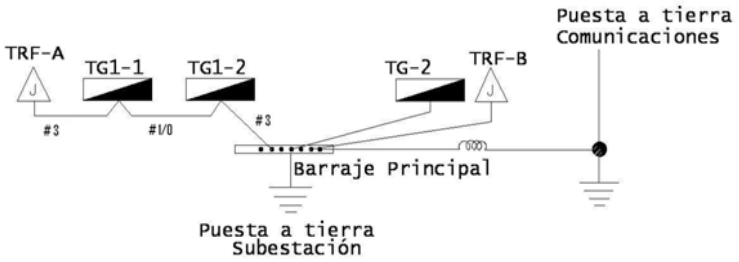


Figura 3.7: Conexión del segundo gabinete del tablero general uno

En la figura anterior se puede observar la diferencia de calibres entre los dos conductores de llegada y de salida a los gabinetes del tablero general uno, igualmente en la figura 3.8 se presenta esta diferencia en el calibre de los conductores.

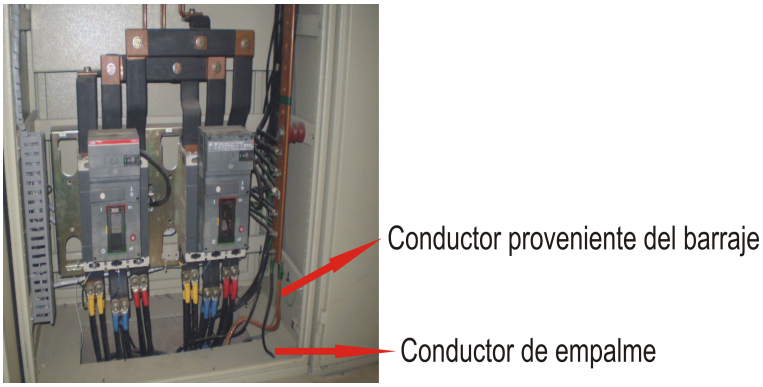


Figura 3.8: Diferencia de calibres entre conductores de puesta a tierra

En la inspección al sistema de puesta a tierra del edificio también se localizó una inconformidad en la conexión del buje del conductor neutro con el conductor de tierra proveniente del primer gabinete del tablero general uno. En la figura 3.9 se puede observar una unión entre la tierra y el neutro, con lo cual no se tiene una conexión independiente para el conductor que va hacia la malla a tierra. El transformador se aterriza a través de su cuba. Esta conexión es altamente riesgosa para los operarios que entren en contacto con el transformador ya que puede presentarse una tensión de contacto con la cuba del transformador en algún momento en el que este circulando una corriente significativa por la misma.

Figura 3.9: Conexión del neutro y tierra

Finalmente se procedió a realizar algunas mediciones de rutina en los conductores de puesta a tierra de los dos tableros generales utilizando una pinza voltiamperimétrica; la pinza registró una corriente circulante por el conductor de 32 A en el tablero general uno,

valor elevado teniendo en cuenta que no se registraba ninguna falla en el momento. Por esta razón surgió la necesidad de buscar en todos los circuitos del edificio, que circuito o tablero podría tener conectado el conductor neutro al barraje de puesta a tierra y como consecuencia directa de esto se estuviese presentando ese flujo tan alto de corriente a tierra. Después de revisar todos los tableros internos del edificio, se encontró que en los tableros de iluminación de cada uno de los pisos existen conexiones irregulares del conductor neutro al barraje de puesta a tierra, se midió con la pinza amperimétrica el valor de la corriente que circulaba por el conductor de tierra y se confirmó que era de 8 [A] en cada tablero, sumando así los 4 tableros tenemos una corriente aproximada al valor registrado en la subestación. En la figura 3.10 se puede observar que el conductor neutro se encuentra unido eléctricamente al barraje de puesta a tierra del tablero de iluminación del primer piso, situación que a la fecha de redacción de este libro ya se ha corregido en los 4 tableros.

Figura 3.10: Tablero de iluminación de cada uno de los pisos

3.3. Medición de la resistencia de puesta a tierra

Después de realizar la inspección del circuito de tierras del edificio, se procede a realizar la medida de la resistencia de puesta a tierra de la malla de la subestación. Según el RETIE [2] la medida de la resistencia de puesta a tierra para una malla de media tensión, debe tener un valor menor a 10 ohm, también recomienda una malla de tierra de servicio para equipos sensibles como computadores, con una resistencia de puesta a tierra menor a 1 ohm. En el caso del CENTIC la resistencia de puesta a tierra de la

malla deberá tener un valor menor a 1 ohm ya que la malla de media tensión es la misma malla de tierra de servicio para los equipos instalados en la edificación. Para realizar la medida de la resistencia de puesta a tierra el equipo utilizado fue el telurómetro. Puesto que no existía ningún borne de algún bajante directo a la malla, la medida se tuvo que realizar tomando como punto de referencia uno de los bornes del barraje de tierra del tablero general uno. Las medidas fueron realizadas utilizando el método de la caída de potencial por medio de dos electrodos, uno de corriente y uno de tensión. Ya que no se conocían las dimensiones exactas de la malla de la subestación, se tomó una distancia de 35 metros para ubicar el electrodo de corriente y posteriormente se fue moviendo el electrodo de tensión cada metro obteniéndose una curva con base a los distintos valores registrados en el telurómetro. En la tabla 3.1 se muestra el registro de los datos obtenidos en la medición de la resistencia de puesta a tierra de la malla ubicada en la subestación.

DISTANCIA [m]	4	8.1	11.8	15.2	19	23	27.5	35
RESISTENCIA [Ω]	1.55	1.64	1.85	2.12	2.2	2.35	5	15.3

Tabla 3.1: Valores de resistencia de puesta a tierra

En la figura 3.11 se observa la curva resultante de dibujar los registros tomados por el telurómetro al medir la resistencia de puesta a tierra de la malla de la subestación.

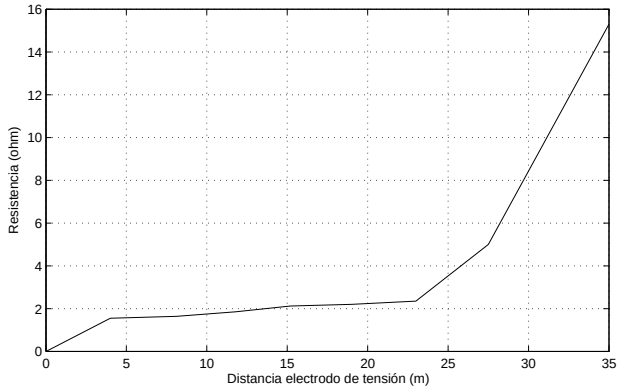


Figura 3.11: Resistencia de puesta a tierra

De la tabla de valores y de la gráfica de medida de la resistencia de la malla, se observa que la región plana de la curva se encuentra alrededor del 62 % de distancia del electrodo de tensión, por lo tanto se puede afirmar que la resistencia de la puesta a tierra de la

subestación es 2.3 ohm. Como se había expresado anteriormente este valor de resistencia es adecuado para una malla de tierra de una subestación eléctrica de media tensión, pero no es la resistencia adecuada para prestar el servicio a equipos sensibles como computadores, PLC y servidores, ya que la impedancia no es lo suficientemente pequeña para proveer un camino rápido de despeje de fallas de tipo electromagnético, que se puedan producir en el sistema.

Capítulo 4

Análisis de los registros tomados

A partir de las medidas efectuadas según la planeación estipulada en el capitulo 2 y con el ánimo de presentar los resultados de una forma cómoda para el lector, en este capítulo se muestra un análisis de los principales eventos y características observados en la medición de algunos de los tableros de la instalación, los dos transformadores y otros equipos de respaldo de energía como son las UPS, los análisis de los demás tableros se remiten al anexo A.

Inicialmente se determinarán las anomalías dentro de la subestación por medio de un registro tomado con la cámara termográfica propiedad de la Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones, seguidamente se haran los análisis de calidad de la energía de los registros tomados.

4.1. Registro termográfico

Utilizando la cámara termográfica se procedió a medir la temperatura de operación de los diferentes elementos y equipos que se encuentran ubicados en la subestación eléctrica, con objeto de detectar anomalías relacionadas con sobrecalentamiento de conductores o interruptores, así como verificar si los transformadores presentan algún tipo de sobrecalentamiento en sus partes.

En la figura 4.1 se muestra el registro termográfico del transformador A de marca ABB, las partes más calientes son básicamente la carcasa y las aletas de ventilación del transformador, no superando estas una temperatura de 41 ºC. Al revisar las espe-

cificaciones del transformador, esta temperatura no representa un riesgo para el buen funcionamiento del transformador.

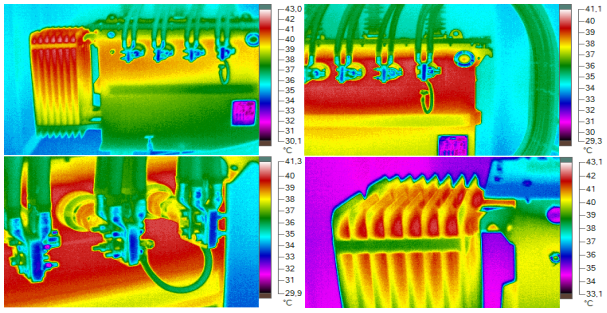


Figura 4.1: Termografía transformador A

El registro de la termografía del transformador B es mostrado en la figura 4.2, donde se puede apreciar al igual que en el transformador A las partes más calientes son la carcasa y las aletas de ventilación, así mismo se verificó que la temperatura máxima de operación especificada por el fabricante es superior a la registrada en estas imágenes.

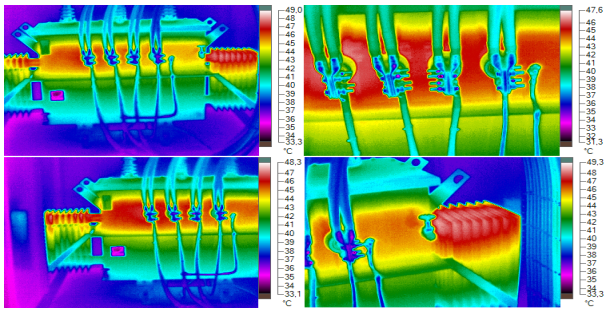
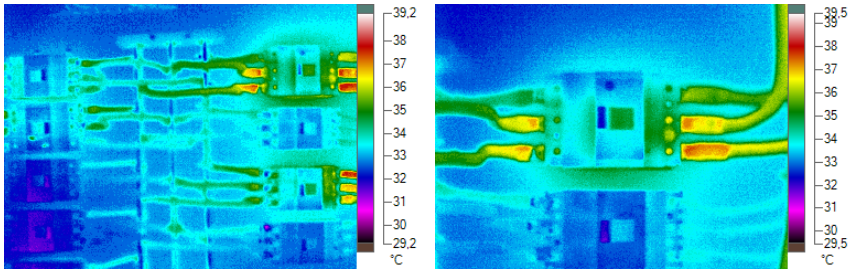


Figura 4.2: Termografía transformador B

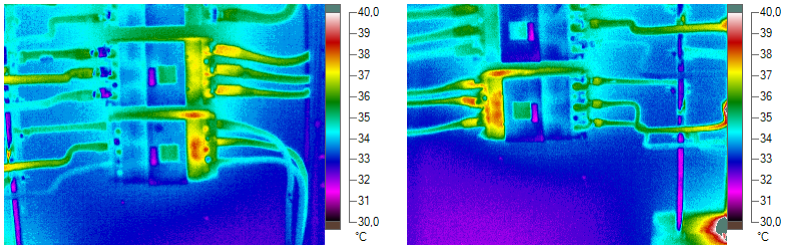
En cuanto al tablero general 1, en el primer gabinete (ver figura 4.3) se destaca el calentamiento en conductores de los interruptores TR2-2 y TR1-2, con temperaturas de 38 ºC a diferencia de los demás interruptores del mismo gabinete en los que se registran temperaturas menores. También se observó un desbalance de carga debido a que dos de sus fases presentan mayor calentamiento que la otra. Con ayuda de la monitorización se establecerá que tan significativo es este desbalance.



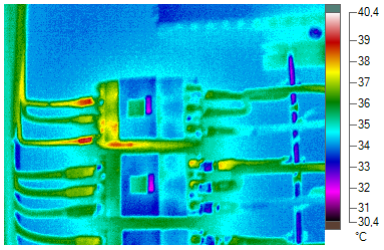
(a) Tablero TR1-2 y TR2-2 (b) Tablero TR1-2

Figura 4.3: Termografía primer gabinete del tablero general 1

En la termografía del segundo gabinete del tablero general 1 mostrado en la figura 4.4, se identificaron algunos puntos calientes con temperaturas cercanas a 39 ºC en cuatro interruptores termomagnéticos, Switch Central, TMS, TRS, TA-1. Asimismo se observa un posible desbalance de carga debido a la diferencia de temperaturas entre conductores del mismo breaker de protección, lo que indica que circula mas corriente por algunos conductores con respecto a los demás.



(a) Tablero Switch Central y TMS (b) Tablero TRS.

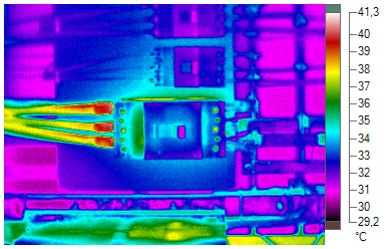


(c) Tablero TA-1

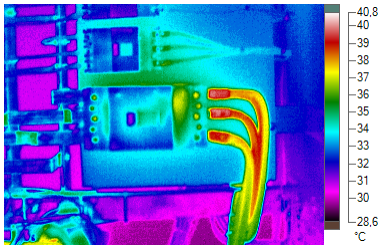
Figura 4.4: Termografía segundo gabinete del tablero general 1

En el tablero general 2 se observaron temperaturas elevadas en los conductores de tres interruptores (EO-1, EO-2 y RCO-2) con respecto a los demás, esta temperatura es

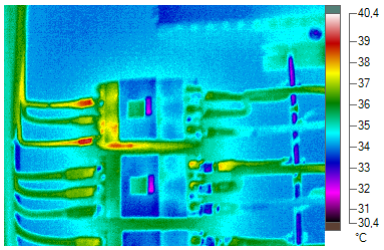
cercana a los 40 ºC, la cual es inferior a la temperatura máxima de operación del conductor. Estos conductores con temperaturas elevadas corresponden a la alimentación de las bombas enfriadoras del sistema de refrigeración del edificio y al sistema de refrigeración de la sala de los racks. En la figura 4.5 se presenta la respectiva termografía.



(a) Tablero EO-1



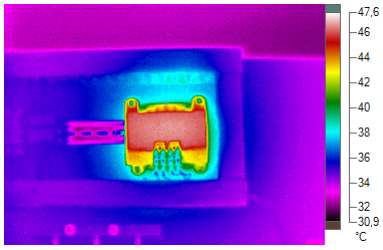
(b) Tablero EO-2



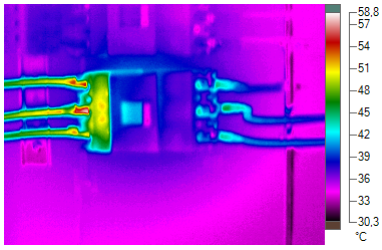
(c) Tablero RCO-2

Figura 4.5: Termografía del tablero general 2

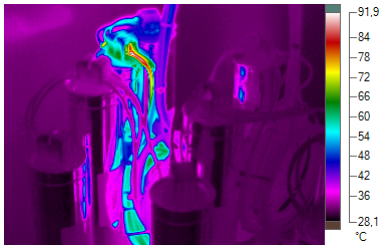
Por último se realizó el registro termográfico del gabinete en el que se encuentra el banco de condensadores para las cargas del transformador B (ver figura 4.6). En este registro se puede ver el calentamiento en uno de los condensadores al igual que en un interruptor termomagnético y un controlador. Se hace énfasis en la temperatura presentada en el condensador debido a que alcanza un valor cercano a 96 ºC razón por la cual al poco tiempo de tomado el registro el condensador se dañó por completo y a la fecha no ha sido reemplazado.



(a) Controlador banco de condensadores



(b) Interruptor 4, sección 1



(c) Condensador sobrecalentado

Figura 4.6: Termografía del banco de condensadores

4.2. Registros de calidad de la energía eléctrica

A continuación se presenta el análisis efectuado al transformador A y B, así como a los distintos tableros alimentados por los mismos. Las gráficas de los espectros armónicos de tensión y de corriente correspondientes a cada tablero evidencian el grado de distorsión de la carga, estos valores se expresan en escala real.

Basados en el caracter no lineal de las cargas ubicadas en la instalación y en mediciones previamente realizadas en algunos puntos, se aprecia la presencia de armónicos y desbalances de carga en la red, se determinó que para los cálculos de potencia y factor de potencia trifásica de los tableros medidos, se utilizará como referencia la norma IEEE 1459 [15], la cual plantea la opción de usar un modelo matemático en el que se consideran tanto los desbalances de carga como la presencia de armónicos en la red. En este modelo dos variables nuevas son tenidas en cuenta, la potencia aparente efectiva (Se) y el factor de potencia efectivo (fpe).

Para un sistema de trifásico tetrafilar:

$$I_e = \sqrt{\frac{Ia^2 + Ib^2 + Ic^2 + In^2}{3}} \tag{4.1}$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18}\left[3\left(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2\right) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2\right]} \tag{4.2}$$

Para el cálculo de la potencia efectiva:

$$S_e = 3I_eV_e \tag{4.3}$$

En el factor de potencia se calcula asi:

$$f_{pe} = \frac{P}{S_e} \tag{4.4}$$

4.2.1. Transformador A

Como ya se había mencionado anteriormente el transformador A, tiene una capacidad de 500 [kVA] y está destinado para la alimentación de todas las cargas de iluminación, servidores, equipos de cómputo y control de la instalación. A continuación se presenta un análisis de los eventos observados durante la monitorización del mismo, el equipo utilizado fue el analizador de redes de marca AEMC 86 T.

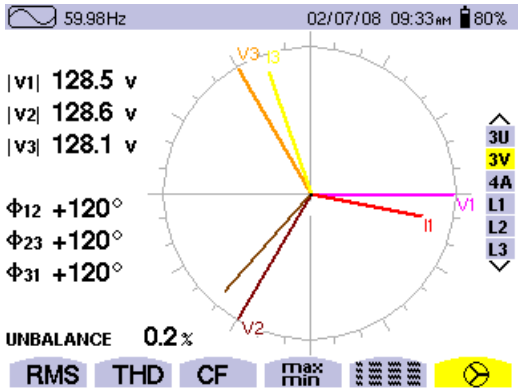


Figura 4.7: Diagrama fasorial a 60 Hz de tensiones y corrientes del transformador A

En el diagrama fasorial de la figura 4.7 se evidencia una tendencia inductiva de la carga, con un desafase entre la tensión y la corriente de aproximadamente 13°, esta tendencia se presenta en cada fase debido a que las cargas en su mayoria son del mismo tipo (equipos de computo).

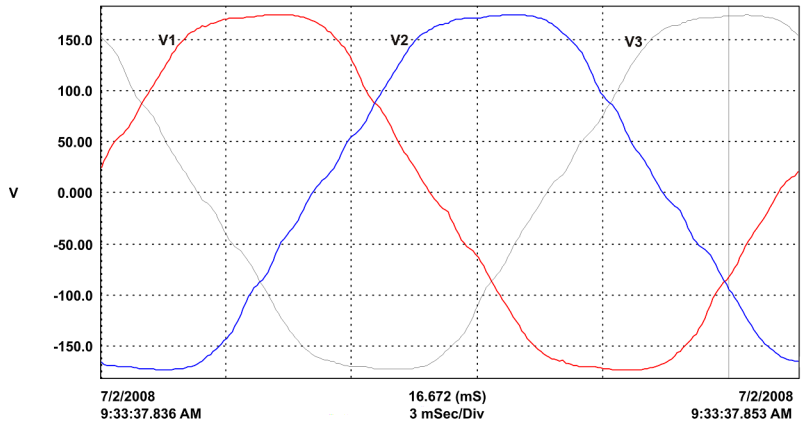


Figura 4.8: Señales de tensión de fase del transformador A

En la figura 4.8 se pueden observar las tensiones de fase con valores similares en amplitud, igualmente se puede ver que la forma de onda de estas señales indican un comportamiento sinusoidal casi puro, situación que se evidencia en la figura 4.9 en la que se presenta el espectro armónico de las tensiones de fase, donde el armónico más considerable es el quinto con un valor cercano al 5 % de la fundamental.

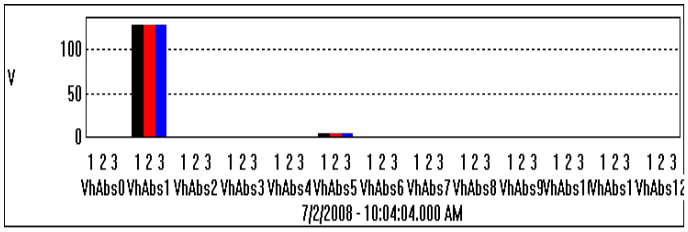


Figura 4.9: Espectro armónico de tensiones de fase

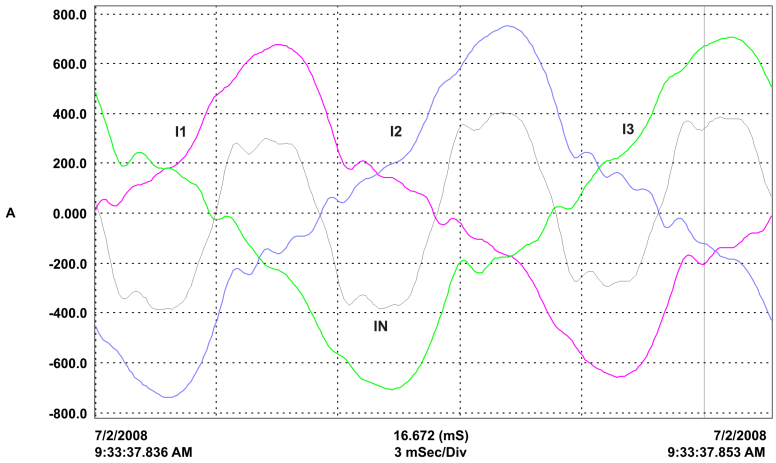


Figura 4.10: Señales de corriente de fase del transformador A

A diferencia de las tensiones de fase, las corrientes no se asemejan a una sinusoidal pura (ver figura 4.10), la forma de onda de las corrientes de fase presentan una distorsión considerable, lo cual significa que las señales de corriente contienen componentes armónicas, en la figura 4.11 se indica el espectro armónico de corrientes de fase, donde el tercer armónico muestra porcentajes de hasta el 30 % de la fundamental, así mismo el quinto y séptimo armónico presentan valores respectivamente del 10 % y 6 % de la corriente fundamental.

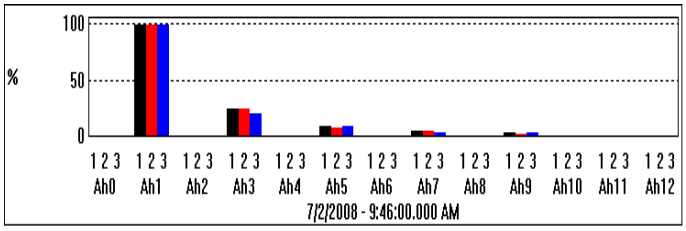


Figura 4.11: Espectro armónico de corrientes de fase

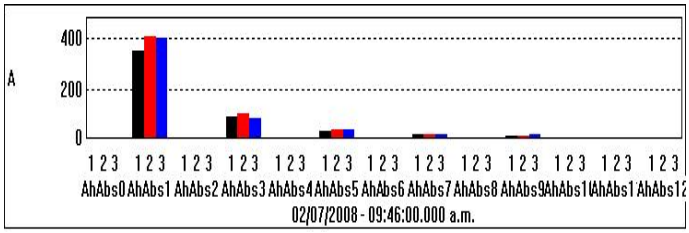


Figura 4.12: Espectro armónico de corrientes de fase (valor real)

Las corrientes de fase presentan diferencia de amplitudes entre ellas, como se puede apreciar en la tabla 4.1, igualmente se tiene una corriente de neutro de magnitud casi comparable con las de fase. El origen de esta gran corriente de neutro no solo se debe al desbalance, sino también a la no linealidad de la carga, en la cual se tienen armónicos de tercer orden, estos por ser de secuencia cero se suman algebraicamente en el conductor neutro, causando problemas relacionados con sobrecargas, distorsión en la tensión y ruido en modo común [21].

Fases	Corriente (A_{RMS})
Fase 1	393.6
Fase 2	473.7
Fase 3	450.2
Neutro	316.7

Tabla 4.1: Magnitudes de las corrientes de fase y el neutro del transformador A

A continuación se resumen los eventos más importantes observados en la medición del transformador A (estos eventos se detallan en el anexo A).

- Los valores en las amplitudes de tensión de cada una de las fase no presentan diferencias de magnitud entre ellas de más de 2 [V] durante el día.
- En el periodo de medición del transformador se observó una tensión elevada, alcanzando valores de casi 130 [V] a lo largo del periodo en el que se realizó la medida, este valor de tensión está por encima del valor límite de 120 [V] $\pm 5\,\%$ establecido por la norma de la ESSA [1] .
- Se observa que existe un fuerte desbalance de carga entre las fases ya que se registraron hasta 92 [A] de diferencia entre la fase de valor más bajo y la fase de valor más alto de corriente.

- Debido al fuerte desbalance de carga existente entre las fases y a la significativa presencia de la tercera componente armónica, se registran valores de corriente en el neutro de hasta 316 [A], valor muy cercano a la corriente de una de las fases del transformador.

- En el anexo A se puede observar la gráfica que presenta los valores de DAT en tensión con registros de 5 %, 5.2 % y 5.1 % de distorsión por fase respectivamente.

- Según los registros durante el periodo de medición se tiene una potencia aparente del transformador de 165.6 [kVA], cuyo porcentaje de carga es del 33.3 % para un transformador de 500 kVA, se corroboro que la potencia requerida según la demanda máxima es de 188.77 kVA, esto con base en el factor k para el transformador (ver capítulo 5).

- El factor de potencia registrado en las fases del transformador corresponde a valores superiores a 0.94, el cual es un nivel adecuado. Por tanto no se recomiendan bancos de condensadores para este transformador.

- Los valores de DAT en corriente se pueden ver en el anexo A con valores por fase de 30.4 %, 29.9 % y 26 % respectivamente, de acuerdo a los límites de distorsión de corriente permitidos por la norma IEEE 519 [13] para una corriente de cortocircuito del transformador de 28.14 KA y una corriente de carga aproximadamente de 450 A se permite una distorsión armónica total en corriente menor al 10 % por lo que el transformador A no cumple con la reglamentación. .

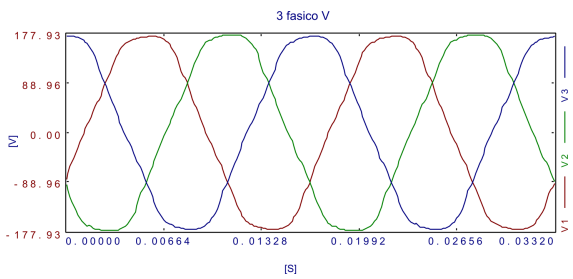
- El transformador cuenta con cuatro conductores por fase de calibre THW # 500 MCM, al igual que para el neutro neutro, este conductor posee una capacidad de corriente de 380 [A] cada uno lo que sumaria un total de 1520 [A] de capacidad, este valor es muy superior al registrado por el analizador de redes.

4.2.1.1. Tablero TR1-2

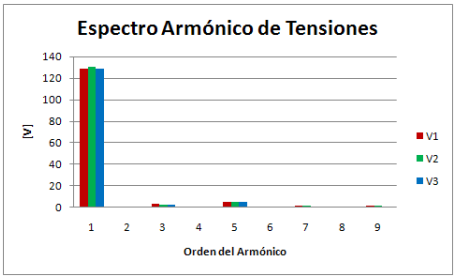
El tablero TR1-2 [1] alimenta 127 computadores ubicados en el primer piso del edificio. Este tablero no cuenta con UPS de respaldo de energía. Los datos de la medición fueron tomados con el analizador de redes Power Vista. En la figura 4.13, se pueden apreciar

[1] TR es la nomenclatura asignada a los tableros regulados. sin embargo no todos los tableros poseen UPS

las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico, en un instante de tiempo durante la medición.



(a) Señales de tensión por fase

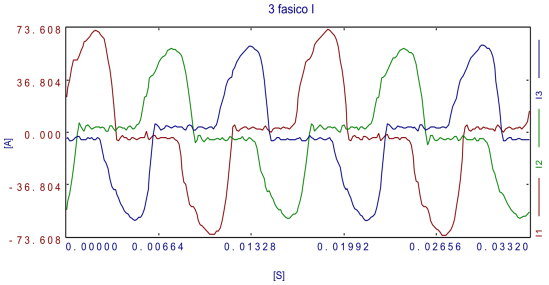


(b) Espectro armónico de tensiones por fase

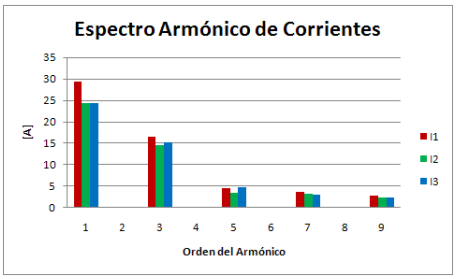
Figura 4.13: Tensiones de fase del tablero TR1-2

En la figura 4.13a se puede ver la forma de onda de las tensiones de fase del tablero, estas señales presentan un comportamiento sinusoidal casi puro, por lo cual en el espectro armónico de la figura 4.13b se tiene que la componente más significativa corresponde al quinto armónico con un porcentaje menor al 5 %. Se observa además que no existe un fuerte desequilibrio en las tensiones de fase.

Igualmente en la figura 4.14 se presenta la gráfica de las corrientes de fase y su respectivo espectro armónico registrado en el tablero, estos a su vez se mantienen en valores casi constantes debido a que la carga posee las mismas características eléctricas.



(a) Señales de corriente por fase



(b) Espectro armónico de corrientes por fase

Figura 4.14: Corrientes de fase del tablero TR1-2

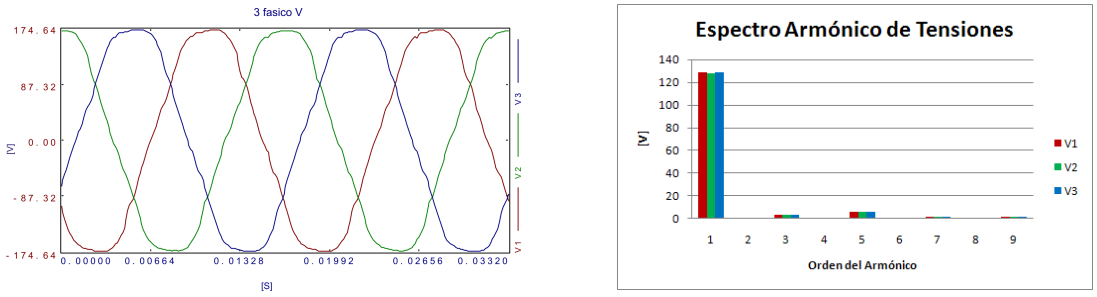
En la figura 4.14a se puede observar que la forma de onda de las corrientes de fase no corresponde con una forma sinusoidal pura, esta situación indica la existencia de

armónicos en la red. En la figura 4.14b se presenta el espectro armónico de las corrientes de fase, las componentes armónicas más significativas son el tercero con valores cercanos al 60 % de la corriente fundamental seguido por un 16 % del quinto y un 13 % del séptimo. Además se aprecia un desbalance considerable de carga entre las tres fases. A continuación se hacen las principales consideraciones a partir de la monitorización del tablero (detalle de graficas en el anexo A).

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, teniendo en cuenta que la diferencia de valor entre la fase más alta y la fase mas baja es cercana a 2 voltios, un valor poco significativo dado el voltaje nominal.
- Es importante anotar que en gran parte de la medición se registraron tensiones de fase que sobrepasan el valor de 120 [V] ±5 estipulado en la norma de la ESSA. Las tensiones de fase se encuentran entre 125 [V] y 133 [V].
- Debido al desbalance de carga ocurrido entre las fases y a la presencia significativa de los armónicos de orden 3, se aprecia en las medidas un valor considerable de la corriente que circula por el neutro, en algunos momentos supera en magnitud a las corrientes de fase del tablero.
- Los valores de DAT de corriente son significativos y diferentes entre fases, con valores máximos promedio de aproximadamente_68.7 %, 66.1 % y 65,3 % por fase. Así mismo se registró una DAT en tensión no mayor al 5 % en cada una de las tres fases.
- En el anexo A se presentan las figuras que muestran la diferencia entre la potencia trifásica aritmética y la potencia trifásica efectiva calculada basados en la norma IEEE 1459, así mismo se puede observar diferencia entre el factor de potencia trifásico y el factor de potencia aritmético calculado por medio de la misma norma.
- En las medidas tomadas al tablero se estableció que la corriente máxima por fase fue cercana a 55 [A] y la corriente máxima medida en el conductor neutro fue de 67 [A]. El calibre de los conductores de fase así como el conductor neutro de este tablero es THW # 2, conductor que soporta una corriente de hasta 115 [A] en operación normal.

4.2.1.2. Tablero TR4-1

El tablero TR4-1 alimenta 52 computadores ubicados en el cuarto piso del edificio, este tablero dispone de una UPS como unidad de respaldo. En cuanto a la forma de onda de las tensiones de fase así como su respectivo espectro armónico son similares a las registradas en el tablero TR1-2, ya que la alimentación proviene del mismo transformador (ver figura 4.15).

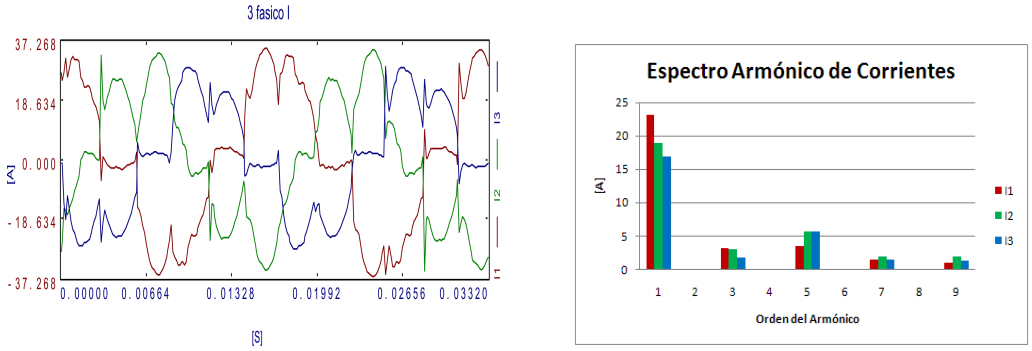


(a) Señales de tensión por fase

(b) Espectro armónico de tensiones por fase

Figura 4.15: Tensiones de fase del tablero TR4-1

En la figura 4.16 se muestra las formas de onda de las corrientes de fase y su respectivo espectro armónico.



(a) Señales de corriente por fase

(b) Espectro armónico de corrientes por fase

Figura 4.16: Corrientes de fase del tablero TR4-1

En el caso de las corrientes de fases, la figura 4.16a muestra una importante diferencia en cuanto a la forma de onda con respecto al tablero TR1-2 el cual no posee UPS. En la misma figura se puede ver que el tercer armónico se reduce considerablemente,

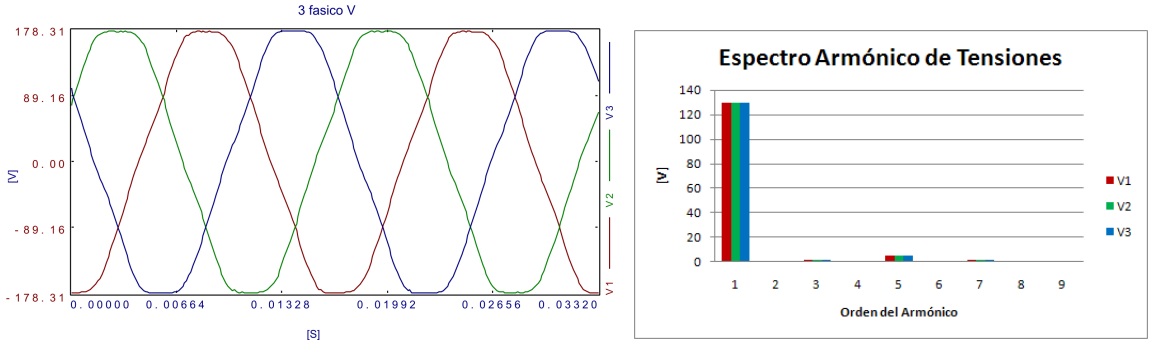
con aproximadamente 13 %, 15 % y 10 % de la fundamental, por el contrario se aprecia un incremento en la quinta componente con valores por fase cercanos al 16 %, 29 % y 33 % de la fundamental. Al igual que en el tablero TR1-2 las medidas indican que existe desbalance de carga entre fases. A continuación se resumen los sucesos más importantes con base en el periodo de medición (ver anexo A).

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, teniendo en cuenta que la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 2 V, durante el periodo de la monitorización .
- Al igual que en el tablero TR1-2, en gran parte de la medición se aprecian valores altos en las tensiones de fase, variando entre valores de 125 V y 133 V, incurriendo en lo estipulado en la norma de la ESSA.
- A pesar de que existe un desbalance de carga entre las fases de este tablero y se presentan componentes armónicos de tercer orden aunque no tan significativas como en el tablero TR1-2, no se aprecia una corriente considerable circulando por el neutro, con lo que la UPS tiene un efecto en el neutro. Durante el periodo en el que se monitorizó este tablero la corriente más alta por el neutro registrada corresponde a un valor no mayor a 1.5 A.
- Los valores de DAT de corriente son menores y similares entre fases, en comparación con el tablero TR1-2. Con valores máximos de aproximadamente 38 %, 51 % y 47 % por fase. Así mismo se registran valores de distorsión armónica en tensión cercanos al 5 % al igual que en el tablero TR1-2.
- Se observa que la potencia aritmética y la potencia efectiva calculadas con base en la norma IEEE 1459 al igual que el factor de potencia son muy similares entre sí.
- Las corrientes máximas registradas en las fases son de 28 [A], 25 [A] y 23 [A] respectivamente, así mismo la corriente máxima registrada en el neutro es de 1,5 [A].

4.2.1.3. Tablero de iluminación del primer piso TA-1

Debido a la importancia que posee el sistema de iluminación fluorescente en materia de contaminación armónica, se procedió a realizar mediciones del tablero de iluminación de

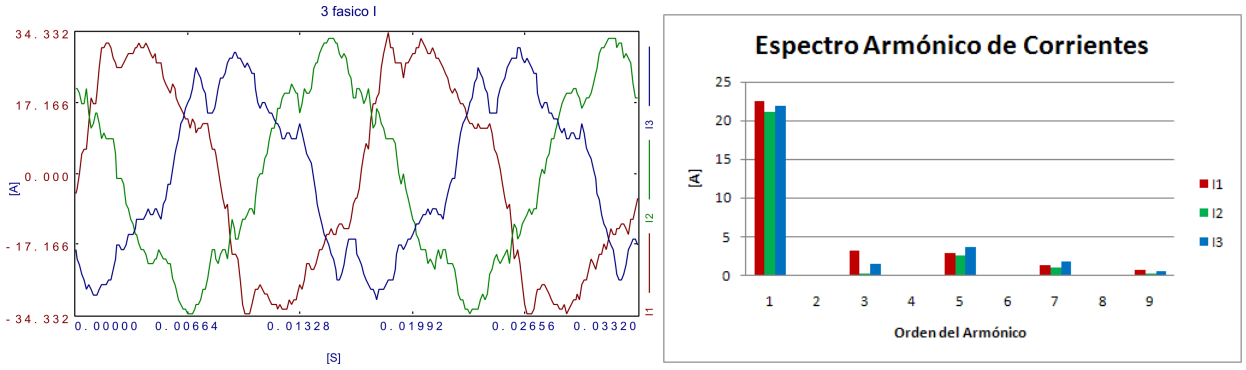
cada piso. En estas mediciones se observó que el comportamiento de todos los tableros de iluminación era muy similar, por esta razón se presenta solamente el análisis del tablero del primer piso. Este proviene del transformador A, al igual que los tableros TR1-2 y TR4-1, es por eso que la forma de onda de las tensiones de fase así como su respectivo espectro armónico son similares (ver figura 4.17). En cuanto al respaldo de energía este tablero no posee UPS.



(a) Señales de tensión por fase (b) Espectro armónico de tensiones por fase

Figura 4.17: Tensiones de fase del tablero TA-1

La figura 4.18 muestra las formas de onda de las corrientes de fase así como su respectivo espectro armónico. Las componentes predominantes por fase estan dadas en aproximadamente en 13.8 %, 1 % y 6.5 % de la fundamental para el tercer armónico, un 12.2 %, 11.9 % y 16 % para el quinto armónico y para el séptimo un 5 %, 4.6 % y 7 % de la fundamental. La diferencia en la proporción de las componentes por cada fase se debe al tipo de lámpara instalado.



(a) Señales de corriente por fase TA-1 (b) Espectro armónico de corrientes por fase

Figura 4.18: Corrientes de fase del tablero TA-1

A continuación se resumen los principales eventos del tablero TA-1 durante la etapa de medición (ver anexo A).

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, teniendo en cuenta que la diferencia entre la fase más alta y más baja es de menos de 2 V.
- Al igual que los tableros TR1-2 y TR4-1 se presenta sobretensión en las tensiones de fase cuyo valor se encuentra entre 127 [V] y 132 [V], incumpliendo con lo estipulado en la norma de la ESSA.
- Debido al desbalance de carga en el tablero y a los armónicos de terecer orden se aprecia una corriente por el neutro cercana a los 12 A.
- La DAT de las tensiones de fase esta ligeramente por debajo del 5 %, en cuanto a la DAT en corriente presenta valores maximos de 22 %, 17 % y 25 % por fase.

4.2.2. Transformador B

Como se había mencionado anteriormente el transformador B, posee una capacidad de potencia de 500 [kVA], este transformador está destinado para la alimentación de todo el sistema de aire acondicionado, bombas de hidroneumáticas, ascensor, entre otras cargas motoras. En el diagrama fasorial de la figura 4.19 se observa una carga de tipo inductivo al igual que el transformador A pero en este caso el caracter inductivo es superior. El motivo se debe a que las cargas que alimenta son basicamente motores. El desfase entre la tensión y la corriente es aproximadamente el mismo en todas las fases en un valor de 30º.

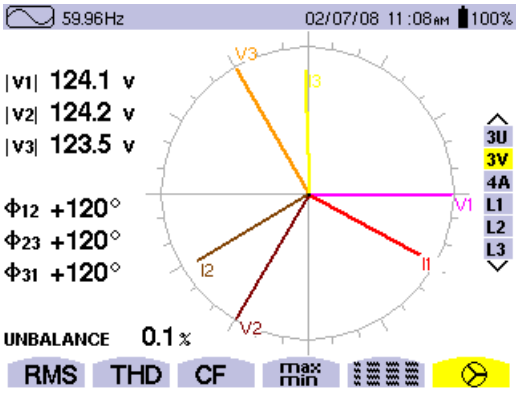


Figura 4.19: Diagrama fasorial a 60 Hz de tensiones y corrientes del transformador B

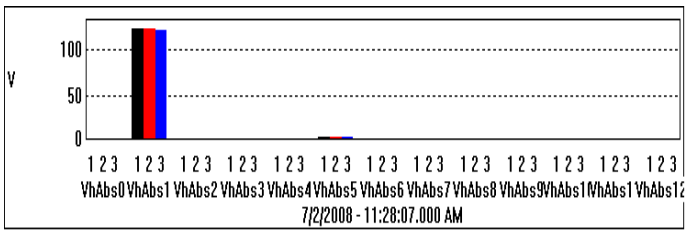


Figura 4.21: Espectro armónico de tensiones de fase

Las señales de tensión por fase de este transformador presentan un comportamiento sinusoidal casi puro como se puede observar en la figura 4.20, al igual que en el transformador A el armónico en tensión mas representativo es el quinto (ver figura 4.21), la diferencia con el transformador A es la magnitud de las tensiones pues no se presenta sobretensión de las fases.

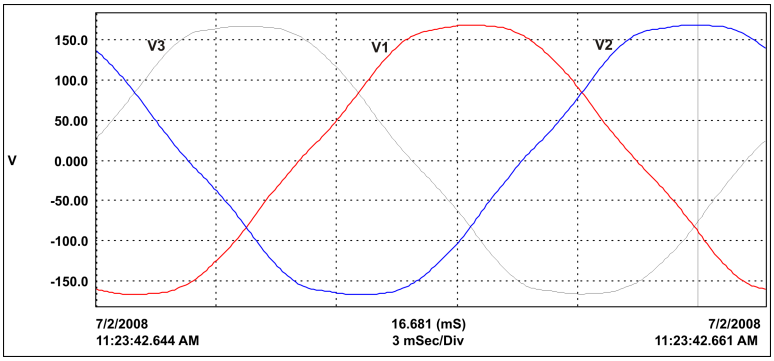


Figura 4.20: Señales de tensión de fase del transformado B

En la figura 4.22 se presentan las señales de corriente registradas en la medición del transformador B. Como se puede apreciar el desbalance de las corrientes de fase no es considerable, igualmente la forma de onda de la carga no se encuentra tan distorsionada. En la tabla 4.2 se presentan las magnitudes de las corrientes de fase máximas asi como también la corriente de neutro, cuyo valor es de 8.6 A, cuyo valor corresponde al 2 % de las corrientes de fase.

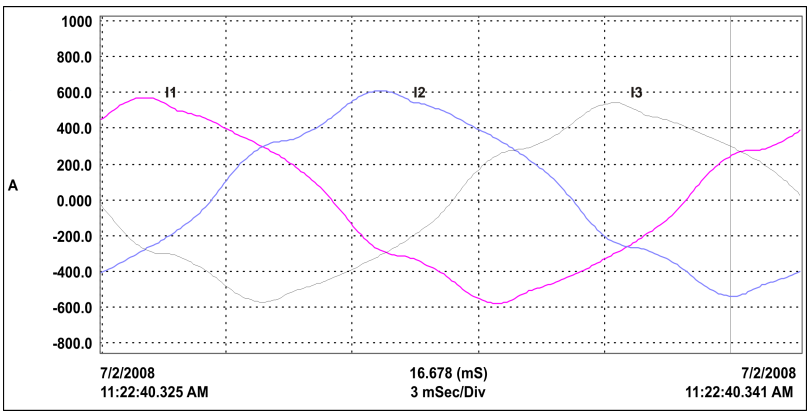


Figura 4.22: Señales de corriente de fase del transformador B

Fases	Corriente (A RMS)
Fase 1	429.6
Fase 2	439.6
Fase 3	420.2
Neutro	8.6

Tabla 4.2: Magnitudes de las corrientes de fase y neutro del transformador B

La distorsion de la forma de onda en corriente del transformador B concuerda con el espectro armónico de la misma, pues no existen componentes armonicas considerables, la mayor contribución es a causa del quinto y séptimo armónico con un valor de 9 % y 4 % respectivamente con referencia a la fundamental (ver figura 4.23).

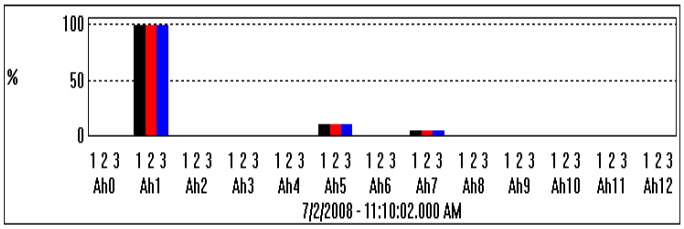


Figura 4.23: Espectro armónico de corrientes de fase

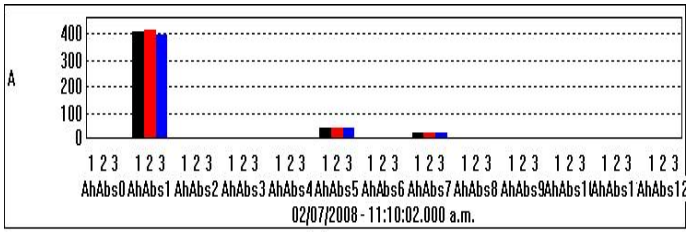


Figura 4.24: Espectro armónico de corrientes de fase (valor real)

Igualmente las componente armónicas de tensión, no son considerables, como puede observarse en la figura 4.25, la mayor componente se debe al quinto armónico con un porcentaje menor al 5 % de la componente fundamental de tensión.

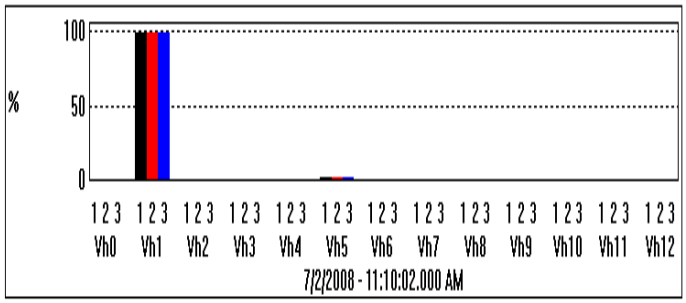


Figura 4.25: Espectro armónico de tensiones de fase

Durante la medición de este transformador se realizó una prueba de encendido de los equipos de mayor consumo con el fin de determinar lo que ocurre con la tensión a causa del encendido de las cargas motoras. A continuación se enuncian los eventos más importantes observados durante la etapa de medición del transformador B (En el anexo A se muestran detalles de las mediciones).

- A lo largo del periodo de medición no se presentaron diferencias de tensión entre las fases mayores a 2 [V].
- A diferencia del transformador A no existe sobretensión, pues los valores de tensión en las fases se encuentran en valores entre 123 [V] y 126.5 [V].
- También se puede apreciar que el desbalance de carga nos es tan considerable pues las corrientes de fase son de un valor muy similar del orden de los 400 [A], con una diferencia máxima de 16 [A] entre la fase mayor y menor.

- Es importante mencionar que en el caso de este transformador la corriente de neutro es aproximadamente cero, con un valor máximo de 8 [A], la razón es debido a que el contenido armónico es muy bajo, por lo cual no se presentan armónicos de tercer orden e igualmente el desbalance de carga es insignificante.

- La DAT en tensiones presenta valores de aproximadamente 3.3 % por fase en operación normal, presentándose un leve aumento a valores de 3.6 % en el momento en que se encienden los aires acondicionados.

- Los valores de DAT en corriente se pueden ver en el anexo A con valores por fase de 11.8 %, 11.7 % y 12.2 % respectivamente, de acuerdo a los límites de distorsión de corriente permitidos por la norma IEEE 519 [13]para una corriente de cortocircuito del transformador de 34.27 KA y una corriente de carga aproximadamente de 400 A se permite una distorsión armónica total en corriente menor al 10 % por lo que el transformador B no cumple con la reglamentación.

- La potencia máxima registrada en el transformador fue de 160 [kVA], donde el porcentaje de carga del transformador es del 32 %, con lo cual existe sobredimensionamiento del mismo.

- El factor de potencia registrado en las fases del transformador se encuentra alrededor de 0.8 diferente a los 0.97 registrados en el relé automático de contro del banco, lo que indica que este se encuentra desprogramado y lee una señal erronea del factor de potencia, que hace que no envie la señal a los contactores para que energice los demás pasos de compensación del banco. Esta situación conlleva a que se produzca un consumo considerable de energía reactiva en la instalación cuando este debería ser cero. Incumpliendo así con la normatividad vigente en la CREG [7].

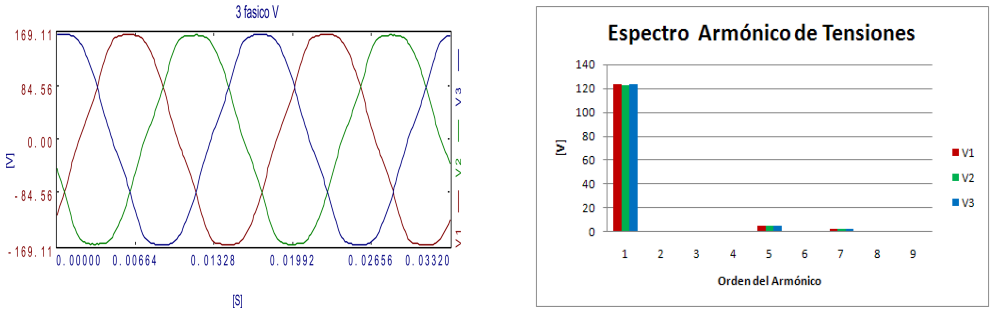
- Como se mencionó anteriormente se procedió a realizar una prueba de encendido de los aires acondicionados, con el fin de monitorizar la caida de tensión. En el momento de encendido de los aires se puede observar que el incremento en la corriente no es inmediato sino es progresivo. En el caso de la tensión, esta se mantiene en un valor cercano a 124 [V], por lo cual la caida es casi imperceptible.

- El transformador B cuenta con cuatro conductores por fase de calibre THW # 500 MCM al igual que el neutro del transformador, estos conductores poseen una

capacidad de corriente de 380 [A] cada uno, lo cual suma una capacidad total de 1520 [A], este valor es muy superior a la corriente registrada en los conductores de fase y de neutro, por tanto las dimensiones de los calibres son apropiadas para la corriente que actualmente maneja el transformador.

4.2.2.1. Tablero RC1-1

El tablero RC1-1 corresponde a una de las recuperadoras que hace parte del sistema de aire acondicionado, este tablero es alimentado por el transformador B. En la figura 4.26 se muestran las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico.

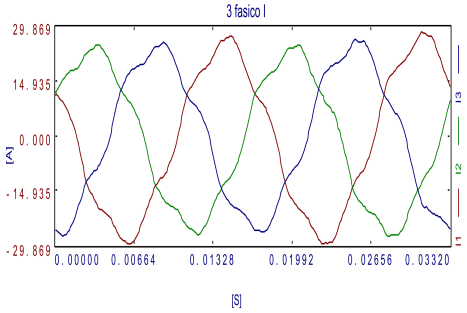


(a) Señales de tensión por fase

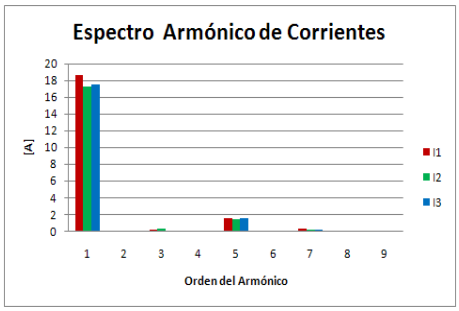
(b) Espectro armónico de tensiones por fase

Figura 4.26: Tensión de fase del tablero RC1-1

En la figura 4.26a se puede ver la forma de onda de las tensiones de fase del tablero, estas señales presentan un comportamiento sinusoidal casi puro, situación que se aprecia con mayor claridad en la figura 4.26b en donde se presenta el espectro armónico de las tensiones de fase, la componente armónica más significativa corresponde al quinto armónico con un porcentaje menor al 5 %, además se ve que no existe un desbalance considerable en magnitud de las tensiones. En la figura 4.27 se presenta la gráfica de las corrientes de fase así como el espectro armónico registrado en el tablero.



(a) Señales de corriente por fase



(b) Espectro armónico de corrientes por fase RC1-1

Figura 4.27: Corrientes de fase del tablero RC1-1

En estas figuras se evidencia que las formas de onda de la corriente presentan distorsión con respecto a una onda sinusoidal pura esto debido a la presencia de corrientes armónicas en el tablero, la quinta componente armónica es la que mayor magnitud con un porcentaje cercano al 10 % con respecto a la fundamental. Se observa que el porcentaje de distorsión es menor al registrado en los tableros correspondientes al transformador A, los cuales alimentaban cargas de características no lineales. A continuación se resumen los análisis con base en las mediciones tomadas (detalles en el anexo A).

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, teniendo en cuenta que la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 1 Volt, durante el periodo de la monitorización.
- Se observó en gran parte de la medición valores de tensiones cercanos a lo recomendado por la norma de la ESSA.
- Es importante mencionar que hacia las 6:00 AM, se presentan los mayores picos de corriente en las fases debido a que en ese momento ocurre el encendido de las recuperadoras de aire, llegando a un máximo de 180 [A] por fase, durante un tiempo reducido de aproximadamente 2 segundos, para posteriormente situarse en 20 [A], en los momentos en que estos picos de corriente se presentan no se observa una caída del nivel de tensión por debajo de lo recomendado por la norma de la ESSA. En el anexo A se muestra el momento en que ocurre el sobrepico.
- Se aprecia en las medidas un valor de corriente de neutro reducido, lo cual era de esperarse debido al poco contenido de armónicos de orden 3, así como al escaso desbalance entre corrientes de fase.

- Los valores de DAT en tensión son similares entre fases con valores menores al 5 %. en cuanto a la magnitud de la DAT de corriente son reducidos y similares entre fases, con valores cercanos al 10 % por fase.

- La potencia aritmética y la potencia efectiva registrada en el tablero son muy similares, evidenciando el poco desbalance y contenido de armónicos de las señales. De la misma forma el factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritméticom.

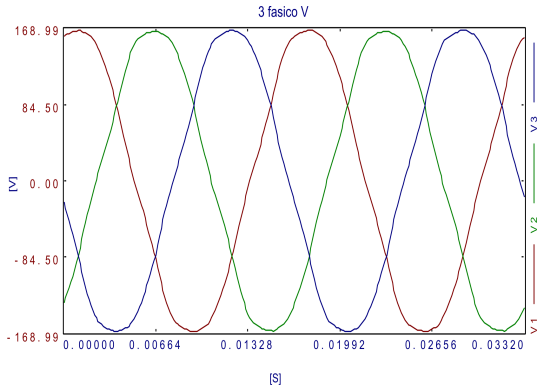
- Las corrientes máximas registradas en las fases alcanzan valores de hasta 175 [A] al momento del encendido a las 6 de la mañana, durante el día se registran valores de corriente de 22 [A], 20 [A] y 21 [A], así mismo la corriente máxima circulante por el neutro es de 3 [A].

- El calibre de los conductores de fase es de THW # 6, el cual posee una capacidad de corriente de 65 [A], en el momento de encendido de la recuperadora se registra una corriente mayor que la permitida en el conductor, sin embargo el pico de corriente del encendido de la recuperadora tiene una duración de tiempo mínima (2 segundos) por lo cual el conductor soporta este pico de encendido.

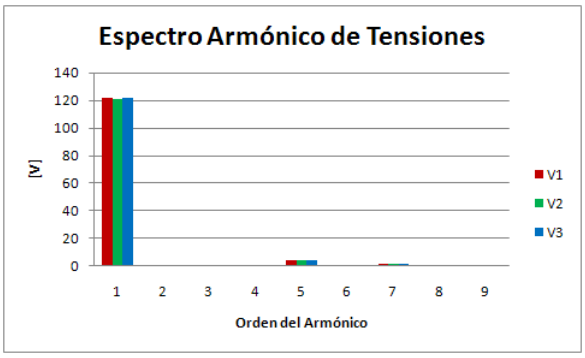
- El calibre del conductor neutro es de THW # 8, el cual posee una capacidad de corriente de 50 [A] lo que confirma que el calibre es adecuado para la corriente circulante por el neutro en el tablero.

4.2.3. Tablero enfriadora 1

La enfriadora del sistema de aire acondicionado del edificio, o comúnmente llamada *chiller*, es la encargada de enfriar el agua proveniente de las bombas. El tablero que alimenta a la chiller se ubica en el segundo tablero general, correspondiente al transformador B. Debido a que la alimentación del tablero proviene del mismo transformador que alimenta al tablero RC1-1, las señales de tensión así como su espectro armónico son muy similares (ver figura 4.28).



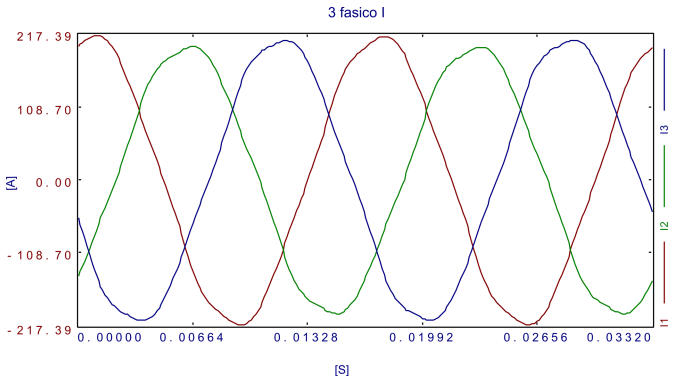
(a) Señales de tensión por fase



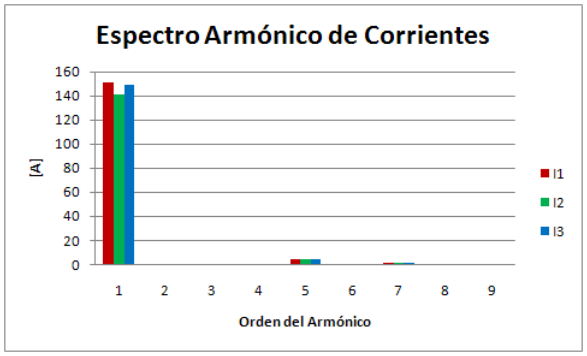
(b) Espectro armónico de tensiones por fase

Figura 4.28: Tensiones de fase del tablero enfriadora 1

Las formas de onda de las corrientes de fase y su respectivo espectro armónico se muestran en la figura4.29, las corrientes de fase corresponden a una forma de onda sinusoidal casi pura con una presencia reducida del tercero y el quinto armónico con un valor por debajo del 5 %.



(a) Señales de corriente por fase



(b) Espectro armónico de corrientes por fase

Figura 4.29: Corrientes de fase del tablero enfriadora 1

A continuación se resumen los analisis realizados con base en los registros del analizador de redes (ver situación gráfica en el anexo A).

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, teniendo en cuenta que la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 2 Volt, durante el periodo de la monitorización.

- Los valores de DAT en tensión son similares en entre fases con valores menores al 5 %. Asimismo los valores de DAT de corriente son reducidos y similares entre fases, con valores que no sobrepasan el 5 % por fase.

- Durante la monitorización se determinó que los valores de tensión no superaban los 126 volts, con lo cual se cumple con los niveles establecidos por la norma de la ESSA.

- En las medidas se aprecian instantes de tiempo en los que las corrientes de fase alcanzan valores de hasta tres veces la corriente de funcionamiento normal, esto debido al encendido aleatorio de los compresores, no obstante la duración del encendido es de algunos segundos. Las corrientes de fase registradas en la monitorización presentan valores durante el día de 150 [A], sin embargo en algunos momentos cuando la enfriadora recarga la corriente alcanza valores de hasta 430 [A]. La corriente que circula por el neutro presenta valores de 3 [A] normalmente pero en algunos instantes del día se presentan picos de hasta 183 [A].

- Con relación a la potencia aritmética y a la potencia efectiva, se observa que durante la monitorización, estas potencias son my similares, evidenciando el poco desbalance y contenido de armónicos de las señales. De la misma forma se muestra que el factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritmético. No obstante como se menciona anteriormente, en el transcurso de la medición se observaron picos en potencia.

- La *chiller* cuenta con dos conductores por fase calibre THW # 2/0, los cuales poseen una capacidad de corriente de 175 [A] cada uno, lo que suma una capacidad por fase de 350 [A], los picos de corriente presentados en algunos momentos del día cuando la shiller recarga son de un valor superior, sin embargo la duración del pico es de algunos segundos y los conductores pueden soportar esta corriente sin sobrepasar los límites de temperatura permitidos.

- La *chiller* cuenta con dos conductores neutros de calibre THW # 6, los cuales poseen una capacidad de corriente de 65 [A] cada uno, lo cual suma una capacidad total de 130 [A]. Los picos de corriente observados en el neutro presentan valores mayores a la capacidad de los conductores, pero al igual que con los conductores de fase el tiempo de sobrecorriente es muy reducido y se corroboró con las especificaciones tenicas del cable que los conductores del neutro soportan esa corriente

por un tiempo reducido.

4.2.4. Registros tomados a UPS

Debido al daño que se venía presentando en las cámaras de video y seguridad, distribuidas en cada uno de los pisos del edificio, se decidió hacer un seguimiento al circuito que alimenta estos equipos. Dada la importancia de las camaras de video para la seguridad del CENTIC, estas se encuentran alimentadas por una UPS de 5 kVA asi como tambien cuenta con respaldo de energía de la planta eléctrica. Se procedió entonces a realizar diferentes pruebas y medidas en la UPS con el ánimo de encontrar algún tipo de irregularidad que ocasionara el daño de las cámaras de video de la instalación.

Por otro lado algunas UPS presentaban problemas reacionados con su funcionamiento debido a que en algunos momentos salían de la operación on-line y pasaban a Bypass.

4.2.4.1. UPS de 5 KVA

Esta UPS se encuentra ubicada en el primer piso de la instalación y está energizada por el transformador A, es una UPS bifásica sin embargo solo está en funcionamiento una de sus fases de salida, la cual alimenta el circuito de las cámaras de video, el circuito de televisión y dos computadores ubicados en el centro de control. Las pruebas realizadas a la UPS consistian en monitorizar las tensiones y corrientes de entrada y salida de la misma cuando esta era alimentada directamente por la red, también cuando trabajaba sin suministro es decir en el periodo de autonomía del equipo y por último cuando trabajaba alimentada por la planta. En la figura 4.30 se puede ver el diagrama de bloques con los nombres de las tensiones de entrada y salida de la UPS que se seleccionaron para realizar la prueba de funcionamiento del equipo.

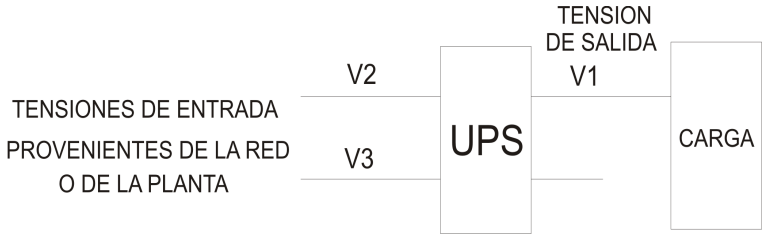
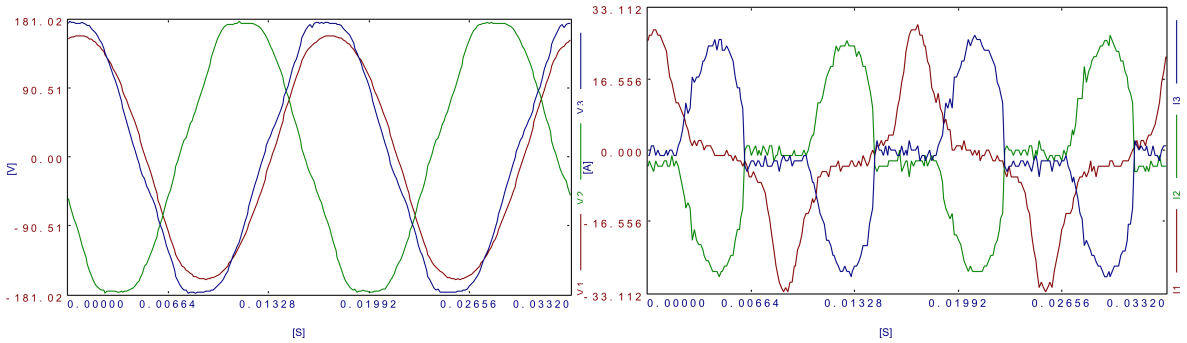


Figura 4.30: Diagrama de bloques de la conexión de la UPS a la alimentación

En la figura 4.31 se muestran las formas de onda de tensión y corriente registradas en las pruebas a la UPS.



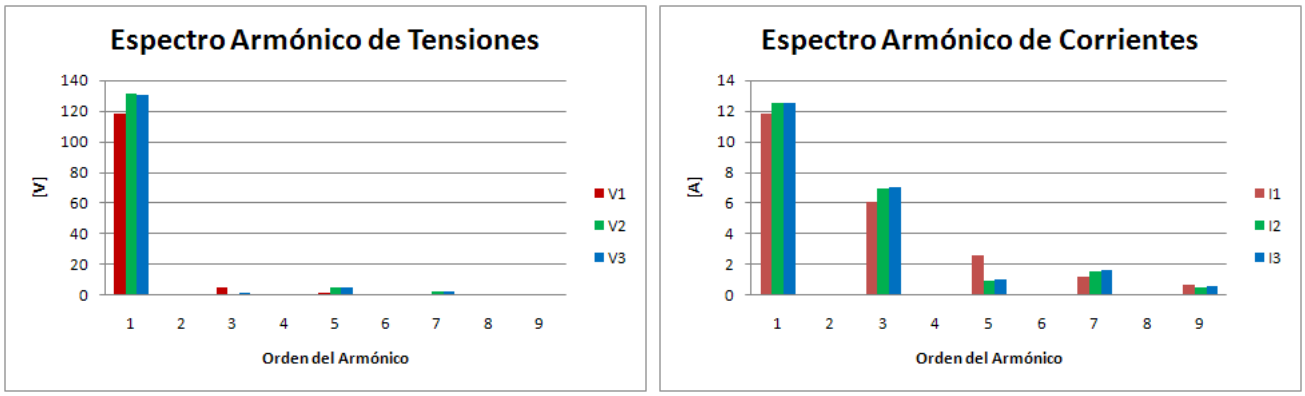
(a) Tensiones de entrada y salida, V1, V2, V3 (b) Corrientes de entrada y salida, I1, I2, I3

Figura 4.31: Señales de entrada y salida de la UPS, en operación normal

- Las señales V2 y V3 de color verde y azul respectivamente, son las señales de la tensión de entrada a la UPS y la onda V1 de color rojo es la tensión de salida. Es importante señalar que siendo la UPS bífasica, sólo tenía carga en una de las fases, por lo que continuamente la UPS pasaba a estado de Bypass.

- Las tensiones de entrada están alrededor de los 131 [V], mientras que la salida presenta valores de tensión cercanos a los 119 [V], lo cual indica que la UPS regula correctamente el valor de tensión reduciendolo a una magnitud adecuada.

- El contenido armónico de las corrientes I2 e I3 son similares con valores para la tercera componente de aproximadamente 55 % con respecto a la fundamental para el quinto con 7 % y con el 12 % para el séptimo. En la corriente I1 se observan valores para el tercer armónico de 50 %, en el quinto se tiene un 21 % y en el séptimo un 9 %, es decir para la corriente I1 se presenta una leve reducción en el tercer y séptimo armónico y un pequeño incremento en la quinta componente (ver figura 4.32b).



(a) Armónicos de tensión (b) Armónicos de corriente

Figura 4.32: Armónicos de tensión y corriente

Debido a que la mayoría de los reportes de daño de las cámaras de video se presentaban luego de que ocurriera algún corte en el suministro de energía y entrara la planta de emergencia, se procedió a realizar la prueba interrumpiendo el suministro eléctrico y permitiendo que la planta diesel alimentara la instalación. De esta forma se realizaron las medidas respectivas tanto a la entrada como a la salida de la UPS.

- Luego de interrumpir el suministro eléctrico, la planta de emergencia tarda aproximadamente 8 segundos en entrar en funcionamiento.
- En el instante de corte de la energía y durante el tiempo que tarda la entrada de la planta eléctrica, la tensión de la UPS se mantiene en el mismo valor RMS de tensión.

En la figura 4.33 se pueden apreciar las formas de onda de tensión de entrada V2, V3 y de salida V1 de la UPS, durante el funcionamiento de la planta de emergencia.

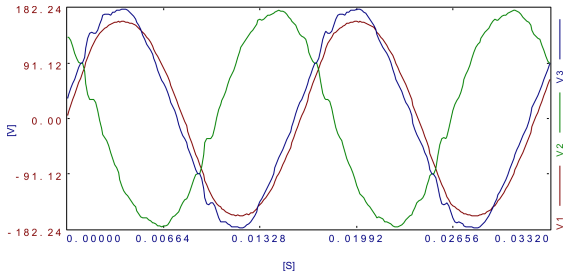


Figura 4.33: Tensiones de entrada y salida de la UPS durante el funcionamiento de la planta

- El grado de distorsión en la forma de onda de las tensiones de entrada V2 y V3 es mayor cuando opera la planta eléctrica.
- La corriente de salida de la UPS presenta una pequeño reducción de aproximadamente 4 [A] en el instante que entra la planta, esta corriente retorna rápidamente a su valor inicial.
- La tensión de salida de la UPS presenta oscilaciones en su magnitud de hasta 5 [V] en el periodo de tiempo que es alimentada por la planta.
- Durante el funcionamiento de la planta de emergencia ocurre una elevación de la DAT en tensión tanto para las fases de entrada V2 y V3 como para la fase de salida V1, cuyo valor cambia del 5 % a una oscilación de entre el 5 % y el 9 % (Ver anexo B).
- En el valor de DAT en corriente se tiene un valor cercano al 55 % para todas las fases, durante el periodo de medición, sin embargo se presenta una pequeña elevación de la DAT para las corrientes de entrada I2 e I3 por aproximadamente un minuto a partir del momento en que entra la planta eléctrica (Ver anexo B).
- Se presentaron inconvenientes para identificar las fases de entrada y salida de la UPS, debido a que no están correctamente marcadas con sus respectivos colores. En todos los tableros de las UPS de la instalación se identificaron errores de marcación de las fases.
- En DAT en tensión la UPS no cumple con las especificaciones de la placa de características presentadas en el capítulo 3, pues el valor de DAT supera el 3 %.

4.3. Registro auditoria URE[2]

Con el fin de de encontrar posibles puntos de ahorro de energia dentro de la instalación y al mismo tiempo identificar potenciales riesgos a la salud humana que se puedan encontrar en el edificio, se realizó una visita por todos los pisos del CENTIC tomando un registro fotográfico de las anomalias encontradas en ella.

[2]Uso Racional y Eficiente de Energía

Durante el recorrido realizado en la terraza del edificio se observó que las mangueras de succión y/o baja presión de algunas unidades de aire acondicionado como lo son los chiller y dos condensadoras de dos aires tipo minisplit se encontraban sin el debido aislamiento térmico o con tramos faltantes del mismo, lo cual implica que el refrigerante que por alli fluye se caliente y la unidad deba trabajar mas tiempo para alcanzar una temperatura adecuada en el cuarto (Ver figura 4.34).

Figura 4.34: Mangueras de succión sin aislamiento térmico

También en la terraza se encontraron dos cajas de conexiones eléctricas con empalmes defectuosos (moños) entre conductores, los cuales reducen la confiabilidad del sistema. Igualmente se observó una fuga de agua en la tuberia que va desde la bomba hasta uno de los chiller, lo que implica no solo un mayor trabajo a cargo del motor de la bomba para llevar el líquido a su destino, sino también un derroche de un recurso natural (Ver figura 4.35).

Figura 4.35: Empalmes defectuosos y fugas de agua en la terraza

Los empalmes entre los conductores de los 5 pararrayos con los que cuenta el edificio se encuetran en mal estado y con muestras de sulfatación, lo cual reduce la confiabilidad del sistema ante una eventual descarga atmosférica. Asimismo se observaron varios tramos de acometidas eléctricas en donde se utiliza tuberia plástica al descubierto, quedando expuesta a cualquier tipo de golpes o daños por parte del personal que transite por el sitio. Esta situación se puede observar en la figura 4.36.

Figura 4.36: Acometidas en tuberia plástica y empalmes defectuosos en conductores de pararrayos

Continuando con el recorrido a cada uno de los pisos del edificio se encontraron varias oficinas con la totalidad de las luces encendidas aún cuando habian cubículos sin ocupación, así mismo se observaron computadores encendidos cuando nadie estaba usándolos y salas con la iluminación encendida cuando estas estaban sin estudiantes (Ver figura 4.37), estas prácticas inadecuadas conllevan a un consumo de energía innecesario en la instalación con todas las implicaciones ambientales y de manejo de recursos que esto implica.

Figura 4.37: Iluminación y equipos encendidos sin uso

En cada uno de los cuartos en donde están ubicados los Racks de cada piso se encuentra una unidad de aire acondicionado tipo minisplit, cuya temperatura está siempre programada en 18 °C. Debido a las dimensiones del cuarto no es posible que con un equipo de 12.000 Btu alcance una temperatura tan baja, por lo que los compresores de las unidades condensadoras de estos aires se encuentran siempre en funcionamiento intentando llegar a la temperatura programada, lo que implica un gran consumo de energía ya que estas unidades permanecen encendidas las 24 horas del día todos los días (Ver figura 4.38).

Figura 4.38: Temperatura de los aires salas de los Racks

En dos de los cuartos de UPS del segundo piso se encontraron conexiones y empalmes indebidos entre dos de los tableros de alimentación de cargas y en las acometidas a una de las UPS. Estas conexiones defectuosas reducen la confiabilidad del sistema ante cualquier manipulación indebida de estas conexiones y crean puntos calientes en los conductores que se reflejan en pérdidas de energía, asi mismo estas conexiones sueltas y al descubierto aumentan el riesgo de electrocución para cualquier persona que tenga contacto con ellas (Ver figura 4.39).

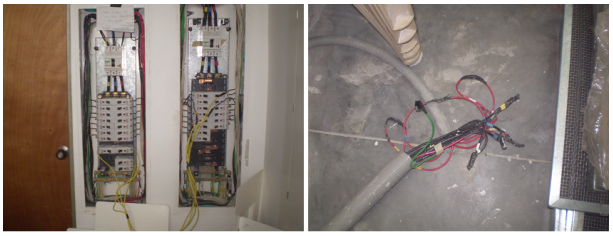


Figura 4.39: Conexiones indebidas en cuartos de las UPS

Una de las unidades manejadoras del aire acondicionado situadas en el segundo piso de la instalación presenta fugas de agua por una de las mangueras de drenaje (ver figura 4.40), lo que conlleva a que el equipo no funcione en condiciones óptimas y por ende se reduzca su vida util.

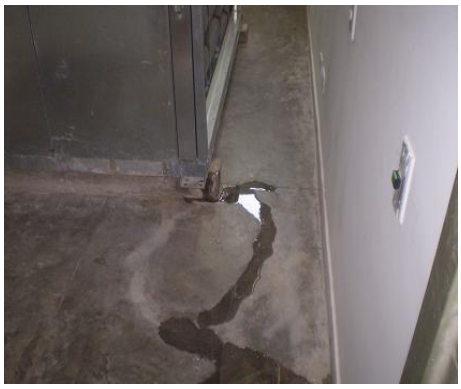


Figura 4.40: Unidad manejadora con fugas de agua

En la última parte del recorrido se observó que los computadores utilizados para que los estudiantes realicen la reserva no cuentan con una programación que les permita entrar en estado de hibernación cuando no están siendo usados, lo que implica que por 14 horas diarias los computadores se encuentran encendidos y estén o no en uso.

Figura 4.41: Computadores para realizar reservas

Capítulo 5

Modelado y simulación de cargas representativas

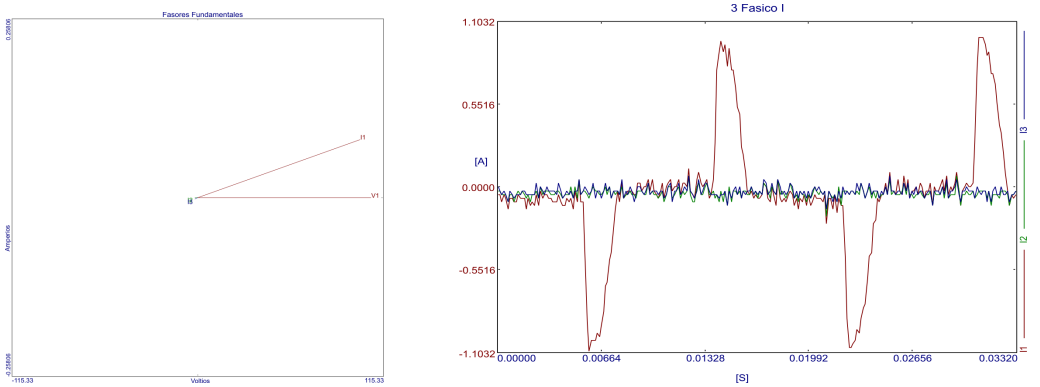
5.1. Caracterización de equipos de cómputo

El CENTIC es una instalación que brinda soporte tecnológico a la comunidad universitaria en general, por esta razón existen una gran cantidad de equipos de cómputo, indispensables para cumplir con los requerimientos informáticos que la institución demanda.

Con el fin de comprender las principales características de funcionamiento de estos equipos, se realizaron medidas por separado de una CPU y de un monitor LCD[1], para posteriormente analizar el comportamiento de cada elemento así como el conjunto completo.

En la figura 5.1a se muestra el diagrama fasorial registrado en la medida tomada a un monitor por individual, en donde se puede observar que el fasor de corriente fundamental esta adelantando al fasor de tensión fundamental, lo cual quiere decir que el monitor a una frecuencia de 60 Hz presenta un comportamiento capacitivo.

[1]Liquid Crystal Display



(a) Diagrama fasorial de un monitor a 60 Hz

(b) Corriente de salida de un monitor

Figura 5.1: Diagrama fasorial y corriente de un monitor

Asimismo se puede observar en la figura 5.1b que la corriente posee un valor pico de 0.96 [A] y presenta una forma de onda distorsionada con respecto a una sinusoidal pura.

En la figura 5.2 se puede ver que la onda de corriente de fase está adelantada de la señal de tensión de fase, lo que efectivamente demuestra un leve comportamiento capacitivo del equipo.

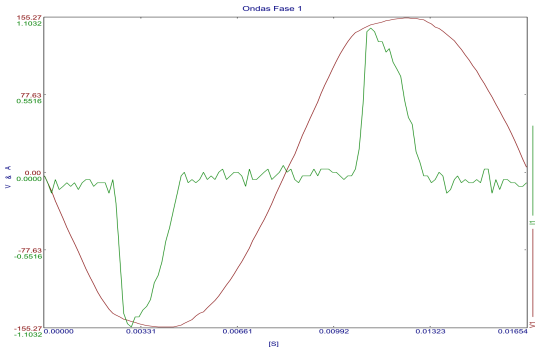


Figura 5.2: Tensión y corriente registradas en la medición de un monitor

El espectro armónico de corrientes en valor rms resultado de la medición individual de un monitor se presenta en la figura 5.3. Alli se puede observar que la componente del tercer armónico presenta una magnitud cercana al 80 % del valor de la corriente fundamental, el quinto y el séptimo armónico también presentan porcentajes elevados con respecto a la fundamental con valores de 60 % y 35 % respectivamente.

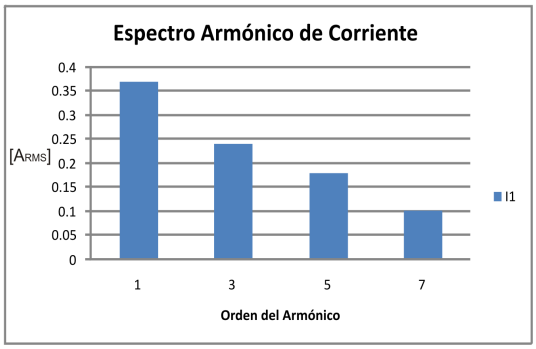
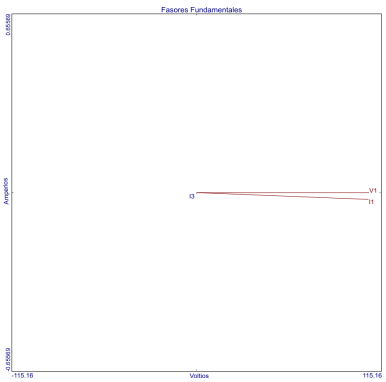


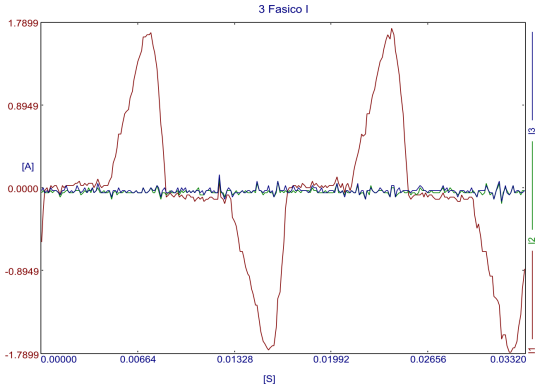
Figura 5.3: Espectro armónico de corriente de un monitor

Teniendo en cuenta las características del monitor de un computador a continuación se estudian las características de una CPU.

En el diagrama fasorial mostrado en la figura 5.4a se puede observar que el fasor de corriente fundamental atrasa el fasor de tensión fundamental, lo que indica que con respecto a estos fasores, la CPU presenta un comportamiento de tipo inductivo a 60 Hz, diferente del comportamiento capacitivo observado en la medición del monitor.



(a) Diagrama fasorial de una CPU a 60 Hz



(b) Corriente de salida de una CPU

Figura 5.4: Diagrama fasorial y corriente de una CPU

En la figura 5.4b se puede observar que la forma de corriente registrada en la medición de la CPU, es muy similar en forma a la que se registró en la medida realizada al monitor, aunque existe diferencias en magnitud y fase con respecto a estas dos corrientes.

En la figura 5.5 se puede ver que la señal de corriente se encuentra ligeramente atrasada de la señal de tensión de fase lo que confirma que el equipo medido presenta un comportamiento levemente inductivo.

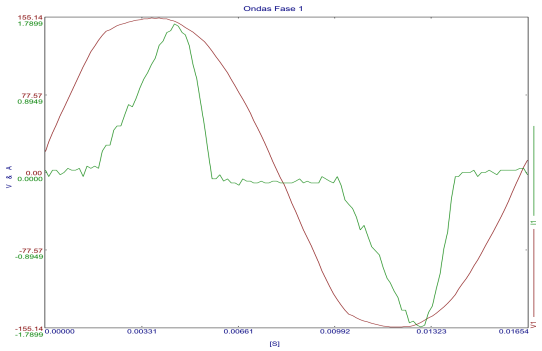


Figura 5.5: Tensión y corriente registradas en la medición de una CPU

El espectro armónico de la corriente registrada de una CPU se muestra en la figura 5.6 en ella se observa la presencia de componentes armónicas de orden 3, 5, 7 y 9 con valores respecto de la fundamental de 60 %, 25 %, 17 % y 8 % respectivamente. Realizando una comparación entre el monitor y la CPU se puede concluir que con respecto a la corriente fundamental que maneja cada elemento, la CPU presenta un porcentaje menor de distorsión armónica que el monitor.

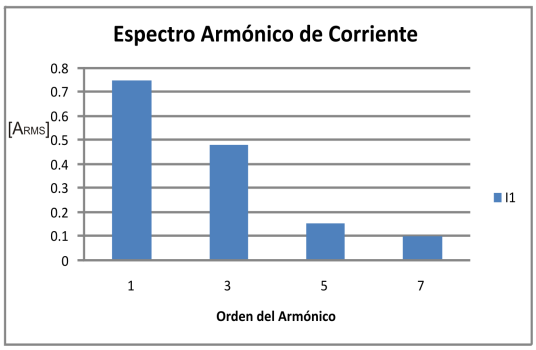
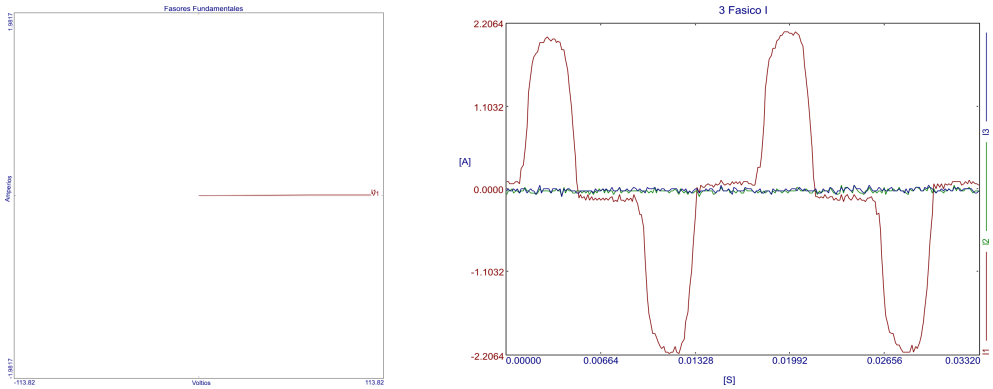


Figura 5.6: Espectro armónico de corriente de una CPU

Analizado el monitor y la CPU por separado se procede a realizar la medida del conjunto completo monitor y CPU.

En la figura 5.7a se puede observar que los dos fasores fundamentales tanto de tensión como de corriente se encuentran casi en fase, lo cual indica que a 60 Hz el computador presenta un comportamiento muy aproximado al resistivo. En la figura 5.7bse puede observar la corriente registrada en la medición de un computador, esta onda es similar en forma a las señales registradas en la medida del monitor y de la CPU por separado.



(a) Diagrama fasorial de un computador a 60 Hz

(b) Corriente de salida de un computador

Figura 5.7: Diagrama fasorial y corriente de un computador

En la figura 5.8 se puede observar como las señales de corriente del monitor y de la CPU suman a su vez la señal de corriente de un computador.

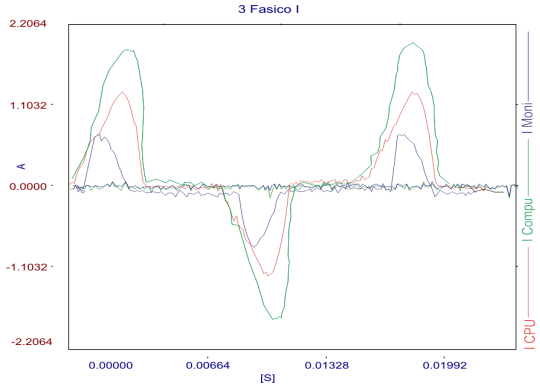


Figura 5.8: Corrientes de fase de los tres elementos

El espectro armónico de corrientes tomado de la medición de un computador se puede observar en la figura 5.9, en ella se identifican componentes del tercer armónico con un porcentaje del 50 % con respecto al valor de la corriente fundamental, componentes del quinto y séptimo armónico con porcentajes del 7 % y el 18 % respectivamente.

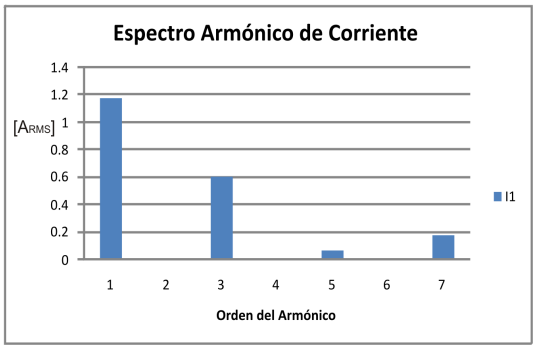


Figura 5.9: Espectro armónico de corriente de un computador

El espectro armónico de corrientes de el monitor, CPU y computador se puede apreciar en la figura 5.10, en ella se observa que a pesar de que el computador presenta un porcentaje menor de distorsión armónica en la tercera, séptima y novena componente con respecto a su corriente fundamental, la contribución en Amperios al sistema de estas componentes con respecto a las obtenidas en la medición del monitor y la CPU por separado es mayor, caso distinto al que se puede observar en la quinta componente, en donde la magnitud de esta corriente en el computador es menor que la registrada en la medición del monitor y de la CPU por separado lo que indica que para esta componente existe algún tipo de compensación entre los elementos cuando se analiza el conjunto completo.

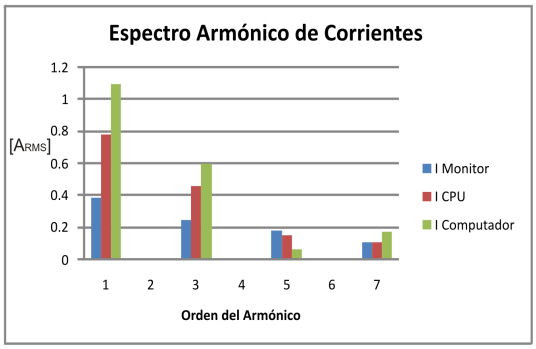


Figura 5.10: Espectro armónico de los tres elementos

5.2. Modelado de equipos de cómputo

Una vez estudiado el comportamiento individual de un monitor y una CPU, así como el conjunto completo formando un computador, se complementará el análisis de estas

cargas mediante el uso de una herramienta computacional de simulación llamada ATP[2]. Esta herramienta permite por medio de la simulación realizar un análisis más detallado profundo de varios de los eventos que se puedan presentar cuando están operando este tipo de cargas en un sistema y evaluar las posibles soluciones antes de implementarlas.

Equipos como los computadores se encuentran constituidos por fuentes de alimentación de corriente continua, estas fuentes de energía presentan características no lineales las cuales son los mayores generadores de armónicos en este tipo de aparatos eléctricos. En la mayoría de las fuentes de alimentación, la tensión de entrada es suministrada por el devanado de un transformador de núcleo magnético, luego la señal de tensión es rectificada por un puente de diodos y posteriormente es sometida a un filtrado capacitivo. La finalidad del filtro capacitivo es mantener constante el nivel de tensión de continua por lo cual debe proporcionar corriente a la carga durante aquellos intervalos en que los diodos que conforman el puente rectificador se encuentran polarizados inversamente y así controlar la tensión de rizado que se presente en la tensión de salida [27].

En la figura 5.11 se muestra el diagrama de bloques que describe el proceso de rectificación de la señal de tensión.

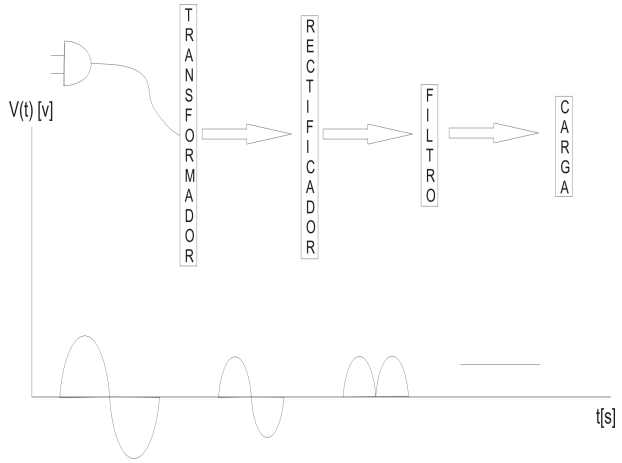


Figura 5.11: Diagrama de bloques de un rectificador

El diseño y construcción del modelo del rectificador se realizó en ATP a partir de elementos predeterminados que se ofrecen en dicha herramienta. Los elementos utilizados fueron diodos, fuentes de corriente alterna y cargas del sistema basadas en el consumo de potencia (activa y reactiva) de los elementos pasivos. El valor de la impedancia de

[2]Alternative Transients Program

línea del modelo corresponde a la impedancia propia de un conductor calibre numero 12, ya que este es el calibre con el que la instalación interna del CENTIC se encuentra cableada. El valor de resistencia de este conductor es 5.21 [mΩ/m] y la reactancia es de 0.16 [mΩ/m]. En la figura 5.12 se muestra el circuito construido en ATP que modela un computador. Los valores de los elementos utilizados son Rs= 33 Ω, Cs= 1 uF, R1= 20 Ω, R2= 80 Ω y C1= 1 mF, los valores de R y L que están en serie con la fuente de alimentación corresponden a la impedancia propia de la linea. Los parámetros de este circuito fueron ajustados de tal forma que las respuestas de tensión y corriente fueran similares a las obtenidas en la medición realizada a un equipo de cómputo.

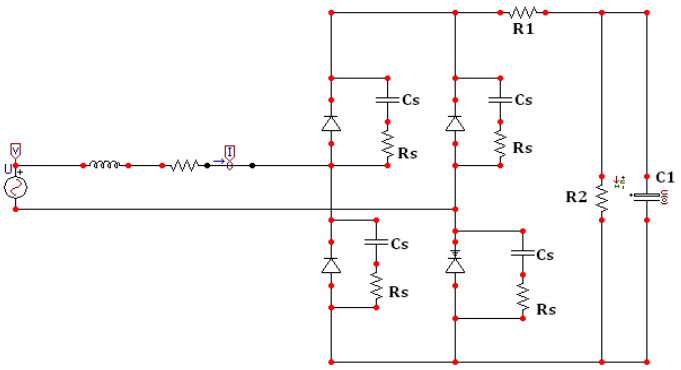
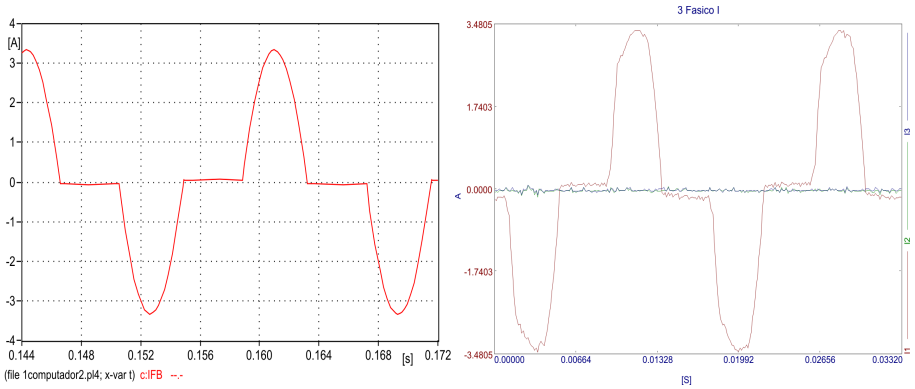


Figura 5.12: Modelo simplificado de un computador en ATP [27]

La señal de corriente obtenida en la simulación del computador en ATP y la señal registrada en la medición se pueden observar en las figuras 5.13a y 5.13b respectivamente, en donde se puede apreciar que dichas corrientes presentan un comportamiento muy similar entre si tanto en forma como en magnitud.



(a) Corriente del modelo de un computador en ATP

(b) Corriente de salida de un computador

Figura 5.13: Corrientes de un computador

El desfase existente entre la onda de tensión y la onda de corriente obtenidas en la medición realizada a un computador se puede observar en la figura 5.14.

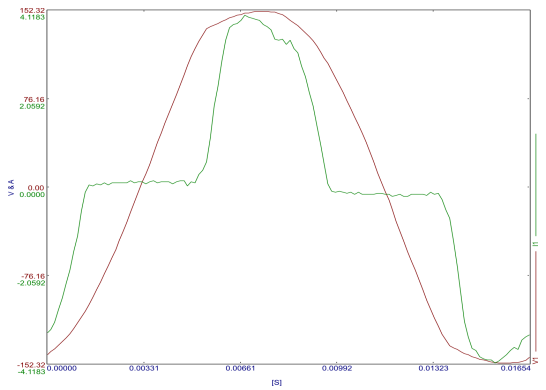
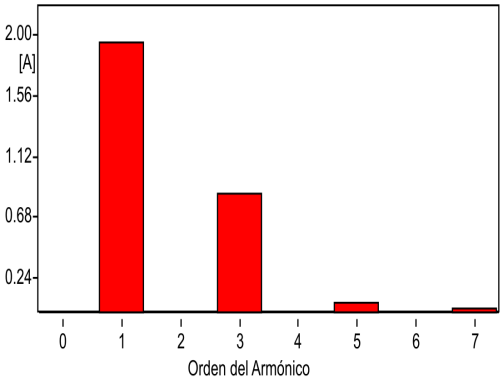
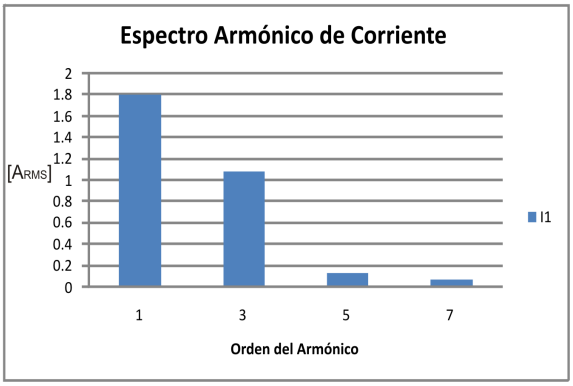


Figura 5.14: Tensión y corriente registradas en la medición de un computador

También las componentes armónicas de corriente producto de la simulación presentan valores muy similares a los obtenidos en la medida realizada a un equipo de cómputo como se puede apreciar en la figura 5.15.



(a) Espectro armónico de corriente de un computador en ATP



(b) Espectro armónico de corrientes de un computador

Figura 5.15: Espectro armónico de corriente de un computador

En la tabla 5.1 se encuentran los respectivos valores de la magnitud de cada componente armónica en corriente, extraídos del modelo simulado de un computador. Se puede apreciar que el tercer armónico corresponde casi al 50 % de la corriente fundamental, de la misma forma el quinto y séptimo armónico corresponden al 6 % y al 3 % respectivamente.

Orden del Armónico	Magnitud [A]
Fundamental	1.778
Tercer Armónico	0.871
Quinto Armónico	0.1148
Séptimo Armónico	0.01688

Tabla 5.1: Magnitud de las componentes armónicas resultantes de la simulación de un computador

Después de analizar los resultados de la simulación de un equipo de cómputo y confirmar la validez del modelo, se procede a estudiar las características que presentan dentro de un sistema trifásico una serie de computadores agrupados en cada una de las fases.

Con el objetivo de realizar la simulación de una forma práctica y sencilla, cada uno de los circuitos rectificadores que modelan un equipo de cómputo se agruparán en un pequeño bloque llamado GRP[3] (ver figura 5.16).

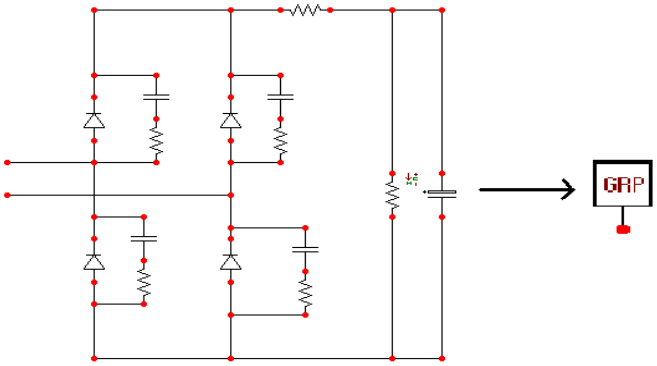


Figura 5.16: Bloque simplificado del modelo obtenido en ATP

El primer escenario a simular dentro de un sistema trifásico tendrá cinco equipos de cómputo por fase como se observa en la figura 5.17. Estos equipos mantienen una distancia entre ellos de 4 metros correspondientes a una R = 0.02084 Ω y una L= 0.001704 mH. Asimismo se asume un calibre #6 con una longitud de 20 metros para el conductor neutro, correspondientes a una R= 0.026 Ω y una L= 0.0021 mH.

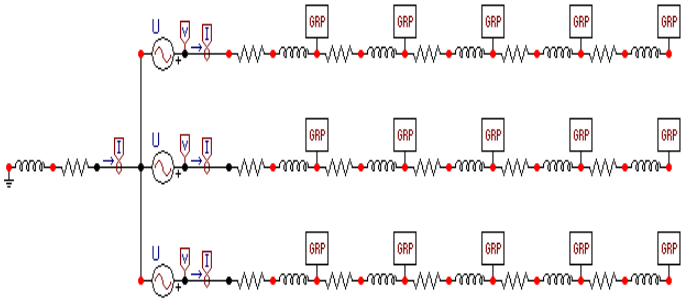


Figura 5.17: Sistema trifásico con 5 computadores por fase

Las corrientes de fase así como la corriente que circula por el conductor neutro obtenidas en la simulación se pueden apreciar en la figura 5.18. Allí se observa que las señales de

[3]Grupo asociado al modelo en ATP

corriente practicamente no varían su forma de onda con respecto a la observada en la figura 5.13a, también se puede observar que la amplitud de cada una de las corrientes de fase es aproximadamente 5 veces el valor de corriente de un computador.

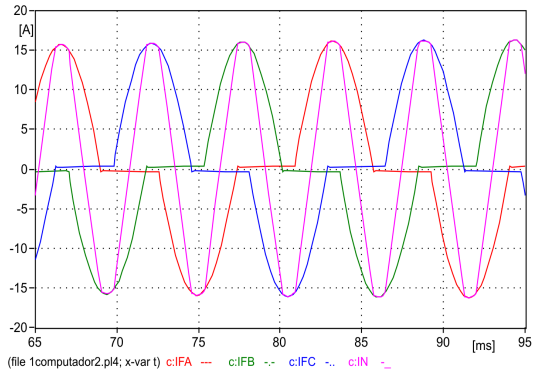


Figura 5.18: Corrientes de fase y neutro

En la figura 5.19 se muestra el espectro armónico de una de las corrientes de fase extraído de la simulación, la tabla 5.2 contiene la información correspondiente a la magnitud de cada componente armónica obtenida de esta figura. Se presenta el análisis de una sola fase debido a que el escenario simulado corresponde a un sistema trifásico balanceado en el que las características de corriente de cada fase son iguales entre si, manteniendo su desfase de 120 grados entre cada una de ellas.

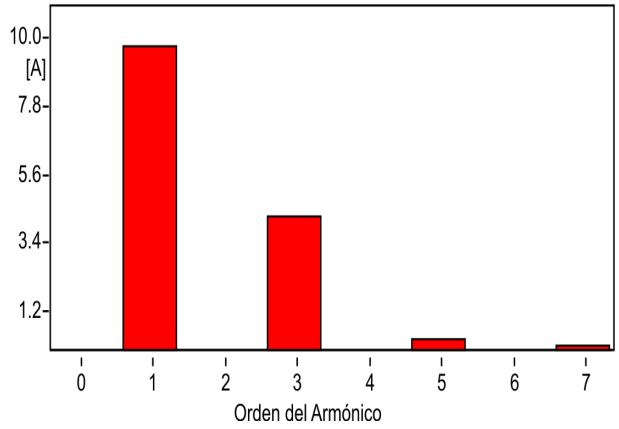


Figura 5.19: Espectro armónico de corriente con 5 computadores por fase en ATP

Orden del Armónico	Magnitud [A]
Fundamental	8.783
Tercer Armónico	4.197
Quinto Armónico	0.5042
Séptimo Armónico	0.1195

Tabla 5.2: Magnitud de las componentes armónicas de un sistema con 5 computadores por fase

El espectro armónico para la corriente del neutro obtenido de la simulación así como la información de los valores de corriente por componente armónica se presentan en la figura 5.20 y la tabla 5.3. En esta figura se puede ver que la componente armónica más significativa circulante por el conductor neutro es la tercera, esta corriente es producto del aporte de las componentes del tercer armónico circulante por cada una de las fases [8].

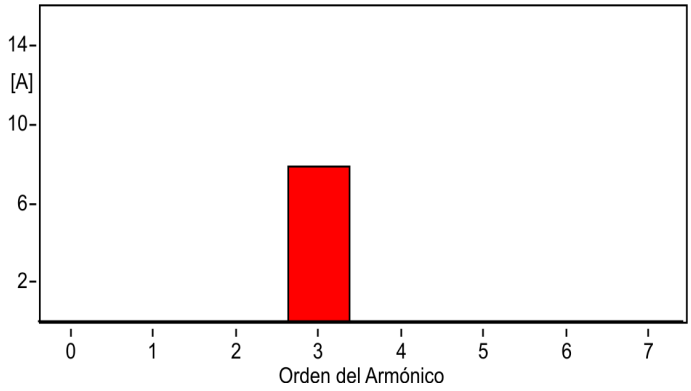


Figura 5.20: Espectro armónico de neutro en sistema con 5 computadores por fase

Orden del Armónico	Magnitud [A]
Fundamental	0
Tercer Armónico	7.857
Quinto Armónico	0
Séptimo Armónico	0

Tabla 5.3: Magnitud del espectro armónico de la corriente por el neutro

Con base en los resultados mostrados en la tabla 5.2 se puede concluir que la magnitud de cada componente armónica en corriente obtenida de la simulación de un sistema con cinco computadores por fase, es de 4.93 veces la corriente obtenida de la simulación

de un solo equipo, es decir un valor aproximado a 5 veces la corriente obtenida de un sistema con un solo equipo por fase cuando estos están encendidos simultaneamente. En la tabla 5.4 se aprecia con mayor claridad la comparación entre los valores de las componentes armónicas para un solo equipo así como para 5 de ellos.

Orden del Armónico	Magnitud de corriente 1 equipo por fase [A]	Magnitud de corriente 5 equipos por fase [A]
1	1.778	8.783
3	0.871	4.197
5	0.1148	0.5042
7	0.01688	0.1195

Tabla 5.4: Comparación de componentes armónicas con sistemas de 1 y 5 equipos

Con el fín de verificar si los resultados obtenidos en la simulación anterior se mantienen aún en otras situaciones, se simulará un sistema trifásico en donde dos de sus fases tienen el computador a 4 metros de la fuente de alimentación lo que corresponde a una R= 0.02084 Ω y una L= 0.003408 mH y la otra fase tiene el computador ubicado a 20 veces la distancia de los otros dos equipos con una R= 0.4168 Ω y una L= 0.06816 Ω como se muestra en la figura 5.21.

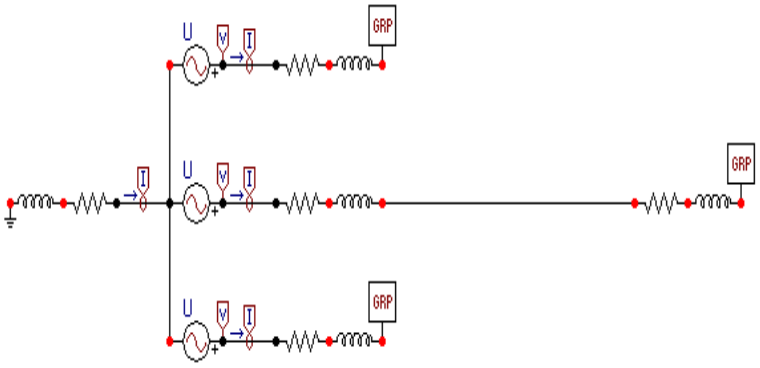


Figura 5.21: Sistema con 1 computador en el extremo de una línea de fase

Las corrientes de fase obtenidas en esta simulación se presentan en la figura 5.22. En esta figura la forma general de las señales de corriente se mantienen similares al escenario anteriormente simulado aunque con una pequeña diferencia en el valor pico de la corriente de la fase B con respecto a las otras dos, esto debido a que la impedancia de la línea es mayor en esta fase que en las otras.

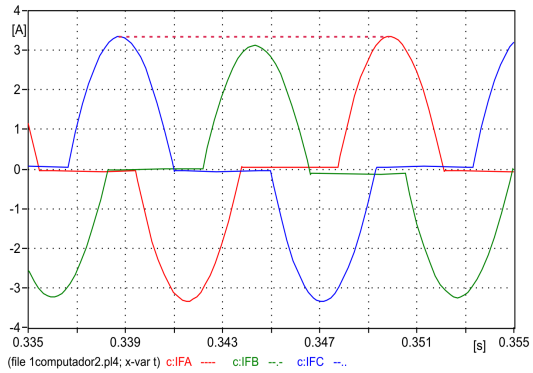


Figura 5.22: Corrientes de fase y neutro de un sistema con 1 computador en el extremo de la línea de fase

En la tabla 5.5 se presenta la comparación entre las magnitudes de las componentes armónicas de la fase B que tiene el equipo situado en el extremo del conductor y la fase A que tiene ubicado el equipo cerca de la fuente de alimentación. En ella se puede ver que las magnitudes de las componentes armónicas para la fase B son menores que para la fase A debido a que la impedancia propia de la línea es mayor en la fase B por estar el equipo alejado una mayor distancia de la fuente de alimentación. Asimismo se puede concluir que el calibre del conductor de cada fase afecta la amplitud de las componentes armónicas de la corriente. Asi un calibre mayor o menor al #12 usado en la fase B conduce a que la magnitud de las componentes armónicas en corriente para esta fase se aproximen o se alejen del valor registrado en la fase A debido al efecto de una mayor o menor impedancia de línea.

Orden del Armónico	Magnitud de corriente 1 equipo por fase A [A]	Magnitud de corriente 1 equipo por fase B [A]
1	1.778	1.76
3	0.871	0.84
5	0.1148	0.10
7	0.01688	0.016

Tabla 5.5: Comparación entre las componentes armónicas de la fase A y B

Debido a que en el CENTIC la alimentación de las salas de computadores se realiza por tableros individuales que solo poseen este tipo de cargas, se simulará un tablero completo de la instalación con el objetivo de realizar una comparación del sistema simulado con un sistema real. El tablero TR3-1 está ubicado en el tercer piso de la instalación y

alimenta a 18 equipos por cada fase, el escenario a simular se puede apreciar en la figura 5.23.

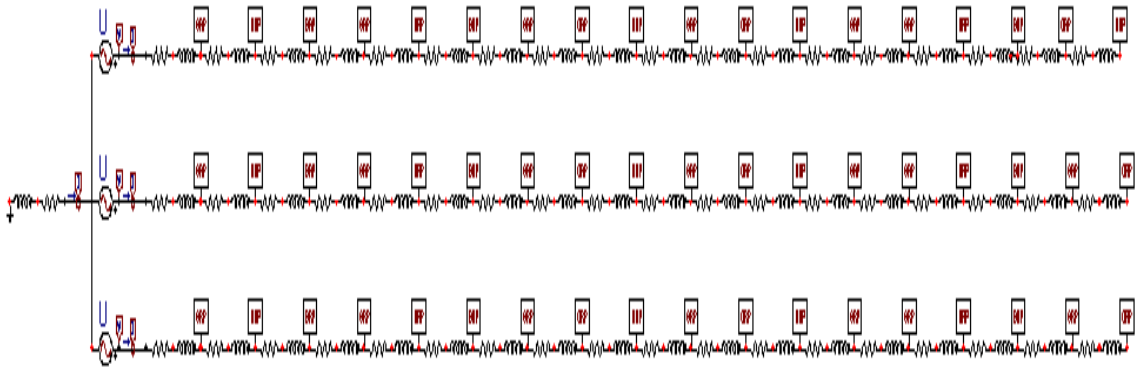
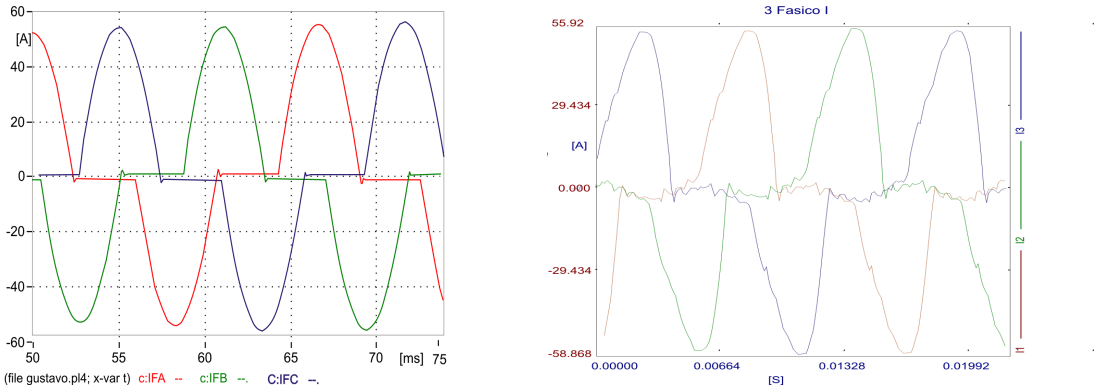


Figura 5.23: Simulación de una sala completa con 18 computadores, tablero TR3-1

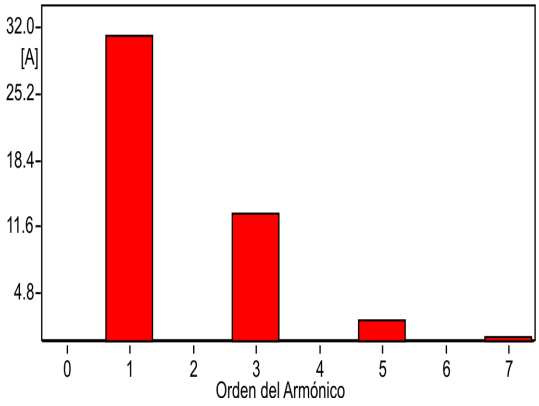
Las corrientes de fase obtenidas de la simulación al igual que las obtenidas de la medición realizada al tablero se presentan en la figura 5.24. En ella se observa que las señales de corriente obtenidas de la simulación del sistema presentan características muy similares a las obtenidas en la medición del tablero.



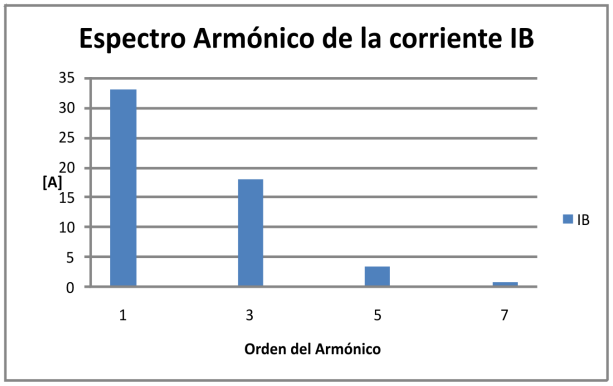
(a) Corrientes de fase según el modelo en ATP (b) Corriente de fase medida

Figura 5.24: Corrientes de fase del tablero TR3-1

Los espectros armónicos de la corriente de fase B simulada y medida se muestran en la figura 5.25a y 5.25b respectivamente. Así mismo los datos de las magnitudes de estas corrientes se pueden observar en la tabla 5.6.



(a) Espectro armónico simulado en ATP de la fase B



(b) Espectro armónico medido de la fase B

Figura 5.25: Comparación de los espectros armónicos de la fase B para un sistema medido y simulado

Se analiza una sola fase debido a que al igual que en el primer escenario analizado el sistema es trifásico y se encuentra balanceado, las diferencias entre los valores de las componentes armónicas de los dos sistemas radican en la actividad que cada usuario estuviera realizando en su equipo lo que implica que el consumo de un computador con respecto a otro puede ser mayor o menor dependiendo de la tarea que cada uno este realizando.

Orden del Armónico	Magnitud de corriente 18 equipos por fase en ATP [A]	Magnitud de corriente 18 equipos por fase medida [A]
1	31.36	33.10
3	13.2	17.90
5	2.2	3.230
7	0.43	0.560

Tabla 5.6: Magnitud de los armónicos en corriente de una fase para un sistema medido y simulado

Con base en los resultados de la simulación en ATP y las mediciones tomadas se puede concluir que existe una leve disminución de las magnitudes de las corrientes armónicas a medida que se van agrupando gran cantidad de cargas, esto debido al efecto que tiene la impedancia de la línea de alimentación con respecto a la ubicación de las cargas. Así mismo se confirmó la validez del modelo construido en ATP ya que los resultados de los distintos escenarios simulados presentan valores muy similares a los resultados obtenidos en cada una de las mediciones registradas a los diferentes tableros de la instalación.

5.3. Cálculo del factor K, pérdidas en el transfomador y conductores

Con el fin de determinar de una forma tangible el efecto causado por los armónicos producidos por las cargas no lineales de la instalación (equipos de computo) se analizarán las pérdidas en el transformador A, de acuerdo con la norma IEEE C57.110-1998 [12], teniendo en cuenta el factor K como un indicador que relaciona las perdidas por corrientes de Eddy por armónicos, igualmente se verificará la corriente máxima y por ende la potencia aparente demandada por la carga en el transformador. A continuación se muestra la relación de las diferentes pérdidas ocurridas en el transformador:

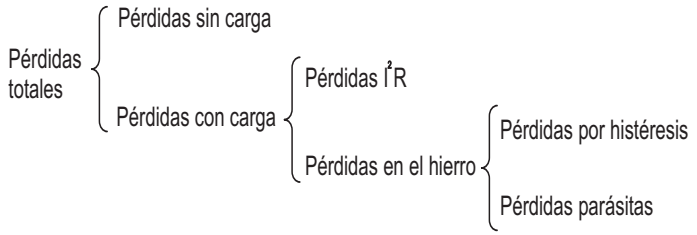


Figura 5.26: Diagrama de pérdidas en el transformador

Las pérdidas totales en el transformador pueden ser calculadas como:

$$P_{LL} = P + P_{EC} \tag{5.1}$$

Donde:

P_{LL} son las pérdidas totales en el transformador.

P se define como las pérdidas por cobre I^2R.

P_{EC} corresponde a las pérdidas parásitas causadas por corrientes de Eddy.

Los transformadores se diseñan para operar con cargas lineales, si estas condiciones se modifican por ambientes de contaminación armónica, las pérdidas serán mayores debido a:

- Aumento de pérdidas en los devanados por el efecto piel.
- Incremento en las pérdidas por corrientes de Eddy, estas varian proporcionalmente al cuadrado de la corriente y la frecuencia.

Bajo condiciones senoidales puras la ecuación 5.1 se convierte en:

$$P_{LL} = RI_1^2 + KI_1^2 \tag{5.2}$$

Donde K es un factor que depende de las pérdidas de Eddy.

Tomando como base las pérdidas en el cobre RI_1^2 en condiciones senoidales puras, la ecuación 5.2 se puede escribir como:

$$P_{LL} = 1 + \frac{K}{R} = 1 + P_{EC-R}(pu) \tag{5.3}$$

Donde P_{EC-R} son las pérdidas de Eddy en pu en condiciones senoidales puras.

En codiciones no senoidales según el orden del armónico h, las pérdidas se convierten en:

$$P_{LL} = R\sum I_h^2 + K\sum I_h^2 h^2 \tag{5.4}$$

La ecuación 5.5 expresa las perdidas totales en pu:

$$P_{LL}(pu) = \sum I_h^2(pu) + P_{EC-R} \sum I_h^2 h^2 \tag{5.5}$$

El factor K dado por las corrientes de Eddy se define como [12]:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} I_h^2} \tag{5.6}$$

La ecuación 5.6 puede ser reescrita en terminos de la corriente fundamental como sigue:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{max}} \left[\frac{I_h}{I_1}\right]^2} \tag{5.7}$$

Con base en los datos obtenidos durante el periodo de medición del transfrormador A se tomaron como referencia los valores de corriente máximos promedios registrados por el analizador de redes, con lo cual se realizó el siguiente cálculo:

Armónico	Frecuencia	I_h
1	60	450
3	180	112
5	300	35
7	420	24
9	540	6

Tabla 5.7: Componentes armónicas del transformador A tomadas para el cálculo

Tabulando los datos como sigue:

h	$\frac{I_h}{I1}$	$\left[\frac{I_h}{I1}\right]^2$	h^2	$\left[\frac{I_h}{I1}\right]^2 h^2$
1	1	1	1	1
3	0,2489	0,0619	9	0,5575
5	0,0778	0,0060	25	0,1512
7	0,0533	0,0028	49	0,1394
9	0,0133	0,0002	81	0,0144
$\sum$		1,0710		1,8625

Tabla 5.8: Datos para el factor K

Calculando el factor K para el transformador A se tiene:

$$K = \frac{1,8625}{1,0710} = 1,7390$$

Dada la cantidad de armónicos generados por las cargas no lineales en el transformador A, es necesario determinar el efecto que estos producen en relación al aumento de las pérdidas. En la norma IEEE C57.110-1998 [12] se considera un método que consiste en determinar la corriente RMS máxima demandada por la carga, equivalente a la corriente que a condiciones senoidales puras causan las pérdidas máximas de diseño del transformador. Este valor de corriente equivalente se calcula como sigue:

$$I_{max(p.u)} = \sqrt{\frac{P_{LL-R(p.u)}}{1 + KP_{EC-R(p.u)}}} \tag{5.8}$$

$$I_{max(p.u)} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R(p.u)}}{1 + KP_{EC-R(p.u)}}} \tag{5.9}$$

Donde $P_{EC-R(p.u)}$ = Pérdidas de Eddy en p.u en condiciones nominales senoidales puras. Estos valores se obtienen directamente del fabricante del transformador de acuerdo a las distintas pruebas realizadas al equipo, en este caso son del 15 %.

$P_{LL-R(p.u)}$=Pérdidas totales en p.u en condiciones nominales senoidales puras.

$$I_{max(p.u)} = \sqrt{\frac{1,15}{1 + 1,739 * 0,15}}$$

$$I_{max(p.u)} = 95\,\%$$

La disminución de la potencia efectiva es de un $5\,\%$ y la demanda actual de $S = 177,45kVA$, por lo que los kVA requeridos para soportar la carga actual del transformador debido a la presencia de armónicos en el sistema son:

$$S = \frac{177,45}{0,95}$$

$$S = 186,78\,kVA$$

Para el cálculo de las pérdidas bajo condiciones no-senoidales se tiene de la ecuación 5.5:

$$P_{LL}\,(p.u) = I_{p.u}^2\,(1 + KP_{EC-R})\;p.u \tag{5.10}$$

$$P_{LL}\,(p.u) = 1,0710\,(1 + 1{,}7390 * 0{,}15)$$

$$P_{LL} = 1,35\,p.u$$

Las pérdidas de potencia base son obtenidas con base a la corriente fundamental o corriente en condiciones senoidales puras.

$$P_{base} = I^2 * R \tag{5.11}$$

donde $R = 0{,}025\,\Omega$ e $I_1 = 450A$

$$P_{base} = 450^2 * 0{,}025 = 5{,}06$$

Calculando las pérdidas por fase en el transformador:

$$P_{LL=}5,06 * 1,35 = 6,836\,kW$$

Las pérdidas trifásicas son:

$$P_{LL} = 6{,}836 * 3 = 20,5\,kW$$

En total las pérdidas en el transformador debido a las corrientes que fluyen por el devanado y a corrientes de Eddy suman 20,5 kW de las cuales cerca del 25 % corresponde a las pérdidas por tercer armónico es decir 5,1 kW.

De acuerdo a lo anterior las pérdidas del transformador se incrementan debido a las componentes armónicas presentes en el sistema, en este caso el armónico más representativo es el tercero con un porcentaje cercano al 25 % de la corriente fundamental, por lo que asociado a esta componente se tendrian unas pérdidas de potencia cercanas a 5.1 kW. Asi mismo este componente armónico causa pérdidas adicionales en el conductor neutro debido a que por este circulan la suma de las corrientes armónicas de orden tres provenientes de cada una de las fases.

A continuación se muestra un cálculo apróximado de las pérdidas en el conductor neutro desde el transformador hasta el tablero general:

El conductor neutro consta de cuatro cables calibre #500 MCM, tomando una resistencia según el RETIE de 0,0695 Ω/km para un conductor de 500 MCM, se tomara una distancia de 25 m, con una corriente RMS de 310 A. Asi las pérdidas se calculan con la siguiente ecuación:

$$P = RI^2 \tag{5.12}$$

$$P_1 = 4 * (0,0695 * 10^{-3})(\frac{310}{4})^2 * 25 = 41,74\,W$$

La magnitud de las pérdidas en el conductor neutro no son significativas debido a que el calibre del neutro ha sido seleccionado contemplando una corriente del mismo valor de la corriente nominal de las fases, por lo que la resistencia para estos conductores es mínima.

Para evaluar las pérdidas en el conductor neutro desde el tablero general hasta los subtableros de distribución se promedia la totalidad de los tableros de la instalación de la siguiente forma:

En su mayoría el conductor neutro de los tableros es Cu #4 AWG, este posee según el RETIE una resistencia de $0,817\,\Omega/km$. Para el cálculo de las pérdidas se considera una longitud en promedio de 30 m, con respecto a la corriente de tercer armónico en el neutro según las mediciones realizadas en los tableros se asumira un valor de corriente de 20 A, con ello las pérdidas son:

$$P_2 = (0,817 * 10^{-3})(20)^2(30) = 9,8\,W$$

Para un total de 21 tableros de distribución se tienen unas pérdidas totales:

$$P_3 = 9,8 * 21 = 205,8\,W$$

Las pérdidas totales del transformador A, debidas al conductor neutro son:

$$P_T = P_1 + P_3 = 41,74 + 205,8 = 247,54\,W$$

Como se observa la magnitud de las pérdidas totales por la tercera componente tanto en el neutro como en el transformador no constituyen un valor significativamente grande por lo que no se hace necesaria la implementación inmediata de un tipo de filtro de tercer armónico en el sistema. Sin embargo en el apéndice C de este libro se presenta un completo análisis de dos tipos de filtros que podrian implementarse a corto plazo en el CENTIC si asi se desea.

Capítulo 6

Recomendaciones

De acuerdo al diagnóstico y análisis realizado en los capítulos anteriores de este documento, se hace evidente la necesidad de implementar diferentes tipos de soluciones a cada uno de los problemas relacionados con una mala calidad de la energía eléctrica encontrados en la instalación.

Basados en esta información que ha sido obtenida a lo largo de la ejecución del estudio, se plantean una serie de soluciones que no solo contemplan la posibilidad de eliminar los problemas que se presentan actualmente en el edificio, sino que además pueden llegar a prevenir futuros inconvenientes que se pueden dar a causa de una eventual variabilidad de la carga.

6.1. Sobretensiones en cargas sensibles de la instalación

Basados en los registros obtenidos en la etapa de medición de los diferentes tableros de la instalación, así como las posteriores medidas realizadas a cada uno de los dos transformadores, se observó que el transformador A presenta un nivel de tensión mayor al recomendado por las normas vigentes. Debido a que este transformador alimenta a la mayoría de las cargas sensibles de la instalación entre las que se encuentran equipos de cómputo, servidores y cámaras de video se plantean las siguientes soluciones.

- La primera medida a implementar tiene que ver con realizar un cambio con respecto a las cargas que alimenta cada transformador, es decir que el transformador

A pase a alimentar las cargas que tienen que ver con el sistema de aire acondicionado de la instalación y el transformador B que actualmente alimenta estas cargas suministre la potencia de los tableros correspondientes a las cargas sensibles como computadores, servidores y circuito cerrado de televisión. Esto debido a que las cargas de tipo electromecánico poseen la característica de soportar niveles de tensión con un margen ligeramente mayor a su tensión nominal, sin que ello interfiera en su correcto funcionamiento (a la fecha de redacción del documemnto ya se ha implementado la recomendación).

- Se recomienda adquirir más y nuevas UPS de tipo on line suficientes para cubrir la totalidad de los tableros que aún no cuentan con ellas, de esta forma se garantiza un completo respaldo de energía eléctrica a todos los equipos, al mismo tiempo que se provee a estas cargas de un nivel de tensión adecuado. Es importante revisar muy bien las características de estas UPS antes de adquirirlas, ya que en los análisis realizados en el capítulo 4 se pudo ver que estas UPS a pesar de ser de tipo on line presentan fuertes transitorios de tensión y a veces presentan apagado en sus sistemas cuando la energía de la red se corta, se recomienda tener en cuenta los criterios de selección de UPS recomendados en [22]

- El encendido de grandes cargas o varias cargas pequeñas al mismo tiempo puede ocasionar transitorios de tensión dentro de la instalación, por esta razón se sugiere que los equipos de cómputo sean encendidos gradualmente en pequeñas cantidades y no por varias salas como se viene haciendo actualmente.

- Es importante realizar un estudio de coordinación de protecciones en los que se incluyan los DPS[1] que protegen algunas de las cargas de la instalación y que están ubicados en los cuartos de las UPS.

6.2. Capacidad de carga de los transformadores

Como se pudo observar en el capítulo cinco después de calculado el factor K de los transformadores, la capacidad utilizada actualmente de cada uno de ellos es del 38 % y 35 % de su capacidad nominal. Asimismo en el capítulo cinco se observó que las pérdidas en el devanado y en el entrehierro de un transformador son proporcionales a la

[1]Dispositivos de Protección contra Sobretensiones

capacidad del mismo, por lo que es necesario reducir este consumo de energía innecesario a causa del sobredimensionamiento. Se sugiere estar a disposición ante cualquier posibilidad de cambio de los transformadores por dos de 250 kVA, aprovechando alguna necesidad existente en otro de los edificios de la Universidad u obteniendo algún beneficio económico extra etc.

6.3. Banco de condensadores

Con base en los registros obtenidos en las mediciones realizadas a cada uno de los transformadores se determinó que el transformador A presenta un factor de potencia aritmético superior a 0.9 por lo que no necesitaria algún tipo de compensación de potencia reactiva, sin embargo el factor de potencia efectivo calculado con base a la norma IEEE 1459 muestra un factor de potencia en el transformador A de 0.86 la mayor parte del tiempo, lo que indica que llegado el caso de que esta norma entre en vigencia el transformador A deberia ser compensado ya sea por un banco de condensadores o por algun filtro en paralelo que brindara al sistema la potencia reactiva requerida y al mismo tiempo srviera como filtro de armónicos. Por otro lado en el transformador B se observan valores fijos del factor de potencia aritmético menor a 0.83 por lo que se recomienda reprogramar el relé de control automático para que monitorice una lectura verdadera y asi envie la señal a los contactores que permiten la entrada de los pasos de compensación. En promedio la potencia reactiva instantanea en exceso consumida por el edificio es de 10 kVAR, (ver anexo A) que multiplicada por las 14 horas diarias que está el sistema de aire acondicionado en uso, 26 dias al mes con llevan a un pago mensual de $ 1.019.200.

$$Precio\, kVAR/h = \$280$$

$$kVAR/h/mes = 10 * 14 * 26 * 280$$

$$kVAR/h = \$1{,}019{,}200$$

También se recomienda brindar a cada condensador del banco una protección individual de acuerdo a la corriente que cada uno de estos elementos maneje, es decir retirar los breakers que protegen en conjunto el paso de compensación y no protege individualmente a cada condensador ante una eventual sobre corriente.

Se debe adquirir nuevamente un condensador de 5 kVAR para reemplazar el que se averió en días pasados.

Se deben revisar periodicamente las conexiones de los condensadores al barraje general con el fin de evitar nuevamente la aparición de temperaturas elevadas y puntos calientes en las conexiones de estos elementos.

6.4. Balance de la demanda eléctrica

Debido al desbalance de carga observado entre las fases, se aprecia en las medidas obtenidas en la etapa de monitorización un valor considerable en la corriente que circula por el neutro, en algunos instantes este valor supera en magnitud a las corrientes de fase del tablero. Por medio de algunas pruebas de encendido y apagado de equipos realizadas en las distintas salas de cómputo de la instalación se identificó el número de equipos pertenecientes a cada fase por sala para asi lograr un correcto balance de carga. A continuación se muestran las tablas en donde se describe la distribución actual de algunos de los tableros de la instalación y a su vez se recomienda una distribución ideal para corregir el problema de desbalance, las propuestas para balance de los demás tableros se encuentran en el anexo B.

En las tablas 6.1 y 6.2 se puede observar la distribución actual de cargas del tablero TR1-2 así como la distribución sugerida para mitigar problemas de desbalances.

TABLERO TR1-2					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
1	4	3	8	5	5
2	8	4	9	6	8
7	8	9	5	11	8
8	8	10	7	12	8
13	5	15	8	17	8
14	3	16	8	18	7
19	2				
TOTAL	38	TOTAL	45	TOTAL	44

Tabla 6.1: Distribución actual de los circuitos del tablero TR1-2

TABLERO TR1-2					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
2	8	1	4	5	5
7	8	3	8	6	8
8	8	4	9	10	7
11	8	9	5	12	8
13	5	15	8	17	8
14	3	16	8	18	7
19	2				
TOTAL	42	TOTAL	42	TOTAL	43

Tabla 6.2: Distribución ideal de los circuitos del tablero TR1-2

La distribución actual e ideal de los circuitos del tablero TR2-2 se muestra en las siguientes tablas.

TABLERO TR2-2					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
1	8	3	8	5	5
2	8	4	5	6	8
7	8	9	8	11	8
8	8	10	8	12	3
13	3	15	8	17	2
14	8	16	8	18	8
19	8	21	5	23	8
20	8	22	8	24	9
25	8	27	8	29	3
26	8	28	5		
TOTAL	75	TOTAL	71	TOTAL	54

Tabla 6.3: Distribución actual de los circuitos en el tablero TR2-2

TABLERO TR2-2					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
1	8	3	8	5	5
2	8	4	5	6	8
7	8	9	8	11	8
8	8	10	8	12	3
13	3	15	8	17	2
14	8	16	8	18	8
19	8	21	5	23	8
20	8	22	8	24	9
25	8	27	8	26	8
				28	5
				29	3
TOTAL	67	TOTAL	66	TOTAL	67

Tabla 6.4: Distribución ideal de los circuitos en el tablero TR2-2

Al igual que en los tableros anteriores la distribución actual y la distribución sugerida para balancear el tablero TR3-1 se presenta en las siguientes tablas.

TABLERO TR3-1					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
1	5	3	6	5	5
2	4	4	6	6	5
7	4	9	6	11	2
8	6	10	5		
TOTAL	19	TOTAL	23	TOTAL	12

Tabla 6.5: Distribución actual de los circuitos en el tablero TR3-1

TABLERO TR3-1					
FASE A		FASE B		FASE C	
CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS	CIRCUITO	# EQUIPOS
1	5	3	6	5	5
2	4	4	6	6	5
7	4	9	6	8	6
10	5			11	2
TOTAL	18	TOTAL	18	TOTAL	18

Tabla 6.6: Distribución ideal de los circuitos en el tablero TR3-1

6.5. Sistema de puesta a tierra

Basados en la inspección visual realizada al sistema de puesta a tierra de la instalación y a los registros obtenidos de las mediciones se realizan las siguientes recomendaciones:

- Eliminar la conexión existente entre el conductor neutro y el barraje de puesta a tierra en cada uno de los tableros de iluminación ubicados en todos los pisos (a la fecha de redacción de este libro ya se realizó la recomendación).
- Como se pudo observar en el capítulo 3 existen conexiones incorrectas entre la malla a tierra y los gabinetes de los dos tableros generales, así como con el transformador A. Se recomienda que las conexiones de cada uno de estos elementos se haga directamente y de forma independiente con el barraje principal proveniente de la malla a tierra de la subestación, con el fin de evitar que cualquier desconexión de alguno de los conductores que une eléctricamente a los gabinetes y el

transformador produzca que parte de la subestación y por ende las cargas que estén conectadas a ellas queden sin sistema de puesta a tierra.

- Se recomienda reajustar todos los bornes y tornillos que unen los conductores que van de la malla de tierra a cada uno de los elementos de la subestación.
- Se debe realizar la conexión del neutro del transformador A con la malla a tierra directamente y sin utilizar la cuba del transformador como conductor.
- Como se observó en el capítulo 3 la resistencia de la malla de puesta a tierra de la instalación posee un valor mayor a 2 Ω, es recomendable disminuir este valor por debajo de 1 Ω ya sea mediante la conexión de otra tierra en paralelo con la existente o relizando algún tipo de mejora en la resistividad del terreno.

6.6. Capacidad térmica de conductores y breakers

En el capítulo 4 se observó que existen varios breakers de protección de circuitos que presentan sobrecalentamiento en algunas de sus partes al igual que en los conductores que alimentan algunas de las cargas de la instalación.

Breakers como el TR2-2, TR2-1, TMS y TRS presentan calentamiento en los bornes de conexion de los conductores de salida por lo que se deben revisar y apretar estas conexiones y asi evitar la aparición de puntos calientes en estos breakers.

El tablero de iluminación del primer piso (TA-1) cuyos conductores son calibre #6 se deben cambiar a calibre #4 ya que presentan temperaturas significativamente altas a lo largo del conductor.

Igualmente los tableros EO-1 y EO-2 presentan temperaturas cercanas a los 52 °C en sus conductores a causa del gran valor de corriente que circula por ellos y a que su operación es continua durante el dia. Estos conductores que actualmente presentan doble circuito en calibre # 2/0 deberian cambiarse por 4/0 y revisar las conexiones de salida con el fin de evitar la aparición de puntos calientes.

En el gabinete del banco de condensadores se registraron temperaturas muy altas de casi 60°C en uno de los controladores ubicados en la parte superior del banco, por lo que se recomienda revisar periodicamente este elemento y si es posible reemplazarlo por uno de mayor resistencia al calor. Asi mismo los conductores del breaker de protección

del paso fijo del banco presentan temperaturas cercanas a los 50 °C, se recomienda reemplazar estos conductores por unos de mayor capacidad.

6.7. Recomendaciones generales a cerca de la visita URE

Basados en los resultados de la visita URE y a inspecciones a la instalación anteriormente realizadas se proponen las siguientes recomendaciones.

- Instalar el respectivo aislamiento térmico faltante (rubatex) a cada una de las tuberias por donde circula el refrigerante de las distintas unidades de aire acondicionado (condensadoras y chiller) ubicadas en la terraza del edificio.
- Se deben eliminar los empalmes defectuosos ubicados en las dos cajas de inspección de la terraza al igual que los encontrados en el cuarto de las UPS del segundo piso.
- Se recomienda revisar los empaques de la tuberia de agua que van desde las bombas hasta los chiller, con el fin de evitar los escapes de líquido.
- Se debe reemplazar la tuberia plástica que se encuentra al descubierto por tuberia metálica galvanizada según lo estipulado en la norma NTC 2050.
- Es necesario reforzar las conexiones de los pararrayos al conductor que va desde la terraza hasta el anillo exterior de la malla a tierra con el fin de evitar accidentes o daño de equipos ante cualquier tipo de descarga atmosférica.
- Es necesario realizar una conexión en baja tensión acorde a lo señalado en la norma NTC 2050 capítulo 3 en el cuarto de las UPS del segundo piso con el fin de eliminar las deficientes conexiones entre dos de los tableros de baja tensión que allí se encuentran.
- En los cuartos de los Racks se recomienda programar la temperatura a 22 °C, ya que esto mantiene el cuarto refrigerado y permite que la unidad condensadora ubicada en la terraza no se encuentre en funcionamiento continuo durante las 24 horas del día.

- Se deben apagar las luces de las oficinas y salas de cómputo que no tengan ocupación, asi mismo los computadores de las oficinas deben programarse en modo ahorro de energía o hibernación cuando no estén siendo utilizados.
- Se recomienda realizar mantenimiento periódico a las unidades condensadoras de los aires con el fin de eliminar las obstrucciones y por ende las filtraciones de agua presentadas en la manguera de succión de las mismas.
- Se recomienda programar los equipos utilizados para realizar las reservas en modo ahorro de energía o hibernación ya que durante largos periodos de tiempo estos equipos estan encendidos sin ninguna utilización 14 horas al día.
- Se debe crear conciencia entre los alumnos, profesores y personal que labora en la planta de la necesidad de preservar el medio ambiente y realizar charlas constructivas y motivacionales sobre el tema a fin de establecer políticas de cambio de cara hacia el ahorro de energía.
- Es necesario actualizar la información de los planos y documentos entregados por la empresa constructora de la instalación debido a que gran parte de esta información contiene errores en cuanto a ubicación de algunos tableros y breakers, calibres de conductores y en general sobre las distancias y disposición del sistema de puesta a tierra en general.

6.8. Resonancia en la Universidad

De acuerdo al estudio de resonancia realizado en el apéndice D de este libro, se recomienda tener en cuenta los resultados obtenidos ante futuras instalaciones de bancos de condensadores en cualquier edificio de la UIS, ya que la conexion de estos bancos podria ocasionar que el sistema entrara en resonancia en algunas frecuencias armónicas que actualmente se presentan y esto conllevaria a la aparición de significativas sobretensiones y transitorios en toda la red eléctrica de la Universidad.

Capítulo 7

Observaciones y conclusiones

- Se corroboró que para realizar un estudio de calidad de la energía eléctrica a una determinada instalación, se deben seguir una serie de pasos que van desde la entrevista inicial con el usuario, hasta la etapa de planificación del trabajo de campo y posterior análisis de los resultados obtenidos, dichas etapas se convierten en una guía general para la realización de estudios y diagnósticos de calidad de la energía eléctrica aplicados a una instalación.

- Aunque el procedimiento sistemático para realizar un diagnóstico de calidad de energía eléctrica sea el mismo, eso no implica que las soluciones que apliquen a una determinada instalación sean válidas para otras similares, es necesario realizar el respectivo diagnóstico y con base en esto elegir la solución mas adecuada.

- El papel de la información recopilada durante la etapa de inspección y planeación de la instalación son la base para cualquier análisis a realizar ya que de esto depende en gran parte el resultado del estudio.

- Por razones de seguridad del personal asi como del buen desempeño del sistema eléctrico, el correcto diseño, instalación, mantenimiento y monitorización del sistema de puesta a tierra es vital para cumplir dichas razones.

- Las condiciones actuales del sistema de puesta a tierra del CENTIC dejan entrever que algunas de las conexiones del mismo se realizaron en forma improvisada, con conexiones irregulares que reducen la seguridad y confiabilidad del sistema.

- La determinación de los circuitos, conexiones y elementos en los que se deben realizar las diferentes medidas requeridas en un estudio de calidad de energía eléctrica, contribuyen en gran parte a la solución propuesta para mejorar los problemas de calidad de energía de una instalación.
- La selección de los diferentes conductores eléctricos que conforman la red interna del CENTIC de acuerdo a su capacidad amperimétrica y el estado de los mismos, en su mayoria es adecuado para los niveles de corriente que se manejan dentro de la instalación, pero se descubrieron varios puntos calientes en algunos elementos como causa directa de conexiones debiles e inadecuadas.
- Clasificar en orden jerarquico cada uno de los problemas asociados a la calidad de la energía eléctrica encontrados en una instalación, contribuyen considerablemente al alcance de una solución adecuada y economicamente viable para el usuario.
- La construcción de un modelo detallado que represente una carga o una situación dentro de un sistema siempre es una alternativa a considerarse cuando se requieren análisis detallados de situaciones asi como de posibles soluciones antes de implementarsen en un determinado sistema.
- La implementación de un modelo implica conocer el comportamiento del elemento real ante cualquier variación de escenarios en los que este interactue y ante eventuales cambios ya sean de carga o de cualquiera de sus parámetros fundamentales.
- Es necesaria la realimentación de los resultados obtenidos en las mediciones y monitoreos del trabajo de campo para validar la aceptación del modelo.
- Dentro del análisis de las soluciones se estableció que el buen funcionamiento del filtro serie ubicado en las fases o en el neutro es indiferente a la potencia reactiva que se genere al sistema, diferente del filtro paralelo que mantiene relación directa entre la potencia que entrega a la red y la frecuencia a la cual se sintoniza el mismo.
- La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas aumenta a medida que disminuye la vida util de los elementos.
- Es poco probable que se requiera de una única solución para resolver problemas relacionados con una mala calidad de la energía eléctrica por lo que es necesario realizar un cuidadoso diseño de varias soluciones adaptadas a cada problema.

- En general el CENTIC posee unas instalaciones aceptables con algunos problemas de calidad de energía eléctrica a nivel de conexiones del sistema de puesta a tierra, contaminación armónica, desbalances de carga y exceso en el consumo de potencia reactiva.

Anexos

Anexo A

Análisis de las mediciones

A.1. Transformador A

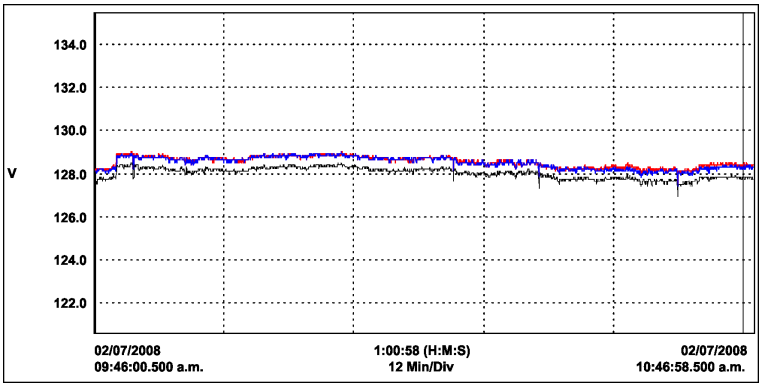


Figura A.1: Perfil de tensiones de fase

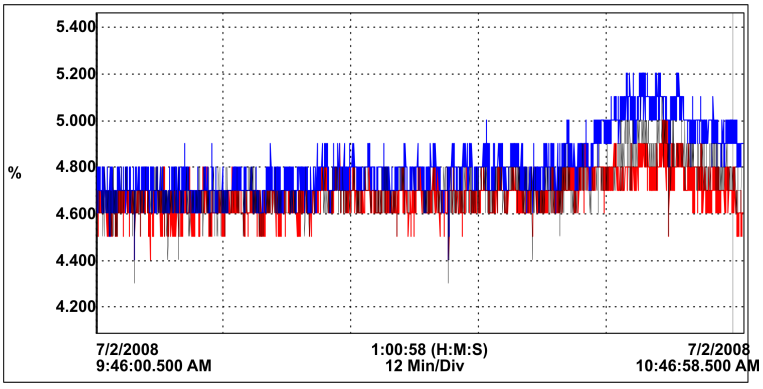


Figura A.2: DAT en Tensión del Transformador A

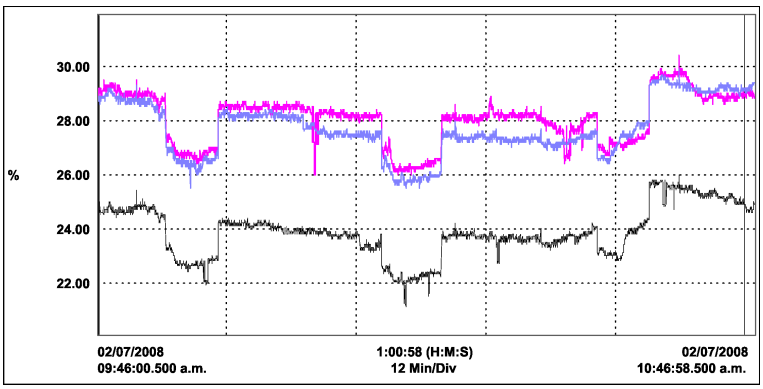


Figura A.3: DAT de corrientes del transformador A

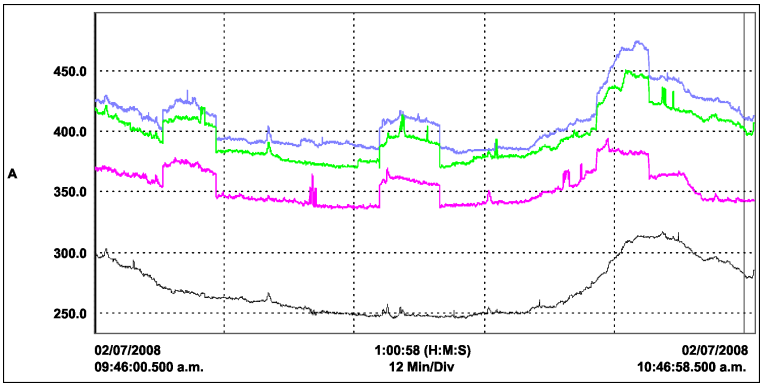


Figura A.4: Perfil de corrientes de fase

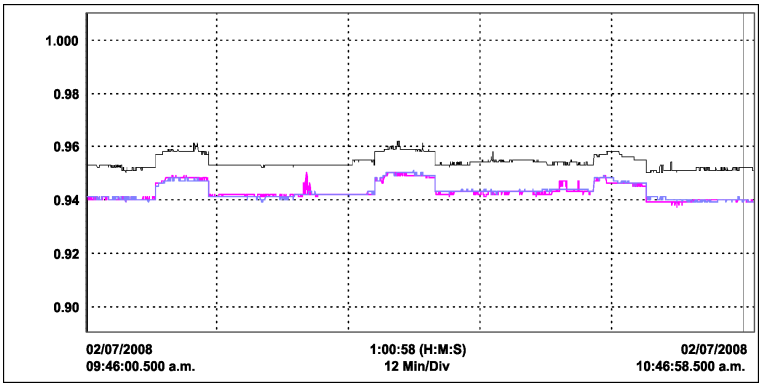


Figura A.5: Factor de potencia por fase del transformador A

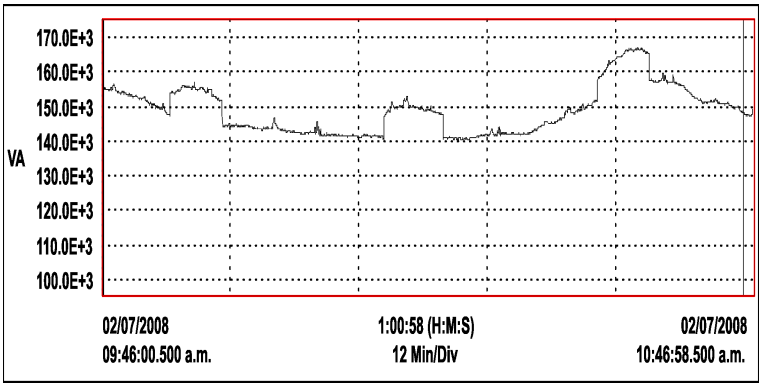


Figura A.6: Potencia total del transformador A

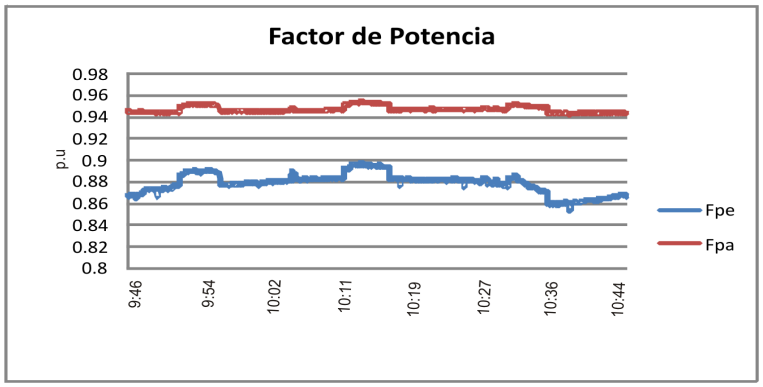


Figura A.7: Factor de potencia aritmético y efectivo del transformador A

A.2. Tablero TR1-2

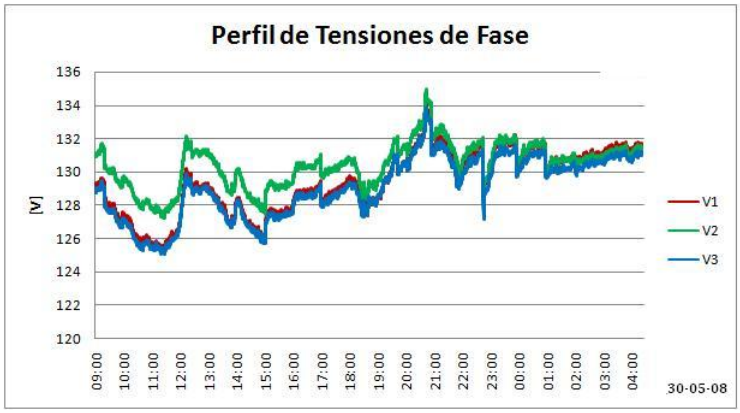


Figura A.8: Perfil de tensiones del tablero TR1-2

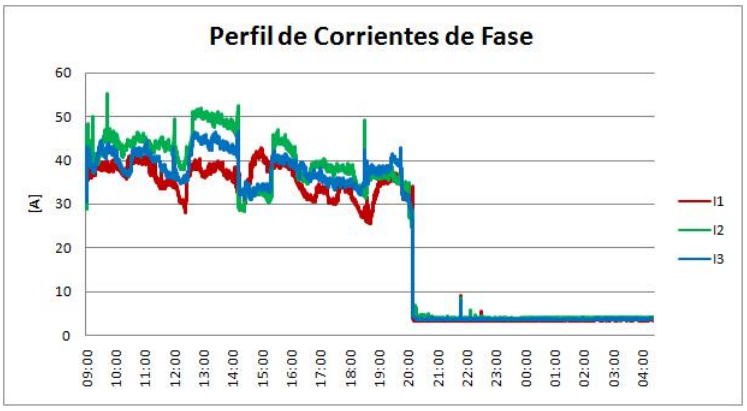


Figura A.9: Perfil de corrientes del tablero TR1-2

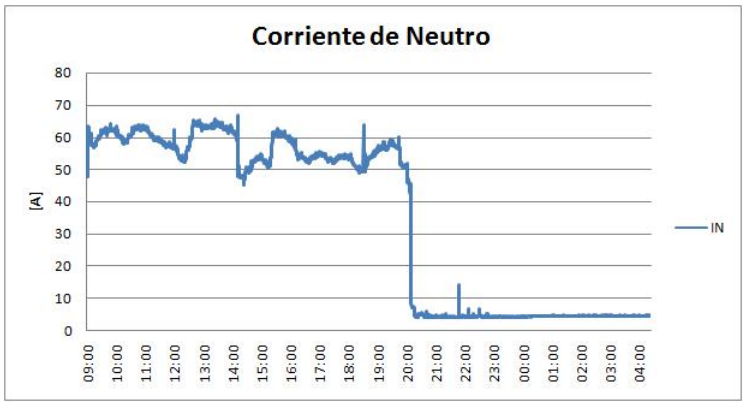


Figura A.10: Corriente de neutro del tablero TR1-2

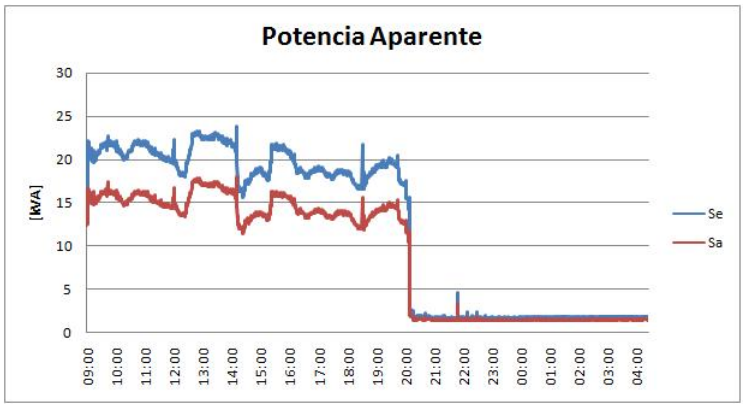


Figura A.11: Potencia aparente del tablero TR1-2

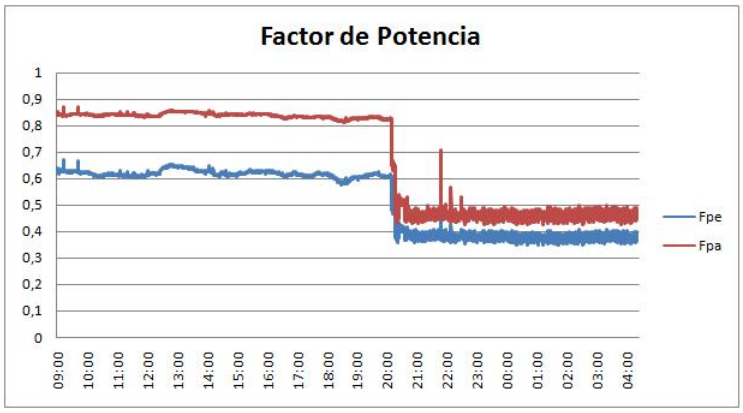


Figura A.12: Factor de potencia del tablero TR1-2

A.3. Tablero TR4-1

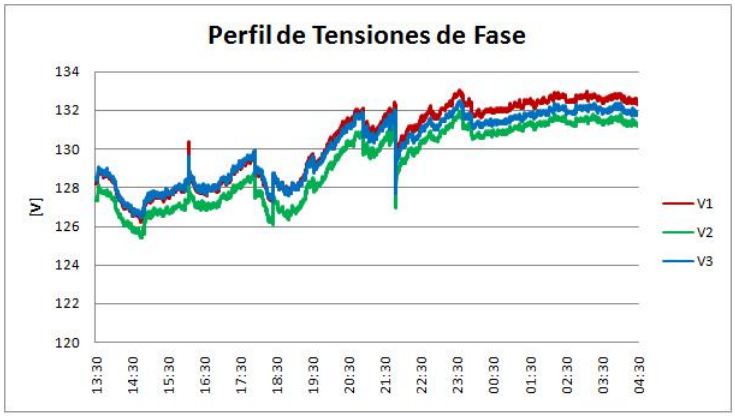


Figura A.13: Perfil de tensiones del tablero TR4-1

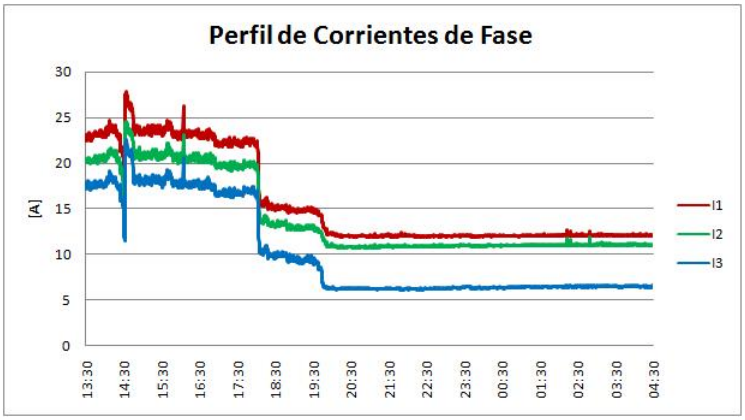


Figura A.14: Perfil de tensiones del tablero TR4-1

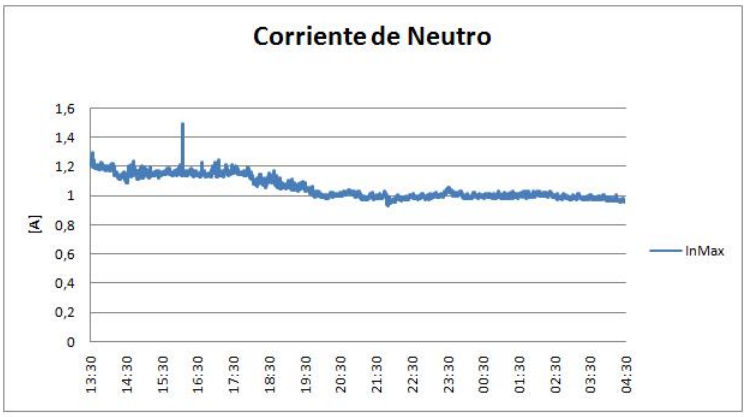


Figura A.15: corriente de neutro del tablero TR4-1

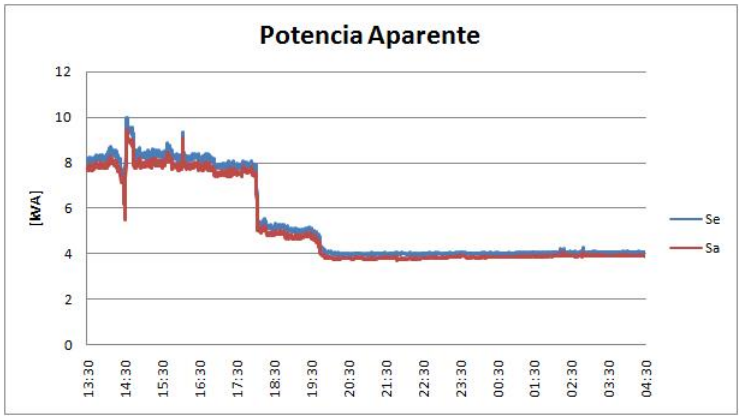


Figura A.16: Potencia aparente del tablero TR4-1

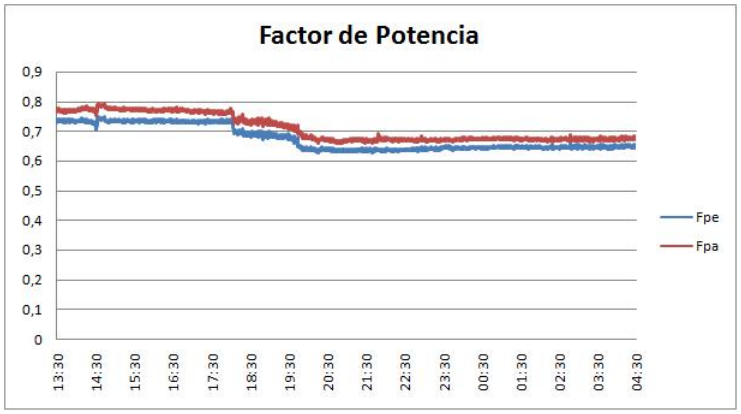


Figura A.17: Factor de potencia del tablero TR4-1

A.4. Tablero TA-1

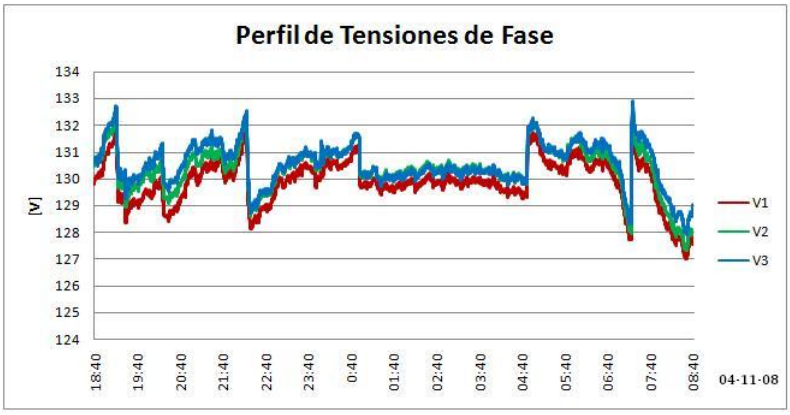


Figura A.18: Perfil de tensiones del tablero TA-1

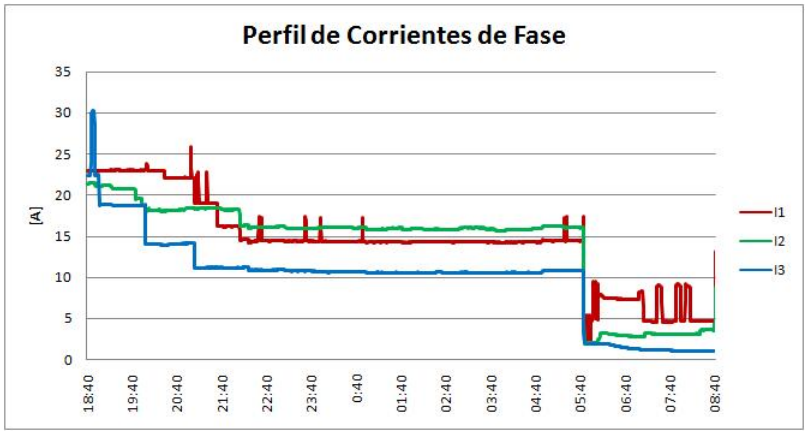


Figura A.19: Perfil de corrientes del tablero TA-1

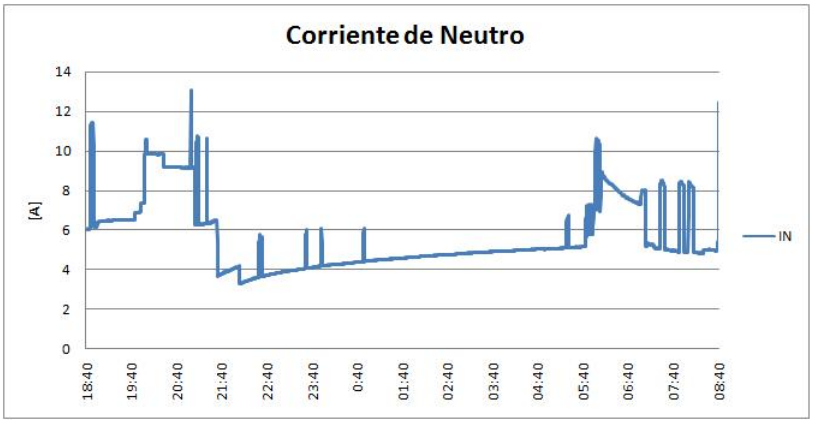


Figura A.20: Corriente de neutro del tablero TA-1

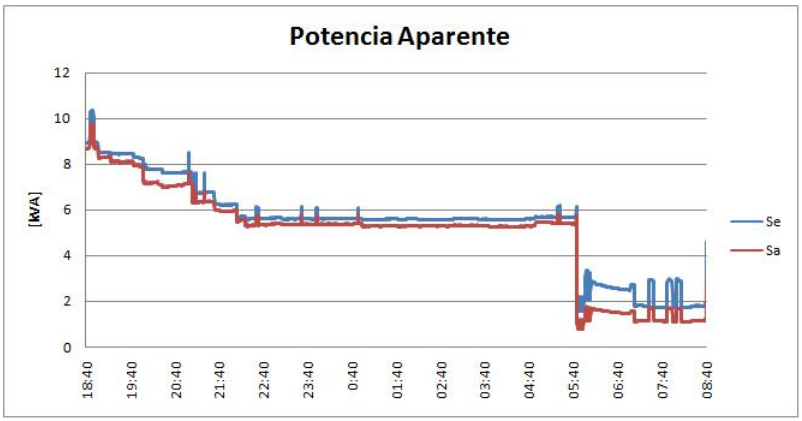


Figura A.21: Potencia aparente del tablero TA-1

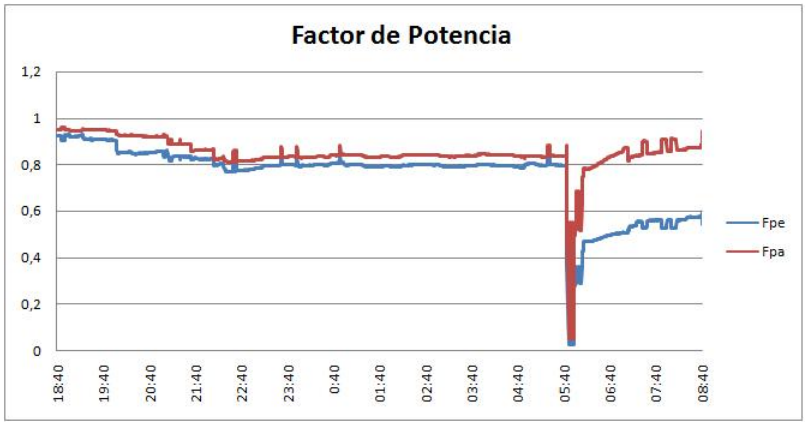


Figura A.22: Factor de potencia del tablero TA-1

A.5. Transformador B

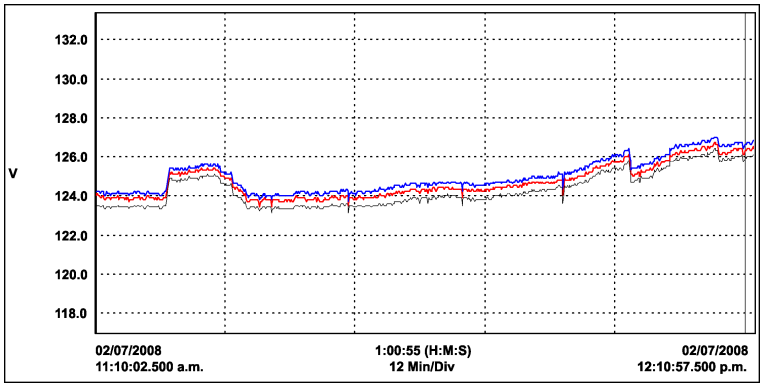


Figura A.23: Perfil de tensiones de fase del transformador B

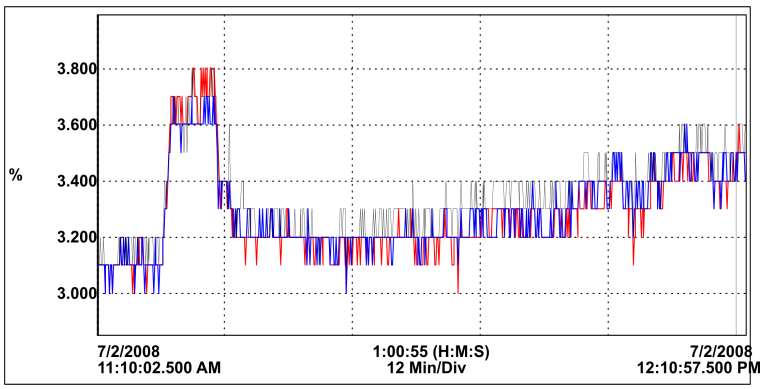


Figura A.24: DAT en Tensión del transformador B

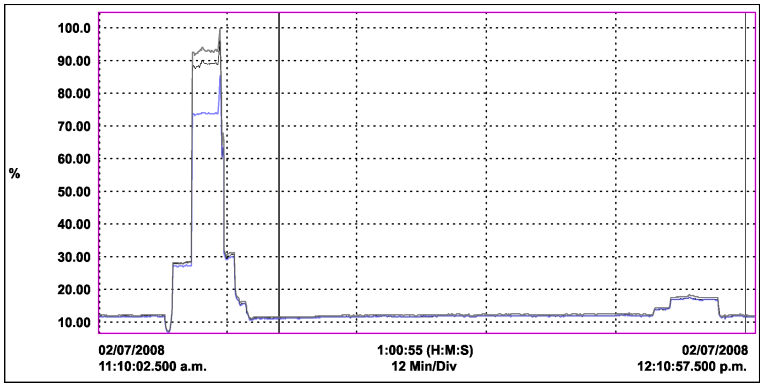


Figura A.25: DAT de corrientes del transformador B

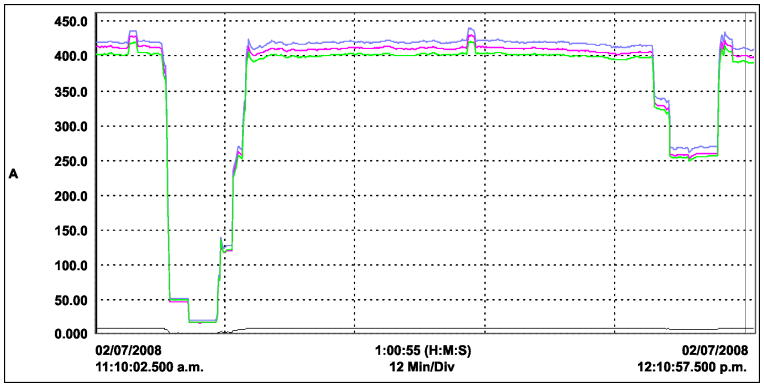


Figura A.26: Perfil de corrientes de fase del transformador B

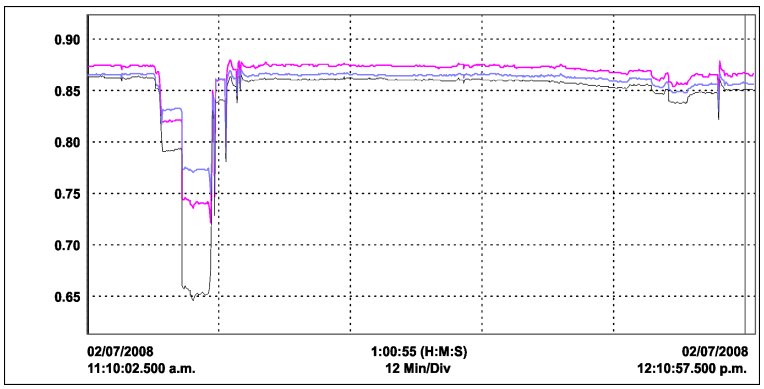


Figura A.27: Factor de potencia del transformador B

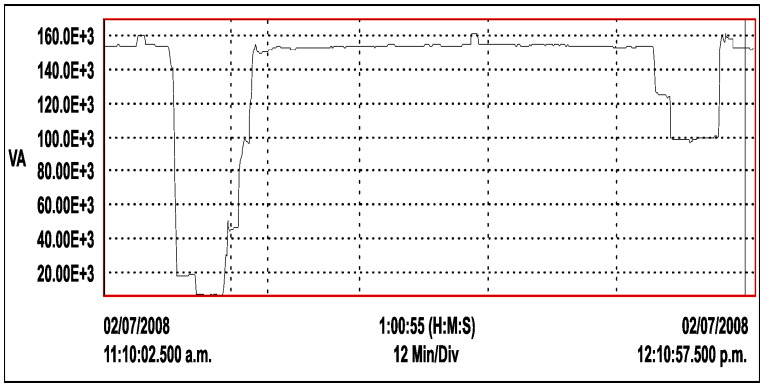


Figura A.28: Potencia aparente del transformador B

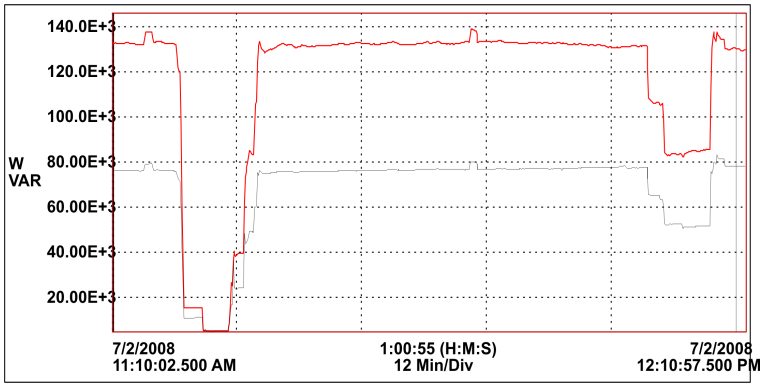


Figura A.29: Potencia activa y reactiva del transformador B

A.6. Tablero REC 1-1

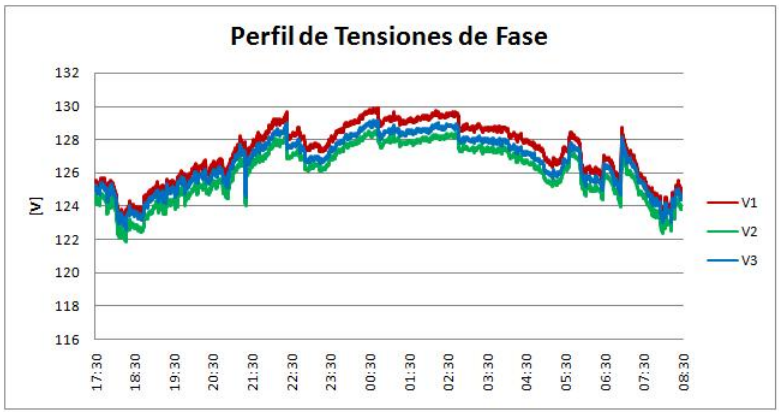


Figura A.30: Perfil de tensiones del tablero REC1-1

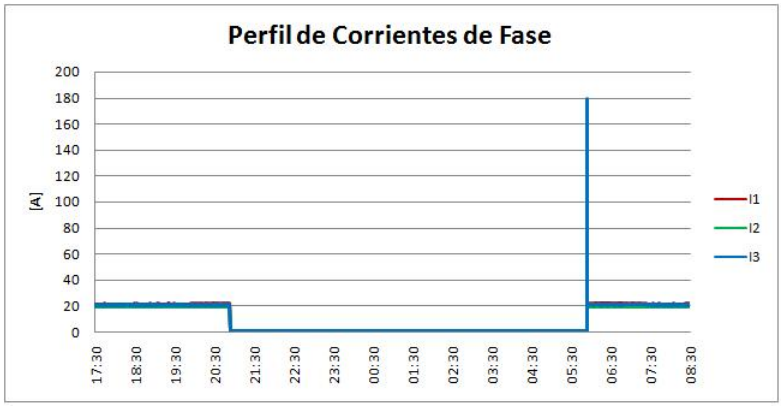


Figura A.31: Perfil de corrientes del tablero REC1-1

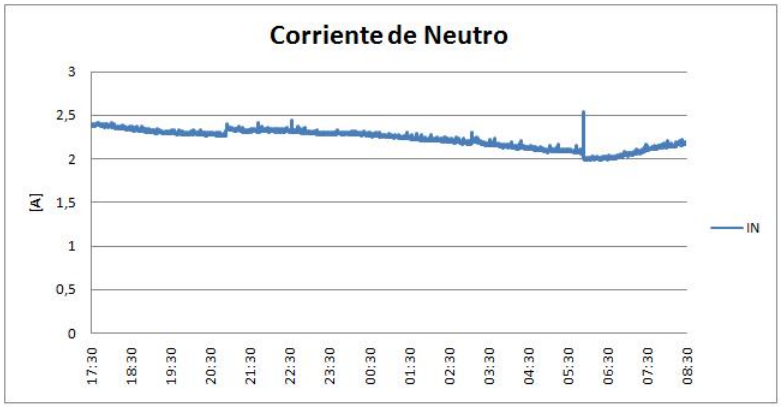


Figura A.32: Corriente de neutro del tablero REC1-1

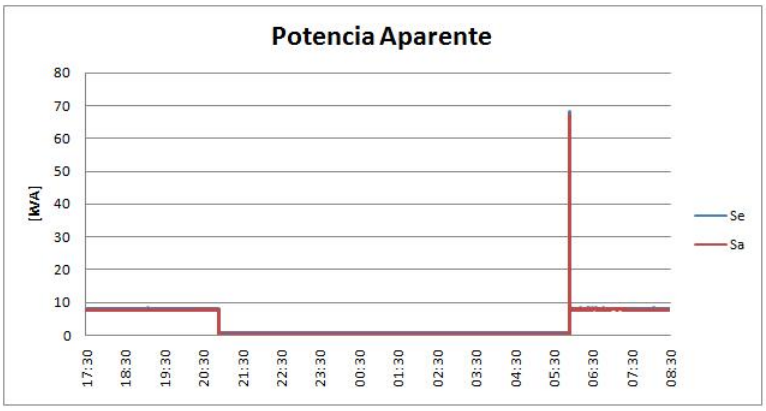


Figura A.33: Potencia aparente del tablero REC1-1

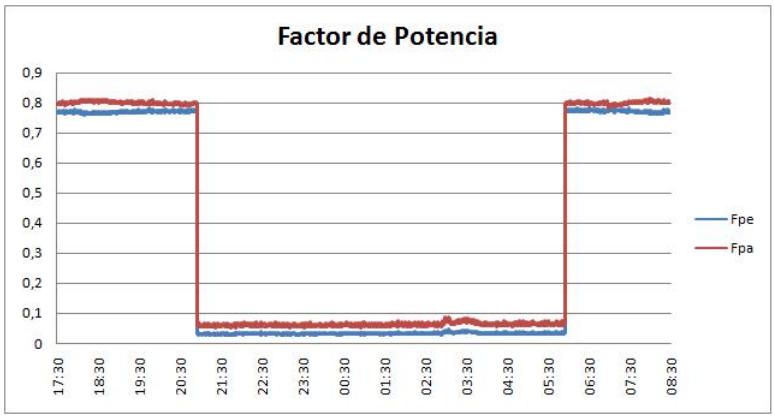


Figura A.34: Factor de potencia del tablero REC1-1

A.7. Tablero Enfriadora 1

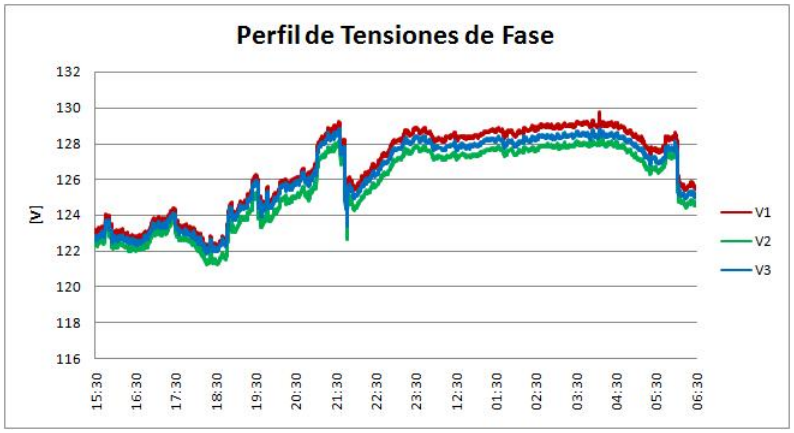


Figura A.35: Perfil de tensiones de la enfriadora 1

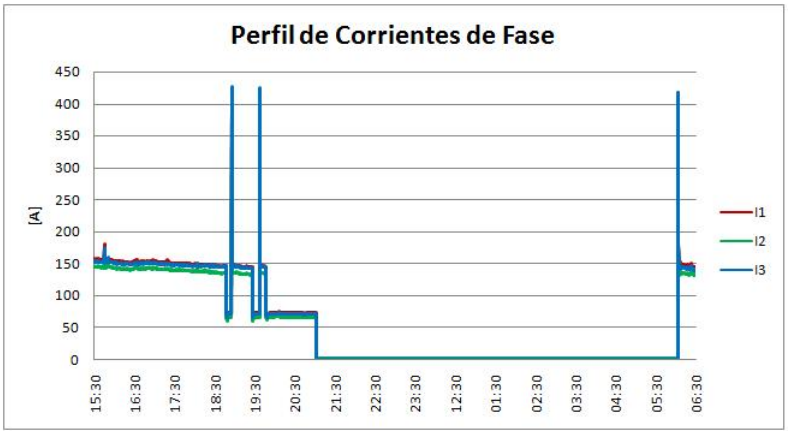


Figura A.36: Perfil de corrientes de la enfriadora 1

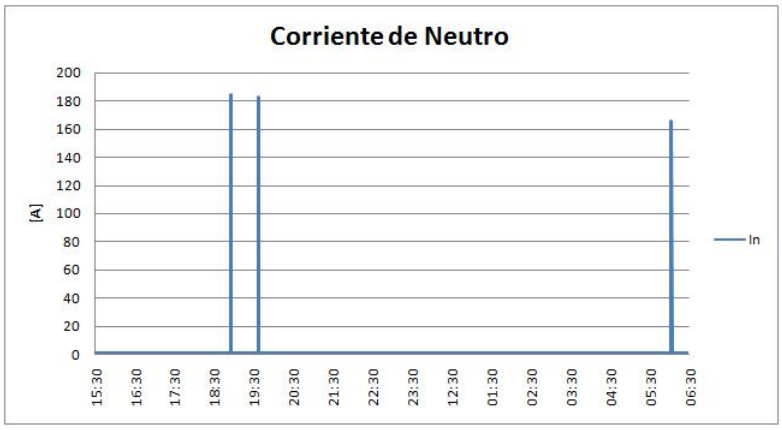


Figura A.37: Corriente de neutro de la enfriadora 1

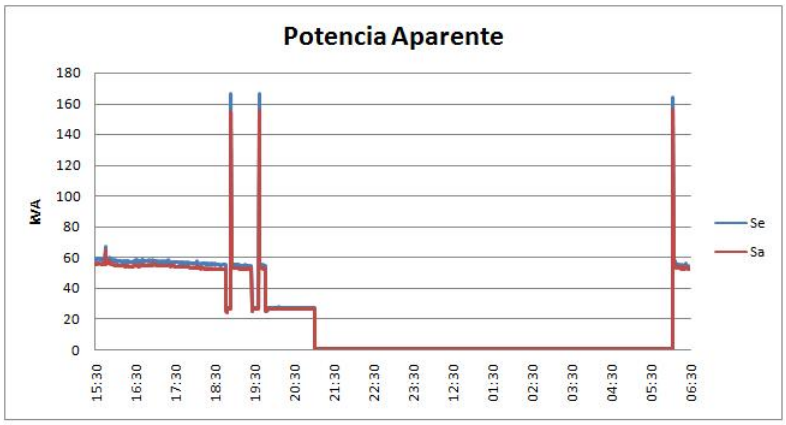


Figura A.38: Potencia aparente de la enfriadora 1

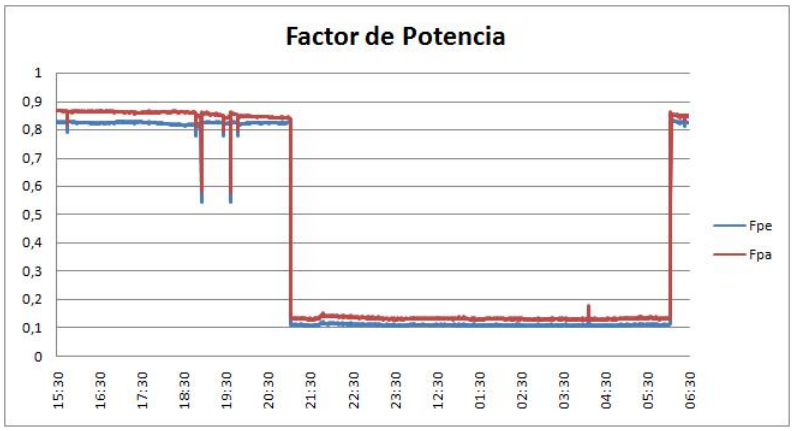
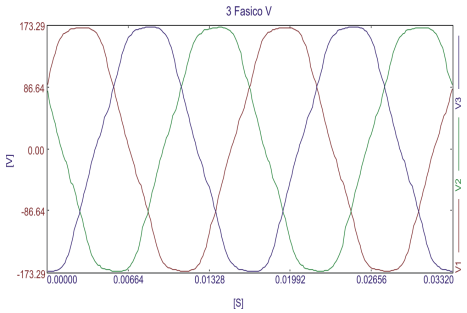


Figura A.39: Factor de potencia de la enfriadora 1

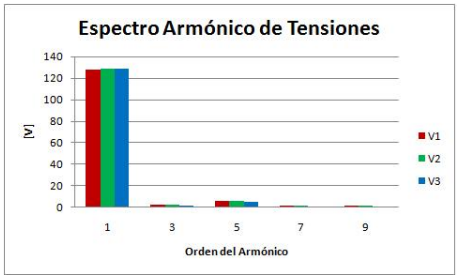
Hasta aqui se presentaron los anexos de los tableros analizados en el capitulo 4, a continuación se realiza el análisis de los tableros restantes.

A.8. Tablero TR2-2

Al igual que en los tableros sin UPS, cuya carga se compone en su mayoría por computadores, estos se comportan de una manera muy similar. El tablero TR2-2 alimenta_solo equipos de cómputo ubicados en el segundo piso del edificio. Este tablero no cuenta con UPS de respaldo de energía. En la figura A.40, se pueden apreciar las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico, cuyas componentes se mantienen en un valor muy parecido durante la medición.



(a) Señales de tensión por fase

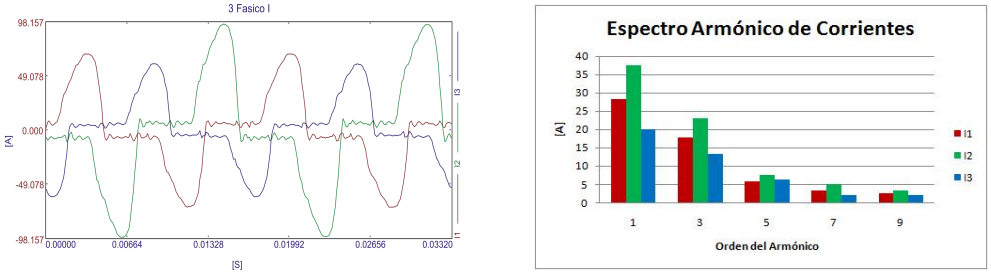


(b) Espectro armónico de tensiones por fase

Figura A.40: Tensiones de fase del tablero TR2-2

La forma de onda de las señales de tensión de la figura A.40a evidencia muy poca distorsión, asimismo en el espectro armónico de la figura A.40b se tiene que la componente más significativa corresponde al quinto armónico con un porcentaje menor al 4.2 % en relación con la fundamental.

En el caso de las corriente de fase en la figura A.41 se presenta la forma de onda de las corrientes de fase y su respectivo espectro armónico registrado en el tablero.



(a) Señales de corriente por fase

(b) Espectro armónico de corrientes por fase

Figura A.41: Corrientes de fase del tablero TR2-2

En la figura A.41a se observar una considerable distorsión de la forma de onda de las corrientes de fase, esta situación indica la existencia de armónicos en la red. En la figura A.41b se presenta el espectro armónico de las corrientes de fase, las componentes armónicas más significativas son el tercero con valores cercanos al tercer armónico 62,78 %, 61,62 %, 66.13 %, quinto 20,1 %, 20.3 % y 30.1 %, séptimo 11.2 %, 12.4 % y 13.5 %, noveno 9.12 %, 8.84 % y 9.69 % respecto a la fundamental. Además se se aprecia un desbalance considerable de carga entre las tres fases. A continuación se hacen las principales consideraciones a partir de la monitorización del tablero.

- Los tensiones de fases se pueden considerar equilibradas, teniendo en cuenta que la diferencia de valor entre la fase más alta y la fase mas baja es menor a 1 voltio.
- Es importante anotar que en gran parte de la medición se registraron tensiones de fase que sobrepasan el valor de 120 [V] ±5 estipulado en la norma de la ESSA. Las tensiones de fase se encuentran entre 126 [V] y 132 [V].
- Debido al desbalance de carga ocurrido entre las fases y a la presencia significativa de los armónicos de orden 3, se presenta un valor considerable de la corriente que circula por el neutro, en algunos momentos supera en magnitud a las corrientes de fase del tablero.
- Los valores de DAT de corriente son significativos con valores máximos de aproximadamente 69 % por fase. Así mismo se registró una DAT en tensión no mayor al 5 % en cada una de las tres fases.

- En las siguientes figuras se muestra la diferencia entre la potencia trifásica aritmética y la potencia trifásica efectiva calculada basados en la norma IEEE 1459, así mismo se puede observar diferencia similar entre el factor de potencia trifásico y el factor de potencia aritmético.

- Se presenta un desbalance de corrientes con valores maximos por fase de 30, 18 y 9 Amperios, lo cual se debe a la programación de las salas de computo, asi mismo la corriente de neutro es de 31 Amperios, como contribución de los terceros armonicos y el desbalance de carga.

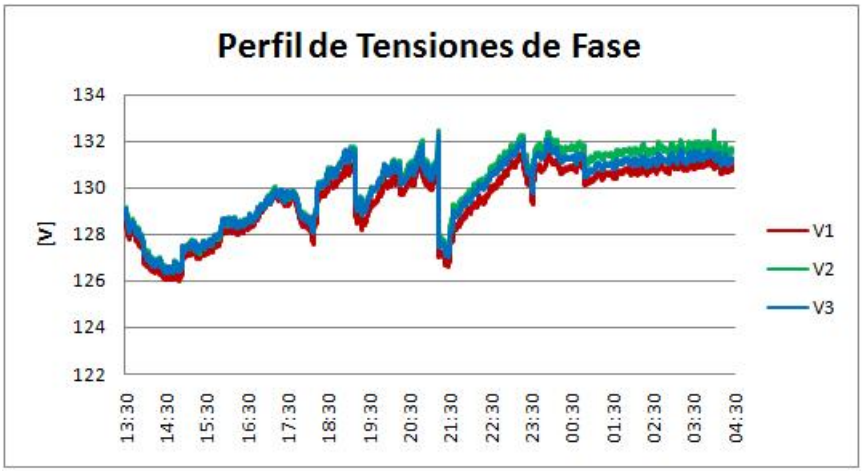


Figura A.42: Perfil de Tensiones del tablero TR2-2

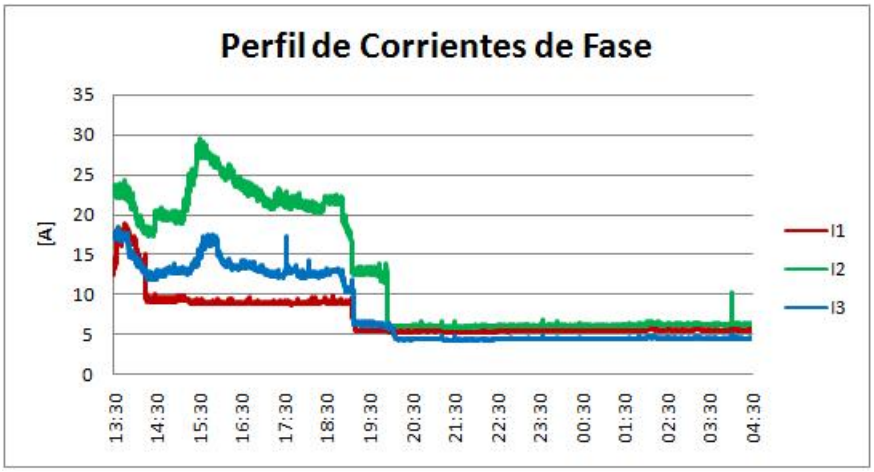


Figura A.43: Perfil de Corrientes del tablero TR2-2

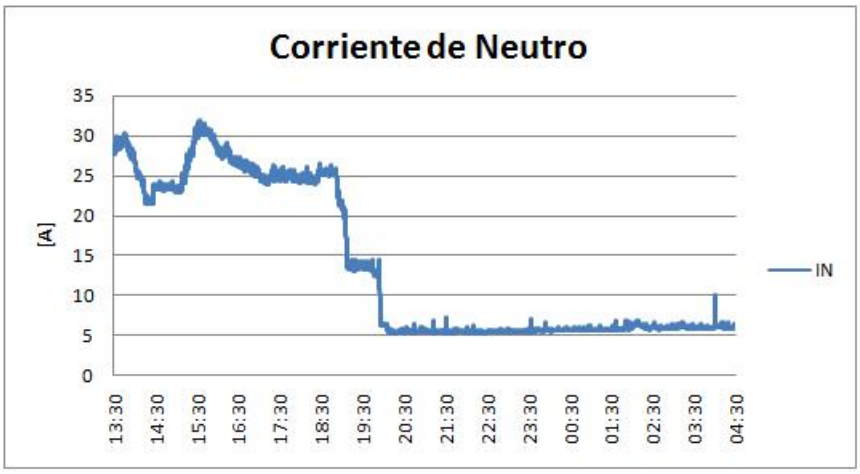


Figura A.44: Corriente de neutro del tablero TR2-2

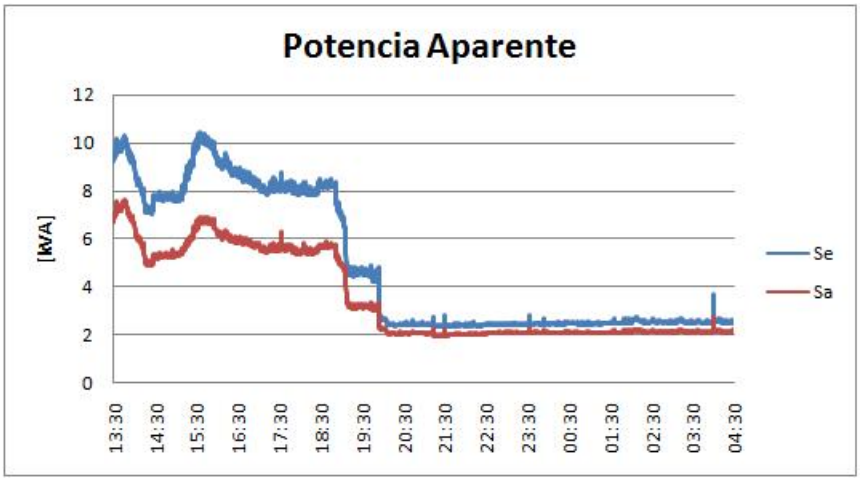


Figura A.45: Potencia aparente del tablero TR2-2

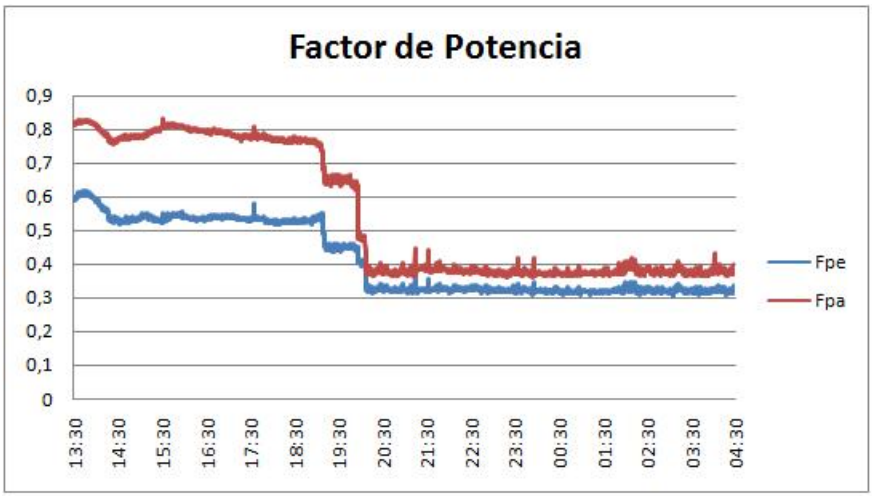
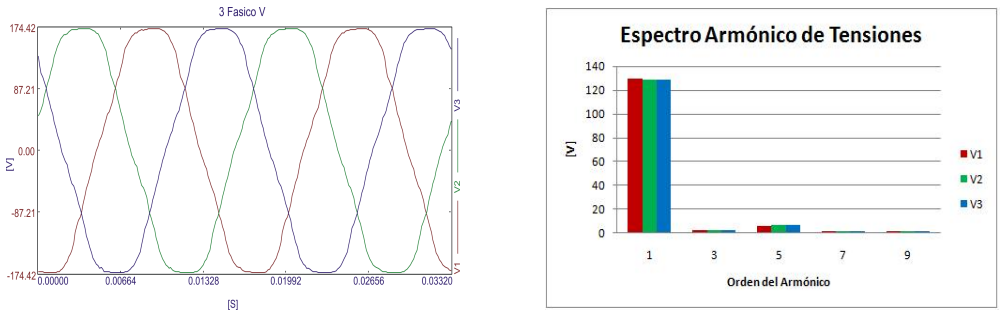


Figura A.46: Factor de potencia del tablero TR2-2

A.9. Tablero TR3-3

El tablero TR3-3 se ubica en el tercer piso del CENTIC, alimenta unicamente_computadores. Este tablero no cuenta con UPS de respaldo de energía. En la figura A.47, se pueden apreciar las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico, el cual se mantiene durante la medición.



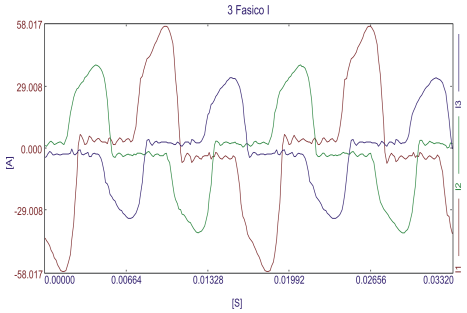
(a) Tensiones de fase (b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.47: Tensiones de fase del tablero TR3-3

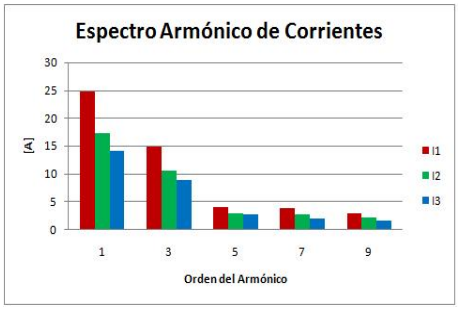
En la figura A.47a se puede ver la forma de onda de las tensiones de fase del tablero, estas señales presentan una distorsion minima, por lo cual en el espectro armónico de la figura A.40b se tiene que la componente más significativa corresponde al quinto

armónico con un porcentaje menor al 4.2 % respecto a la fundamental. El desequilibrio en las tensiones de fase es poco significativo. Estas características de tensión se repiten en todos los tableros medidos suminstrados por el transformador A.

En la figura A.48 se presenta las gráficas de las corriente de fase y el espectro armónico registrado en el tablero.



(a) Corrientes de fase



(b) Espectro armónico de corrientes de fase

Figura A.48: Corrientes de fase del tablero TR3-3

La forma de onda y el espectro armónico de las de fase es muy similar en los tableros que no poseen UPS, características que son el común denominador en este tipo de tableros según las mediciones realizadas, en la figura A.48a se observa la forma de onda de las corrientes de fase. En la figura A.48b se presenta el espectro armónico de las corrientes de fase, las componentes armónicas más significativas son el tercero con valores cercanos al tercer armonico 60.1 %, 60.8 %, 62.4 %, quinto 15.6 %, 16.1 % y 18.2 %, séptimo 14.2 %, 14.7 % y 13.4 %, noveno 11.5 %, 11.6 % y 11.3 % respecto a la fundamental. Además se se aprecia un desbalance considerable de carga entre las tres fases. A continuación se hacen las principales consideraciones a partir de la monitorización del tablero.

- Los tensiones de fases se pueden considerar equilibradas, teniendo en cuenta que la diferencia de valor entre la fase más alta y la fase mas baja es menor a 0.5 voltio.

- Es importante anotar que en gran parte de la medición se registraron tensiones de fase que sobrepasan el valor de 120 [V] ±5 estipulado en la norma de la ESSA. Las tensiones de fase se encuentran entre 125 [V] y 132 [V].

- Debido al desbalance de carga ocurrido entre las fases y a la presencia significativa de los armónicos de orden 3, se presenta un valor considerable de la corriente que

circula por el neutro, en algunos momentos supera en magnitud a las corrientes de fase del tablero.

- Los valores de DAT de corriente son significativos con valores máximos de aproximadamente 69 % por fase. Así mismo se registró una DAT en tensión no mayor al 5 % en cada una de las tres fases. Como se puede ver en el anexo B sección 2.
- En el anexo B sección 2 se presentan las figuras que muestran la diferencia entre la potencia trifásica aritmética y la potencia trifásica efectiva calculada basados en la norma IEEE 1459, así mismo se puede observar diferencia similar entre el factor de potencia trifásico y el factor de potencia aritmético.
- Se presenta un desbalance de corrientes con valores maximos por fase de 30, 28 y 50 Amperios, lo cual se debe a la programación de las salas de computo, asi mismo la corriente de neutro es de 54 Amperios, como contribución de los terceros armonicos y el desbalance de carga.

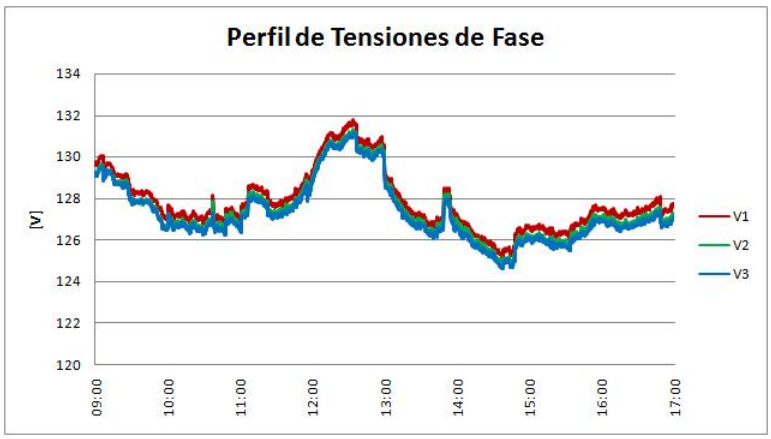


Figura A.49: Perfil de tensiones del tablero TR3-3

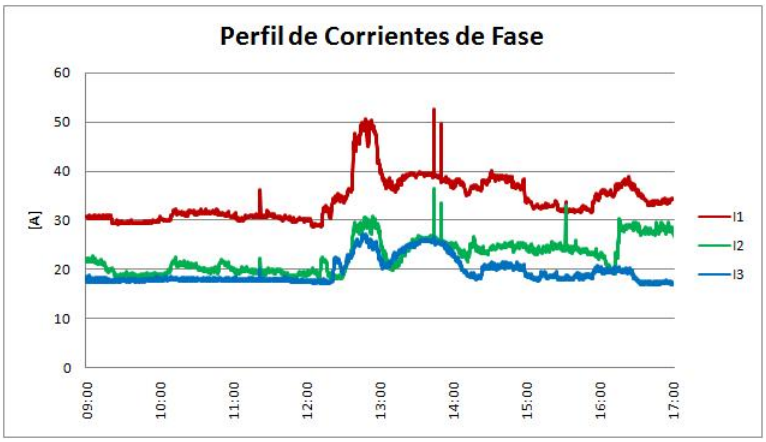


Figura A.50: Perfil de corrientes del tablero TR3-3

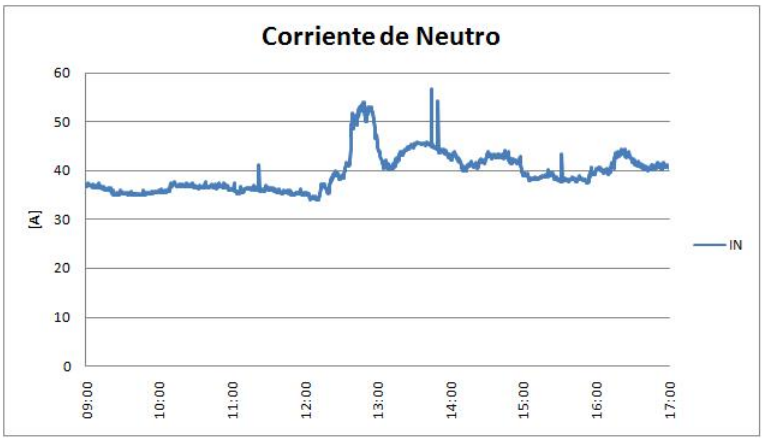


Figura A.51: Corriente de neutro del tablero TR3-3

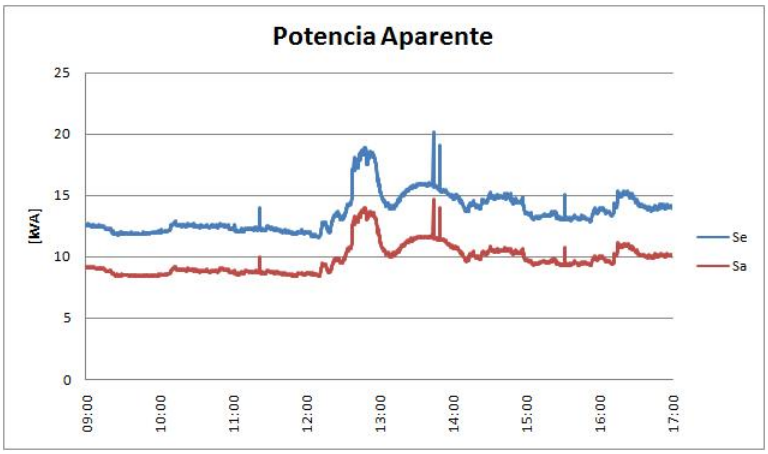


Figura A.52: Potencia aparente del tablero TR3-3

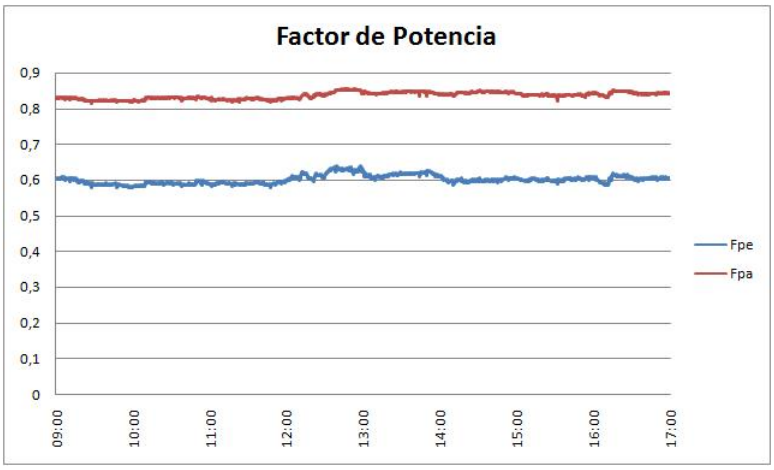
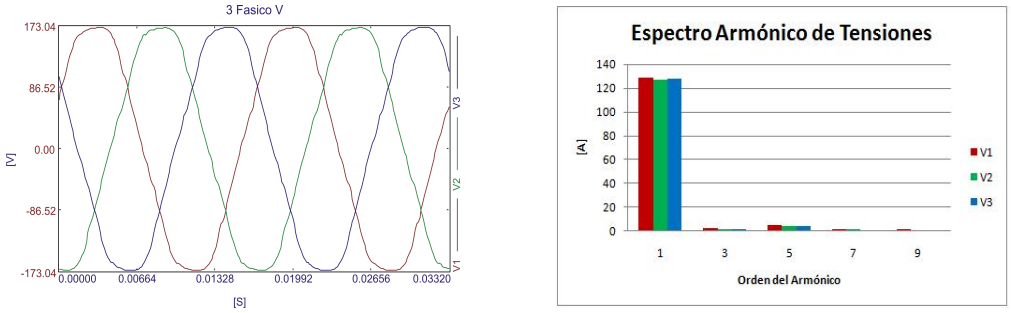


Figura A.53: Factor de potencia del tablero TR3-3

A.10. Tablero TR3-1

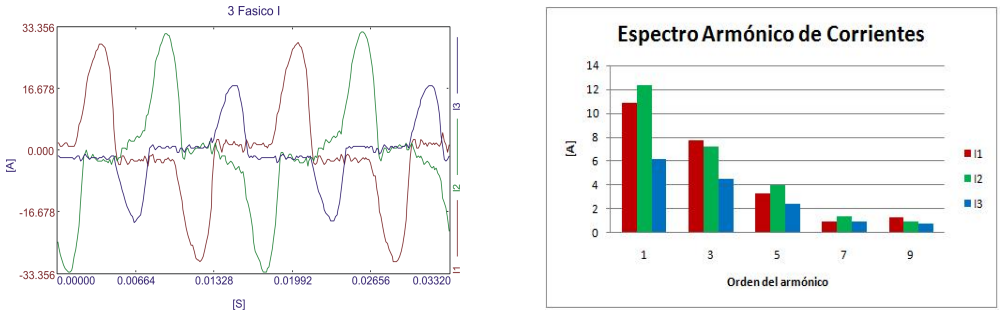
Este tablero se ubica en el tercer piso, la carga se compone unicamente de equipos de computo. La alimentación proviene del transformador A, por lo cual la forma de onda y su espectro armónico de tensión poseen características muy similares al tablero TR3-1, como se presenta en la figura A.54.



(a) Tensiones de fase (b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.54: Tensiones de fase del tablero TR3-1

En corriente se tiene una forma de onda similar a la del tablero TR3-1, lo cual es común en todos los tableros que contienen equipos de computo y que no poseen UPS en la figura A.55 se aprecian las corrientes de fase y su espectro armónico.



(a) corrientes de fase (b) Espectro armónico de corrientes

Figura A.55: Corrientes de fase del tablero TR3-1

En el espectro armónico se tienen componentes distribuidos de la siguiente forma en el tercer armónico 68.1 %, 62.4 %, 65.4 %, quinto 22,5 %, 25,4 % y 23,5 %, séptimo 10,3 %, 11,2 % y 12.4 %, noveno 11.1 %, 10.6 % y 9.3 % respecto a la fundamental. Además se se aprecia un desbalance considerable de carga entre las tres fases. A continuación se hacen las principales consideraciones a partir de la monitorización del tablero.

- En las tensiones de fases existe una diferencia entre las mismas poco significativa menor a 0.3 voltios, por ende se consideran equilibradas.
- Durante la medición se registraron tensiones de fase que sobrepasan el valor de 120 [V] ±5 estipulado en la norma de la ESSA, estas tensiones de fase se encuentran entre 126 y 132 [V].
- Existe un desbalance de carga considerable como se observa en la figura de corrientes de fase, esto se refleja en la corriente que circula por el neutro así como también la presencia de los armónicos de orden 3 los cuales aumentan la magnitud de la misma.
- Los valores de DAT de corriente son significativos con valores de aproximadamente 67 % por fase, esta proporcion se mantiene en un valor cercano deurante la minitorización. Así mismo se registró una DAT en tensión no mayor al 5 % en cada una de las tres fases.
- La diferencia entre la potencia trifásica aritmética y la potencia trifásica efectiva calculada basados en la norma IEEE 1459 es considerable a causa de los desbalances de carga y los armónico, así mismo se puede observar diferencia similar entre el factor de potencia trifásico y el factor de potencia aritmético.

- Se presenta un desbalance de corrientes con valores maximos por fase de 25, 30 y 15 Amperios, lo cual se debe a la programación de las salas de computo. En la corriente de neutro su valor alcanza los 35 Amperios, llegando a ser mayor que las corrientes de fase.

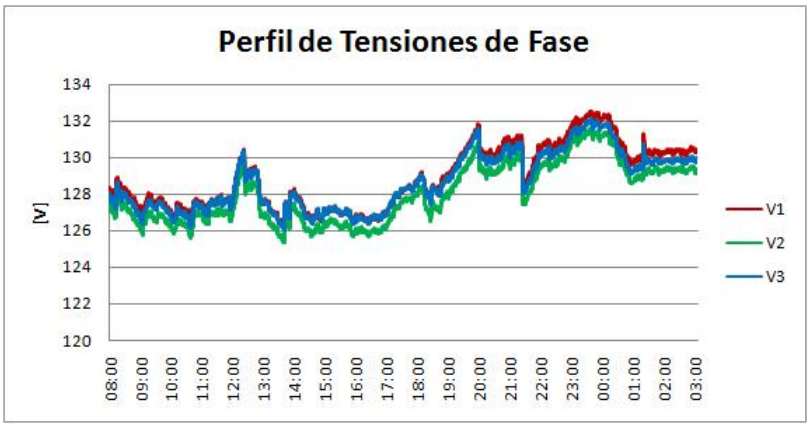


Figura A.56: Perfil de tensiones del tablero TR3-1

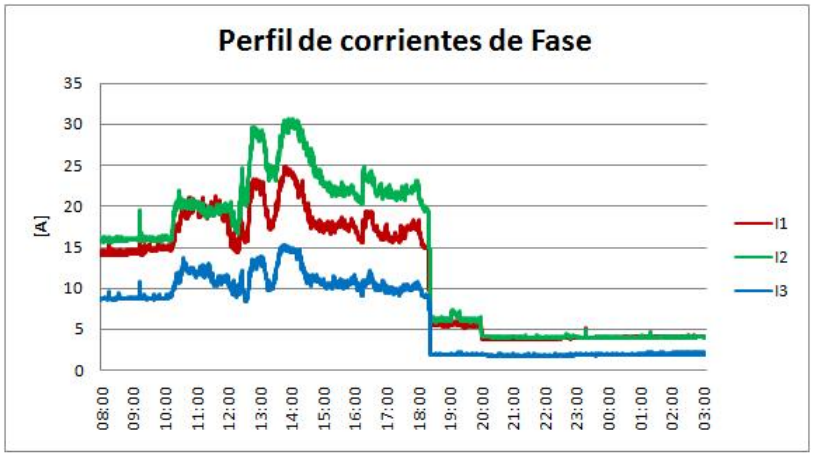


Figura A.57: Perfil de corrientes del tablero TR3-1

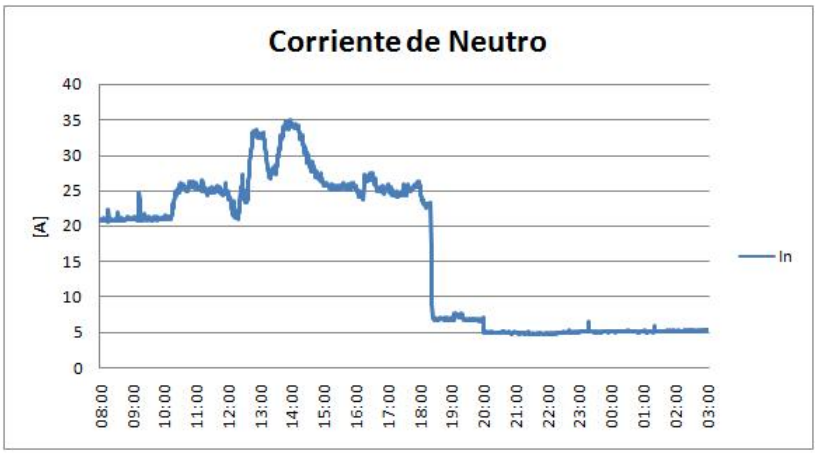


Figura A.58: Corriente de neutro del tablero TR3-1

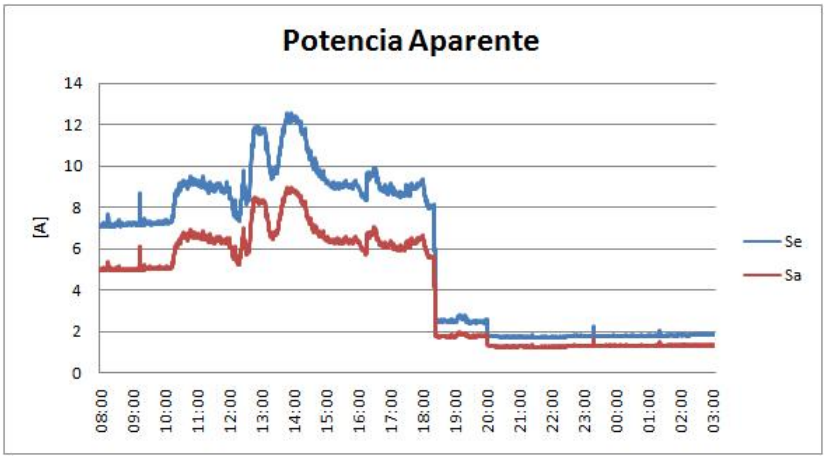


Figura A.59: Potencia aparente del tablero TR3-1

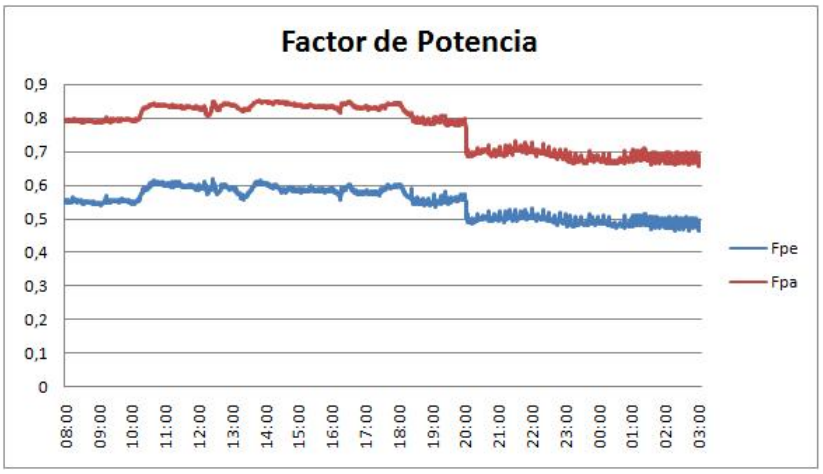
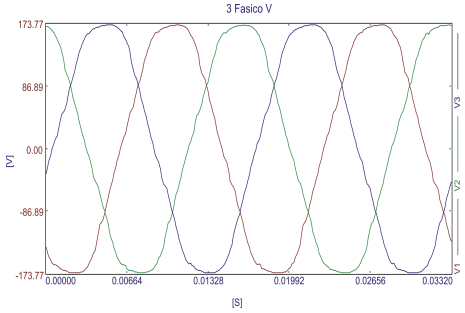


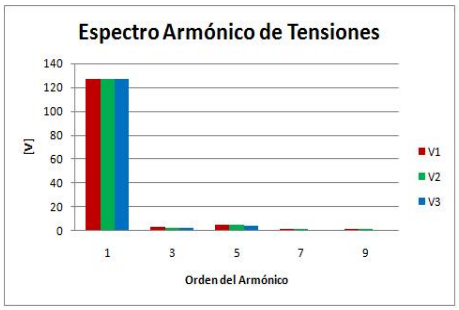
Figura A.60: Factor de potencia del tablero TR3-1

A.11. Tablero TR2-1

El tablero TR2-1 corresponde al segundo piso del edificio, su carga es esta unicamente conformada por computadores, en este caso posee respaldo de energía por medio de una UPS. En la figura A.61 se observan las tensiones de fase.



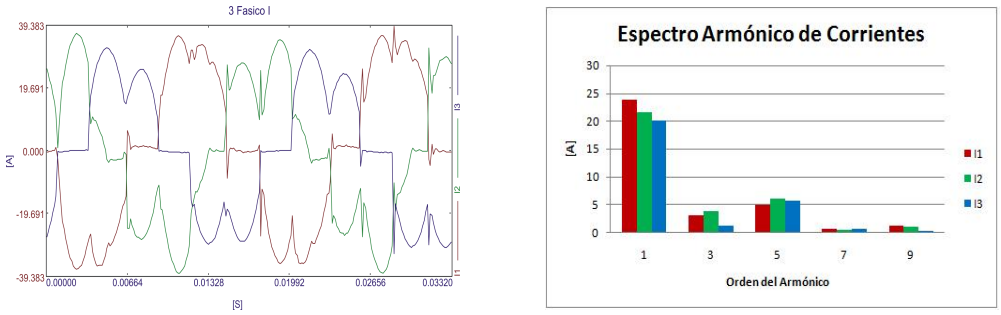
(a) tensiones de fase



(b) Espectro armónico de tensiones de fase

Figura A.61: Tensiones de fase del tablero TR2-1

Al igual que para los tableros que poseen UPS la corriente presenta una forma muy similar, como se aprecia en la figura A.62. El espectro armónico se compone primordialmente por el tercer armónico en valores menores a 15 %, en el quinto armónico con valores de 20,4 %, 24,3 % y 25 % por fase, para los demás componentes su valor es poco significativo.



(a) Corrientes de fase (b) Espectro armónico de corrientes

Figura A.62: Corrientes de fase del tablero TR2-1

A continuación se resumen los sucesos más importantes con base en el periodo de medición.

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, pues la diferencia entre la fase más alta y más baja es menos de 0.5 V, durante el periodo de la monitorización.
- Al igual que todos los tableros alimentados por el transformador A, se presenta sobretensón. En gran parte de la medición se aprecian valores altos en las tensiones de fase, oscilando entre valores de 126 V y 133 V, incurriendo en lo estipulado en la norma de la ESSA.
- En este caso no existe un desbalance considerable de carga entre las fases de este tablero, además las componentes armónicos de tercer orden no son de gran magnitud, esto contribuye a que la corriente de neutro no sea tan grande, por otro lado la UPS tambien tiene un efecto sobre la corriente de nuetro. Durante el periodo en el que se monitorizó ocurrio un pico en las corrientes de fase llegando a alcanzar en el neutro un valor de 62 A
- Los valores de DAT de corriente. Con valores máximos de aproximadamente 25 %, 33 % y 29 % por fase. Así mismo se registran valores de distorsión armónica en tensión cercanos al 5 % al igual que en el tablero TR1-2.
- Se observa que la potencia aritmética y la potencia efectiva calculadas con base en la norma IEEE 1459 al igual que el factor de potencia son muy similares entre sí. En el anexo B se muestra gráficamente esta situación.

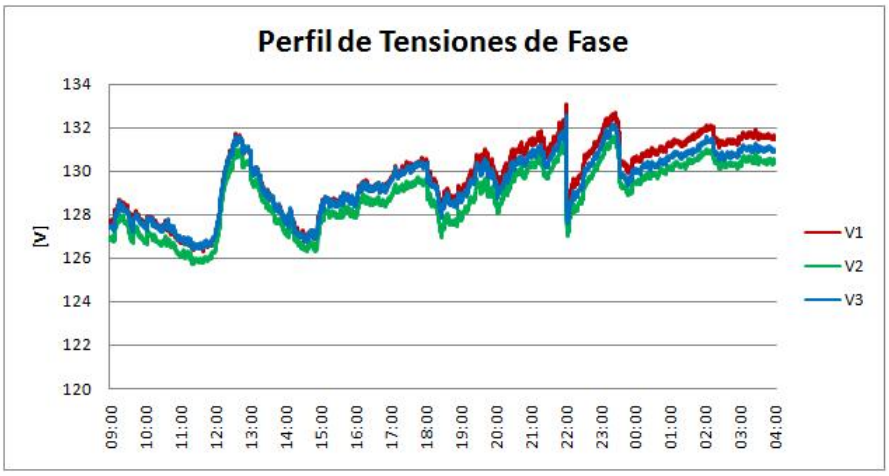


Figura A.63: Perfil de tensiones del tablero TR2-1

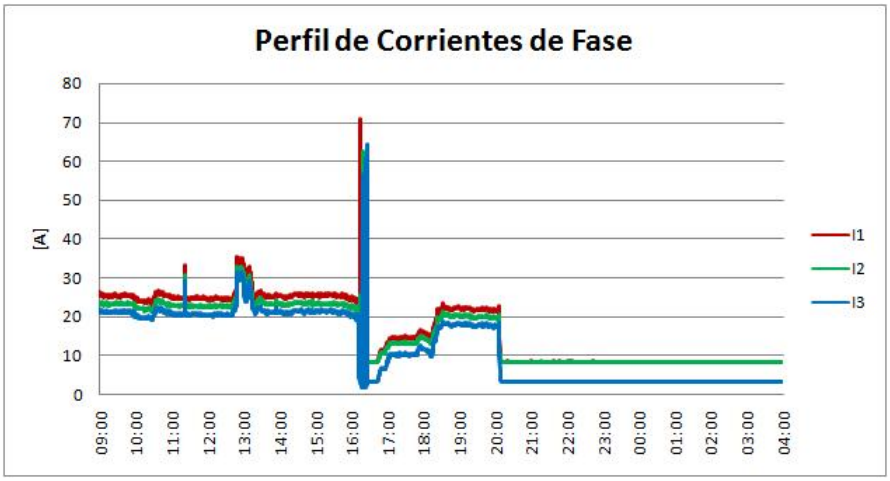


Figura A.64: Perfil de corrientes del tablero TR2-1

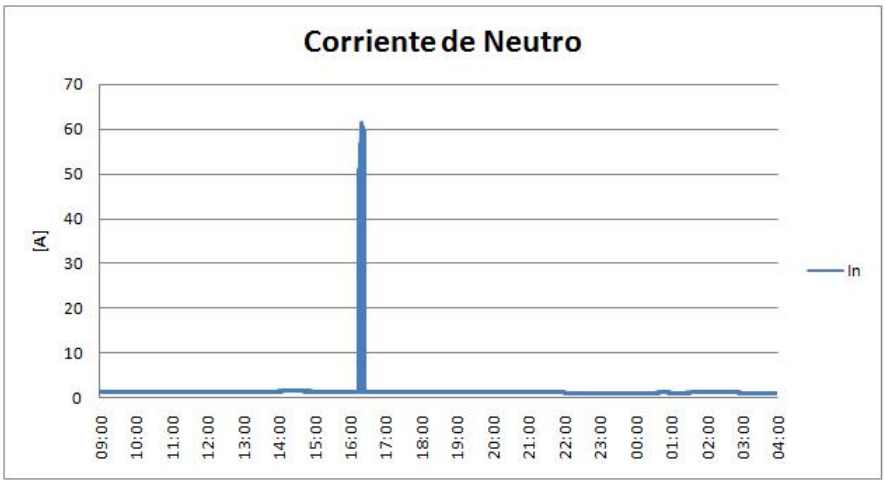


Figura A.65: Corriente de neutro del tablero TR2-1

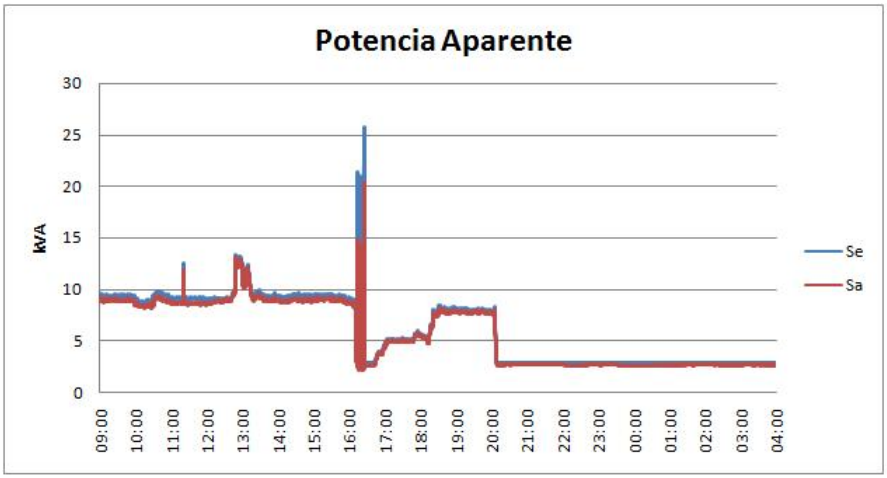


Figura A.66: Potencia aparente del tablero TR2-1

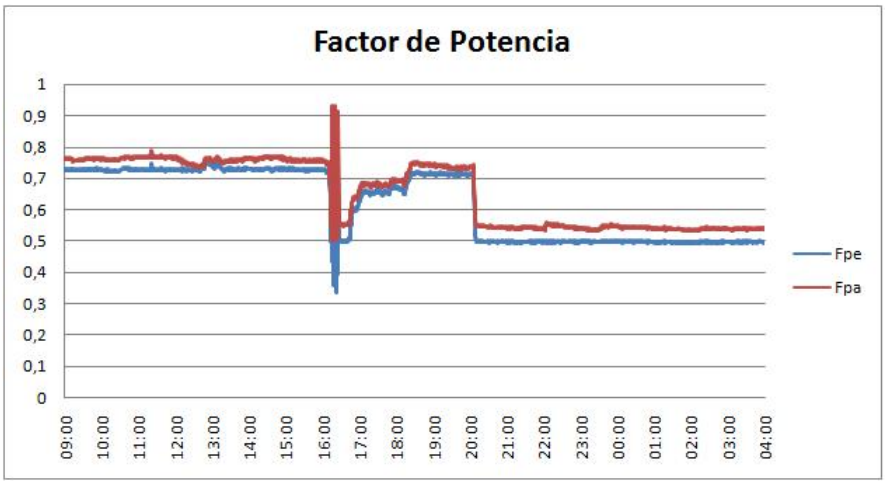
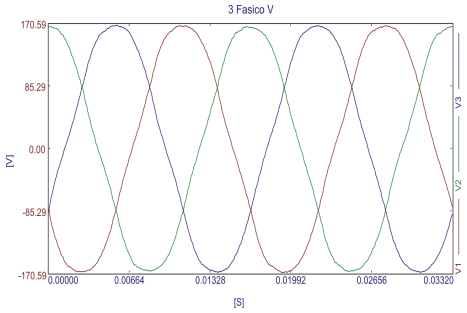


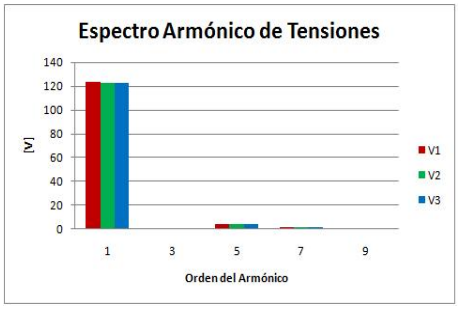
Figura A.67: Factor de potencia del tablero TR2-1

A.12. Tablero TM3-1

El tablero TM3-1 corresponde a la manejadora del tercer piso, este es alimentado por el transformador B. En la figura A.68 se tiene la forma de onda de las tensiones de fase y su espectro armónico.



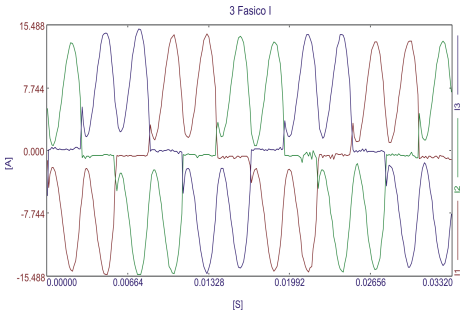
(a) Tensiones de fase



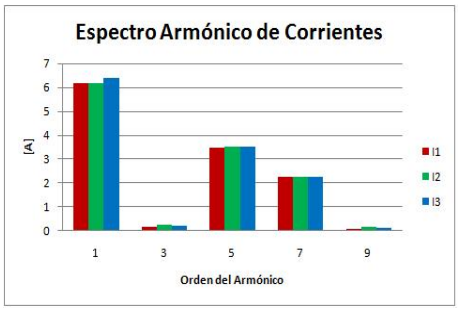
(b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.68: Tensiones de fase del tablero TM3-1

Respecto a las corrientes de fase del tablero se nota una no linealidad en la carga (ver figura A.69a), lo cual se refleja en el espectro armónico de la figura A.69b.



(a) Corrientes de fase



(b) Espectro armónico de corrientes

Figura A.69: Corrientes de fase del tablero TM3-1

Para este tipo de carga la onda de corriente muestra una distorsión significativa (ver figura A.69a), particularmente se tiene en la quinta componente armónica un porcentaje aproximado del 58 %, en este caso se presentan armónicos del séptimo orden en un 36.6 %, en cuanto al tercer armónico su magnitud poco considerable. A continuación se resumen los analisis con base en las mediciones tomadas.

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, pues en cada instante de tiempo la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 1 Volt, durante el periodo de la monitorización.
- Se observó durante la medición valores de tensiones dentro de lo recomendado por la norma de la ESSA, en un rango que va de 121 [V] a 129 [V], los valores más altos corresponden a horas de la noche donde no hay presencia de carga.
- En las corrientes de fase no existe un desbalance importante, esto contribuye a que en el neutro no se presente una gran corriente, asi mismo el tercer armónico es muy bajo, por ende la magnitud de la corriente de neutro es menor a 2.5 [A].
- Los valores de DAT en tensión, son similares entre fases con valores menores a 3.5 %. Por el contrario respecto a la DAT en corriente se refleja una importante distorsión con valores cercanos al 68 % por fase, estos factores se mantienen durante la monitorización del tablero.
- La potencia aritmética y la potencia efectiva registrada son muy similares, igualmente el factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritmético, esto significa que el desbalance y los armónicos son mínimos, no obstante el factor

de potencia es inferior a 0.8, habiendo la necesidad de compensar mejor con el banco de condensadores.

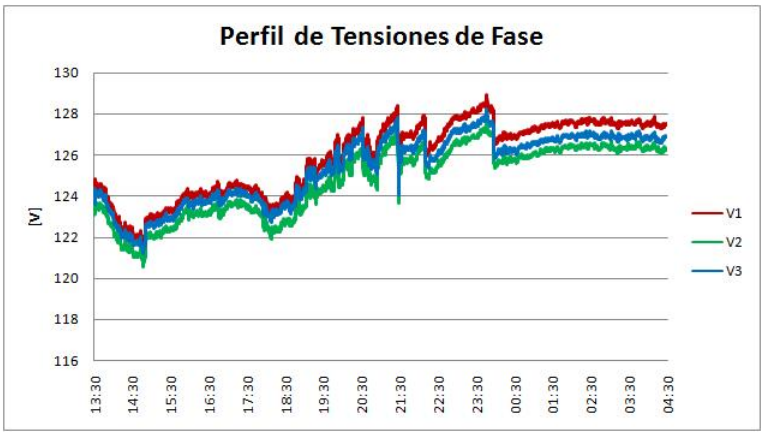


Figura A.70: Perfil de tensiones del tablero TM3-1

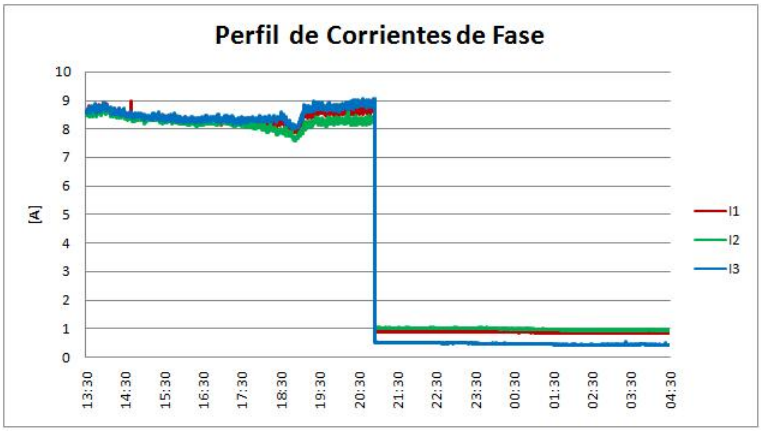


Figura A.71: Perfil de corrientes del tablero TM3-1

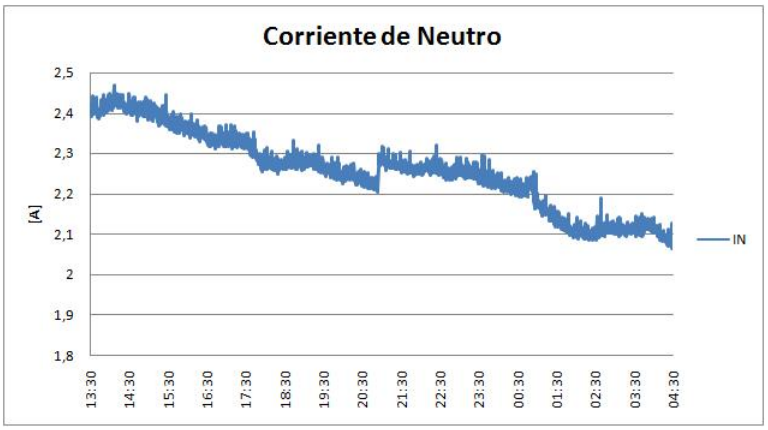


Figura A.72: Corrientes de neutro del tablero TM3-1

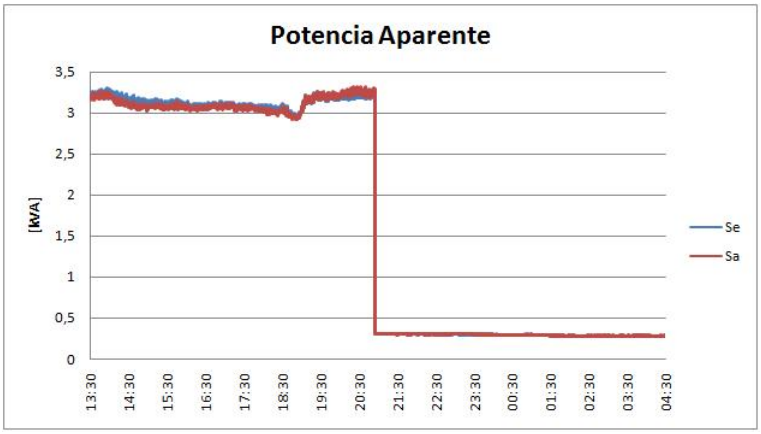


Figura A.73: Potencia aparente del tablero TM3-1

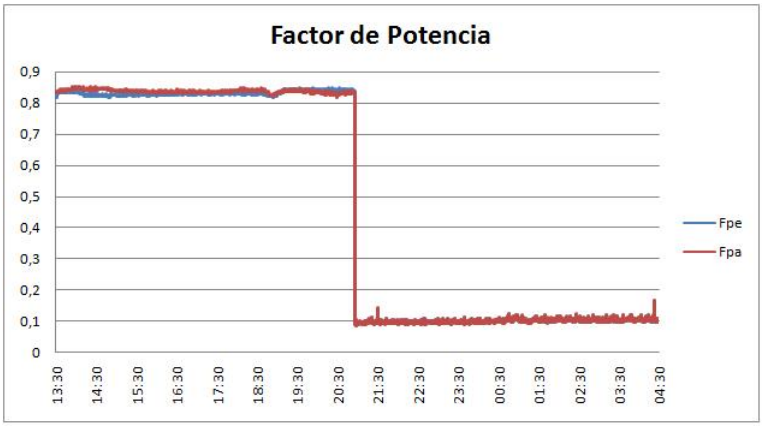
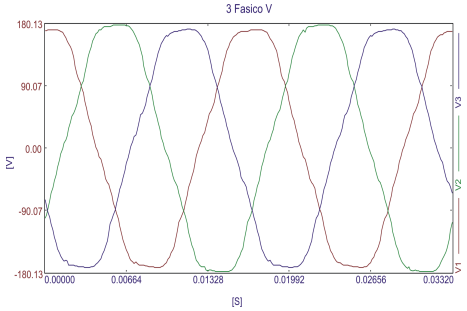


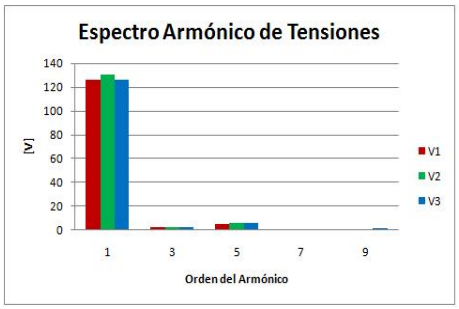
Figura A.74: Factor de potencia del tablero TM3-1

A.13. Tablero TMS

Este tablero corresponde a la manejadora de aire acondicionado de los servidores ubicados en el primer piso, por ser un equipo necesario para el correcto funcionamiento de los servidores, se le ha instalado una unidad UPS. Al igual que el tablero TR4-2 la alimentación proviene del transformador A, es por eso que las señales de tensión son muy similares asi como su espectro armónico (ver figura A.75).



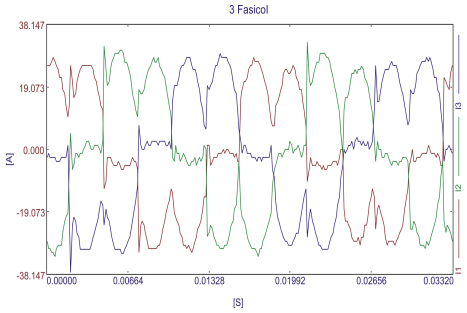
(a) Tensiones de fase



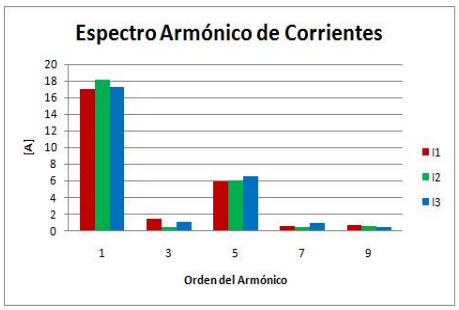
(b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.75: Tensiones de fase del tablero TMS

Con relación a la forma de onda de las corrientes de fase, se tiene una similitud con respecto a los tableros que poseen unidad de respaldo como lo es la UPS (ver figura A.76a), igualmente las proporciones del espectro armónico esta en el orden de 35 % para el quinto armónico, en cuanto a los demás componentes la magnitud es menor al 1 % de la fundamental como se observa en la figura A.76b.



(a) Corrientes de fase



(b) Espectro armónico de corrientes

Figura A.76: Corrientes de fase del tablero TMS

A continuación se hacen las principales consideraciones a partir de la monitorización

del tablero.

- En las tensiones de fase ocurre un desquilibrio en la fase V2, la diferencia con respecto a las demás fases es cercano a los 5 V, estas por el contrario se mantienen en valores muy cercanos.
- Las tensiones de fase presentan sobretensión, el rango de valores se encuentra entre los 125 y 138 voltios, con lo cual se supera el valor de 120 [V] ±5 permitido en la norma de la ESSA.
- En la corriente de neutro su magnitud no es tan amplia como en algunos de los tablero en los que ocurre un importante desbalance de carga y existen componentes de orden 3, para este caso la corriente de neutro es carcana a los 6 Amperios.
- Los valores de DAT de corriente son de aproximadamente 35 % por fase. Así mismo se registró una DAT en tensión no mayor al 5 % en cada una de las tres fases.
- La diferencia entre la potencia trifásica aritmética y la potencia trifásica efectiva calculada basados en la norma IEEE 1459 es pequeña, así mismo se puede observar una diferencia un poco mayor entre el factor de potencia trifásico y el factor de potencia aritmético, cuyos valores están por debajo de 0.8.

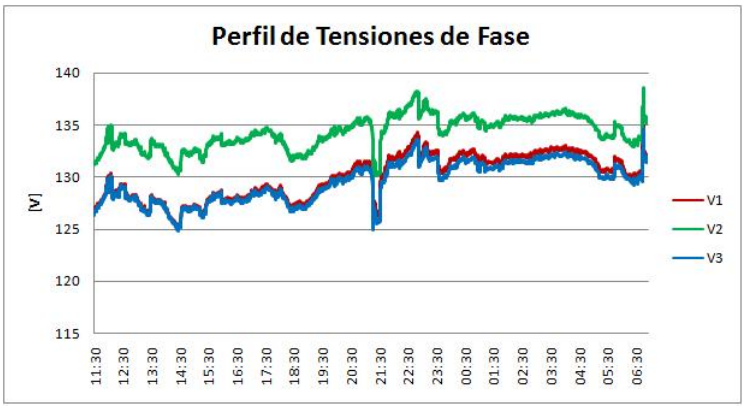


Figura A.77: Perfil de tensiones del tablero TMS

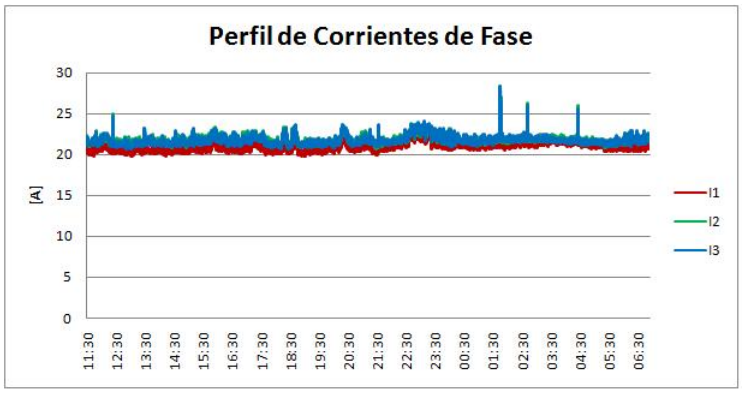


Figura A.78: Perfil de corrientes del tablero TMS

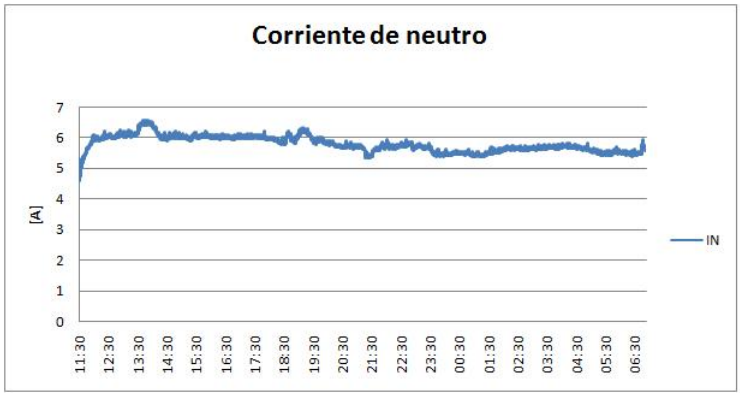


Figura A.79: Corriente de neutro del tablero TMS

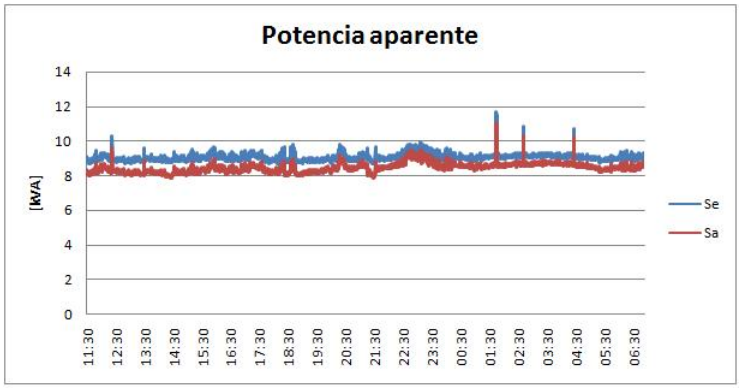


Figura A.80: Potencia aparente del tablero TMS

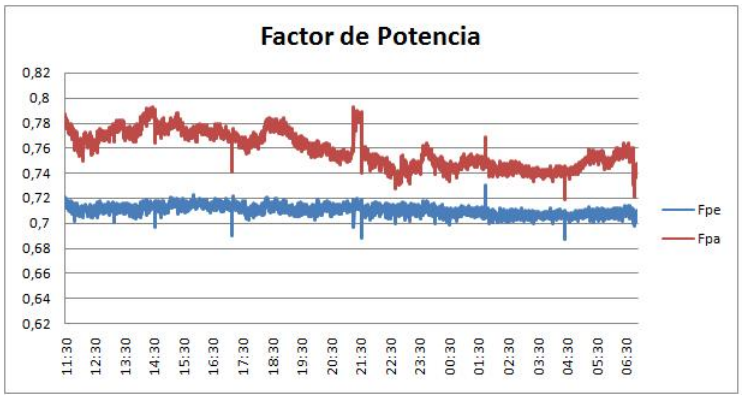
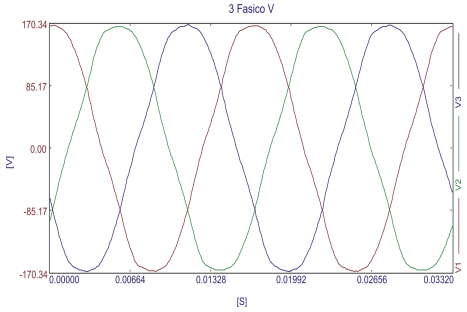


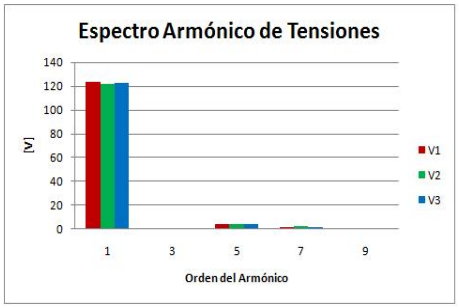
Figura A.81: Factor de potencia del tablero TMS

A.14. Tablero de la Bomba

Este tablero corresponde a la Bomba hidroneumática del edificio, este motor es alimentado por el transformador B. En la figura A.82 se muestran las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico.



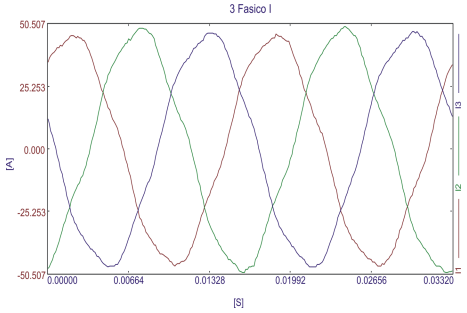
(a) Tensiones de fase



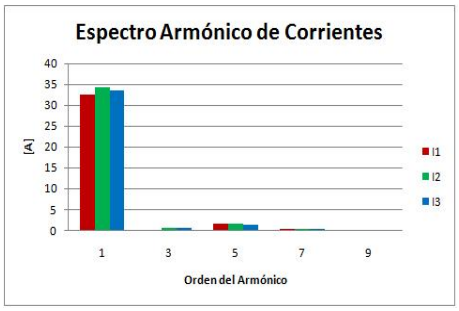
(b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.82: Tensiones de fase de la Bomba

En la figura A.82a se presenta la forma de onda de las tensiones de fase, como en todos los tableros la distorsión en tensión es casi imperceptible, con lo cual las componentes armónicas de la figura A.82a son muy bajas, la componente armónica más significativa corresponde al quinto armónico con un porcentaje menor al 4.4 %. En la figura A.83 se presenta la gráfica de las corrientes de fase y el espectro armónico registrado en el tablero.



(a) Corrientes de fase



(b) Espectro armónico de las corrientes de fase

Figura A.83: Corrientes de fase de la Bomba

Por ser una carga de tipo motor la forma de onda de las corrientes de fase no muestran una distorsión significativa (ver figura A.83a), por lo que en el espectro armónico de la figura A.83b se observa sólo una contribución en la quinta componente armónica con un porcentaje cercano al 4.5 %, las demás componentes no son considerables pues el porcentaje es menor al 1 % con respecto a la fundamental. A continuación se resumen los analisis con base en las mediciones tomadas.

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, pues en cada instante de tiempo la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 0.5 Volt, durante el periodo de la monitorización.
- Se observó durante la medición valores de tensiones dentro de lo recomendado por la norma de la ESSA, en un rango que va de 121 [V] a 129 [V].
- Se aprecia un valor de corriente de neutro reducido, cercano a 2 [A] esto se debe al poco contenido de armónicos de orden 3, así como al escaso desbalance entre corrientes de fase.
- Los valores de DAT en tensión, son similares entre fases con valores menores a 3.5 %. En cuanto a la magnitud de la DAT es reducido, con valores cercanos al 5.2 % por fase, estos factores se mantienen durante la monitorización del tablero.
- La potencia aritmética y la potencia efectiva registrada son muy similares, igualmente el factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritmético, esto significa que el desbalance y los armónicos son mínimos, no obstante el factor

de potencia es inferior a 0.8, habiendo la necesidad de compensar mejor con el banco de condensadores.

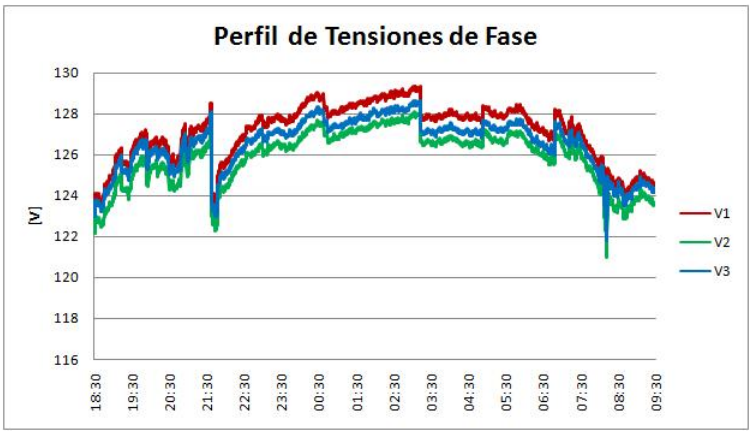


Figura A.84: Perfil de tensiones de fase

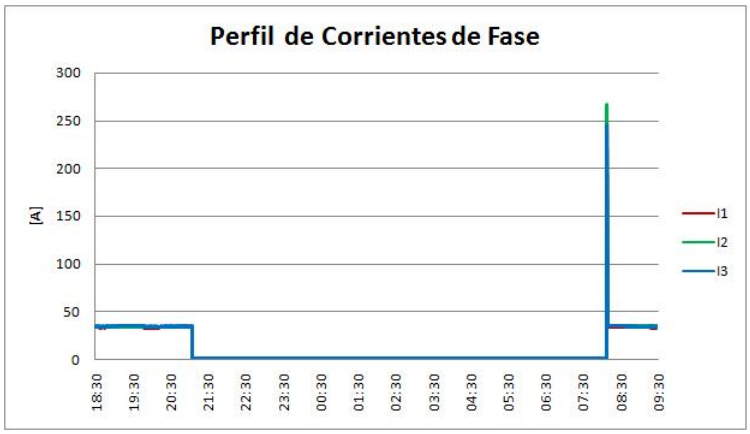


Figura A.85: Perfil de corrientes de fase

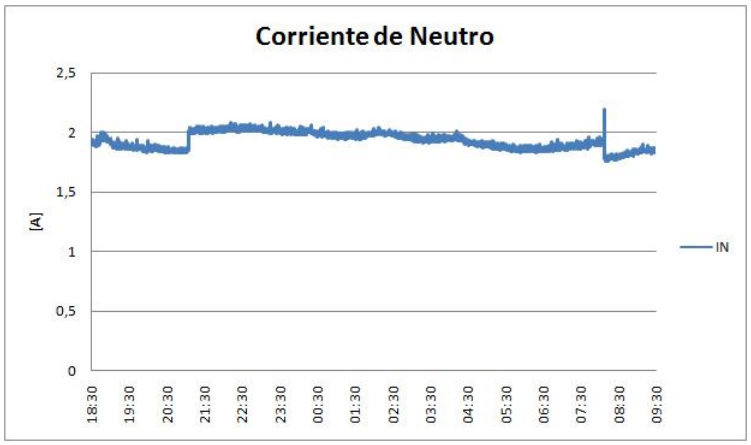


Figura A.86: Corriente de neutro

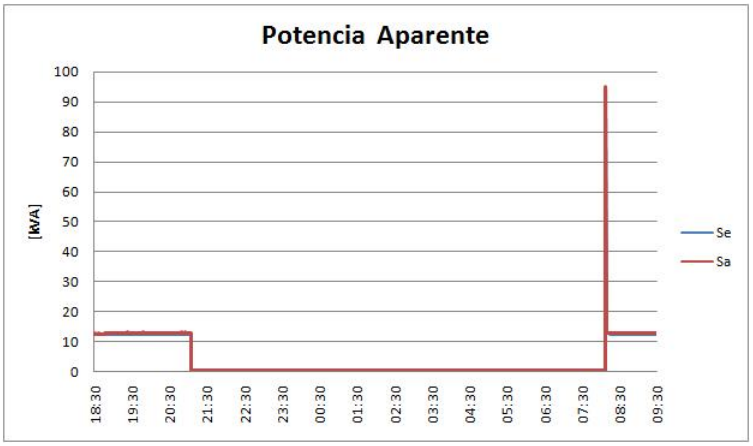


Figura A.87: Potencia aparente

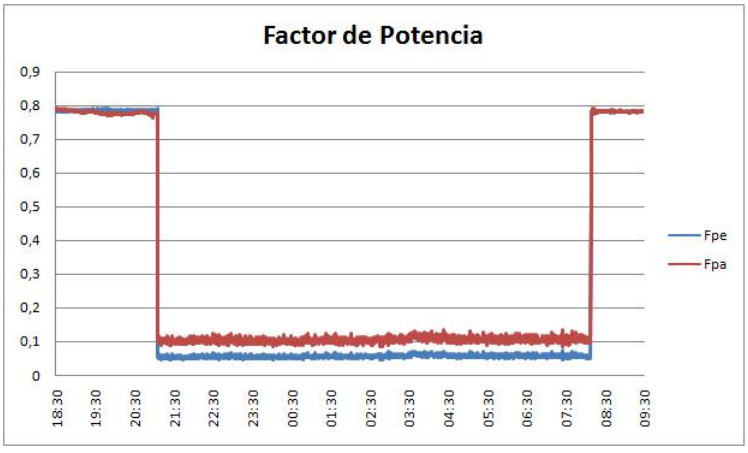
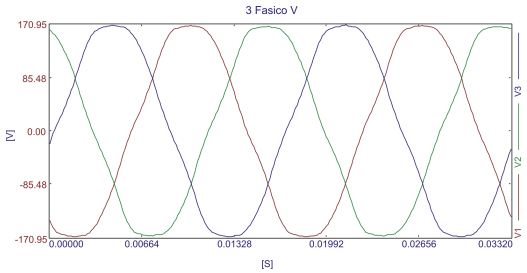


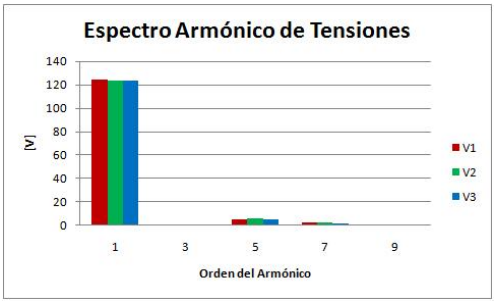
Figura A.88: Factor de potencia

A.15. Tablero RC 1-2

El tablero RC1-2 al igual que el tablero RC1-1 conforman las dos recuperadoras del sistema de aire acondicionado, por lo cual se comportan de una manera muy similar, asi mismo los dos tableros se alimentan del transformador B. En la figura A.89 se muestran las formas de onda de tensión y su respectivo espectro armónico.



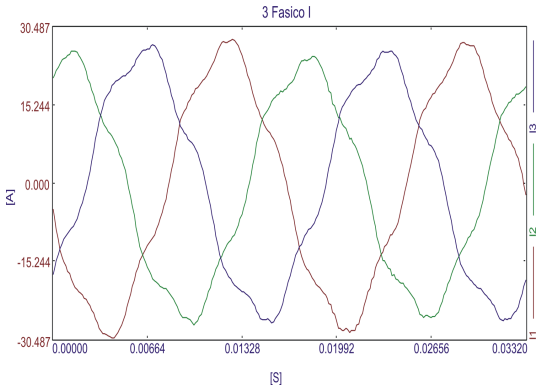
(a) Tensiones de fase



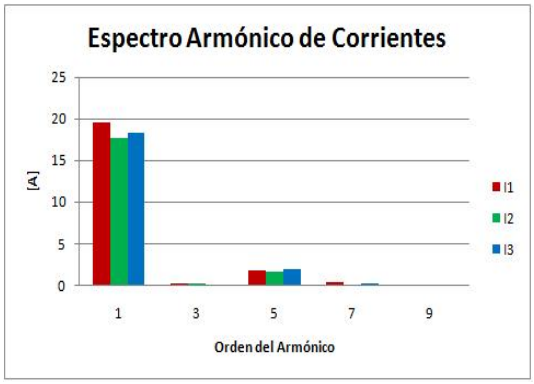
(b) Espectro armónico de tensiones

Figura A.89: Tensiones de fase del tablero RC1-2

En la figura A.89a se observa la forma de onda de las tensiones de fase del tablero, estas señales presentan un comportamiento sinusoidal casi puro, es por eso que al analizar las componentes armónicas de la figura A.89b, la componente armónica más significativa corresponde al quinto armónico con un porcentaje menor al 5 % , además se ve que no existe un desbalance considerable en magnitud de las tensiones. En la figura A.90 se presenta la gráfica de las corrientes de fase y el espectro armónico registrado en el tablero.



(a) Corrientes de fase



(b) Espectro armónico de las corrientes de fase

Figura A.90: Corrientes de fase del tablero REC1-2

La forma de onda de las corrientes de fase no muestran una distorsión significativa (ver figura A.90a), por lo que en el espectro armónico de la figura A.90b se observa sólo una contribución importante en la quinta componente armónica con un porcentaje cercano al 10 %, las demás componentes no son considerables pues el porcentaje es menor al 1 % con respecto a la fundamental. Esta distorsión en niveles bajos se debe a que por ser motores existe una gran linealidad en la carga. A continuación se resumen los analisis con base en las mediciones tomadas.

- Los voltajes de las tres fases se pueden considerar equilibrados, pues en cada instante de tiempo la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 1 Volt, durante el periodo de la monitorización.
- Se observó durante la medición valores de tensiones dentro de lo recomendado por la norma de la ESSA, en un rango que va de 121 [V] a 126 [V].
- En las corrientes de fase ocurre una oscilación durante la mayor parte de la medición, no obstante el rango de variación es cercano a los 2.5 [A]
- Se aprecia un valor de corriente de neutro reducido, esto se debe al poco contenido de armónicos de orden 3, así como al escaso desbalance entre corrientes de fase.
- Los valores de DAT en tensión, son similares entre fases con valores menores al 5 %. En cuanto a la magnitud de la DAT es reducido, con valores cercanos al 10 % por fase, estos factores se mantienen durante la monitorización del tablero.
- La potencia aritmética y la potencia efectiva registrada son muy similares, sin embargo se presenta una considerable oscilación. Igualmente el factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritmético también con la misma oscilación de la potencia aparente.

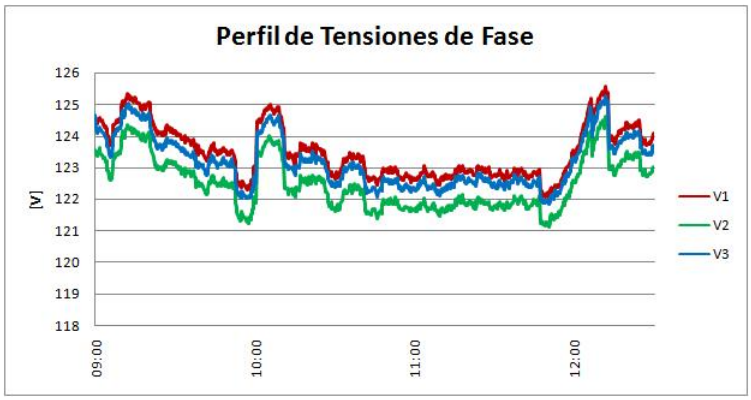


Figura A.91: Perfil de tensiones del tablero RC1-2

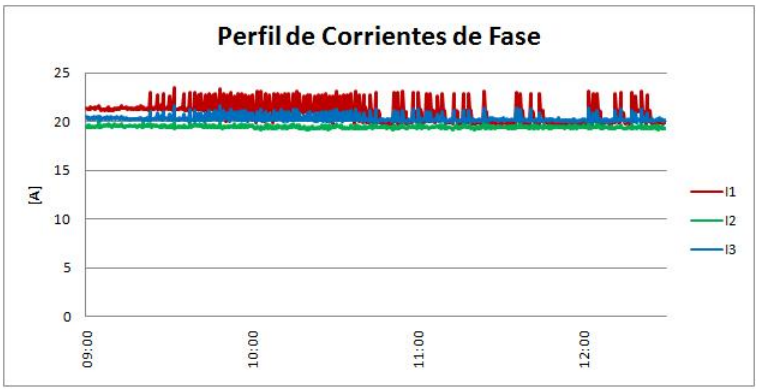


Figura A.92: Perfil de corrientes del tablero RC1-2

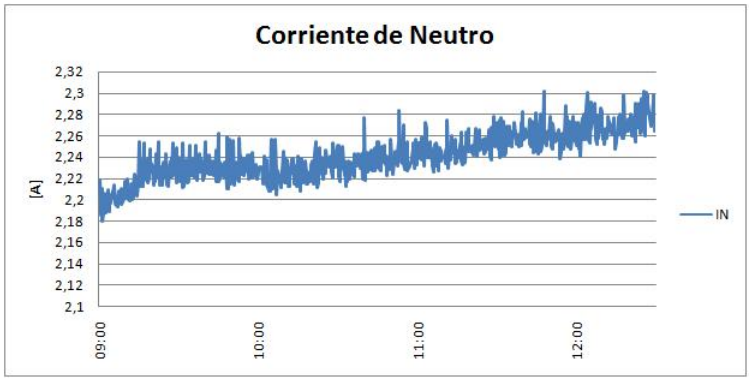


Figura A.93: Corriente de neutro del tablero RC1-2

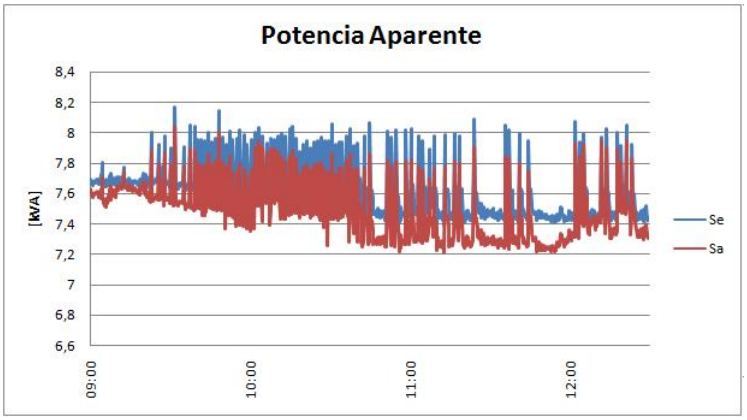


Figura A.94: Potencia aparente del tablero RC1-2

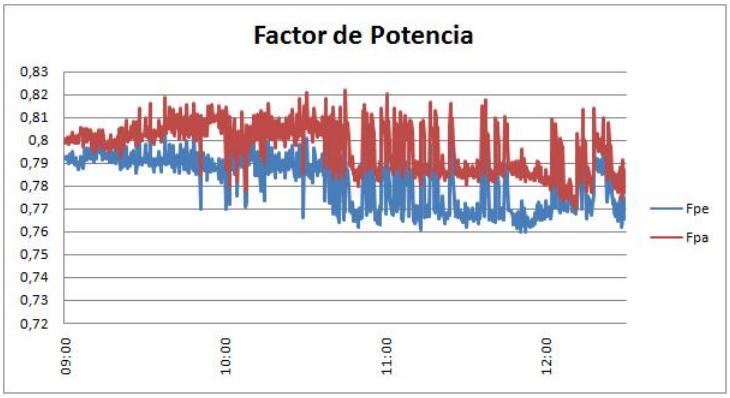


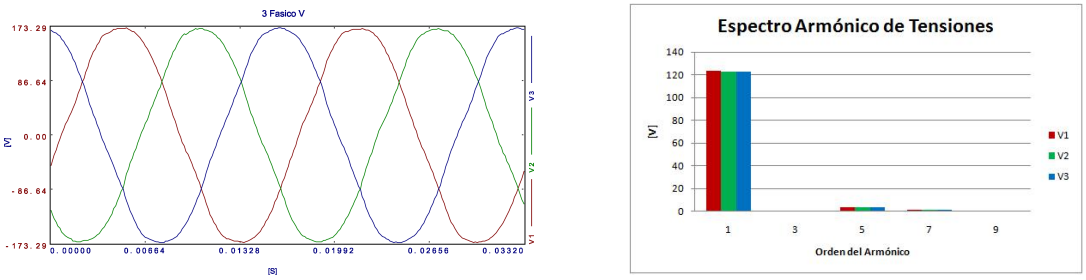
Figura A.95: Factor de potencia del tablero RC1-2

A.16. Ascensor

El ascensor es una carga muy particular debido al hecho de que su funcionamiento no es constante sino que solo se usa en algunos casos para transportar a los operarios y encargados del CENTIC, por tanto para tomar el registro fue necesario hacer la

medición con 6 personas dentro del ascensor y en movimiento por cerca de 5 minutos. Este tablero es alimentado por el transformador B.

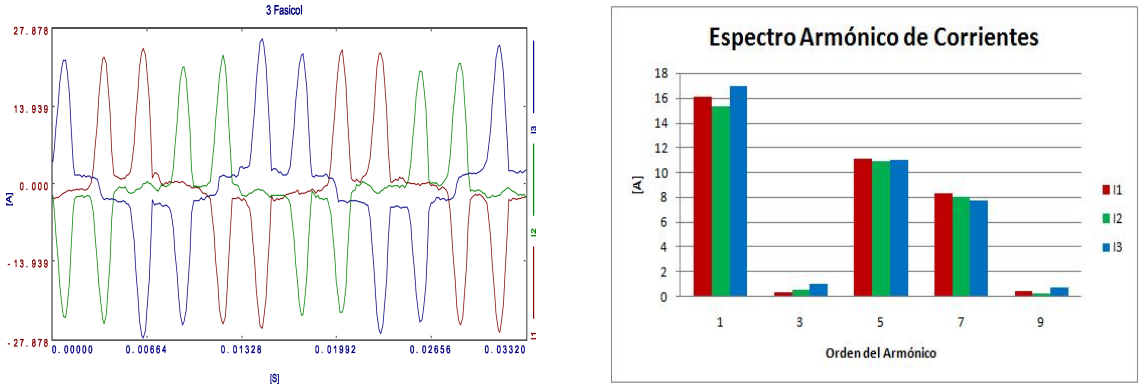
Al igual que todos los tableros correspondientes al transformador B, estos poseen las mismas características en tensión, como se observa en la figura A.96 donde se aprecia la forma de onda y su respectivo espectro armónico.



(a) Tensiones de fase (b) Espectro armónico de tensiones de fase

Figura A.96: Tensiones de fase del ascensor

En el caso de las corrientes de fase estas poseen una forma y un espectro armónico diferente con respecto a los demás tableros como se aprecia en la figura A.97, donde las componentes armónicas predominantes son el quinto con 72.7 %, 70.5 % y 64.4 % por fase, el séptimo con 51.3 %, 51.9 % y 45.4 % por fase con respecto a la fundamental, las demás componentes son poco significativas.



(a) Corrientes de fase (b) Espectro armónico de corrientes

Figura A.97: Corrientes de fase del ascensor

A continuación se resumen loa análisis de los registros tomados durante el periodo de medición:

• Las tensiones de las tres fases se pueden considerar equilibrados, debido a que la diferencia entre la fase más alta y más baja fue menos de 1 Volt.

• No existe un desbalance en corrientes de fase, pues estas son muy similares, registrando un valor pico de aproximadamente 25 A.

• La corriente de neutro permanece en un valor muy bajo en alrededor de 2.5 A antes del arranque y llega a alcanzar los 3.5 A durante la operación del motor.

• Durante la monitorización se determinó que los valores de tensión no superaban los 124 volts, con lo cual se cumple con los niveles establecidos por la norma de la ESSA.

• Con relación a la potencia aritmética y a la potencia efectiva, se observa que estas potencias son my similares, evidenciando el poco desbalance y contenido de armónicos de las señales.

• Se observa que factor de potencia efectivo es similar al factor de potencia aritmético, durante la operación del ascensor. La diferencia en estos factores de potencia se presenta cuando no hay actividad del ascensor.

• Se presenta una no linealidad en la carga debido al sistema de control del ascensor, esta distorsión no ocurre continuamente sino durante el funcionamiento del ascensor. El índice de DAT en corriente es cercano al 80 % para cada fase, un valor considerable.

• El índice de DAT en tensión es muy bajo con valores menores al 5 % , esto se cumple para todos los tableros alimentados por el transformador B.

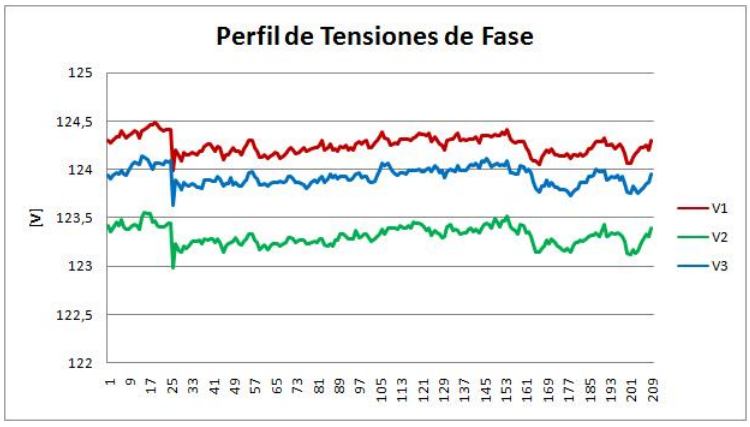


Figura A.98: Perfil de tensiones de fase del ascensor

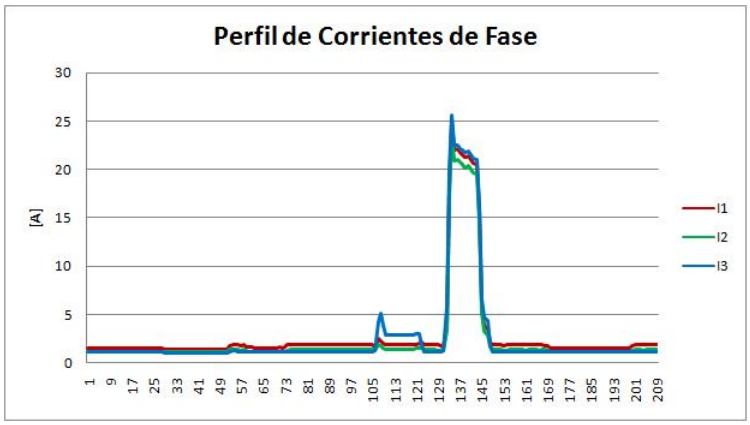


Figura A.99: Perfil de corrientes de fase del ascensor

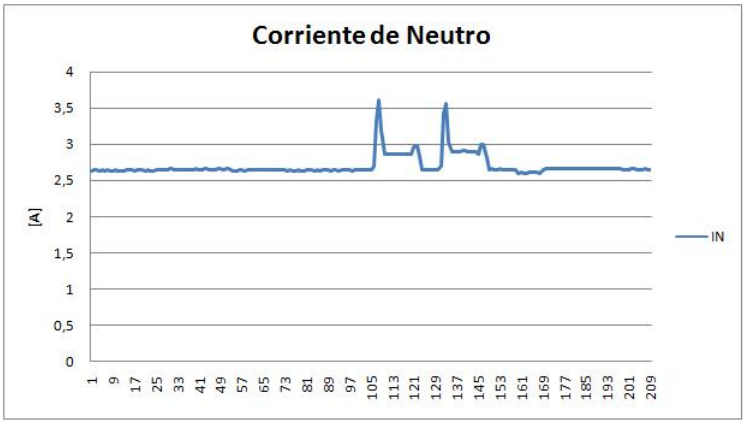


Figura A.100: Corriente de neutro del ascensor

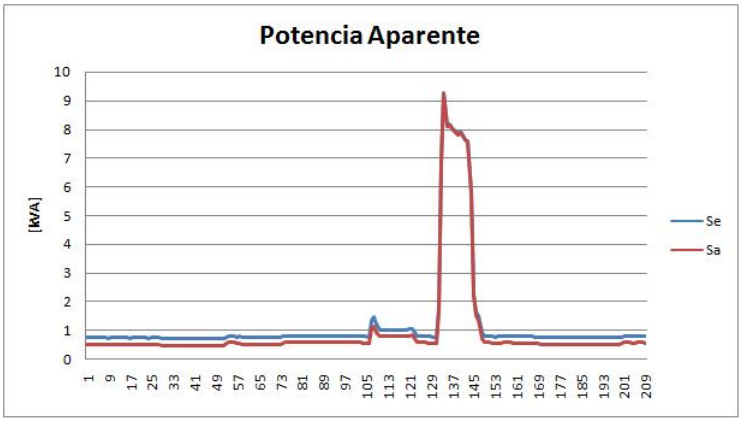


Figura A.101: Potencia aparente del ascensor

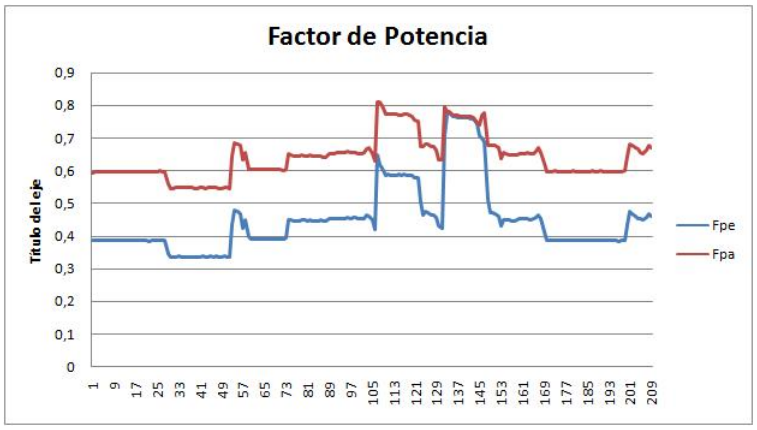


Figura A.102: Factor de potencia del ascensor

Anexo B

Balanceo de cargas en tableros de la instalación

B.1. Tablero TR3-3

Tablero TR3-3					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
1	8	3	8	5	8
2	8	4	5	6	8
7	9	9	8	11	8
8	8	10	9	12	8
13	9				
Total	42	Total	30	Total	32

Tabla B.1: Distribución actual de los circuitos del tablero TR3-3

Tablero TR3-3					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
1	8	3	8	4	5
2	8	9	8	5	8
7	9	10	9	6	8
8	8	13	9	11	8
				12	8
Total	33	Total	34	Total	37

Tabla B.2: Distribución recomendada para los circuitos del tablero TR3-3

B.2. Tablero TR4-1

Tablero TR3-3					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
1	3	3	5	5	6
2	6	4	6	6	4
7	6	9	6	11	
8	3	10	6	12	
13					
14	1				
Total	19	Total	23	Total	10

Tabla B.3: Distribución actual de los circuitos del tablero TR4-1

Tablero TR3-3					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
1	3	3	5	5	6
2	6	4	6	6	4
7	6	9	6	10	6
8	3			14	1
Total	18	Total	17	Total	17

Tabla B.4: Distribución recomendada para los circuitos del tablaro TR4-1

B.3. Tablero TR4-2

Tablero TR4-2					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
1		3		5	8
2		4		6	8
7	8	9	5	11	8
8	5	10		12	8
13	3	15		17	3
14	8	16	3	18	
19	4				
Total	28	Total	8	Total	35

Tabla B.5: Distribución atual de los circuitos del tablero TR4-2

Tablero TR4-2					
Fase A		Fase B		Fase C	
Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos	Circuito	# Equipos
7	8	8	5	5	
13	3	9	5	6	8
14	8	12	8	11	8
19	4	16	3		8
		17	3		
Total	23	Total	24	Total	24

Tabla B.6: Distribución recomendada para los circuitos del tablero TR4-2

Anexo C

Propuesta de solución a la contaminación armónica

Una vez analizados los distintos inconvenientes que acarrea a un sistema eléctrico la presencia de corrientes armónicas, e igualmente confirmar las complicaciones que se pueden presentar debido a una circulación de corriente significativamente alta por el conductor neutro, se planteará una solución que pueda comprender estas dos situaciones con el fin de resolverlos de una forma óptima y adecuada.

Una solución adecuada para este tipo de problemas la ofrecen los circuitos tipo filtro. Un filtro es un circuito eléctrico diseñado para que seleccione una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasan através de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

Existen varias formas de clasificar los filtros eléctricos de acuerdo a su utilización. Teniendo en cuenta los elementos que los constituyen los filtros se pueden clasificar en:

Filtros Pasivos: Son aquellos que están constituidos por elementos pasivos tales como resistencias, condensadores y bobinas. Su ganancia es igual o menor a la unidad [18].

Filtros Activos: Tienen aparte de los componentes pasivos elementos activos tales como fuentes de energía. Su factor de ganancia es variable de acuerdo a lo que se necesite en el ancho de banda tanto de atenuación como de paso [18].

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

- Filtros series

- Filtros paralelos

Los filtros serie evitan el paso de una componente en particular, desde el equipo contaminante hacia alguna parte o componente del sistema de potencia, mediante la presencia de una gran impedancia serie a la frecuencia especificada [5].

Los filtros en paralelo proveen un paso alternativo de muy baja impedancia para las frecuencias armónicas, y casi siempre consisten en una rama resonante serie compuesta con elementos RLC en conexión paralela con el sistema de alimentación [5].

En la utilización de un filtro como solución a un problema se deben tener en cuenta una serie de situaciones de las que dependerá la elección del filtro adecuado.

Dependiendo del número de armónicos existentes en el sistema, se puede determinar la cantidad de filtros que se podrían ubicar para obtener una atenuación de dichas componentes. La magnitud de cada armónico está directamente relacionada con las pérdidas que estas componentes ocasionan en el sistema de potencia.

La ubicación del filtro también constituye un factor fundamental a la hora de pensar en algún tipo de compensación.

Existen dos opciones para ubicar un filtro pasivo en paralelo para armónicos (ver figura C.1):

La primera, en el alimentador de media tensión con el fin de disminuir las pérdidas del sistema, la segunda, cerca de la carga no lineal (baja tensión), para evitar la inyección de componentes armónicas de corriente al sistema por parte de la carga. Esta última opción muy adecuada ante la existencia de cargas altamente contaminantes. Al ubicar el filtro en el lado de baja tensión el transformador de potencia sirve de amortiguador (aislante de armónicos) tanto de corrientes armónicas provenientes de otras cargas como de las corrientes armónicas generadas por la carga no lineal, lográndose aislar el problema [5].

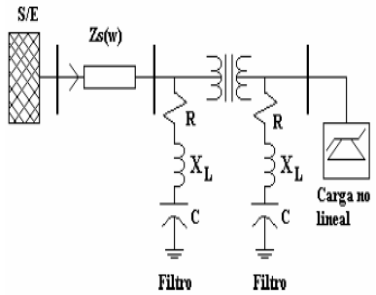


Figura C.1: Posibles ubicaciones de un filtro pasivo

Debido a que el CENTIC posee una gran cantidad de cargas no lineales como lo son equipos de cómputo y a que la componente armónica más significativa en corriente es la tercera, se propone que la mejor opción para un filtro es un circuito que atenúe el tercer armónico en corriente y que esté ubicado cerca de la carga no lineal, es decir en cada uno de los tableros de alimentación de las salas de computadores. Para ello se proponen dos tipos de filtro uno ubicado en serie con la carga y otro en paralelo.

C.0.1. Propuesta para un Filtro Serie

Una de las configuraciones propuestas para un filtro serie consiste en un filtro pasivo doblemente sintonizado (ver figura C.2). Este circuito consta de dos ramas principales, una rama RLC en serie en la que se sintoniza la frecuencia que se desea circule por el conductor, para nuestro caso 60 Hz, mientras que con los elementos de la segunda rama RL en paralelo con C se sintoniza el circuito para que bloquee las componentes de corriente de una determinada frecuencia armónica, en este caso 180 Hz [19].

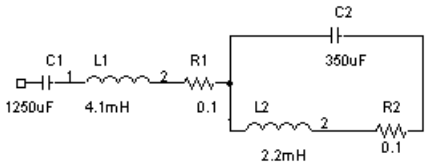


Figura C.2: Filtro pasivo doblemente sintonizado

La función de transferencia correspondiente a este circuito pasivo se presenta a continuación:

$$H(s) = \frac{S^2 L1C1+RC1S+1}{SC1} + \frac{R+SC2}{S^2 L2C2+SRC2+1}$$

La gráfica de la magnitud de la función de transferencia del filtro se muestra en la figura C.3, en ella se puede observar que el filtro presenta una baja impedancia para una frecuencia de 60 Hz y una alta impedancia para una frecuencia de 180 Hz y algunas frecuencias superiores a esta, lo que quiere decir que las componentes de corriente armónica superiores al orden tres serán significativamente disminuidas mientras que la componente fundamental a 60 Hz podra circular por el conductor en que esté ubicado el filtro.

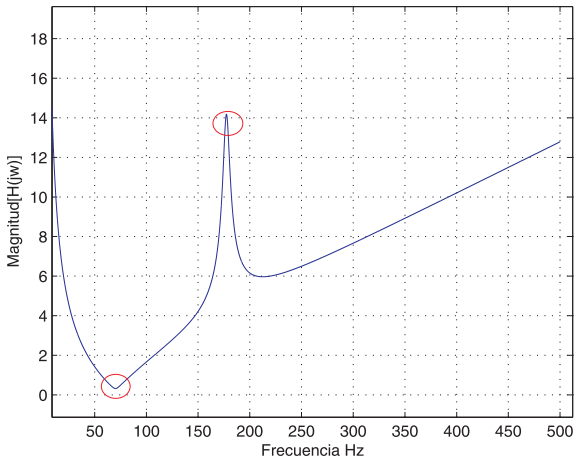


Figura C.3: Respuesta en frecuencia del filtro

Con el fin de observar el comportamiento del filtro dentro de un sistema eléctrico, se realizará una comparación entre los resultados obtenidos de simular diferentes escenarios, con el filtro ubicado en cada fase o bien en el conductor neutro. El primer escenario a simular corresponde a una sala de cómputo con 12 equipos por fase como el mostrado en la figura C.4, en esta simulación el filtro está ubicado en cada fase en serie con la impedancia de línea de las mismas.

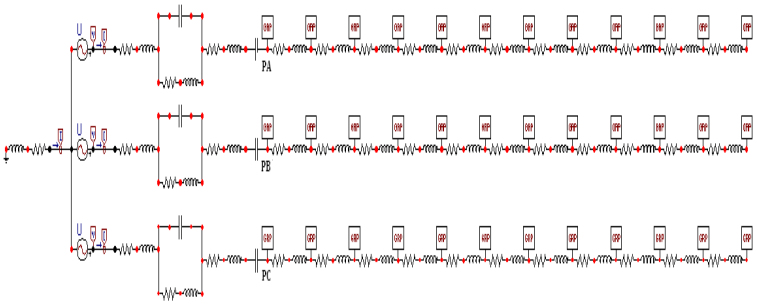
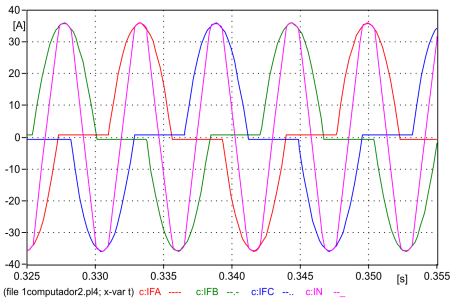
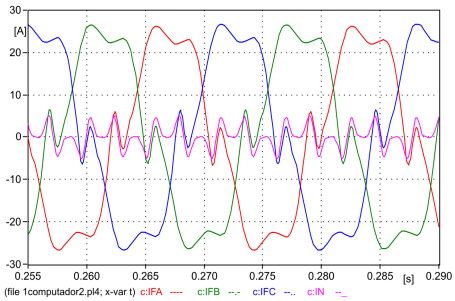


Figura C.4: Sistema con 12 equipos y filtro por fase

La gráfica con las corrientes de fase y de neutro del sistema sin filtro y con filtro se muestran en las figuras C.5ay C.5b respectivamente. En estas figuras se puede observar que las corrientes de fase del sistema con filtro presentan una forma de onda menos distorsionada y una amplitud de la corriente de neutro menor con respecto a las corrientes obtenidas en la figura C.5a.



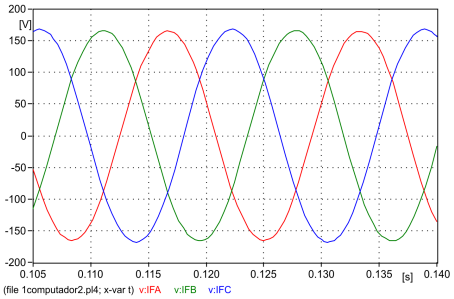
(a) Corriente 12 equipos por fase sin filtro



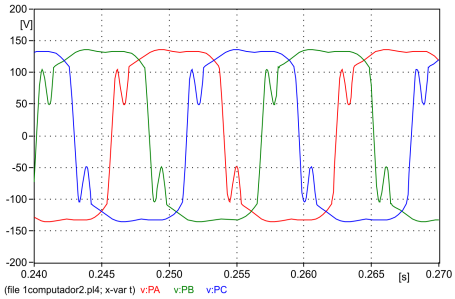
(b) Corriente 12 equipos con filtro en las fases

Figura C.5: Corrientes simuladas con filtro y sin filtro en las fases

En la figura C.6se puede apreciar la diferencia entre las tensiones de la fuente de alimentación con las tensiones que ve directamente la carga, en las que se aprecia una distorsión significativa en sus formas de onda y una magnitud menor a la de las tensiones de fuente.



(a) Tensiones de la fuente



(b) Tensiones vistas por la carga

Figura C.6: Tensiones obtenidas de la simulación del sistema

En la tabla C.1 se puede observar que la corriente del tercer armónico tiene una reducción significativa en las corrientes de fase cuando está operando el filtro, con respecto al valor cuando el sistema opera sin él. Asimismo se puede ver que la corriente circulante por el neutro también presenta una reducción significativamente alta de la tercera componente armónica, en comparación con la registrada cuando el sistema opera sin filtro.

Orden del armónico	Componentes armónicas sistema sin filtro		Componentes armónicas sistema con filtro	
	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)
1	20.58	0	19.3	0
3	9.39	17.15	3.28	1.122
5	1.080	0	1.451	0
7	0.8	0	1.127	0

Tabla C.1: Comparación de componentes armónicas en un sistema con filtro y sin filtro

Debido a que se pueden presentar momentos en los que los computadores no esten siendo utilizados en su totalidad dentro de una sala, a continuación se simulará un nuevo escenario con el fin de observar el comportamiento que tiene el filtro operando en un sistema desbalanceado. El escenario a simular se observa en la figura C.7 .

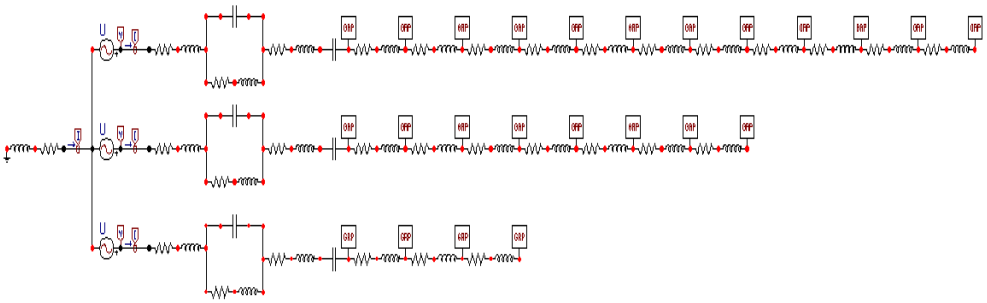


Figura C.7: Sistema desbalanceado con filtro en cada fase

En la figura C.8 se muestran las corrientes de fase así como la corriente de neutro obtenidas en la simulación del sistema desbalanceado. En esta figura se puede observar que la forma de las corrientes es muy similar a la obtenida en la simulación anterior, pero existe una diferencia considerable entre la magnitud de la corriente que circula por el conductor neutro en este escenario con respecto al simulado anteriormente.

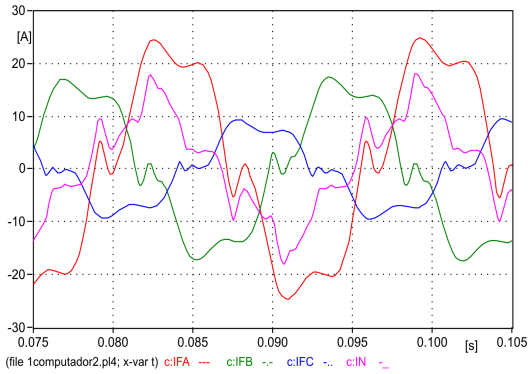


Figura C.8: Corriente simulada del sistema desbalanceado con filtro en las fases

En la tabla C.2 se muestran los valores de las magnitudes de las componentes armónicas en corriente para las tres fases así como para el neutro. En esta tabla se puede apreciar que la corriente más significativa en el neutro es la componente fundamental producto del desbalance de carga existente entre las fases del sistema. También se puede observar que el filtro opera satisfactoriamente ya que las componentes armónicas presentan valores sustancialmente bajos con respecto a los registrados en las componentes fundamentales tanto de las fases como del neutro.

Orden del armónico	Corriente fase A (A)	Corriente fase B (A)	Corriente fase C (A)	Corriente por el neutro (A)
1	19.78	12.26	7.478	11.36
3	1.865	2.416	0.5028	0.6814
5	1.237	0.9352	0.4163	0.721
7	0.6791	0.6691	0.2606	0.2661

Tabla C.2: Componentes armónicas de un sistema desbalanceado con filtro

En la simulación de los dos escenarios anteriores se ha observado el comportamiento del filtro tanto en un sistema balanceado como en uno desbalanceado, apreciándose en estas simulaciones una reducción considerable del tercer armónico en las corrientes de fase al igual que en la corriente del neutro, igualmente se observó que debido a la ubicación del filtro en cada una de las fases la tensión que ve la carga presenta una onda muy distorsionada y con un valor en su magnitud menor al de la fuente.

A continuación se simulará uno de los escenarios analizados anteriormente pero ahora con el mismo filtro ubicado en el conductor neutro como el observado en la figura C.9.

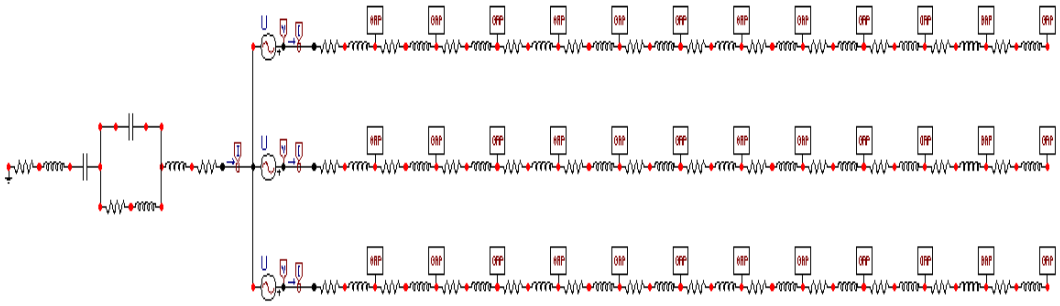
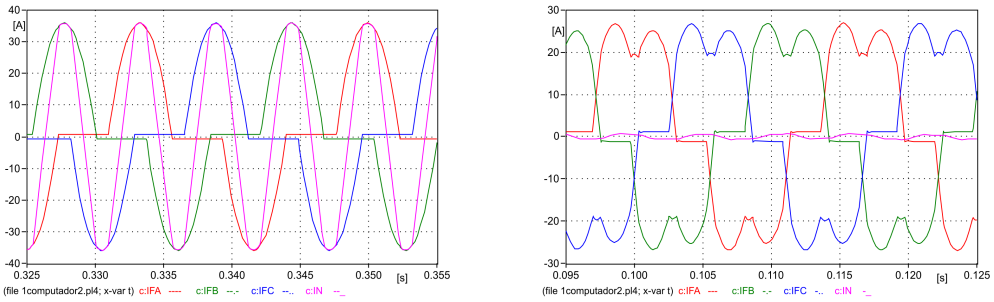


Figura C.9: Sistema con 12 equipos y filtro en el neutro

Las corrientes de fase y de neutro obtenidas de la simulación del sistema sin filtro y con el filtro ubicado en el conductor neutro se pueden apreciar en las figuras C.10a y C.10b respectivamente, en ellas se puede ver que la forma de onda de las corrientes del sistema con el filtro presentan una forma menos distorsionadas y una corriente por el conductor neutro menor que las obtenidas en la figura C.10a.



(a) Corriente sistema sin filtro (b) Corrientes sistema con filtro

Figura C.10: Corrientes de fase sistema con filtro y sin filtro

Las tensiones de fase que ve la carga se pueden ver en la figura C.11. En estas señales se aprecia una distorsión de las ondas con respecto a una sinusoidal pura y un valor pico igual al de la fuente de alimentación.

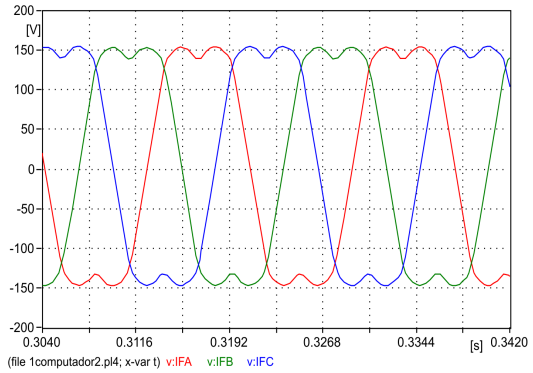


Figura C.11: Tensiones de fase sistema con filtro en el neutro

En la tabla C.3 se puede observar la comparación entre el valor de las componentes armónicas de corriente del sistema con el filtro ubicado en cada una de las fases y el sistema con el filtro ubicado en el conductor neutro. En esta tabla se puede ver que la diferencia entre estos valores armónicos en las fases para los dos sistemas es pequeña, mientras que en el conductor neutro si se aprecia disminución mayor en estas magnitudes debido a que es allí en donde directamente se ubica el filtro para el segundo caso de estudio.

Orden del armónico	Componentes armónicas sistema con filtro en las fases		Componentes armónicas sistema con filtro en el neutro	
	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)
1	19.3	0	19.6	0
3	3.28	1.122	3.398	0.3118
5	1.451	0	1.717	0
7	1.127	0	1.167	0

Tabla C.3: Comparación de componentes armónicas para un sistema con filtro en las fases y filtro en el neutro

El siguiente escenario a simular corresponde al sistema desbalanceado pero con el filtro ubicado en el conductor neutro como se puede ver en la figura C.12.

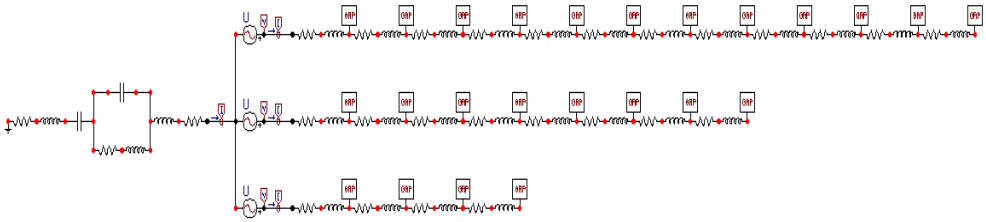


Figura C.12: Sistema desbalanceado con filtro en el neutro

En la figura C.13 se pueden apreciar las corrientes de fase y de neutro resultado de la simulación.

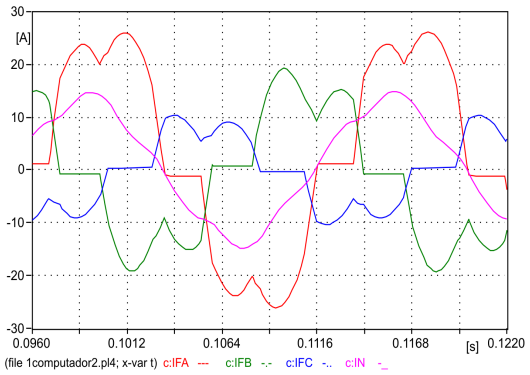


Figura C.13: Corriente simulada sistema desbalanceado con filtro en el neutro

La comparación entre los valores de las componentes armónicas de corriente para los dos sistemas desbalanceados con el filtro ubicado en las fases y el filtro ubicado en el neutro se pueden observar en la tabla C.4. En esta tabla se puede ver que la diferencia entre los valores de cada componente armónica en la simulación del sistema con el filtro ubicado en las fases, con respecto al sistema con el filtro ubicado en el neutro es mínima siendo esta un poco mas evidente para el conductor neutro en el que se aprecia una diferencia mayor entre las magnitudes de las componentes para los dos casos de estudio.

C.0.2. Propuesta para un Filtro en Paralelo

Una de las configuraciones mas usadas para un filtro paralelo se puede observar en la figura C.14, este filtro consta de una rama RLC en serie la cual es sintonizada para que no permita el paso de una determinada componente armónica.

Orden del armónico	Componentes armónicas sistema desbalanceado con filtro en las fases				Componentes armónicas sistema desbalanceado con filtro en el neutro			
	Corriente fase A (A)	Corriente fase B (A)	Corriente fase C (A)	Corriente por el neutro (A)	Corriente fase A (A)	Corriente fase B (A)	Corriente fase C (A)	Corriente por el neutro (A)
1	19.78	12.26	7.478	11.36	21.01	12.4	7.662	11.5
3	1.865	2.416	0.5028	0.6814	2.651	2.42	0.8073	0.5666
5	1.237	0.9352	0.4163	0.721	1.102	1.112	0.3425	0.426
7	0.6791	0.6691	0.2606	0.2661	0.6583	0.6698	0.2744	0.2459

Tabla C.4: Valores de las componentes armónicas

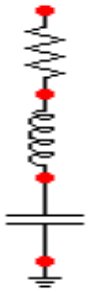


Figura C.14: Filtro paralelo propuesto para el sistema

La frecuencia a la cual se va a sintonizar el filtro es 180 Hz, es decir la frecuencia del tercer armónico. Para determiar el valor de los parámetros del filtro se utilizan las siguientes fórmulas en donde Qc es la potencia reactiva que el filtro va a suministrar al sistema, h es el número del armónico al cual se va a sintonizar el filtro y Q es el factor de calidad utilizado para dicho filtro [referencia].

$$X_c = \frac{1}{W_c} = \frac{[V]^2}{Q_c} \tag{C.1}$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \tag{C.2}$$

$$L = \left(\frac{1}{2\pi f h\sqrt{C}}\right)^2 \tag{C.3}$$

$$X_{Lh} = W_h L \tag{C.4}$$

$$R = \frac{X_{Lh}}{Q} \tag{C.5}$$

Los parametros obtenidos por medio de las fórmulas anteriormente descritas para un sistema con 12 equipos por fase como el simulado en la sección 5.3.1 son los siguientes: C=28.7µF, L=27mH, R=0.51 con una potencia de 13 VAR por equipo de acuerdo a los resultados obtenidos en las mediciones realizadasa los distintos tableros de alimentación de las salas y un factor de calidad de 60.

La función de transferencia correspondiente al circuito del filtro se presenta a continuación.

$$H(s) = \frac{S^2 L1C1 + RC1S + 1}{SC1} \tag{C.6}$$

La gráfica de la magnitud de la función de transferencia del filtro se muestra en la figura C.15, en ella se puede observar que el filtro presenta una baja impedancia para una frecuencia de 180 Hz correspondiente al tercer armónico y una impedancia alta para las demás frecuencias, lo que quiere decir que cualquier corriene a 180 Hz pasará a través de el filtro y las otras componentes circularán a la carga normalmente.

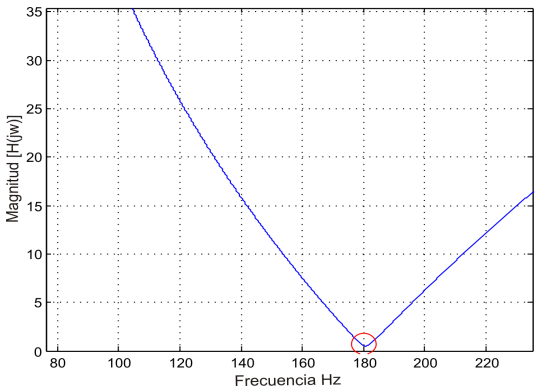


Figura C.15: Respuesta en frecuencia del filtro

Con el fin de contrastar los resultados obtenidos en la sección anterior en donde se verificó el funcionamiento de un filtro en serie ubicado en las fases del sistema asi como en el neutro del mismo, con los resultados a obtener con la simulación de un sistema con un filtro ubicado en forma paralela con la carga, se realizarán las mismas pruebas con los mismos escenarios simulados anteriormente.

El primer escenario a simular corresponde al sistema balanceado con 12 computadores pr fase que ya se ha simulado anteriormente (ver figura C.16)pero ahora con el

filtro ubicado en paralelo con la carga. Con el fin de brindar una mayor comodidad al lector se ha comprimido el filtro en un bloque que internamente presenta las mismas características del circuito original.

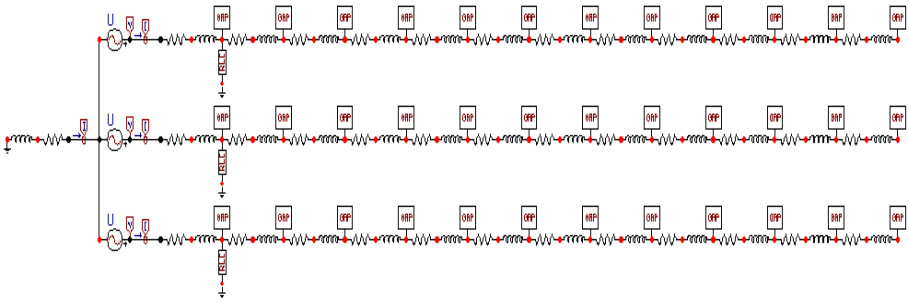
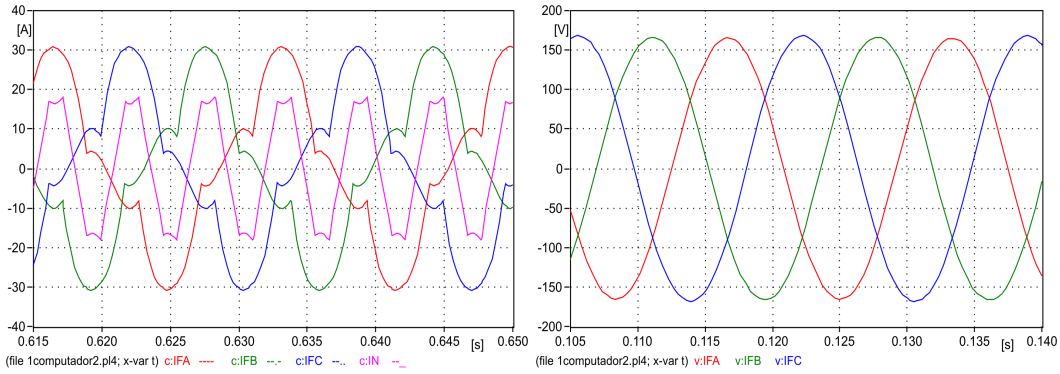


Figura C.16: Sistema con 12 equipos por fase y filtro en paralelo

Las corrientes de fase y de neutro asi como las tensiones de fase obtenidas en la simulación se pueden apreciar en las figuras C.17a y C.17b respectivamente. En ellas se puede apreciar que las corrientes de fase presentan una onda un poco menos distorsionada que la corriente original obtenida cuando en el sistema no opera ningún filtro. Las tensiones de fase siguen presentando su amplitud y forma sinusoidal original.



(a) Corrientes de fase y neutro obtenidas en la simulación

(b) Tensiones de fase obtenidas en la simulación

Figura C.17: Corrientes y tensiones obtenidas en la simulación

En la tabla C.5 se puede apreciar la comparación entre los valores de las componentes armónicas para un sistema sin filtro y con el filtro ubicado en paralelo. En dicha tabla se puede ver que las componentes armónicas especialmente en el conductor neutro

presentan una reducción significativa en el sistema cuando opera el filtro paralelo con respecto al sistema original sin él.

Orden del Armónico	Sistema sin Filtro		Sistema con Filtro Paralelo	
	Corriente de Fase (A)	Corriente de Neutro (A)	Corriente de Fase (A)	Corriente de Neutro (A)
1	20.58	0	21.42	0
3	9.39	17.15	6.56	8.517
5	1.080	0	0.722	0
7	0.8	0	1	0

Tabla C.5: Comparación de componentes armónicas para un sistema sin filtro y con filtro en paralelo

El siguiente escenario a simular corresponde a un sistema desbalanceado como el mostrado en la figura C.18.

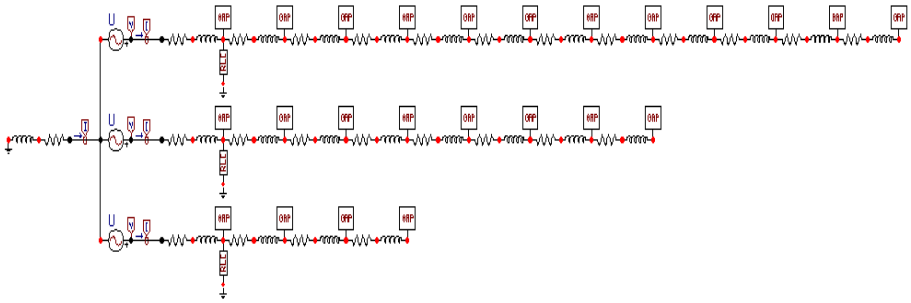


Figura C.18: Sistema desbalanceado con filtro paralelo

Las corrientes de fase y de neutro producto de la simulación se pueden observar en la figura C.19.

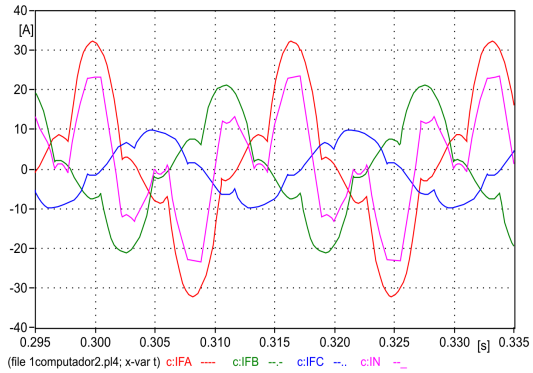


Figura C.19: Corrientes sistema desbalanceado con filtro paralelo

Las magnitudes de las corrientes armónicas de esta simulación se pueden observar en la tabla C.6.

Orden del Armónico	Corriente de Fase A (A)	Corriente de Fase B (A)	Corriente de Fase C (A)	Corriente de Neutro (A)
1	24.69	14.62	8.722	13.47
3	3.05	4.49	0.6976	6.06
5	2.844	0.452	0.7144	3.089
7	1.88	0.740	0.494	1.557

Tabla C.6: Componentes armónicas de un sistema desbalanceado con filtro paralelo

C.0.3. Comparación de Resultados de los Filtros Estudiados

Con el fin de escoger una solución al problema de contaminación armónica se realizará una comparación entre los resultados de las corrientes armónicas obtenidas en las simulaciones de los distintos escenarios simulados. En las tabla C.7 se realiza la comparación entre los resultados obtenidos de la simulación de un escenario con 12 equipos por fase simulados en las dos secciones anteriores.

Orden del Armónico	Componentes sistema balanceado filtro en las fases		Componentes sistema balanceado filtro en el neutro		Componentes sistema desbalanceado filtro paralelo	
	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)	Corriente de fase (A)	Corriente de neutro (A)
1	19.3	0	19.6	0	21.42	0
3	3.28	1.122	3.398	0.3118	6.56	8.517
5	1.451	0	1.717	0	0.722	0
7	1.127	0	1.167	0	1	0

Tabla C.7: Comparacion sistema balanceado con los tres filtros

En la tabla anterior se puede ver que el filtro que ofrece una mayor disminución de las componentes armónicas en las tres fases es el filtro en serie ubicado en cada una de ellas. Asimismo se puede ver que en el conductor neutro la mejor opción para la reducción de corriente armónica se obtiene con el filtro en serie ubicado sobre este conductor. El filtro en paralelo a pesar de ofrecer reducción de distorsión armónica en las fases y en el neutro no ofrece una reducción significativa comparada con el filtro serie ubicado ya sea en las fases o en el neutro. Por otro lado la mayor distorsión armónica en las tensiones que ve la carga se presentan cuando se simula el sistema con el filtro ubicado en cada fase. Por esta razón el filtro que se recomienda usar en las instalaciones del CENTIC es el filtro en serie ubicado en el conductor neutro ya que primero la disminución de las componentes armónicas sobre todo la tercera es significativamente alta, segundo la distorsión en las ondas de tensión que ve la carga es mínima y su valor RMS es el mismo de la fuente por lo que es facil para el rectificador de cada computador transformar esta señal a corriente continua, es por esto que este tipo de filtro solo debe usarse en los tableros que poseen equipos de cómputo y tercero porque economicamente posee mayor viabilidad adquirir un solo filtro por tablero que tres de ellos.

Anexo D

Estudio de resonancia en las instalaciones de la UIS[1]

Debido a que el CENTIC es una instalación que cuenta con un banco de condensadores que le permite compensar la potencia reactiva consumida por los sitemas de aire acondicionado del edificio, es posible que en la interacción del banco de condensadores con las corrientes armónicas que se generan en el transformador A de la instalación, se puedan presentar frecuencias en las que el sistema en general pueda entrar en resonancia, lo cual podria generar la aparición de transitorios y sobretensiones no solo en este edificio sino tambien en las demás instalaciones de la Universidad.

Con el fin de observar el efecto que crea el banco de condensadores del CENTIC en todo el sistema, es necesario analizar la respuesta en frecuencia que posee el circuito de la figura D.1. En esta figura se puede ver como siete de los transformadores de la UIS son alimentados en paralelo por una única linea de entrada, también se observa que el único transformador en la universidad que posee compensación de reactivos es el transformador B del CENTIC. Las impedancias de cada uno de los transformadores al igual que la de la línea que alimenta la Universidad están dados en valores en por unidad bajo una base común tomada de los datos de placa del transformador B del CENTIC. $S_{base} = 500kVA$, $V_{base} = 216$V y $Z_{base} = 0{,}093312\Omega$. Asimismo las impedancias que representan las cargas alimentadas por cada transformador fueron calculadas de acuerdo a los valores de potencia activa y potencia reactiva registrados en las mediciones realizadas a cada uno de los transformadores, algunos como en el caso del

[1]Universidad Industrial de Santander

CENTIC obtenidos durante la realización de este proyecto y los demás obtenidos con base a estudios anteriormente realizados a otras instalaciones de la Universidad cuyos valores se pueden ver en [3] .

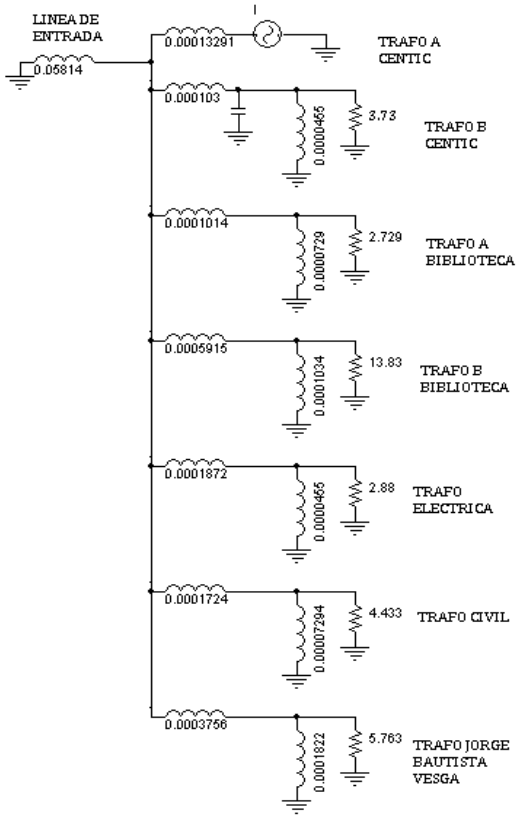


Figura D.1: Sistema eléctrico reducido de la UIS

La respuesta en frecuencia del circuito visto desde el punto común de alimentación de todos los transformadores se puede apreciar en la figura D.2. En esta figura se pueden ver las diferentes frecuencias de resonancia que tiene el sistema a medida que se varian los pasos de compensación del banco de condensadores del CENTIC. Se puede ver claramente una tendencia a que la frecuencia de resonancia se corra hacia la izquierda a medida que se introducen condensadores a la red, alcanzando un valor muy cercano a los 300 Hz cuando todo el banco de condensadores esta operando.

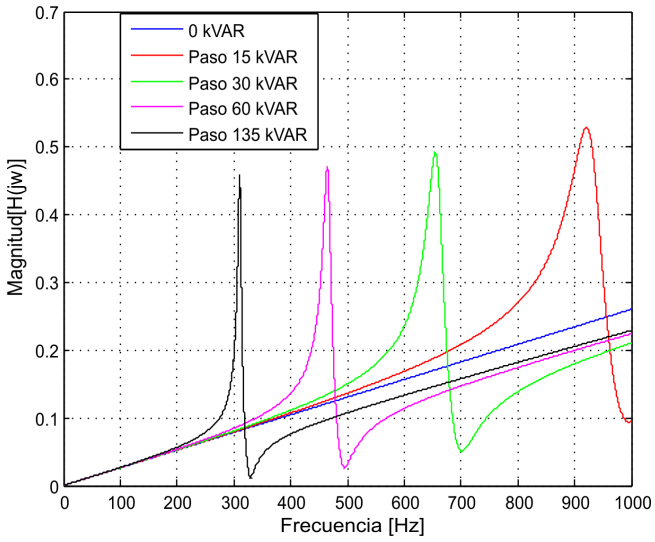


Figura D.2: Respuesta en frecuencia sistema eléctrico de la UIS

Estas frecuencias de resonancia presentan valores muy cercanos a las frecuencias del quinto y séptimo armónico en corriente registradas en las mediciones realizadas al transformador A del CENTIC, lo cual implica que una corriente armónica no muy alta pueda ocasionar significativas sobretensiones y transitorios en todo el sistema interconectado de la universidad.

Bibliografía

[1] *Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución. Electrificadora de Santander S.A.* 2005.

[2] *Reglamento Técnico de Intalaciones Eléctricas, RETIE, COLOMBIA.* Agosto 2008.

[3] Sergio A. Ramirez Aponte. *Levantamiento de las redes eléctricas externas de media tensión del campus central de la universidad industrial de santander.* Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, 2007.

[4] Fred Beck. Energy smart data centers: Applying energy efficient design and technology to the digital information sector. Technical report, Renewable Energy Policy Project, www.repp.org, November 2001.

[5] Marcelo Aristizabal Naranjo y Ramón A. Gallego Carlos A. Rios Porras. Análisis de armónicos en sistemas eléctricos. *Universidad Tecnologica de Pereira*, 2003.

[6] Hans de Keulenaer. Guía para una autovaloración de la calidad de la energía. Technical report, European cooper institute, www.lpqi.org, Mayo 2002.

[7] Comision de Regulación de Energia y Gas (CREG). Resolución 108. (1997) por la cual se señalan criterios generales sobre protección de los derechos de los usuarios de los servicios públicos domiciliarios de energía eléctrica y gas. *Comision de Regulación de Energia y Gas (CREG)*, 1997.

[8] Jan Desmet and Angelo Baggini. Dimensionado del neutro en las instalaciones ricas en armónicos. Technical report, www.lpqi.org, Junio 2003.

[9] Bekiarov Stoyan B Emadi Ali, Nasiri Abdolhosein. *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters.* 2005.

[10] Proyectos especiales de ingenieria LTDA. *Proyectos especiales de ingenieria PEI*. www.peipower.com, 2000.

[11] Brian Fortenbery. Power quality in internet data centers. Technical report, Electric Power Research Institute, www.leonardo-energy.org, November 2007.

[12] IEEE. Std c57.110: Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents. *IEEE standards board*, 1998.

[13] P. S. E. IEEE. Std 519-1992: Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. *IEEE Standard*, 1993.

[14] P. S. E. IEEE. Std 1159-1995: Recommended practice for monitoring electric power quality. *IEEE Standard*, 1995.

[15] P. S. E. IEEE. Std 1459-2000: Trial-use standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Standard*, 2000.

[16] P. S. E. IEEE. Recommended practice for powering and grounding electronic equipment. *IEEE standards board*, December 2005.

[17] IEC International Electrotechnical Commission. 61000-2-4 ed. 2.0 spanish. niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales. *IEC*, 2002.

[18] Patricio Salmerón y Salvador P. Litrán Jesús R. Vasquez. Diseño de filtros pasivos, activos e hibridos para la compensación armónica de cargas trifásicas no lineales. 2005.

[19] Lawrance and W. Mielczarski V.G Agelidis. Reduction of harmonic currents in fluorescent lighting systems: Design and realisation. *IEEE*, 2003.

[20] Henryk Markiewicz and Antoni Klajn. Puesta a tierra y emc. sistemas de puesta a tierra fundamentos de cálculo y diseño. Technical report, www.lpqi.org, Junio 2003.

[21] Columbus OH. Thomas M. Gruzs, Liebert Corp. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. *IEEE Transactions on*, pages 719–725, 2005.

[22] Roberto Villafáfila and Andreas Sumper. Selection criteria of high-power static uninterruptible power supplies. In *9 th International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation*, October 2007.

[23] Min Wang. *Pattern recognition methology for network-based diagnostics of power quality problems*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering University of Washington, 2004.

[24] Jenny Johanna Pacheco López y Alfonso Peñuela Ayala. *Propuesta metodológica para la valoración de los costos debidos a una inadecuada calidad en la continuidad del suministro de la energía eléctrica*. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, 2004.

[25] Jorge Ardila y Erika Rodriguez. *Diseño de un programa para el uso racional y eficiente del consumo de energia eléctrica en el proceso de extracción del crudo del campo-escuela colorado*. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, 2008.

[26] Pavas Martínez y Fabio Andrés. *Evaluación de la Calidad de la Potencia en Baja Tensión de una Instalación Industrial*. Tesis de grado Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, 2002.

[27] Victor Augusto Barrera Nuñez y Jorge Andres Cormane Angarita. *Predicción de corrientes armónicas en ventanas de carga residenciales, mediante modelos neuronales artificiales*. Tesis de grado Universidad Industrial de Santander, 2003.

[28] Monroy Arévalo Iván y Rojas Martínez Andrés J. *Estrategias para la Corrección de Potencia Reactiva y Reducción de Armónicos en el Edificio de Aulas de Ingenierías*. Tesis de grado Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, 2002.