



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS
SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS
PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS
TRANSCOLD INGENIERÍA GUATEMALA S.A.**

Edgar Miguel Rodas Mayén

Asesorado por el Inga. Ingrid Salome Rodríguez de Loukota

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS
SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS
PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS
TRANSCOLD INGENIERÍA GUATEMALA S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDGAR MIGUEL RODAS MAYÉN

ASESORADO POR LA INGA. INGRID SALOME RODRÍGUEZ DE LOUKOTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Helmunt Federico Chicol Cabrera
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salome Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Julio Cesar Solares Peñate
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS
SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS
PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS
TRANSCOLD INGENIERÍA S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de junio de 2019.

Edgar Miguel Rodas Mayén

Guatemala 7 de julio de 2020

Ingeniero
Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apreciable Ingeniero Rivera.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado "**Diseño del plan de mantenimiento preventivo y correctivo en los sistemas de control de cámaras climáticas tomando en cuenta los parámetros de humedad y temperatura para el laboratorio de pruebas Transcold Ingeniería Guatemala, S.A.**", del señor **Edgar Miguel Rodas Mayén**, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesora, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones de este.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Inga. Ingrid Rodríguez de Loukota
Colegiada 5,356
Asesora

Ingrid Rodríguez de Loukota
Ingeniera en Electrónica
colegiado 5356

Guatemala, 10 de agosto de 2020.
Ref.EPS.DOC.275.08.2020.

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Argueta Hernández.

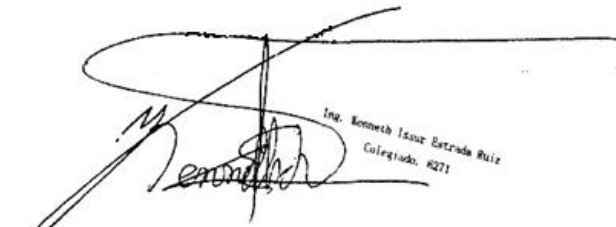
Por este medio atentamente le informo que como Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Edgar Miguel Rodas Mayén** de la Carrera de Ingeniería Electrónica, Registro Académico No. **201314350** y **CUI 2563 92978 0101**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS TRANSCOLD INGENIERÍA GUATEMALA S.A.”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Colegiado. #271

Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica

c.c. Archivo
KIER/ra



Guatemala 10 de agosto de 2020.
Ref.EPS.D.116.08.2020.

Ing. Armando Alonso Rivera Castillo
Director Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Rivera Castillo:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS TRANSCOLD INGENIERÍA GUATEMALA S.A."** que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Edgar Miguel Rodas Mayén**, quien fue debidamente asesorado por la Inga. Ingrid de Loukota y supervisado por el Ing. Kenneth Issur Estrada Ruiz.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora y Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS



/ra



Guatemala, 2 de octubre de 2020

Señor Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Señor Director:

Por este medio me permito dar aprobación al informe final de EPS titulado **Diseño del plan de mantenimiento preventivo y correctivo en los sistemas de control de cámaras climáticas tomando en cuenta los parámetros de humedad y temperatura para el laboratorio de pruebas Transcold Ingeniería Guatemala, S.A.**, desarrollado por el estudiante **Edgar Miguel Rodas Mayén**, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio César Solares Peñate'.

Ing. Julio César Solares Peñate
Coordinador de Electrónica

REF. EIME 015.2020.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, y del director de EPS, al trabajo de Graduación del estudiante **Edgar Miguel Rodas Mayén**, titulado: **DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS TRASCOLD INGENIERÍA S.A.** procede a la autorización del mismo.



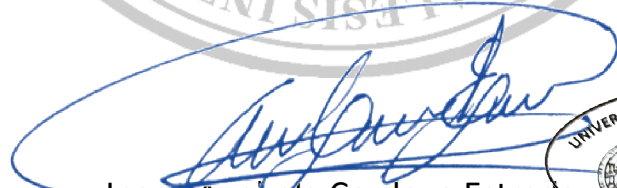
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 11 de febrero de 2021.


DTG. 174.2021.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO EN LOS SISTEMAS DE CONTROL DE CÁMARAS CLIMÁTICAS TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE HUMEDAD Y TEMPERATURA PARA EL LABORATORIO DE PRUEBAS TRANSCOLD INGENIERÍA GUATEMALA S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Miguel Rodas Mayén**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi inspiración de vida y haberme dado la oportunidad de culminar mi carrera.
Mis padres	Edgar Ottoniel Rodas Velázquez y Nydia Evelyn Mayén Ortiz de Rodas, por su amor, entrega, sacrificio y enseñanzas de vida que me forjaron como el hombre que soy, los amo.
Mi hermana	Mariana Rodas, por apoyarme y siempre darme ánimos.
Mis tíos	Darwin Mayén y Astrid Cardona, por su cariño y brindarme una oportunidad laboral.
Mis abuelos	Juan Rodas y Haide de Mayén, por su cariño y amor conmigo y familia.
Mi familia en general	Tíos y primos, por formar parte de mi vida.
En memoria de	Miguel Ángel Mayén García (q. e. p. d) y María Eloína Velázquez Estrada de Rodas (q. e. p. d).

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ser mi inspiración de vida y haberme dado la oportunidad de culminar mi carrera.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios, el lugar en donde obtuve muchos conocimientos.
Facultad de Ingeniería	Por ser la mejor Facultad.
Fogel de Centroamérica S.A.	Por brindarme la oportunidad de realizar el proyecto de EPS en sus instalaciones.
Ing. Alejandro Barillas	Por su apoyo, asesoramiento y disposición para la realización del proyecto de EPS.
Compañeros y amigos de la Facultad	Eduardo Muralles, Kevin Monterroso, Steve Marroquín y Paulo Diéguez, por su apoyo y estar siempre presentes durante mis estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. FOGEL DE CENTROAMÉRICA.....	1
1.1. Grupo Fogel.....	1
1.2. Reseña histórica.....	1
1.3. Certificaciones	2
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Termodinámica.....	5
2.1.1. Principio cero de la termodinámica.....	5
2.2. Sistema de refrigeración.....	5
2.2.1. Radiador	5
2.2.2. Compresor.....	6
2.2.3. Refrigerante	6
2.2.3.1. R290	6
2.2.4. Condensador	6
2.2.5. Válvula de control	7
2.2.6. Termostato.....	7
2.2.7. Filtro secador	7
2.3. Metrología.....	7

2.3.1.	Calibración	8
2.3.2.	Tolerancia.....	8
2.3.3.	Exactitud, inexactitud e incertidumbre	8
2.3.4.	Precisión.....	9
2.3.5.	Repetibilidad y reproducibilidad.....	9
2.3.6.	Relación entre precisión y exactitud.....	9
2.4.	Análisis de Fourier.....	10
2.5.	Armónicos eléctricos	12
2.5.1.	Tipos de armónicos	13
2.5.2.	Cargas lineales.....	14
2.5.3.	Cargas no lineales.....	14
2.5.4.	Causas de armónicos eléctricos.....	15
2.5.5.	Consecuencias de armónicos eléctricos	15
2.5.6.	Corrección de armónicos.....	16
2.5.6.1.	Filtros serie.....	17
2.5.6.2.	Filtros Shunt	17
2.5.6.2.1.	Filtro sintonizado simple.....	18
2.5.6.3.	Filtro pasa altos	19
2.5.6.4.	Filtros activos	20
2.5.7.	Distorsión armónica total (THD)	20
2.5.8.	Distorsión de la demanda total (TDD)	21
2.6.	Normas IEEE519 1992.....	22
3.	DIAGNÓSTICO.....	25
3.1.	Paneles eléctricos	26
3.2.	Sistema de humidificadores	35
3.2.1.	Descripción del sistema.....	35
3.2.2.	Estado del sistema	36

3.3.	Sistema de control de tensión	43
3.3.1.	Descripción del sistema	43
3.3.2.	Estado del sistema	44
3.4.	Conexiones dentro de las cámaras climáticas.....	46
3.4.1.	Estado encontrado.....	46
4.	PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO.....	49
4.1.	Paneles eléctricos	49
4.2.	Sistema de humidificación	56
4.3.	Sistema de control de tensión	59
4.4.	Estudio de armónicos	63
4.4.1.	Software	64
4.4.1.1.	Configuración de registros	65
4.4.1.2.	Comunicación.....	66
4.4.1.3.	Publicación de datos.....	67
4.4.1.4.	Generador de reportes	69
4.4.1.4.1.	Bucle de variables e interfaz GUI	71
4.4.1.4.2.	Secuencia 1.....	76
4.4.1.4.3.	Secuencia 2.....	77
4.4.1.4.4.	Secuencia 3.....	79
4.4.1.4.5.	Secuencia 4.....	81
4.4.2.	Resultados.....	85
	CONCLUSIONES	123
	RECOMENDACIONES.....	125
	BIBLIOGRAFÍA.....	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Función $f(x)$	10
2.	Funciones que componen a $f(x)$	11
3.	Análisis de Fourier.....	12
4.	Armónicos	13
5.	Filtro serie	17
6.	Frecuencia de resonancia de un filtro shunt.....	18
7.	Impedancia del filtro sintonizado simple.....	18
8.	Filtro pasa altos.....	19
9.	Impedancia filtro pasa altos.....	20
10.	THD en tensión	21
11.	THD en corriente	21
12.	TDD	22
13.	Ventilador de panel dañado	26
14.	Falta de ventilador.....	27
15.	Compartimiento de ventilación sin uso.....	27
16.	Ventilador dañado	28
17.	Indicadores y pulsadores de emergencia (vista frontal)	28
18.	Indicadores y pulsadores de emergencia (vista trasera).....	29
19.	Pulsadores sin uso (frontal).....	29
20.	Pulsadores sin uso (trasero)	30
21.	Cable dañado.....	31
22.	Daños por sobre corrientes o cortocircuitos	31
23.	Cables de <i>breakers</i> dañados	32

24.	Conexiones al aire	32
25.	Ventiladores de controladores de potencia dañados (panel cámara 1)	33
26.	Ventiladores de controladores de potencia dañados (panel cámara 5 y 6)	33
27.	Falta de protección entre pletinas y equipos.....	34
28.	Desorden de conexiones	35
29.	Tanque humidificador	37
30.	Sarro y óxido en la base del barril.....	37
31.	Fuga de agua en la base del barril.....	38
32.	Vista superior de un barril (desconectado)	39
33.	Corrosión en conectores de alimentación de electrodos	39
34.	Corrosión en conector de electrodo	40
35.	Medición del sensor de nivel del barril (sin agua)	41
36.	Lectura de humedad de la cámara 1 (color gris)	42
37.	Sistema de control de tensión que presenta falla de sobrecalentamiento.....	44
38.	Tensión inducida sobre el eje del variac	45
39.	Comparación de corrosión de conectores de termopar	48
40.	Conexión 1 ventilador de 220 VAC	50
41.	Conexión 2 ventiladores de 110 VAC	50
42.	Flujo de aire en los paneles eléctricos	52
43.	Temperatura del ambiente del cuarto de máquinas.....	53
44.	Temperatura en disipador de control de potencia Watlow	54
45.	Temperatura en la parte baja del panel de la cámara 1.....	55
46.	Temperatura en la parte alta del panel de la cámara 1.....	55
47.	Temperatura en la parte central del panel de la cámara 1.....	56
48.	Conector para tronillo M6 para barril de humidificación	59
49.	Tensión inducida en variac con conexión a tierra	60

50.	Rediseño del sistema	62
51.	Modificación (resultado final).....	63
52.	Lectura de registros mediante modbus	66
53.	Agregar una librería al proyecto	68
54.	Agregar una variable dentro de la librería	68
55.	Propiedades de una variable compartida.....	69
56.	Estructura básica del software	70
57.	Gestión de variables eléctricas	71
58.	Gestión de variables de armónicos	73
59.	Presentación de variables en la interfaz GUI	74
60.	Interfaz gráfica de usuario.....	75
61.	Configuraciones iniciales.....	77
62.	Creación/verificación del directorio	78
63.	Creación del archivo.....	80
64.	Diagrama de bloque de la secuencia 4	81
65.	Interrupción de control.....	82
66.	Escritura en el archivo.....	84
67.	Consumo de corriente (26-08-2019) cámara 1	86
68.	THD en tensión (26-08-2019) cámara 1.....	87
69.	THD en corriente (26-08-2019) cámara 1	88
70.	Consumo de corriente (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1	89
71.	THD en tensión (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1	90
72.	THD en corriente (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1	91
73.	Consumo de corriente (07-09-2019) cámara 1	92
74.	THD en tensión (07-09-2019) cámara 1.....	93
75.	THD en corriente (07-09-2019) cámara 1	94
76.	Consumo de corriente (09-09-2019) cámara 1	95
77.	THD en tensión (09-09-2019) cámara 1.....	96
78.	THD en corriente (09-09-2019) cámara 1	97

79.	Consumo de corriente (04-09-2019) cámara 2	98
80.	THD en tensión (04-09-2019) cámara 2	99
81.	THD en corriente (04-09-2019) cámara 2	100
82.	Consumo de corriente (14-09-2019) cámara 2	101
83.	THD en tensión (14-09-2019) cámara 2	102
84.	THD en corriente (14-09-2019) cámara 2	103
85.	Consumo de corriente (15-09-2019) cámara 2	104
86.	THD en tensión (15-09-2019) cámara 2	105
87.	THD en corriente (15-09-2019) cámara 2	106
88.	Consumo de corriente (06-09-2019) cámara 4A y 5A.....	107
89.	THD en tensión (06-09-2019) cámara 4A y 5A.....	108
90.	THD en corriente (06-09-2019) cámara 4A y 5A	109
91.	Consumo de corriente (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE	110
92.	THD en tensión (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE.....	111
93.	THD en corriente (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE	112

TABLAS

I.	Clasificación y límites de distorsión para sistemas de bajo voltaje	23
II.	Corriente armónica máxima en porcentaje IL	24
III.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 1).....	113
IV.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 1)	114
V.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 2).....	115
VI.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 2)	116

VII.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 4A y 5A).....	117
VIII.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 4A y 5A)	118
IX.	Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte (cámara FLUKE)	119
X.	Distorsión armónica máxima registrada según su frecuencia (tensión)	120
XI.	Distorsión armónica máxima registrada según su frecuencia (corriente).....	121

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
%	Porcentaje

GLOSARIO

ADC	Convertidor análogo a digital.
DC	Corriente directa.
<i>Even harmonics</i>	Armónicos pares.
F(x)	Función en términos de la variable x.
Modbus	Protocolo de comunicación.
<i>Odd harmonics</i>	Armónicos impares.
Ohms	Unidad de medida de la resistencia.
PID	Control proporcional, integral y derivativo.
Refrigua	Refrigeradores de Guatemala S.A.
Rf	Resistencia de referencia.
RLC	Circuito conformado por una resistencia, inductor y un capacitor.
RPM	Revoluciones por minuto.

RS 485	Estándar de comunicaciones.
THD	Distorsión armónica total.
VAC	Voltaje de corriente alterna.
Variac	Transformador variable.
VCI	Inhibidor de corrosión volátil.
Wo	Frecuencia de resonancia.

RESUMEN

Fogel es una empresa que diseña, prueba, ensambla y distribuye equipos de refrigeración comercial para productos como refrescos, bebidas carbonatadas, cerveza, lácteos, helados y productos congelados. Entre sus líneas de productos se pueden encontrar vitrinas refrigeradas, FROSTER para cervezas, congeladores, refrigeradores y mostradores para el hogar, supermercados y tiendas de conveniencia.

Para el diseño y prueba de los equipos Fogel cuenta con el laboratorio de análisis TRANSCOLD, en el cual se llevan a cabo pruebas de impacto, resistencia mecánica, consumo energético, desgaste, precisión y estabilidad de los equipos ante distintas condiciones atmosféricas. Para ello son sometidos a prueba dentro de cámaras climáticas, las cuales son cuartos especialmente diseñados para alterar el nivel de temperatura y humedad relativa dentro de ellas, esto con el objetivo de poner a prueba los equipos que se diseñan según los estándares solicitados por los clientes.

El diseño de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo permitirá identificar fallas, malas conexiones, desgaste de equipos, falta de calibración, conexiones a tierra donde sea requerido, ciclos óptimos de mantenimientos, y otros. Esto con el objetivo de presentar toda posible mejora y corrección en cuanto al estado actual de los sistemas empleados para poner a prueba los equipos de refrigeración diseñados por la empresa.

Para la realización del plan de mantenimiento preventivo y correctivo se contará con el apoyo del laboratorio de pruebas Transcold ingeniería ubicado en Lotificación El Rosario, zona 3, Mixco Guatemala.

OBJETIVOS

General

Diseñar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para cámaras climáticas del laboratorio de pruebas transcold tomando en cuenta factores como calibraciones periódicas, estado de conexiones, desgaste de piezas y seguridad industrial.

Específicos

1. Realizar un diagnóstico sobre el estado actual de los sistemas que conforman las cámaras climáticas tomando en cuenta desgastes, conexiones, protecciones, seguridad industrial y calibración.
2. Elaborar un plan de mantenimiento preventivo.
3. Elaborar un plan de mantenimiento correctivo.
4. Investigar y proponer posibles mejoras a los sistemas que conforman las cámaras climáticas basándose en la información obtenida en el diagnóstico.

INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios la humanidad se vio en la necesidad de optimizar el uso de sus recursos disponibles, entre uno de los más importantes sería el alimento, de los cuales en su mayoría eran de rápida descomposición expuestos a las condiciones atmosféricas comunes. Por tanto, se recurrió a la búsqueda de métodos para la preservación de estos, entre ellos el más práctico encontrado resultó ser el mantenerlos expuestos a temperaturas bajas para ralentizar el proceso de descomposición.

Para ello diferentes culturas se dieron a la tarea de diseñar sus propios métodos para obtener espacios de temperatura controlada dentro de diversos contenedores. Desde dejar agua en bandejas puestas en la noche a la intemperie para conseguir finas capas hielo (método utilizado en el antiguo Egipto), acumulando nieve para luego convertirse en hielo en construcciones tipo iglú aisladas con paja y ramas (método utilizado en la antigua Roma y Grecia) hasta los métodos modernos donde se emplean líquidos refrigerantes.

En la actualidad se utilizan equipos de refrigeración que cuentan con sistemas de control electrónicos de gran precisión y estabilidad, los cuales pasan por rigurosas pruebas donde se monitorea su respuesta a distintas condiciones atmosféricas simulando la región o país a donde estos serán distribuidos.

Toda empresa dedicada al diseño y fabricación de cualquier producto debe considerar que la calidad de diseño, implementación y mantenimiento periódico de sus equipos y sistemas delimitara la calidad final de sus productos.

La elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo permitirá obtener un diagnóstico sobre el estado actual de los sistemas implementados para el funcionamiento de las cámaras climáticas.

Este plan, además, permitirá presentar propuestas de corrección a los problemas y fallos que se presenten al realizar el diagnóstico del sistema con el objetivo de mantener su desempeño óptimo. El diseño del plan de mantenimiento preventivo y correctivo para las cámaras climáticas se ha dividido en las siguientes fases:

- Fase inicial, diagnóstico sobre el estado actual de los sistemas de control relacionados directamente al funcionamiento de las cámaras climáticas.
- Fase técnica, elaboración del plan de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Fase de capacitación, efectuar las capacitaciones técnicas al personal respectivo.

1. FOGEL DE CENTROAMERICA

1.1. Grupo Fogel

El Grupo Fogel es una compañía dedicada a la manufactura, diseño, ventas y servicio de equipos de refrigeración comercial conformada por dos fábricas ubicadas en Guatemala y Colombia entre las cuales cubren una demanda de 180 mil unidades anualmente. La empresa cuenta con más de 50 años de experiencia por lo que cuenta con una larga lista de clientes regionales e internacionales de renombre tales como Coca Cola, Pepsi, Heineken, Abinbev, Asahi, Lala, Nestlé, Dos Pinos Walmart. Diseñando equipos para industrias de lácteos, helados, refrescos, postres, carnes frías y cervezas.

1.2. Reseña histórica

La compañía conocida actualmente como Fogel de Centroamérica S.A. fue fundada por el Estadounidense William Fogel en 1899 en la ciudad de Filadelfia, Pensilvania. En 1967, gracias al hijo del Sr. Fogel, se funda Fogelsa, la primera planta de fabricación, al establecer una alianza con inversionistas nicaragüenses. De la misma manera se fundaron luego dos fábricas adicionales, una de ellas en República Dominicana y la otra en Puerto Rico.

Las posteriores condiciones económicas y políticas debido a una guerra civil librada en Nicaragua provocaron en 1981 que Fogelsa se mudase a Guatemala pasando a llamarse Refrigeradores de Guatemala, S.A. (Refrigua). Decididos a reconstruir y alcanzar el éxito regional nuevamente, un grupo de 12 colaboradores se dieron a la tarea de continuar labores en una pequeña bodega

ubicada en la zona 4 de la ciudad capital. Dicho éxito no se hizo esperar, ya que para 1985 las instalaciones de la fábrica se trasladaron para un edificio de mayor tamaño ubicado en zona 7 (actual zona 3 del municipio de Mixco) donde en la actualidad siguen operando, habiéndose expandido considerablemente en la misma área.

Con la muerte del emprendedor, visionario y fundador William Fogel en 1998, la compañía en Nicaragua pasó a ser adquirida por sus socios, de igual manera con sus otras dos alianzas estratégicas, pasando a ser compañías independientes hasta la actualidad.

En 2007 la compañía cambia de nombre como una estrategia comercial pasando a llamarse Fogel de Centroamérica S.A. y se funda una segunda fábrica ubicada en Cali, Colombia, llamada Fogel Andina, S.A. para cumplir con la demanda de equipos de refrigeración.

El Grupo Fogel cuenta con una capacidad aproximada de 180 mil equipos fabricados anualmente dentro de un extenso catálogo de modelos para su distribución a nivel nacional e internacional a 50 países en el Norte, Centro y Sudamérica, el Caribe, África, Europa e India.

1.3. Certificaciones

El Grupo Fogel busca mantener altos estándares de calidad en sus productos, por lo que cuenta con diversas certificaciones empleadas a nivel mundial como la norma ISO 9001:2015 (manufactura, comercialización y diseño de refrigeradores y refrigeradores para aplicaciones comerciales), ISO 17025 (eficiencia energética), UL (cumplimiento de normas eléctricas y de sanidad de los EE.UU.), CEC (eficiencia energética), NOM-022.SCFI/ENER-2008

(eficiencia de refrigeradores para uso comercial, límites, métodos de prueba y etiquetado).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Termodinámica

Rama de la física que estudia la interacción entre el calor y otros tipos de energía a nivel macroscópico.

2.1.1. Principio cero de la termodinámica

Este principio se fundamenta en el equilibrio térmico entre cuerpos que interaccionan directamente entre sí, por tanto, si dos cuerpos están en equilibrio y llegase a presentarse un tercero, este podrá ganar o perder calor hasta que el sistema vuelva a estar equilibrado energéticamente.

2.2. Sistema de refrigeración

Sistema mecánico cuya función radica en aprovechar las propiedades termodinámicas de la materia para redirigir energía térmica de un punto hacia otro generalmente para reducir la temperatura de un objeto o espacio deseado.

2.2.1. Radiador

Elemento formado por un conjunto de tubos metálicos colocados en paralelo cuyo fin es liberar calor al ambiente aprovechando el principio cero de la termodinámica maximizando el área de contacto entre el refrigerante, radiador y ambiente (aire).

2.2.2. Compresor

Máquina diseñada para aumentar el nivel de presión dentro de un espacio controlado, por lo general tuberías, para desplazar fluidos compresibles como gases y vapores.

2.2.3. Refrigerante

Substancia desarrollada para los sistemas de refrigeración cuya función es absorber energía térmica a bajas temperaturas y presión, liberando calor a mayores temperaturas y presión.

2.2.3.1. R290

Refrigerante de propano muy utilizado en la actualidad debido a su eficiencia, gran calidad, bajo precio y ser amigable con el ambiente. Puede encontrarse en el petróleo crudo ya que está conformado por elementos simples: hidrógeno y carbono.

2.2.4. Condensador

Radiador ubicado en la parte interna del equipo, trabaja del lado de baja presión del sistema y su función es de absorber calor del compartimiento controlado del refrigerador al evaporarse el refrigerante obtenido de la válvula de expansión.

2.2.5. Válvula de control

Elemento que junto con el compresor se encarga de dividir el circuito termodinámico en una sección de alta presión y en otra de baja presión. Su función principal es controlar la dosificación del refrigerante que entra al evaporador.

2.2.6. Termostato

Dispositivo electrónico de control que cuenta con un sensor (por lo general un termistor) para conocer la temperatura del equipo en cuestión y así activar o desactivar el motor del compresor, evaporador y condensador, según esté preconfigurado para realizar las correcciones necesarias en el sistema.

2.2.7. Filtro secador

Retiene la humedad y todo tipo de impurezas que pueda llevar el refrigerante después de pasar por el condensador.

2.3. Metrología

Rama de la ciencia encargada del estudio de las mediciones, pesos y la determinación de las magnitudes físicas. Su objetivo es garantizar la trazabilidad de los procesos y, por tanto, la exactitud de las magnitudes que sean requeridas, empleando para ello métodos, instrumentos y medios apropiados basándose en patrones previamente estandarizados.

2.3.1. Calibración

Acciones que permiten establecer la incertidumbre asociada a una medida bajo un determinado instrumento, esto con el objetivo de hacer equivalentes las mediciones de distintos laboratorios.

2.3.2. Tolerancia

Define la desviación máxima permitida para un componente con relación al valor establecido por el fabricante. Este generalmente viene dado por un porcentaje según el cual se puede obtener el rango dentro del cual se debe encontrar el componente para cumplir con las especificaciones requeridas.

Al expresar el error máximo esperado, se relaciona estrechamente con la exactitud ya que es común encontrar el valor de exactitud de un componente en términos de su tolerancia.

2.3.3. Exactitud, inexactitud e incertidumbre

La exactitud describe qué tan próximo está el valor obtenido por la medición con la magnitud del valor verdadero, esto lo presenta como el error máximo cuantificado que puede ocurrir en una medición, por tanto, realmente describe la inexactitud o incertidumbre de la medición.

Por ejemplo, si se obtuvo una medición de voltaje mediante un multímetro de 100 voltios y se conoce según las especificaciones del instrumento que la inexactitud del instrumento es de $\pm 2 \%$, entonces el valor real de tensión registrado podría estar en el rango 98 a 102 voltios.

2.3.4. Precisión

La precisión determina la proximidad de los valores obtenidos con un instrumento de medición habiéndose tomado una serie de datos para registrar su dispersión. Esto se realiza según las mismas condiciones, permitiendo determinar la repetibilidad de la prueba.

2.3.5. Repetibilidad y reproducibilidad

Ambos términos son empleados en casos distintos, pero generalmente expresan lo mismo, siendo esto la dispersión de las mediciones obtenidas.

La repetibilidad expresa la dispersión cuando las múltiples lecturas de la misma cantidad son realizadas en las mismas condiciones de ambiente, observador, ubicación e instrumento; las cuales se mantienen con una variación mínima o nula.

La reproducibilidad expresa la dispersión cuando varía en gran manera o se sustituye al observador, instrumento de medición, método, ubicación; como sería el caso si se deseara comprobar un mismo experimento en dos laboratorios ubicados en continentes distintos.

2.3.6. Relación entre precisión y exactitud

Se suele confundir el concepto de exactitud con el de precisión de un instrumento, cuando son completamente distintos, aunque ambos son de gran importancia al momento de calibrar un instrumento de medición. Para ejemplificar de mejor manera la diferencia se observa la siguiente imagen que representa los cuatro posibles escenarios (baja precisión y exactitud, alta

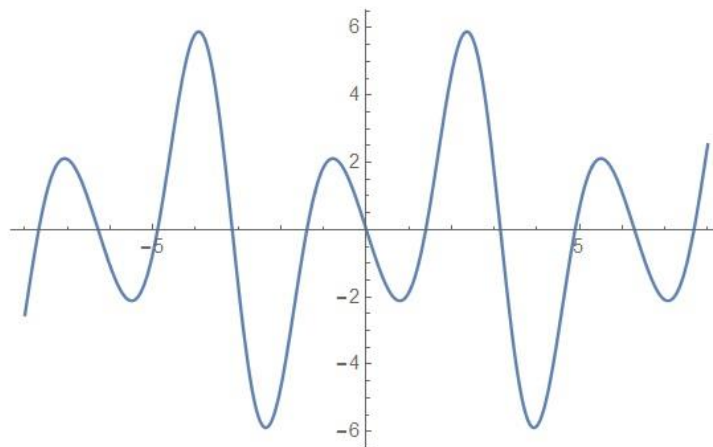
precisión y exactitud, baja precisión y alta exactitud, alta precisión y baja exactitud).

2.4. Análisis de Fourier

Entre finales de la centuria de 1700 e inicios de 1800 un matemático y físico francés de nombre Jean-Baptiste Joseph Fourier se dio a la tarea de buscar una explicación matemática al comportamiento de las distribuciones de calor y sus cambios de temperatura sobre una zona específica en un período de tiempo.

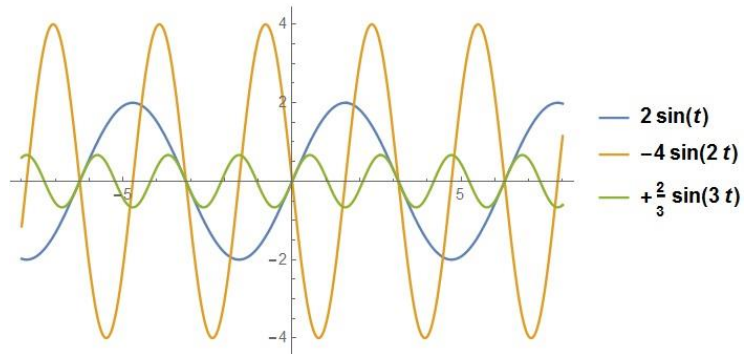
Esto lo llevó a desarrollar un método para representar funciones discontinuas mediante la suma de un conjunto de funciones continuas, permitiendo analizar formas de onda complejas, dado que estas sean periódicas empleando una superposición de una gran cantidad de funciones armónicas siendo por lo general ondas senoidales y cosenoidales las más empleadas.

Figura 1. Función $f(x)$



Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

Figura 2. **Funciones que componen a f(x)**



Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

Por tanto, toda función $f(x)$ que sea periódica con periodo definido P , puede representarse como la suma infinita de funciones armónicas, expresándose matemáticamente como la sumatoria de funciones seno y coseno de período definido P , cuyas amplitudes vienen dadas por los denominados coeficientes de Fourier a y b . Estos se calculan mediante las integrales mostradas en la figura 3.

Figura 3. **Análisis de Fourier**

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos[i\omega t] + b_i \sin[i\omega t])$$

$$P = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{2}{P} \int_{-P/2}^{P/2} f(t) dt$$

$$a_i = \frac{2}{P} \int_{-P/2}^{P/2} (f(t) \cos[i\omega t]) dt$$

$$b_i = \frac{2}{P} \int_{-P/2}^{P/2} (f(t) \sin[i\omega t]) dt$$

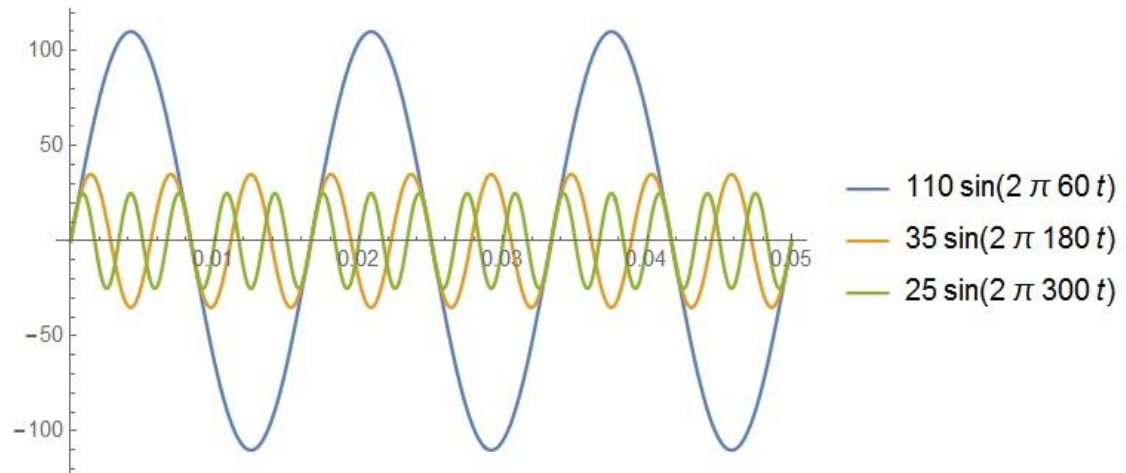
Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.5. Armónicos eléctricos

En un sistema eléctrico un armónico es un componente de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental de la señal, dependiendo de la amplitud de las componentes, por lo general no deseadas, se puede alterar la señal original hasta el punto de generar fallas en los equipos que trabajen con ella.

Por ejemplo, se tiene la señal sinusoidal de corriente alterna estándar de 110 VAC la cual, si se llega a distorsionar por sobre cierto margen, puede provocar fallos importantes en equipos electrónicos tales como reinicios inesperados, pudiendo afectar un proceso importante dentro de una industria.

Figura 4. **Armónicos**



Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.5.1. Tipos de armónicos

Los armónicos se clasifican en dos grupos denominados como *even harmonics* (armónicos pares) y *odd harmonics* (armónicos impares). Esta división se fundamenta no solo en el campo de la electricidad pues en el ámbito de la acústica musical se considera a los armónicos pares más musicales y por tanto de mejor sonido, ya que estos reproducen la nota original (fundamental) una o más octavas más altas y los armónicos impares crean disonancias.

De forma similar ocurre cuando de armónicos eléctricos se trata, ya que si tomamos un semiciclo de la fundamental que resulta ser π radianes se puede verificar que para todo armónico par siempre habrá un número par de semiciclos dentro de π y, por tanto, siempre por cada semiciclo positivo habrá un semiciclo negativo para cancelarlo. No sucede esto con armónicos impares donde siempre habrá un número impar de semiciclos.

El comportamiento previamente mencionado produce que los armónicos impares tengan mayor influencia sobre la fundamental provocando que sus distorsiones produzcan efectos adversos sobre los equipos que sean alimentados por esa señal, mientras que los armónicos pares al venir en números iguales de semiciclos dentro de un semiciclo de la fundamental provocan que en sistemas de potencia tiendan a atenuarse su efecto sobre la señal.

2.5.2. Cargas lineales

Las cargas lineales son conocidas como tal ya que la corriente que consumen tiene la misma forma de la señal que las alimenta, tal y como se da en el caso de los motores o bombillas incandescentes, las cuales son alimentadas por una tensión sinusoidal y, por tanto, su corriente de consumo también es sinusoidal.

El consumo de estas cargas no necesariamente está sincronizado en fase a la señal de alimentación como se da en el caso de las cargas capacitivas que tiene el efecto en adelanto de fase o las cargas inductivas que tienen retraso de fase, las cargas que si se sincronizan tanto en forma y fase en cuanto a su consumo son las cargas resistivas.

2.5.3. Cargas no lineales

A diferencia de las cargas lineales, el consumo de corriente de este tipo puede no ser sinusoidal, por tanto, habrá contenido armónico generado por la carga. Esto es producido generalmente por la inclusión de la electrónica en el mundo de la electricidad y la aplicación de los semiconductores tal como en la electrónica de potencia.

2.5.4. Causas de armónicos eléctricos

Los armónicos eléctricos son producidos por componentes electrónicos como es el caso de los rectificadores de onda que permiten alterar una onda sinusoidal para obtener una señal estable de corriente continua DC por lo que algunos de estos ejemplos son fuentes de alimentación, variadores de frecuencia para controlar la velocidad de motores industriales, convertidores de potencia, sistemas de protección de alimentación ininterrumpida, arrancadores suaves.

2.5.5. Consecuencias de armónicos eléctricos

Debido a que la señal base en estos casos idealmente estaría conformada solamente por la fundamental, la suma de armónicos da lugar a una serie de posibles efectos adversos ya que con esta adición pueden llegar a darse picos de sobrevoltaje no deseados que alteren el consumo del dispositivo o equipo provocando que puedan dispararse protecciones, generar sobrecalentamiento en conductores (sobre todo en aquellos que no están sobredimensionados y trabajan cerca de su límite establecido por su calibre), envejecimiento prematuro de componentes e incluso daños graves a equipos.

Por otra parte, si los armónicos provocan caídas de tensión respecto de los valores esperados o alteraciones en la forma de onda por las distorsiones que reduzcan el área bajo la curva de la señal, provocará que la potencia promedio RMS que se entrega para alimentar un dispositivo sea menor. Esto resulta perjudicial al bajar hasta un punto donde provoque pérdida de rendimiento, fallas de sistemas electrónicos, reinicios no deseados de equipos, disminución del factor de potencia, degradación de aislamientos de transformadores y motores, acoplamientos en redes de telefonía y datos.

Los problemas antes mencionados acarrearán pérdidas económicas importantes para cualquier empresa o industria, ya que se ve en la necesidad de sobredimensionar conductores y la potencia de suministro de la instalación eléctrica, así como la frecuente sustitución de equipos dañados por armónicos y paros de producción debido al disparo de dispositivos de control y protección (interruptores automáticos y diferenciales).

2.5.6. Corrección de armónicos

Cuando se tiene el problema de armónicos en la red hay métodos tanto para reducir efectos adversos como para disminuir el aporte de los armónicos. Se da en el caso del sobrecalentamiento generado por las sobrecorrientes que exponen los conductores al trabajar cerca o sobre los parámetros máximos de operación por lo que, aunque esto conlleve costos importantes, basta con sobredimensionar los conductores y también cambiar las pletinas eléctricas por unas de mayores dimensiones.

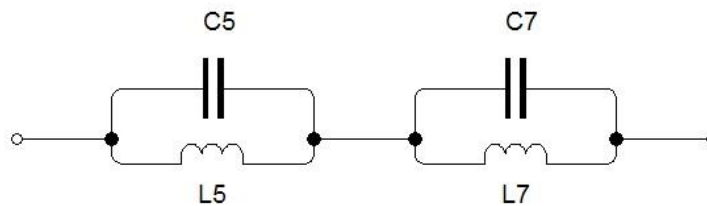
Esto claramente no soluciona por completo el problema, sino que resulta más una medida para paliar la situación, pues solo los efectos de sobrecalentamiento se ven reducidos pero los armónicos seguirán presentes en la red.

Si los armónicos son de mucha amplitud, es necesario reducirlos tanto como sea posible o necesario para que no ocasionen problemas en la red. Para esto se recurre a filtros para atenuar concretamente solo el aporte de las frecuencias armónicas de gran amplitud sin alterar la fundamental.

2.5.6.1. Filtros serie

Estos filtros están diseñados para atenuar una frecuencia en particular, está conformado por un arreglo entre un capacitor y un inductor conectados en paralelo entre sí y estos conectados en serie entre la fuente y la carga.

Figura 5. Filtro serie



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

2.5.6.2. Filtros Shunt

Este tipo de filtro provee una baja impedancia ante las frecuencias de los armónicos. Este consiste en un circuito RLC en paralelo al sistema de alimentación.

Una ventaja clara de este filtro es que solamente debe soportar la corriente del armónico a atenuar ya que al conectarse en paralelo no debe soportar toda la corriente que demanda la carga por lo que se reduce su costo de fabricación al no necesitarse componentes de muy altos rendimientos.

Sin embargo, el comportamiento de un filtro acarrea ciertos conflictos como el que se vea afectado por la impedancia de la fuente, ya que esta puede variar si se altera la topología de la red. Otro problema es el de sintonización de estos filtros, por lo que se requiere reajustarlos de manera periódica. Además,

debe tomarse en cuenta el hecho de presentarse una resonancia paralela a la red sintonizada con la siguiente frecuencia:

Figura 6. **Frecuencia de resonancia de un filtro shunt**

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_S + L_F) * C}}$$

Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.5.6.2.1. **Filtro sintonizado simple**

Este filtro consta de un circuito RLC en serie, el cual se emplea para eliminar un armónico definido, para ello se sintoniza a la frecuencia del armónico deseado, representado una impedancia alta para toda frecuencia lejana a ω_0 y en la frecuencia de resonancia la reactancia capacitiva e inductiva se anulan dejando solamente a R_f para disipar el armónico deseado. El valor de la resistencia de este filtro ayuda a limitar la corriente máxima que pasará por el filtro, pero así también no permitirá eliminar por completo el aporte del armónico al que sea sintonizado.

Figura 7. **Impedancia del filtro sintonizado simple**

$$Z = R_f + j \left[\omega L_f - \left(\frac{1}{\omega C_f} \right) \right]$$

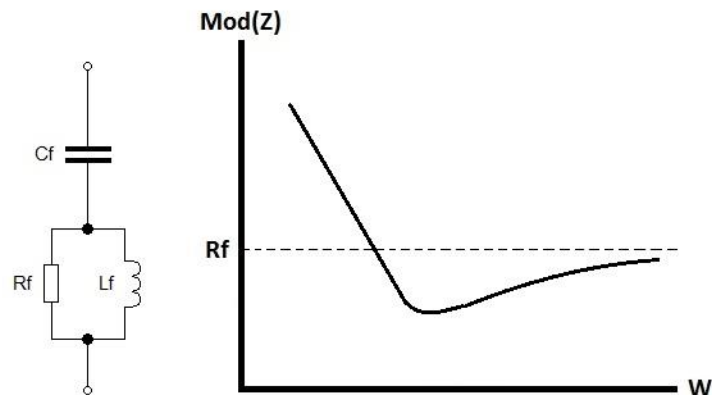
Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

Este filtro proporciona una atenuación máxima con respecto a un armónico en especial teniendo bajas pérdidas, principalmente asociadas a la resistencia del filtro y del inductor, aunque es bastante vulnerable a desintonizarse debido a los efectos provocados por variaciones de frecuencia o temperatura.

2.5.6.3. Filtro pasa altos

De igual manera que con el filtro sintonizado simple, este se sintoniza para atenuar una frecuencia en específico, salvo con la diferencia de la configuración del circuito pues en este caso la resistencia del filtro se conecta en paralelo al inductor, y estos juntos en serie al capacitor por lo que el efecto de resonancia entre las capacitancias inductiva y capacitiva se ve amortiguada. Por tanto, también atenuará las frecuencias mayores a la que sea sintonizado cubriendo un mayor rango en el espectro de frecuencias.

Figura 8. Filtro pasa altos



Fuente: elaboración propia, empleando LiveWire.

Este filtro resulta muy útil para atenuar un amplio rango del espectro de armónicos sin necesidad de agregar otros filtros como complemento en

paralelo. Sin embargo, al filtrarse más de un armónico a través de este circuito se debe tomar en cuenta que ha de ser diseñado con componentes para una mayor potencia ya que múltiples armónicos serán desviados a través de este, de forma simultánea.

Figura 9. **Impedancia filtro pasa altos**

$$Z = \left(\frac{1}{i \omega C_f} \right) + \left[\left(\frac{1}{R_f} \right) + \left(\frac{1}{i \omega L_f} \right) \right]^{-1}$$

Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.5.6.4. Filtros activos

Aunque en términos de costos y tecnologías ampliamente conocidas en el tratamiento de armónicos se suelen emplear filtros pasivos, sin embargo, si se desea una opción mucho más estable y escalable se tienen los filtros activos, estos pasan a incluir semiconductores en su diseño por lo que sus circuitos son mucho más complejos lo que también añade un costo significativo a esta solución. Estos filtros también son conectados en paralelo a la carga que genera la contaminación de armónicos en la red, este mide la corriente proveniente de armónicos (no lineal) e inyecta en la red la corriente justa para contrarrestarlos sin alterar la fundamental.

2.5.7. Distorsión armónica total (THD)

Es una medida que denota el nivel de distorsión por armónicos que se encuentra presente en una determinada señal, este se considera generalmente para la tensión, aunque también puede analizarse para la corriente.

Matemáticamente está definido en base a la norma IEC61000-4-7 como el cociente entre la raíz de la suma de los cuadrados del aporte de las componentes armónicas en la señal con el valor de aporte en la frecuencia fundamental.

Figura 10. **THD en tensión**

$$V_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + \dots}}{V_1} * 100 \%$$

Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

Figura 11. **THD en corriente**

$$I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} * 100 \%$$

Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.5.8. Distorsión de la demanda total (TDD)

Directriz que denota la distorsión armonía de corriente en una señal con respecto a la corriente de carga, calculada únicamente para corriente se define base a la norma IEC61000-4-7 como el cociente entre la raíz de la suma de los cuadrados del aporte de las corrientes armónicas en la señal con el valor de la corriente de carga I_L .

Figura 12. **TDD**

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_L} * 100 \%$$

Fuente: elaboración propia, empleando Wolfram Mathematica.

2.6. **Normas IEEE519 1992**

Norma titulada Prácticas y requisitos recomendados por el IEEE para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica, desarrollada en 1981 para posteriormente revisada y mejorada en 1992. Su objetivo es introducir los conocimientos matemáticos y técnicos sobre los armónicos presentes en señales eléctricas debido al efecto de las cargas no lineales y establecer valores y rangos aceptables que aseguren que el efecto de las componentes armónicas presentes en la red no provoque efectos no deseados o dañinos para los equipos conectados, de esta manera procurar el correcto funcionamiento del sistema.

Esta norma busca establecer metas y objetivos a nivel de diseño de sistemas eléctricos para cargas lineales y no lineales, definiendo límites en cuanto a la distorsión armónica máxima para evitar interferencia entre equipos, sin embargo, estos estándares presentan ciertas dificultades para ser aplicados, ya que comúnmente la información respecto de un sistema y su carga se desconoce durante la etapa de diseño. Si la información detallada del sistema es conocida posteriormente, no siempre se cuenta con los recursos necesarios para llevar a cabo los estudios y las correcciones del sistema.

Por lo anterior, los ingenieros suelen optar por tratar el problema de la distorsión armónica corrigiéndolo en las terminales de los equipos no lineales en busca cumplir con la norma.

Respecto de los límites que establece para la distorsión armónica en tensión para equipos electrónicos tales como computadores y controladores programables que necesiten de una fuente AC para su funcionamiento. Su valor de distorsión armónica total THD no debe superar el 5 %, teniendo en cuenta que su mayor aporte individual no debe superar el 3 % del valor de la fundamental. Valores fuera de estos límites conllevan a una muy alta probabilidad del malfuncionamiento de equipos electrónicos, así como datos erróneos en equipos de medición por lo que es un tema de suma importancia cuando se trata de equipos médicos.

Estos datos son ampliados y presentados en la tabla I para aplicaciones especiales (hospitales y aeropuertos), sistemas generales y sistemas dedicados a exclusivamente a la carga; tomando en cuenta las propiedades de las muescas provocadas en la señal debido a la distorsión armónica.

Tabla I. **Clasificación y límites de distorsión para sistemas de bajo voltaje**

	Aplicaciones especiales	Sistemas generales	Sistemas dedicados
Profundidad de muescas	10 %	20 %	50 %
THD (tensión)	3 %	5 %	10 %
Área de muescas [Volt-micro seg]	16,400	22,800	36,500

Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE 519 1992*. p. 77.

El nivel de distorsión armónica en tensión puede analizarse en base a la función de corriente armónica generada por un consumidor a través de la impedancia de un sistema en las frecuencias armónicas. Esta puede representarse mediante la capacidad de cortocircuito de un sistema ya que esta limitará la corriente máxima que pueda ser suministrada a este. De esta manera puede calcularse la influencia de un consumidor sobre un sistema para estimar el voltaje de distorsión armónica que producirá.

Por tanto, esta norma establece una relación matemáticamente para calcular los límites de distorsión de corriente aceptables, la cual es proporcional a la corriente de corto circuito (I_{sc}) en un determinado punto de acople común (PCC) e inversamente proporcional al promedio de la corriente máxima de demanda (IL).

Dicha relación da un estimado sobre la impedancia de la fuente de energía eléctrica en cuestión y de su capacidad para tolerar armónicos. Por tanto, entre mayor sea el valor de la relación, la probabilidad de que el desempeño del circuito se vea afectado por armónicos será menor como se observa en la tabla II.

Tabla II. **Corriente armónica máxima en porcentaje IL**

Orden de armónicos individuales				
ISC/IL	$3 \leq a < 11$	$11 \leq a < 17$	$17 \leq a < 23$	$23 \leq a < 35$
20 < 50 A	4.0	2.0	1.5	0.6
50 < 100 A	10.0	4.5	4.0	1.8
100 < 1000 A	12.0	5.5	5.0	2.0

Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE 519 1992*. p.78.

3. DIAGNÓSTICO

El laboratorio de pruebas cuenta con un área denominada cuarto de máquinas donde se ubican los paneles eléctricos con los sistemas de control de potencia de los tanques de humidificación, resistencias que generan el ambiente de las cámaras climáticas y los sistemas de control de voltaje para variar la tensión y frecuencia de alimentación de los equipos que se pongan a prueba.

Se cuenta con 5 cuartos equipados para ajustar su ambiente según sea requerido dentro de un rango limitado de posibilidades, esto en función de las pruebas que se requiere cumplan los equipos de refrigeración.

Debido a que la empresa distribuye equipos no solo a nivel centroamericano, sino que también dentro del mercado se encuentran países de Sudamérica, Europa y recientemente la India. Por ello, hay tres parámetros muy importantes para las cámaras climáticas a fin de que su ajuste sea el más exacto y estable posible.

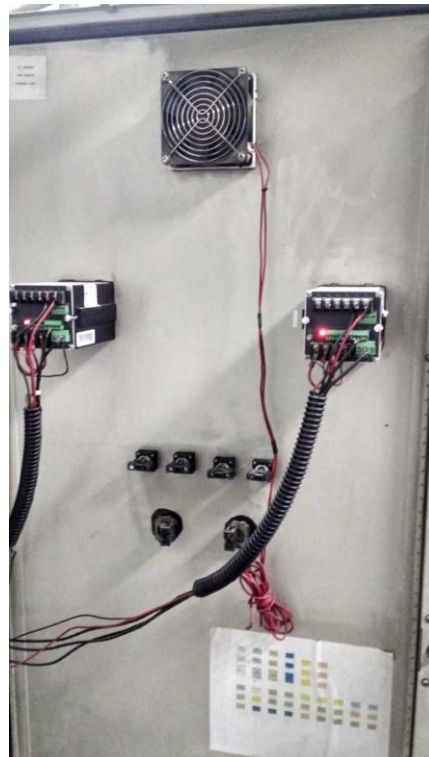
Inicialmente se realizó un sondeo en busca de malas prácticas, vulnerabilidades, deficiencias y cualquier otro factor que pudiese reducir significativamente el desempeño de los sistemas que controlan el ambiente (temperatura y humedad) de las cámaras climáticas del laboratorio, además del control de tensión.

Entre los problemas encontrados se presentan a continuación:

3.1. Paneles eléctricos

Los paneles eléctricos se encontraron con acumulaciones importantes de polvo y suciedad debido a que algunas de las puertas se dejan abiertas durante períodos de tiempo prolongados como medida de enfriamiento para ciertos componentes que generan mucho calor, esto se debe a que no se está utilizando las entradas y salidas de aire con las que cuentan los paneles de fábrica, esto por no utilizarla o porque el ventilador instalado se encuentra dañado.

Figura 13. Ventilador de panel dañado



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 14. **Falta de ventilador**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 15. **Compartimiento de ventilación sin uso**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 16. **Ventilador dañado**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Los paneles cuentan con una serie de indicadores y pulsadores de emergencia en la puerta frontal de acceso, los cuales se encuentran desconectados y, por tanto, no poseen ningún uso. Por medidas de seguridad industrial se requieren ciertas protecciones eléctricas como pulsadores de emergencia, fusileras,

Figura 17. **Indicadores y pulsadores de emergencia (vista frontal)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 18. **Indicadores y pulsadores de emergencia (vista trasera)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 19. **Pulsadores sin uso (frontal)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 20. **Pulsadores sin uso (trasero)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Se encontraron presentes conexiones con daños considerables, debido a probables cortocircuitos o sobre corrientes.

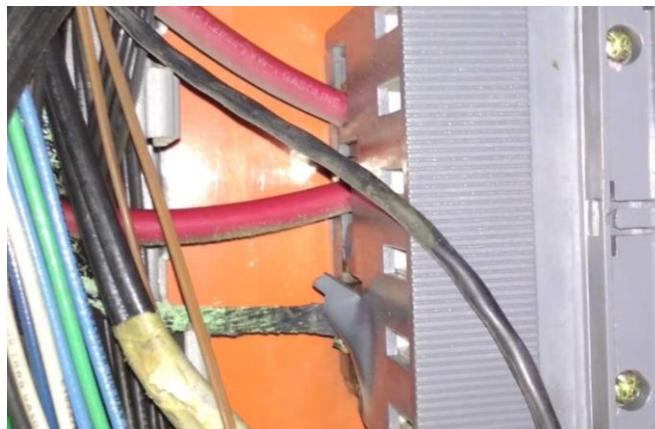
Para encontrar la causa de los daños mencionados se realizará un estudio de las líneas de conexión en cuestión, la corriente promedio que manejan, corrientes pico registradas y posibles accidentes al momento de la manipulación de los componentes involucrados.

Figura 21. **Cable dañado**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 22. **Daños por sobre corrientes o cortocircuitos**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

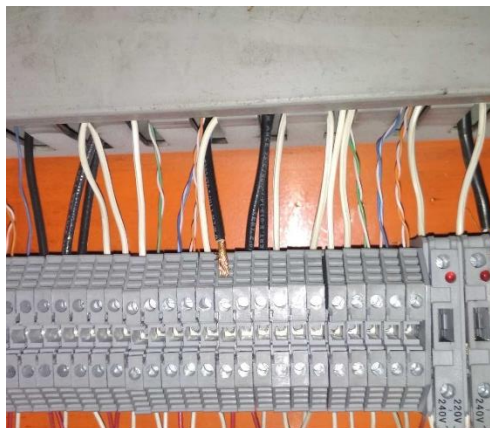
Figura 23. **Cables de *breakers* dañados**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Se encontraron una serie de conexiones al aire sin aislamiento en sus terminales, aparentemente sin uso alguno, además de desconocerse si transita algún tipo de señal en específico por ellas.

Figura 24. **Conexiones al aire**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Algunos componentes presentan un excesivo acumulamiento de polvo y suciedad, esto es perjudicial en cuanto al tiempo de vida de estos.

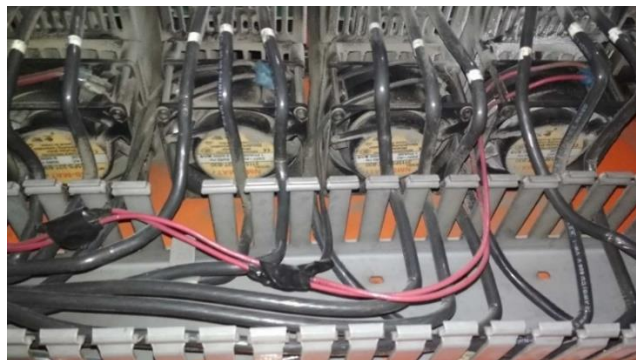
Se observa que algunos de los ventiladores que vienen ensamblados en unos controladores de potencia ya se encuentran dañados.

Figura 25. **Ventiladores de controladores de potencia dañados (panel cámara 1)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

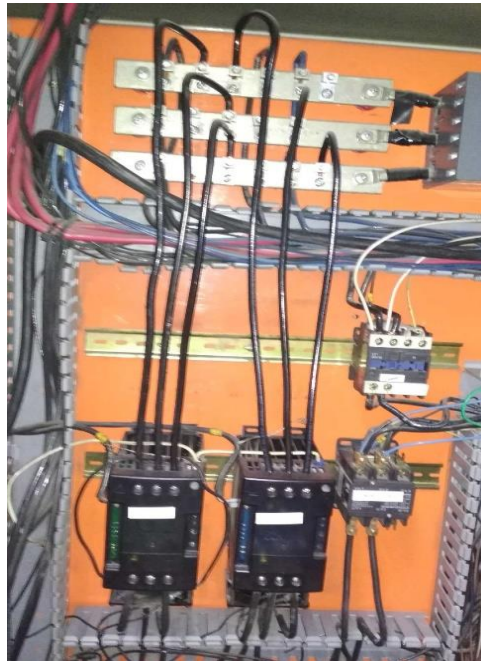
Figura 26. **Ventiladores de controladores de potencia dañados (panel cámara 5 y 6)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Los controladores de potencia trifásicos se encuentran conectados directamente a sus líneas de fase respectivas sin ningún tipo de protección previa en la conexión.

Figura 27. **Falta de protección entre pletinas y equipos**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Las conexiones hacia los módulos ADC a pesar de estar etiquetados se encuentran en desorden además de estar junto a las líneas de alta tensión.

Figura 28. **Desorden de conexiones**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

3.2. Sistema de humidificadores

Sistema cuya función radica en agregar partículas de agua en el aire de un espacio controlado mediante el uso de energía térmica.

3.2.1. Descripción del sistema

El sistema de humidificación de las cámaras se basa en la implementación de barriles para acumular agua y generar vapor de ella. Este funciona bajo dos sistemas de control independientes.

Primeramente, se tiene el control de nivel, del cual el llenado se trabaja con una electroválvula controlada por un circuito que censa mediante electrodos a tres alturas distintas para determinar si el barril ya alcanzó el rango necesario. Aunque el vaciado del barril se da principalmente por evaporación, también se tiene un sistema de purga automático controlado por un temporizador.

Para la evaporación se da mediante una serie de electrodos ubicados dentro del barril, estos son alimentados mediante un control de potencia de estado sólido trifásico, estos se activan en función de un control PID que determina el vapor necesario para alcanzar el nivel necesario de humedad relativa necesario.

3.2.2. Estado del sistema

Algunos de los barriles del sistema de humidificación se encuentran seriamente deteriorados a simple vista.

En la figura 30 se puede observar una acumulación importante de sarro lo que puede indicar una posible fuga de agua proveniente del barril.

Figura 29. **Tanque humidificador**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

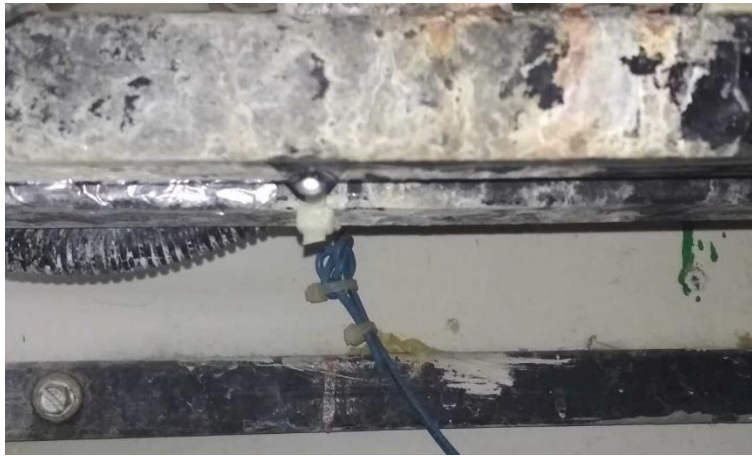
Figura 30. **Sarro y óxido en la base del barril**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Observando más de cerca se confirma la causa de la acumulación de sarro en la base del barril, al parecer la fuga se intentó reparar con un pegamento de soldadura en frío, sin embargo, no se realizó correctamente por lo que la fuga persiste, como se puede apreciar en la figura 31.

Figura 31. Fuga de agua en la base del barril



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Las conexiones superiores del barril que corresponden a los electrodos para evaporar el agua se encuentran muy deteriorados combinando acumulación de sarro y óxido, esto incluye también al conector que alimenta los electrodos.

Se observa también señales de quemadura por arco eléctrico, lo que indica las consecuencias del mal contacto producido el daño de la humedad.

Figura 32. **Vista superior de un barril (desconectado)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 33. **Corrosión en conectores de alimentación de electrodos**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Figura 34. **Corrosión en conector de electrodo**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Haciendo un estudio más a fondo se encontró que entre los electrodos encargados de censar la altura del agua en el barril marcan una resistencia muy baja, si se toma en cuenta que la conexión física entre electrodos en el momento de tomar la lectura es el propio ambiente (aire) y tubo pvc, tendría que medir como un circuito abierto (una impedancia muy alta del orden de mega ohms).

Debido a que el agua con la que se llenan los barriles no se filtra ni se trata previamente a su uso, esta contiene minerales que se acumulan en las paredes del barril y de las tuberías como residuos salinos.

Esta acumulación de minerales tiene la característica de ser de baja impedancia eléctrica por el alto contenido salino, lo que perjudica al sistema de manera considerable creando una serie de resistencias conectadas a los electrodos que miden la altura del líquido dando lugar a que el circuito de

control detecte mediciones erróneas dando lugar a que en ocasiones el barril se llene al punto de rebalsarse al no censarse de manera correcta.

Figura 35. **Medición del sensor de nivel del barril (sin agua)**



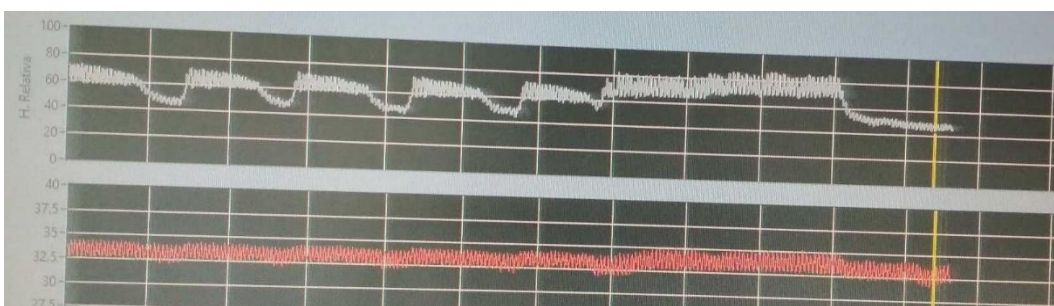
Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Internamente los electrodos del barril pueden ser activados solamente hasta estar sumergidos ya que el líquido acumulado en el barril sirve para cerrar el circuito permitiendo el calentamiento del agua para aprovechar el vapor en las cámaras. Esto representa un riesgo para la integridad de los componentes, ya que al acumularse las sales que no se evaporan, elevan el nivel de conductividad del agua disparando el consumo de corriente y, por tanto, accionando las protecciones que evitan que el control de potencia sufra daños irreparables, lo que podría generar continuos gastos de reparación.

Las pruebas que se corren en las cámaras son monitoreadas desde un servidor que trabaja bajo el software NI LabView, mediante el cual se generan gráficas en tiempo real que servirán luego como constancia del funcionamiento de los equipos de refrigeración bajo determinadas medidas de tensión de alimentación, temperatura y humedad relativa del ambiente. Por lo anterior, es necesario que dichos valores sean lo más estables posibles para dar veracidad a las especificaciones que serán expuestas para cada modelo que sea aprobado por el laboratorio.

El problema de acumulación de sedimento salino en el barril provoca que el sistema funcione de manera inestable debido a que, al elevarse la conductividad y el consumo de los electrodos, estos se calientan más velozmente y a mayores temperaturas, esto sumado al constante disparo de las protecciones eléctricas da como resultado un comportamiento como el que se observa en la figura 36.

Figura 36. **Lectura de humedad de la cámara 1 (color gris)**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

3.3. Sistema de control de tensión

Sistema de ajuste automático de tensión de salida usado para obtener voltajes estables dentro de rangos establecidos según sea necesario.

3.3.1. Descripción del sistema

Debido al alcance del mercado actual de la empresa, los equipos de refrigeración deben ser probados según parámetros específicos de tensión de alimentación de corriente alterna, así como de la frecuencia de esta, ya que los estándares de frecuencia y tensión tienden a variar según normas acatadas por cada país. Además de que ciertas pruebas requieren verificar cuál es el comportamiento de los equipos en prueba cuando la tensión de alimentación se eleva o cae fuera del rango normal.

Para cumplir con las condiciones necesarias se cuenta con un sistema de control de tensión formado por un variac (transformador variable) para conseguir el ajusten necesario de voltaje, un circuito de control on/off con histéresis, un transductor de voltaje y un motor DC de bajos RPM y alto torque.

El motor DC se controla mediante un arreglo de relays del circuito de control para hacer de puente H. la tensión de salida del variac es censada mediante un transductor de voltaje que convierte una señal de 0 a 250 VAC a una señal estándar 0 a 10 volts, esto es registrado por el circuito y comunicado a un servidor mediante protocolo RS485 para que desde software se pueda ajustar el voltaje deseado para alimentar el equipo de refrigeración en prueba.

3.3.2. Estado del sistema

Se cuenta con un control de tensión por cámara del laboratorio, por lo que se tienen 6 sistemas de control independientes.

Se tiene registro de ciertas fallas anómalas en estos sistemas si explicación aparente y uno de ellos se encuentra desconectado debido a que al estar encendido el eje que conecta físicamente el variac con el motor DC comienza a generar calor de manera progresiva hasta terminar dañando los componentes como ya sucedió en una ocasión según los operarios. Estos sistemas se encuentran sobre estructuras metálicas aseguradas a los pares para soportar las aproximadamente 15 lb de peso por variac.

Figura 37. **Sistema de control de tensión que presenta falla de sobrecalentamiento**



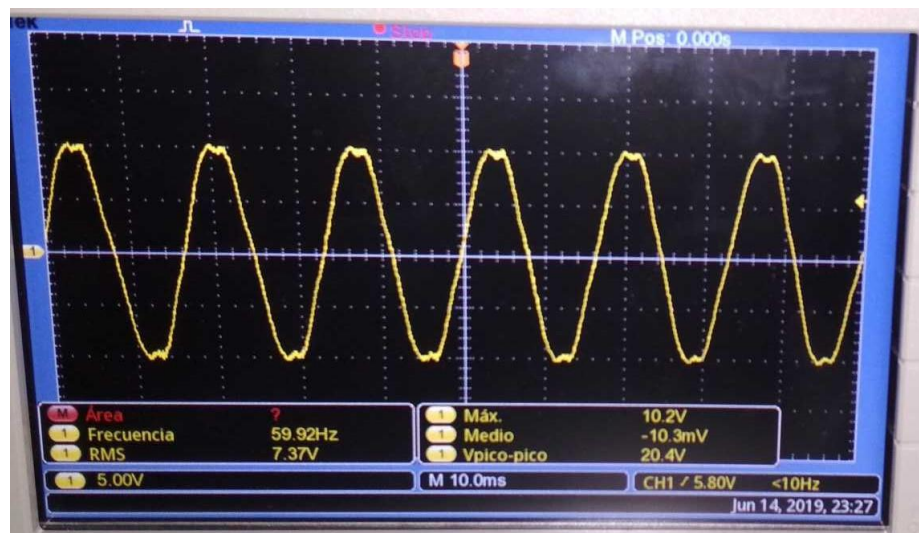
Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Con ayuda de un osciloscopio se buscaron señales de corrientes de fugas o corrientes inducidas, tomando como punto de partida el eje central del variac

ya que allí es donde se sabe que se acumula calor de forma progresiva y a pesar de que el eje no tiene conexión eléctrica con ninguno de los devanados del transformador se encontró una corriente inducida por la propia alimentación confirmándose por compartir la misma frecuencia y fase de 60 Hz.

En la figura 38 se observa que la tensión tiene un valor pico-pico de 20,4 V lo cual resulta bastante alto si se considera que esta tensión puede estar llegando al circuito de control del motor que trabaja con 12 VDC.

Figura 38. **Tensión inducida sobre el eje del variac**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

3.4. Conexiones dentro de las cámaras climáticas

Dentro de las cámaras se tienen las conexiones de alimentación para los equipos, sensores de humedad y de temperatura.

Las conexiones de alimentación cuentan con pequeñas cajas eléctricas con tomacorrientes y algunas extensiones de estas para cuando por las especificaciones físicas de algún equipo no permita su uso, además que permiten mayor libertad de que estos puedan moverse para ser trabajados durante la prueba en curso sin desconexiones no deseadas. Las conexiones referentes a humedad son para solamente para el sensor encargado de monitorear el nivel de humedad relativa de la cámara.

Las conexiones para las mediciones de temperatura son un grupo de termocuplas que permiten monitorear y registrar la temperatura de la cámara, temperatura de los componentes de los equipos de refrigeración (compresor, motor de condensador, motor de evaporador, y otros.), temperatura del espacio controlado dentro del refrigerador y la temperatura interna de los productos empleados para probar los equipos (gaseosas, lácteos, cervezas y en ocasiones recipientes con glicol).

3.4.1. Estado encontrado

Las conexiones de tensión se encuentran con cierto uso, pero sin deterioro significativo, su principal inconveniente resulta a nivel visual ya que suelen encontrarse desordenadas sobre el suelo de las cámaras o enrolladas de manera poco estética. Las conexiones de los sensores de humedad se encuentran en buen estado sin mayores problemas.

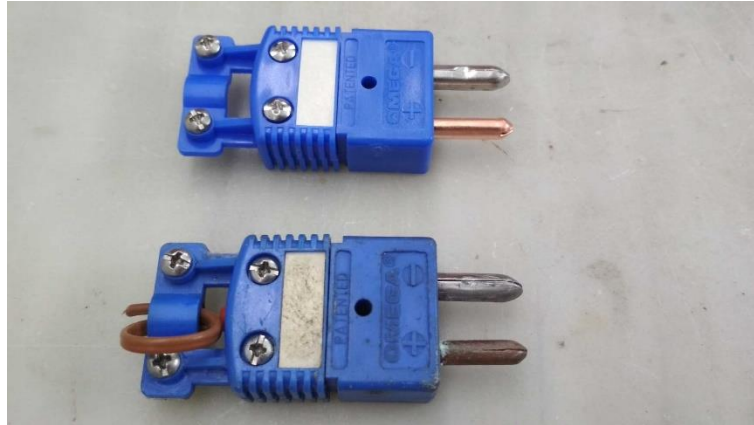
Las conexiones de medición de temperatura constan de un panel de conectores hembra especiales para termopares tipo T de la marca Ω Omega®, estos mediante conectores y un grupo de termopares permiten tomar mediciones en los equipos en prueba y del ambiente de cada cámara.

Los termopares tipo T comúnmente son utilizados en aplicaciones de refrigeración ya que son resistentes cuando se tienen atmósferas oxidantes, húmedas y en vacío. Por cámara se cuenta con 108 conexiones disponibles para termopares, de los cuales dependiendo del tamaño o cantidad de equipos que sea ingresado a una cámara, dictará su distribución. Por lo general al ser ingresado un equipo grande (ej: de tres puertas) ocupa la mayoría de los sensores y en algunos casos, su totalidad, pero comúnmente suele tenerse dos equipos medianos o pequeños utilizando la mitad de los sensores por equipo.

La longitud normal de los termopares que se utiliza es de 9 metros, aunque se puede apreciar una cantidad considerable de ellos de menor tamaño, esto se debe a la degradación que han sufrido por el paso del tiempo al estar continuamente expuestos a los entornos de las cámaras.

Este envejecimiento ha provocado corrosión en al extremo de la unión de aleaciones de los termopares y de darse el caso, esta se extiende de forma progresiva a través del cable por lo que suelen ir recortando las puntas afectadas para continuar su uso, ya que al corroerse la punta del termopar se obtienen mediciones anómalas. La mayoría de los conectores padece del mismo problema presentando sarro y óxido en sus terminales.

Figura 39. **Comparación de corrosión de conectores de termopar**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

4. PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y CORRECTIVO

4.1. Paneles eléctricos

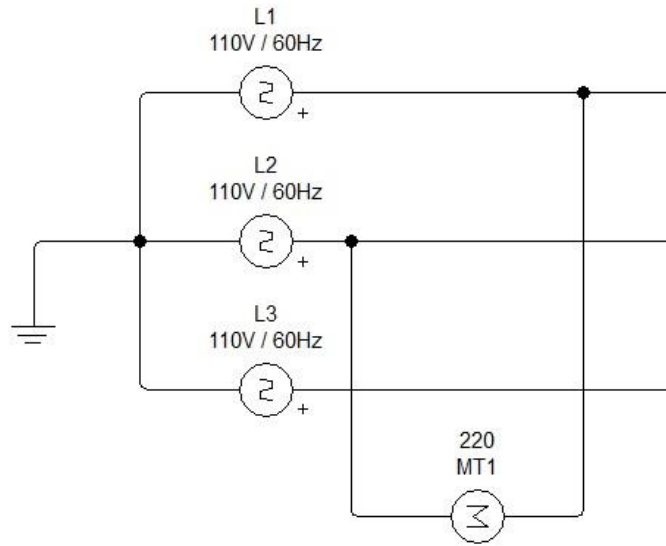
Para evitar la excesiva acumulación de polvo y partículas de suciedad dentro de los paneles eléctricos es necesario que estos se mantengan cerrados y que exista un flujo constante de aire de entrada y salida para disipar el calor producido de manera eficaz.

Por lo general, los paneles eléctricos prefabricados de gran tamaño suelen ser diseñados tomando en cuenta la ventilación que necesitarán, por lo que ya vienen con escotillas o secciones troqueladas para la instalación de ventiladores de tamaños estándares.

Para el caso de los paneles con los que cuenta la empresa, vienen de fábrica con secciones troqueladas donde traen instalados filtros para partículas. Ya que los filtros se encuentran muy sucios es necesario que sean reemplazados de forma periódica cada 6 meses o bien sean lavados mientras no estén muy deteriorados.

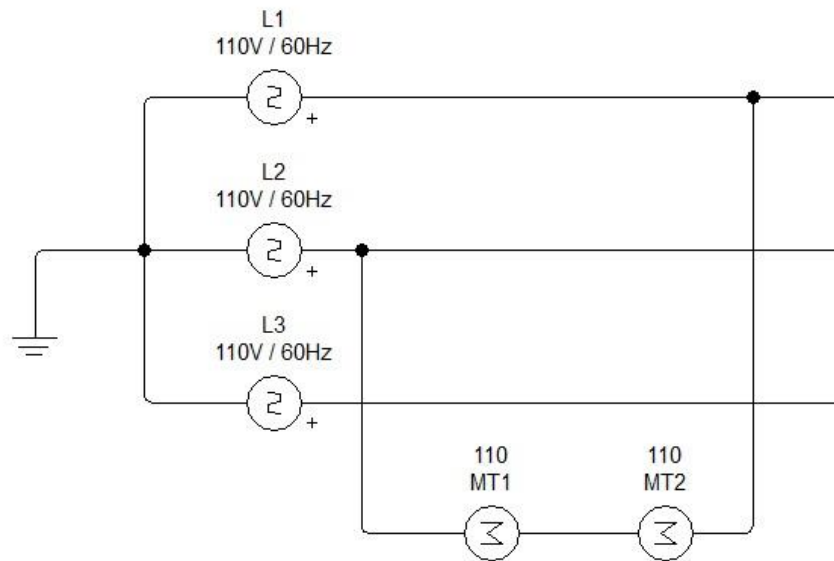
A los filtros deben asegurarse ventiladores *brushless* (sin escobillas) AC de preferencia de 220 VAC para facilitar su instalación conectándolos en paralelo a la línea trifásica de alimentación, de lo contrario sería necesario conectar dos ventiladores de 110 VAC en serie a las líneas de fase para su alimentación.

Figura 40. **Conexión 1 ventilador de 220 VAC**



Fuente: elaboración propia, empleando el software LiveWire.

Figura 41. **Conexión 2 ventiladores de 110 VAC**



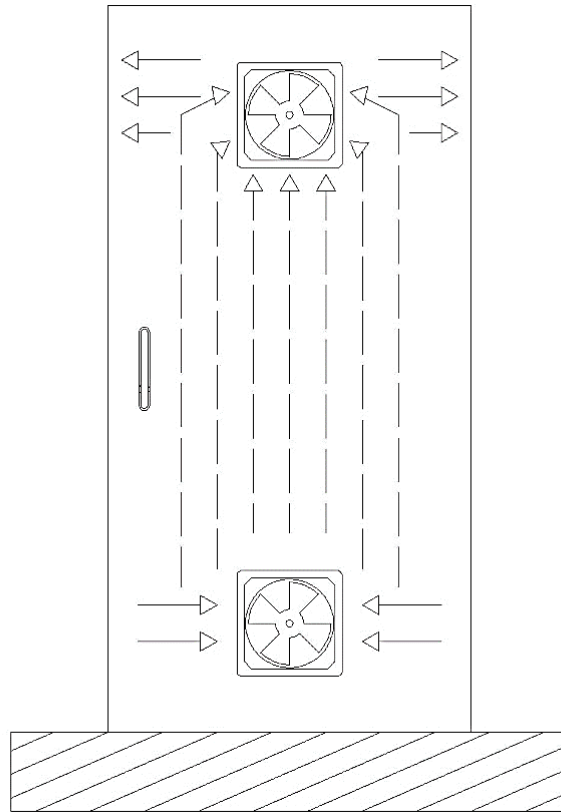
Fuente: elaboración propia, empleando el software LiveWire.

Se toma en cuenta que la temperatura del aire es inversamente proporcional a su densidad, por lo que, si su temperatura aumenta, este se expande aumentando su volumen, provocando que su densidad y peso disminuyan.

Por tanto, si se juntan en un mismo espacio dos volúmenes de aire de las mismas dimensiones cada uno a diferente temperatura, por la diferencia de densidad entre ellos, el aire a menor temperatura por su mayor peso bajará y desplazará al aire de mayor temperatura hacia arriba.

Basándose en la interacción entre los gases y sus características atmosféricas se deduce que la manera más eficiente para refrigerar un espacio mediante un flujo constante de aire (siendo en este caso los paneles eléctricos) es que el flujo de entrada sea en la posición más baja posible y el flujo de salida en la posición más alta posible, favoreciendo al desplazamiento del mayor volumen de aire posible.

Figura 42. **Flujo de aire en los paneles eléctricos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Del lado interno del panel donde se instalan los ventiladores es recomendable colocar rejillas para evitar posibles percances tanto a los operarios como a los equipos.

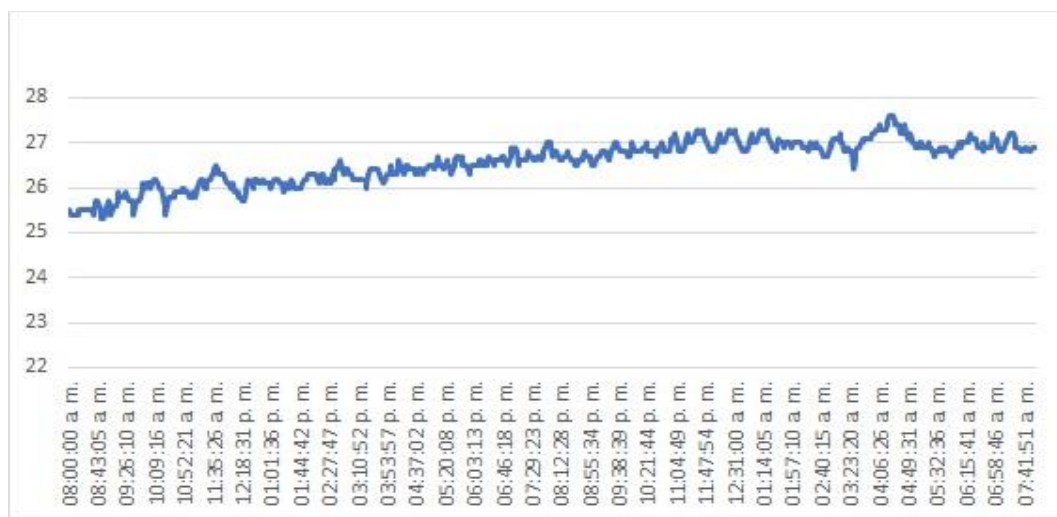
Se realizaron pruebas registrando la temperatura del panel eléctrico de la cámara climática 1 en múltiples ubicaciones, siendo esta la de mayor consumo y la que más calor genera debido a los controles de potencia Watson y a una fuente de voltaje de 24VCD Siemens instalados dentro.

Las mediciones de temperatura se realizaron con y sin ventilación para poder tener un margen de comparación teniendo la temperatura del ambiente del cuarto como referencia.

En la figura 43 se observa el cambio de temperatura en el cuarto de máquinas donde se ubica la mayor parte de los controles de potencia de las cámaras. Se observa que la temperatura oscila entre el rango de 25 °C a 28 °C debido a que no existe un flujo constante de aire que evite que el calor se acumule dentro, por ello inclusive en horario nocturno no se observa que la medición disminuya de manera significativa.

La gráfica solamente representa la temperatura promedio del día que se tomaron las mediciones dentro de los paneles, por lo que esta se verá considerablemente afectada por la temperatura que dicte la estación climática de momento.

Figura 43. **Temperatura del ambiente del cuarto de máquinas**

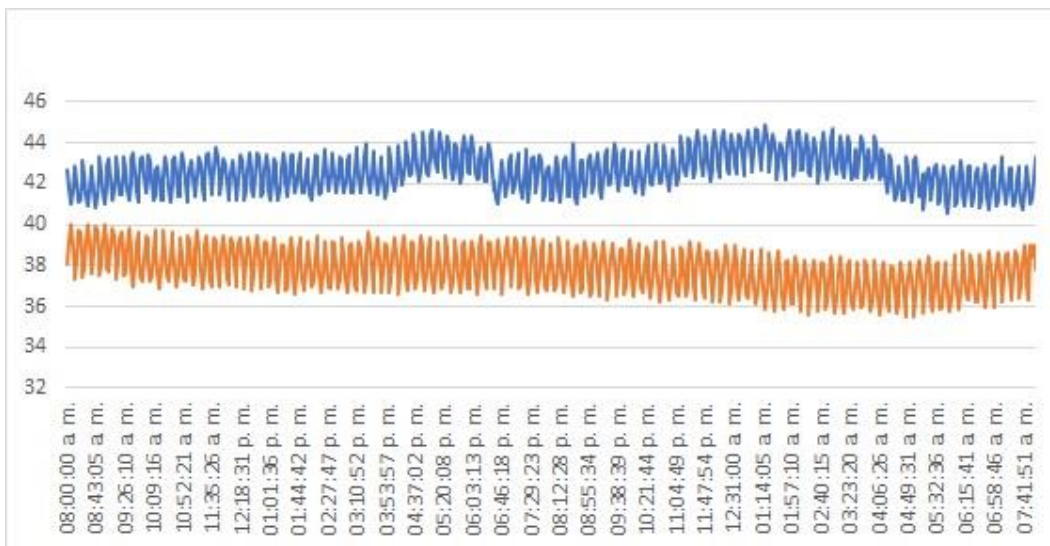


Fuente: elaboración propia.

La medición más importante dentro del panel resulta ser sobre los disipadores de los controladores de potencia, ya que estos controlan la alimentación de los sistemas más importantes, por tanto, la disminución de temperatura sobre el disipador permitirá alargar la vida útil de los tiristores SCR.

Puede observarse en la figura X que la temperatura sin ventilación (gráfico azul) sobre los disipadores puede fácilmente llegar a los 45° bajo la demanda adecuada, en cambio al tener un flujo constante de aire hacia el panel (gráfico naranja) puede reducir su temperatura alrededor de 5° a 8° fácilmente.

Figura 44. **Temperatura en disipador de control de potencia Watlow**

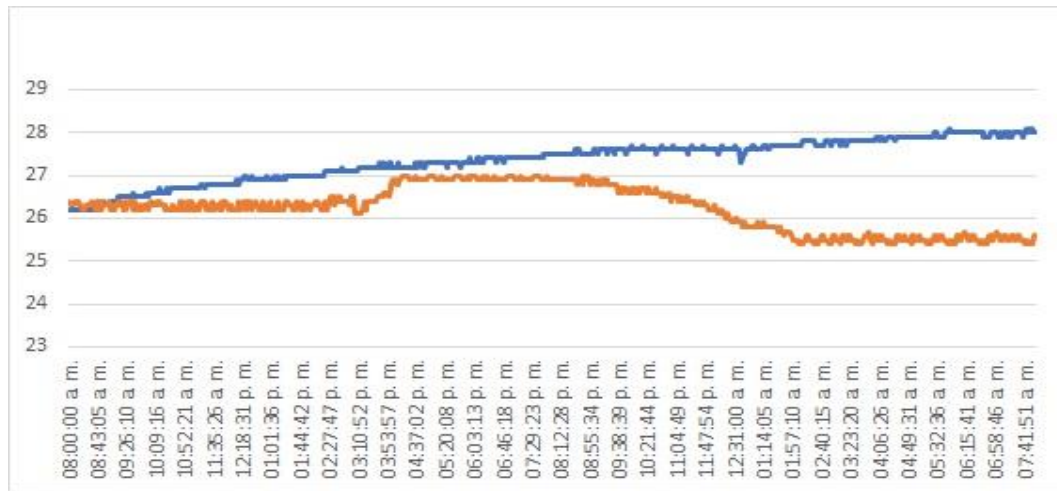


Fuente: elaboración propia.

La temperatura, tanto en la parte baja como alta del panel disminuyó gracias a la ventilación. Entre el rango de 3 a 5 pm del día se observa un incremento significativo en el gráfico naranja debido a que este por lo general es el horario con mayor demanda de energía por los sistemas por lo que hay un

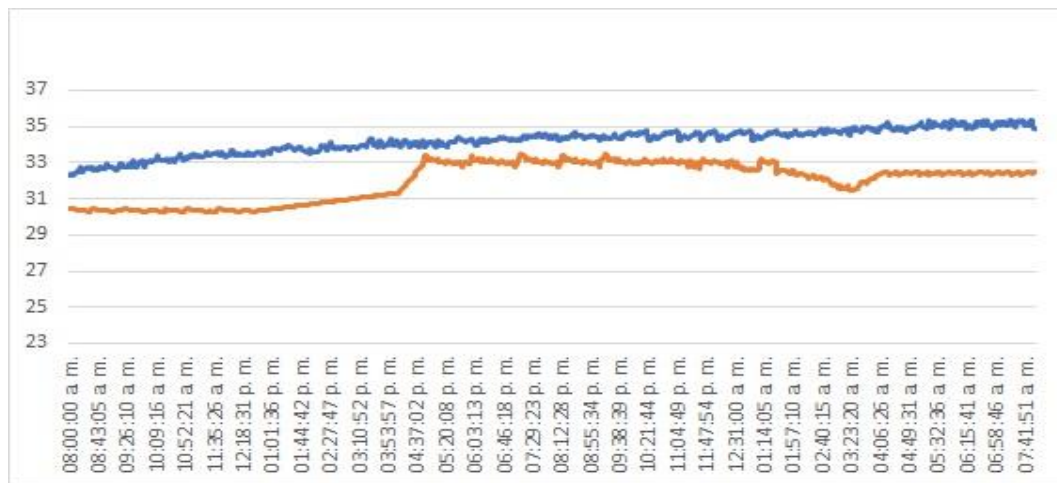
aumento en la potencia suministrada y por tanto en la disipada como se observa en las figuras 45 y 46.

Figura 45. **Temperatura en la parte baja del panel de la cámara 1**



Fuente: elaboración propia.

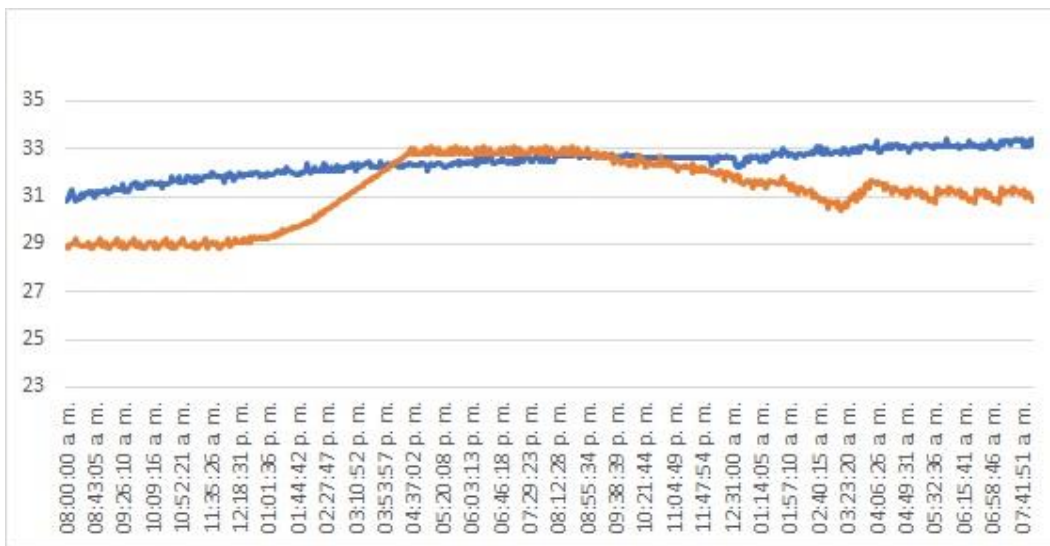
Figura 46. **Temperatura en la parte alta del panel de la cámara 1**



Fuente: elaboración propia.

A una altura media del panel se tiene el mismo aumento de temperatura sobre el horario de mayor demanda de potencia, salvo con la diferencia de que no hay una diferencia tan marcada como en el caso de las gráficas previas debido a que en esta área se concentra el calor generado por la fuente de 24VCD y los controladores de potencia, lo que dificulta su enfriamiento como se observa en la figura 47.

Figura 47. **Temperatura en la parte central del panel de la cámara 1**



Fuente: elaboración propia.

4.2. Sistema de humidificación

El problema más grave que pueden llegar a presentar estos sistemas es cuando los barriles llevan un período muy largo de tiempo sin recibir limpieza por dentro, ya que como fue mencionado previamente en el diagnóstico la acumulación de minerales salinos causa que los parámetros del sistema se

disparen generando diversos conflictos que pueden resultar en gastos importantes en reparaciones y paros imprevistos de las cámaras.

Para determinar el período de limpieza de los barriles es necesario obtener un estimado del tiempo que le toma a este llenarse de minerales salinos solidificados a un nivel determinado, para ello se recomienda llevar un registro para buscar predecir el mejor momento para llevar a cabo este mantenimiento.

El nivel de humedad relativa solicitada por las pruebas en curso solo determina la cantidad de agua que debe ser evaporada. Por tanto, los electrodos funcionan de manera intermitente hasta conseguir alcanzar el nivel requerido de forma suave y controlable. Esto significa que el consumo de los electrodos de los barriles debería ser en teoría aproximadamente siempre el mismo al estar alimentados. Tomando en cuenta que al acumularse el mineral salino aumenta la conductividad y, por tanto, altera el consumo de los electrodos.

En las condiciones previamente descritas se puede utilizar el consumo de corriente de los electrodos como valor de medición en busca de ajustar una expresión matemática que pueda ayudar a predecir si el incremento de consumo es moderado y constante o si este se incrementa de forma abrupta. Para ello se requiere llevar un registro etiquetando cada electrodo de todos los barriles y recolectar el dato de consumo mediante una pinza amperométrica, de manera que el sistema pueda seguir en funcionamiento sin interrupción alguna.

Las mediciones fácilmente pueden recolectarse 1 vez por semana ya que, aunque los electrodos se enciendan de manera intermitente, solo se requiere esperar algunos minutos a que estos pasen a estado “on” y algunos segundos

para tomar la medición, además que puede realizarse a cualquier hora del día que los barriles estén en funcionamiento por lo que resulta un pequeño estudio bastante flexible en busca de llevar un mejor control de los sistemas de humidificación.

Otra circunstancia de importancia en cuanto a los barriles es la facilidad con la que se deterioran los conectores de los electrodos por corrosión. A pesar de ser conectores provistos por el mismo fabricante (Carel Parts), estos se ven expuestos a muchos factores que favorecen a la corrosión galvánica como los cambios de temperatura, humedad, alta corriente que transita por el conductor.

Para estos casos se recomienda el uso de inhibidores de corrosión ya sea en forma de aerosol para crear un recubrimiento sobre la pieza o bien empleando espumas impregnadas con inhibidor de corrosión para su aplicación directa o para liberar vapores que se adhieren a superficies metálicas sin interferir con sus propiedades eléctricas.

Ya que estos están diseñados para ser instalados dentro de espacios cerrados para concentrar los vapores en lugares específicos puede aprovecharse las cubiertas plásticas de los conectores que proporciona Carel Parts para almacenar una pequeña cantidad de la espuma en el espacio interno sobrante.

Figura 48. **Conector para tronillo M6 para barril de humidificación**



Fuente: Carel Parts. *Adaptador para tornillo M6*. <https://www.carelparts.com/carel-98c615p005-adapter-kit.html>. Consulta: 13 de febrero 2020.

El fabricante de los barriles (Carel Parts) no especifica un intervalo de servicio muy definido para este sistema debido a todos los factores que pueden afectar que escapan a su control, como por ejemplo la cantidad de minerales presentes en el agua. Por ello este estudio permitirá realizar una estimación basada en los parámetros propios del área donde se ubica la empresa.

4.3. Sistema de control de tensión

Los sistemas de control de tensión son una adaptación para transformadores variables (variacs) para automatizar su ajuste. Aunque el diseño es funcional, hay ciertos problemas persistentes en algunos de estos.

Se tiene registro que uno de estos sistemas empezó a generar calor hasta el punto de incendiarse quedando completamente destruido. Tras un proceso

de observación, prueba y análisis se encontraron varios factores que podrían provocar esta acumulación de calor.

Al no existir ninguna conexión a tierra de estos sistemas es la primera corrección en busca de resolver la acumulación de calor que estos dispositivos sufren de forma aleatoria. Después de realizar dicha conexión se utilizó el osciloscopio para revisar el resultado sobre la tensión inducida sobre el eje que se describió en el diagnóstico.

Figura 49. **Tensión inducida en variac con conexión a tierra**



Fuente: Fogel de Centroamérica S.A.

Luego de realizarse la conexión a tierra de la carcasa del variac se verificó que, en efecto, esto ayudó a reducir la tensión inducida de forma considerable, aunque no se logró eliminar la señal completamente. Esto puede deberse al estado actual del sistema de toma a tierra, puede tener un valor de resistencia alto para lo que debe tener un sistema de puesta a tierra.

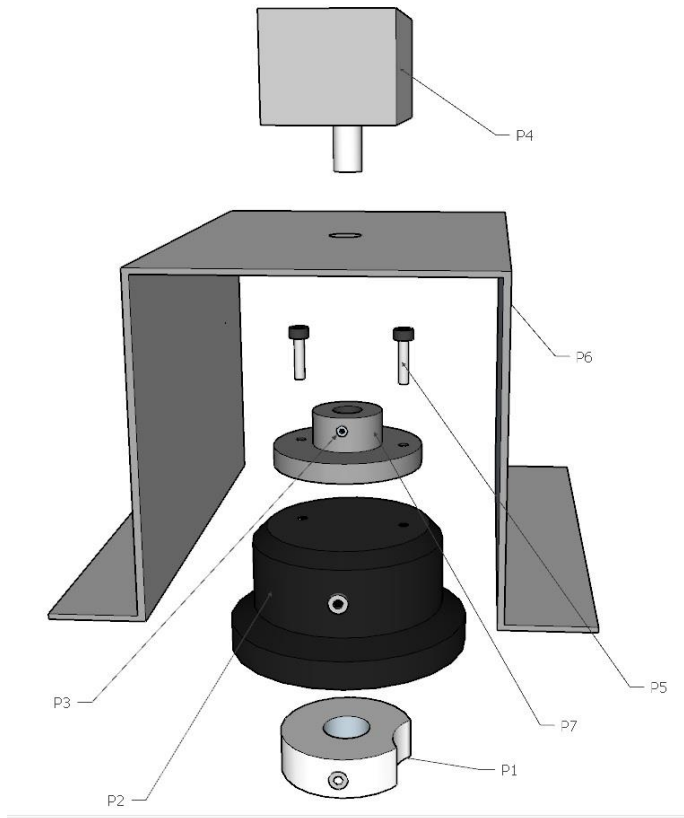
Con la conexión a tierra se hicieron más pruebas al sistema y se pensó en un principio que el problema de sobrecalentamiento estaba solucionado, pero resultó que la velocidad de acumulación de calor disminuyó en gran manera, pero el sistema seguía cantándose de forma progresiva.

Basándose en el diseño del sistema se verificó si el eje metálico del variac tenía conexión hacia algún punto del circuito de corriente continua y resultó que al ser metálico el armazón de la caja de reducción de engranajes del motor DC existía conexión entre el eje del variac y el negativo de la fuente de 12 VDC. Para confirmar de forma definitiva que esta conexión entre el negativo de una señal DC y una señal alterna oscilatoria generaba el sobrecalentamiento se desconectó físicamente el eje del variac al motor DC y se monitoreo por horas estando ambos alimentados, lo que confirmó que en efecto este era el problema ya que el sistema no generó ninguna temperatura anómala.

Tomando en cuenta cuál es el problema que presenta el sistema y el hecho de que los otros sistemas pueden llegar a producir el mismo conflicto de sobrecalentamiento. Se plantea a continuación mediante gráficos el diseño de algunas piezas extras para corregir el sistema siempre basándose en el diseño original.

En la figura 50 se puede apreciar el rediseño y ensamble para corregir el problema de sobrecalentamiento. Esto consiste en volver a utilizar perilla selectora (P7) que traen los variacs ya que estas, por norma general, siempre son aislantes y de materiales resistentes tales como la baquelita. Internamente estas perillas no son completamente sólidas ya que el fabricante busca ahorrar materia prima por lo que si se desea reforzar la perilla es recomendable rellenar el espacio vacío interno con pegamentos epóxicos, así maximizar su vida útil.

Figura 50. **Rediseño del sistema**

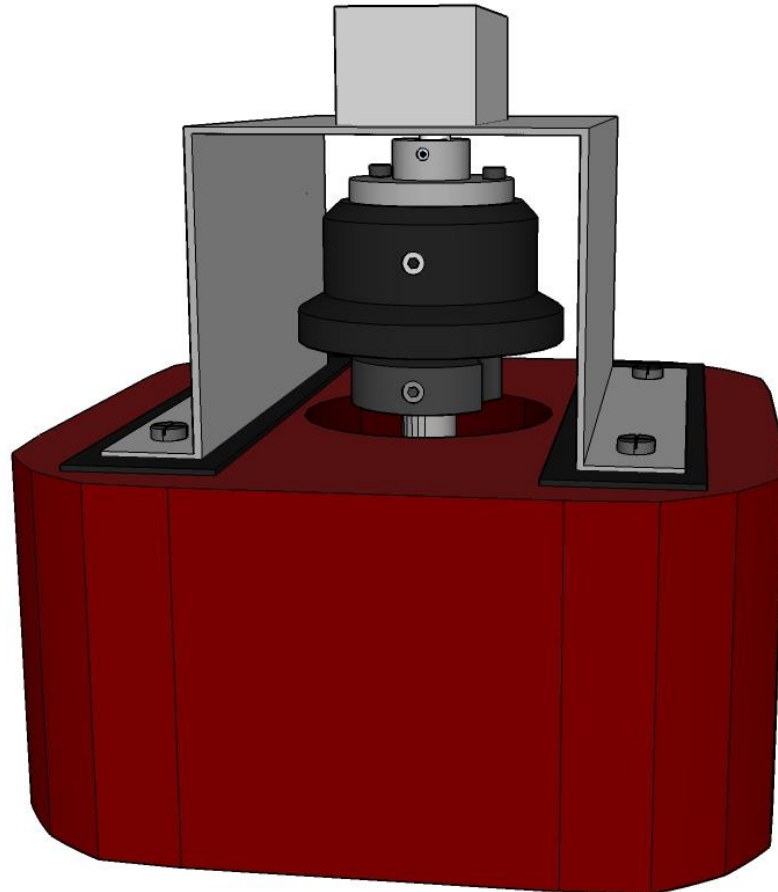


Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

También se requiere diseñar mediante un servicio de torno una nueva pieza (P3) la cual consiste en dos discos de diferente diámetro siendo en pequeño arriba, de tal manera que sobre el disco pequeño lleve una perforación en su centro del tamaño del eje del motor DC y una perforación en un costado para colocar un tornillo castigador y así asegurar el motor. Sobre el disco grande realizar dos perforaciones en lados opuestos los cuales deben coincidir con dos perforaciones sobre la perilla selectora de manera que mediante dos tornillos ambas piezas puedan ser aseguradas con firmeza.

La lámina metálica (P6) será necesario reemplazarla con otra que cumpla con las dimensiones de altura requerida para agregar las nuevas piezas.

Figura 51. **Modificación (resultado final)**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp.

4.4. Estudio de armónicos

Dentro del laboratorio de pruebas se cuenta con una serie de medidores de energía y calidad de alimentación del fabricante Schneider Electric modelo PowerLogic ION7330, estos son empleados para obtener una medición

confiable de las variables eléctricas relacionadas con la operación de cada cámara climática (corriente de consumo, tensión, potencia aparente, potencia reactiva, factor de potencia).

Entre las características más relevantes para este trabajo con las que cuentan estos dispositivos se tiene que incorpora un mapa de registros de 16 o 32 bits según sea la resolución necesaria. Además, son configurables mediante un software proporcionado por el fabricante ya que el módulo cuenta con una gran lista de complejos cálculos matemáticos que pueden ser extraídos de las mediciones de energía tales como la distorsión armónica del primer hasta el quinceavo armónico o el valor total de distorsión armónica THD. Todo esto mediante comunicación RS-485 mediante el protocolo MODBUS.

El objetivo de este estudio es diseñar un software que permita recolectar la distorsión armónica presente en la red, más concretamente en las cámaras climáticas donde se ha reportado fallas de equipos electrónicos sin explicación hasta el momento y corroborar la posible correlación con la distorsión armónica existente.

Para lograr esto se requiere de un sistema que permita la medición del aporte de cada armónico por separado y de ser posible dar el valor de distorsión armónica total (aunque este valor también puede calcularse en base a la medición de los armónicos individuales por lo que no es en extremo necesario que lo genere el módulo)

4.4.1. Software

Para diseñar un software escalable pensado en la infraestructura con la que se cuenta dentro de la empresa, la mejor opción es optar por el lenguaje de

programación G (gráfica) dado en la plataforma de desarrollo LabView distribuida por *National Instruments*.

Todo el sistema de recolección, calibración, configuración y monitoreo de las pruebas llevadas a cabo dentro de las cámaras climáticas se trabaja bajo aplicaciones diseñadas en LabView

4.4.1.1. Configuración de registros

Primeramente, se necesitó reajustar el mapeado de registros del ION 7330 para incluir las mediciones de distorsión armónica en valores óptimos que puedan representar las mediciones lo más exactas posibles. Esto se consigue utilizando el software gratuito PowerLogic ION Setup, el cual proporciona un entorno intuitivo para configurar la dirección de los registros por utilizar, divisor por emplearse para tomar en cuenta valores decimales, el tamaño por registro (16 o 32 bits) según la resolución necesitada, rango de valores posibles para el registro y el valor por almacenar.

Para ahorrar memoria y maximizar la cantidad de mediciones a registrar se optó por configurar los registros de 16 bits. Tomando en cuenta que la distorsión armónica oscilará entre 0 a 100 y que por lo general tendrá un valor pequeño, por lo que se ha de considerar la necesidad de contar con decimales para expresar sus valores de manera más exacta.

Para esto se configuró que los 16 bits representen valores de 0 a 65535 (*unsigned integer*) descartando valores negativos que en este caso no son necesarios. Para incluir los valores decimales el software también permite asignar un divisor al registro basado en décadas, por lo que al configurarlo con divisor 100 se tendrá un rango final de posibles valores entre 0,00 a 655,35, lo

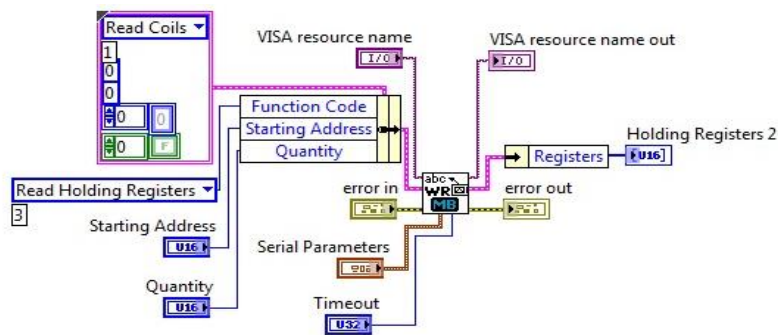
que cubre sobradamente el límite hipotético de una distorsión armónica de un valor muy alto cerca del 100 % (100,00).

4.4.1.2. Comunicación

La comunicación entre el ordenador y el ION7330 se lleva a cabo mediante el protocolo MODBUS RTU a través de un enlace ya establecido previamente que se empleaba solamente para el monitoreo y registro de las variables eléctricas generales (tensión, consumo, potencia), por lo que solo se requirió de modificarlo para agregar la lectura de los valores relacionados con las distorsiones armónicas.

Debido a derechos de autor del código de la comunicación, no se expondrán capturas de este, sino que se explicará su funcionamiento mediante un ejemplo de comunicación MODBUS.

Figura 52. **Lectura de registros mediante modbus**



Fuente: National Instruments. *NI MODBUS library 1.2.1*. <https://www.ni.com/example/29756/en/>.

Consulta: 7 de marzo 2020.

4.4.1.4. Publicación de datos

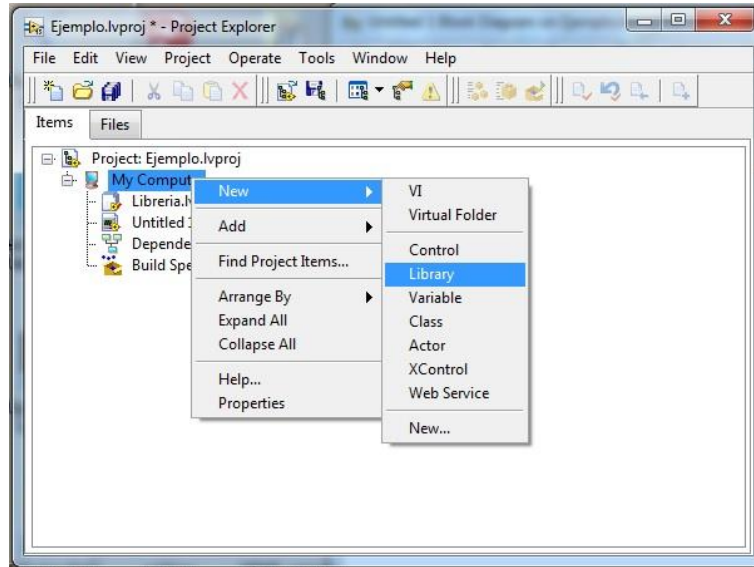
Dentro del laboratorio se maneja una larga serie de datos en tiempo real que deben ser almacenados en una base de datos para ser visualizados en tiempo real o revisar valores antiguos desde múltiples ordenadores en cualquier momento, por lo que todas estas variables son presentadas y publicadas dentro de una red local mediante aplicaciones ejecutables (.exe) diseñadas y compiladas en LabView, facilitando la implementación de cualquier software posterior que deba tener acceso a variables específicas en tiempo real dentro de la red del laboratorio.

Este tipo de diseño de implementación de variables permite que la medición y almacenamiento de datos no esté directamente ligado a otras aplicaciones que posteriormente sean desarrolladas con LabView u otras plataformas ya que si estas presentan errores que provoquen malfuncionamiento o su cierre abrupto, esto no perjudica ni interfiere con la continua lectura y guarda información en la base de datos, pues esta tarea está destinada a un servidor dedicado a este propósito.

Dentro del entorno de LabView estas variables son presentadas como variables compartidas (*shared* variables en inglés) y su estado puede verificarse en tiempo real mediante la herramienta “NI *distributed system manager*”

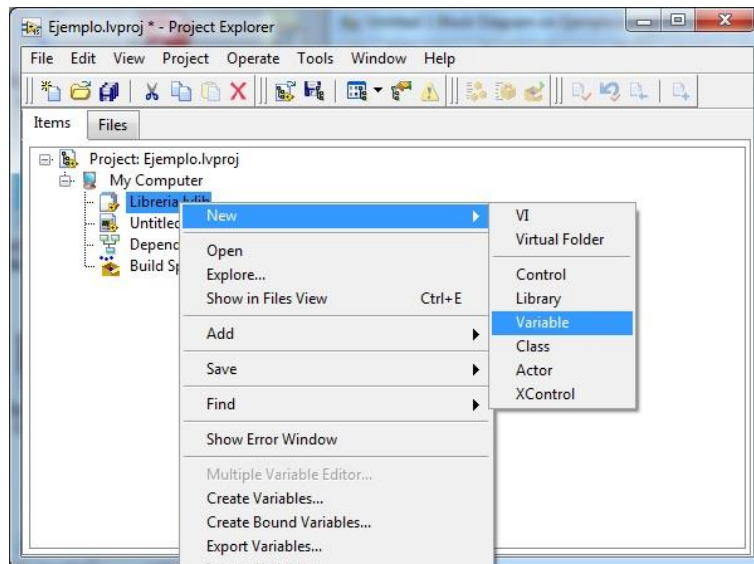
A continuación, se expondrá como trabajar y crear una variable compartida dentro del entorno de desarrollo de LabView, para ello es necesario que el proyecto donde se esté trabajando contenga una librería para crear esta variable y configurarla, como se observa en las figuras 53 y 54.

Figura 53. **Agregar una librería al proyecto**



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

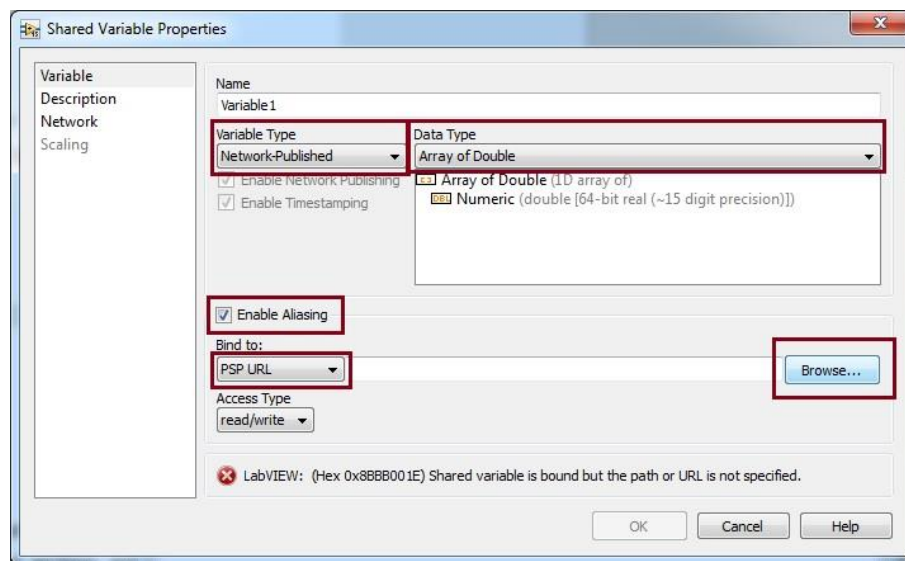
Figura 54. **Agregar una variable dentro de la librería**



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

Al crearse la variable se abrirá una ventana de configuración como la que se presenta en la Figura 55. Las opciones que deben configurarse están marcadas con un cuadro rojo de las cuales se puede cambiar el tipo de variable con el que se desee trabajar, además que en la opción “browse” se ingresa la dirección ip del ordenador donde se ubica la variable, de modo que LabView actualice automáticamente la dirección de red del equipo en caso esta llegara a cambiar por ajustes de direccionamiento estático o mediante el protocolo DHCP.

Figura 55. **Propiedades de una variable compartida**



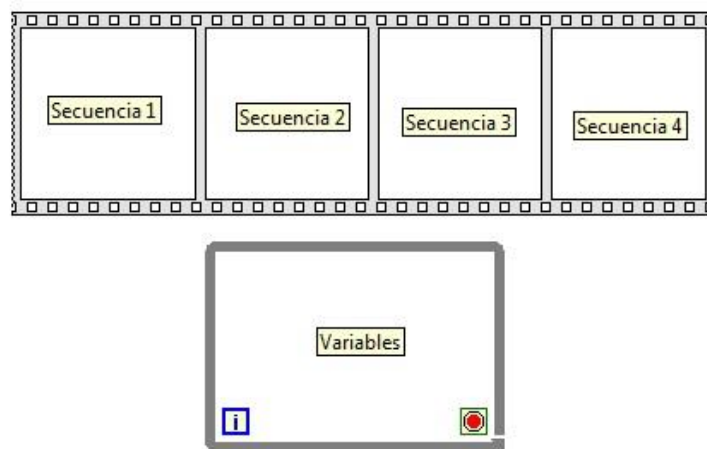
Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

4.4.1.5. **Generador de reportes**

El software para generar el archivo de reporte basado en los datos recolectados de distorsiones armónicas diseñado en LabView dentro del entorno de programación gráfico se basa en dos estructuras lógicas principales:

una secuencia ordenada para gestionar la creación del archivo, su estado y escritura de datos y un lazo o bucle (más conocido como *loop* en inglés) para la constante actualización de las variables compartidas, así como de la gestión principal de la interfaz gráfica.

Figura 56. **Estructura básica del software**



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

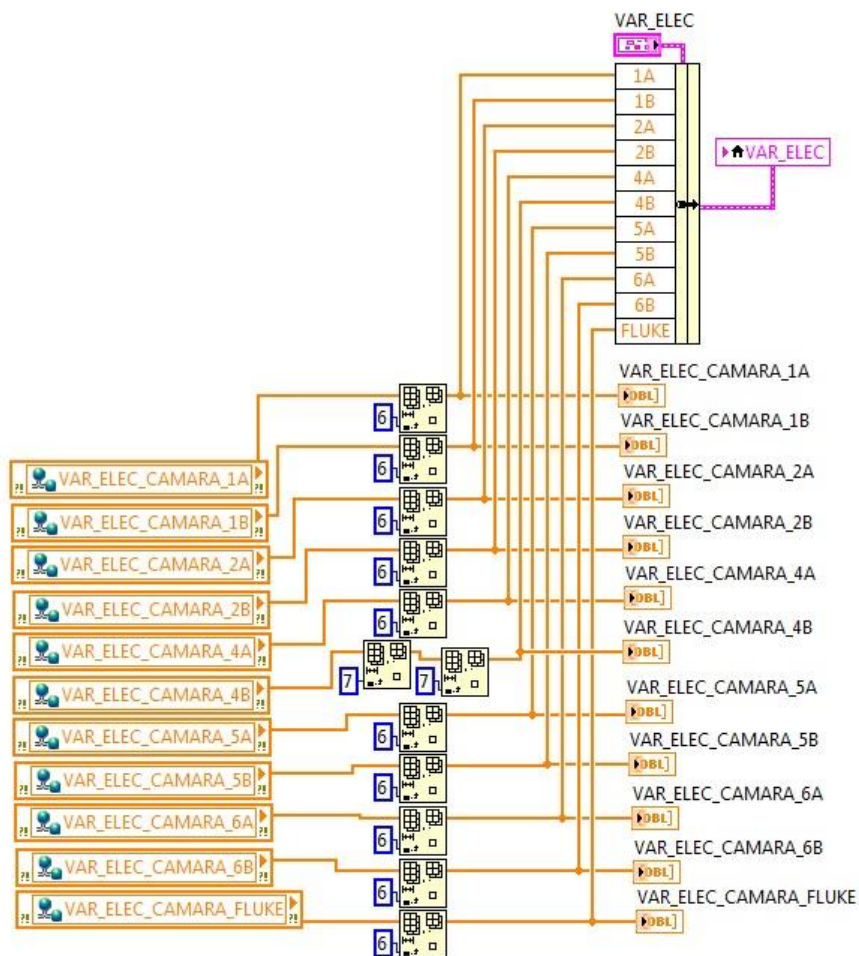
Para una comunicación más estructurada y simple de toda variable dentro del programa, se realiza la conversión o creación de variables locales para su fácil escritura y lectura.

La estructura y etiquetas de la imagen previa será de mucha utilidad a continuación ya que servirá de guía para explicar más a fondo los elementos que incorporan la estructura secuencial y el bucle que conforman la aplicación.

4.4.1.5.1. Bucle de variables e interfaz GUI

Dentro del bucle se gestiona la lectura de las variables compartidas y de la generación y actualización de interfaz gráfica de usuario.

Figura 57. Gestión de variables eléctricas



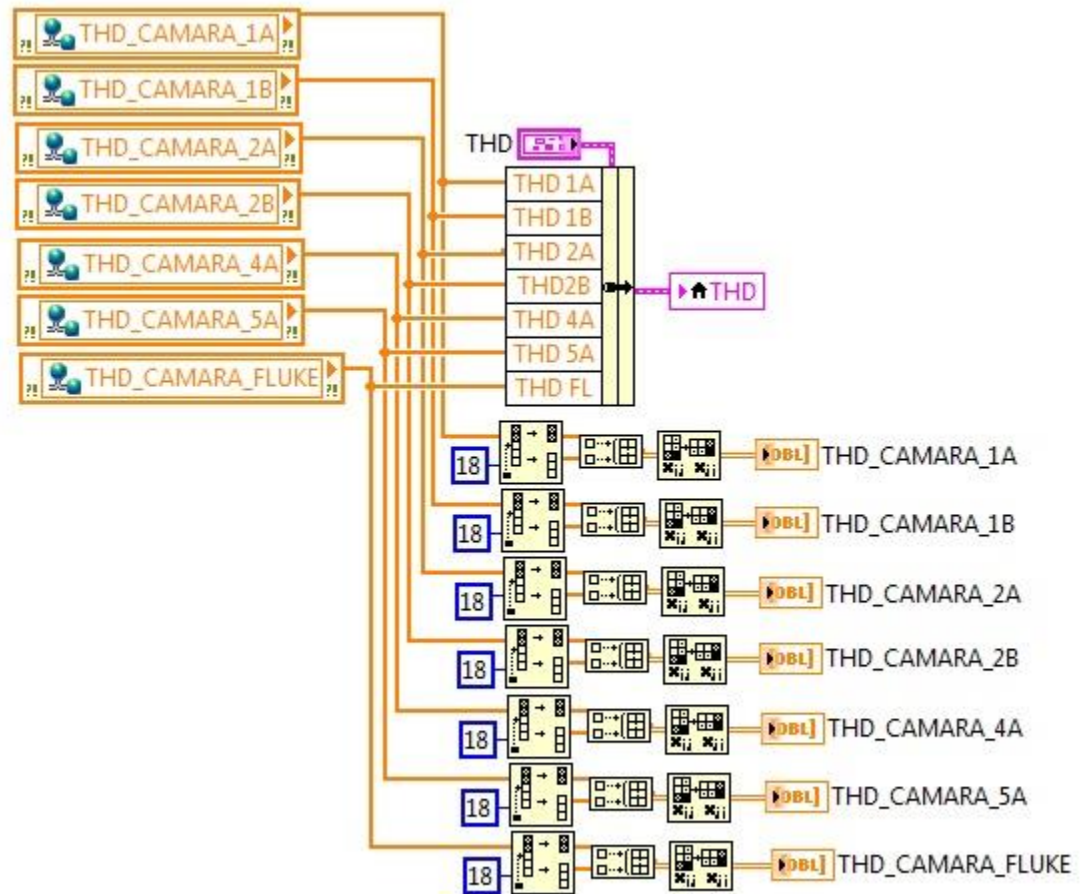
Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

En la imagen previa se observa cómo se realiza la gestión de las variables eléctricas (tensión, corriente, potencia, factor de potencia) importantes.

Las variables compartidas dentro de la red se presentan como arreglos (array) de variables por lo que es necesario depurar y/o reorganizar la información para facilitar su uso. En este caso se recurre a la eliminación del 7º elemento y en caso de la cámara 4B de la eliminación del 8º y 9º elemento ya que el índice seleccionado sigue a la lógica n+1.

Luego de depurar los elementos no deseados de las variables eléctricas sin alterar las variables compartidas originales se procede a mostrar su valor en tiempo real sobre la interfaz gráfica y de crear y una variable local para trabajar con esta de forma ordenada. Para recopilar todos los arreglos de variables en un solo elemento se recurre a la creación de *clusters* donde se toman todos los *arrays* de variables eléctricas como un solo conjunto para formar la variable local VAR_ELEC.

Figura 58. Gestión de variables de armónicos

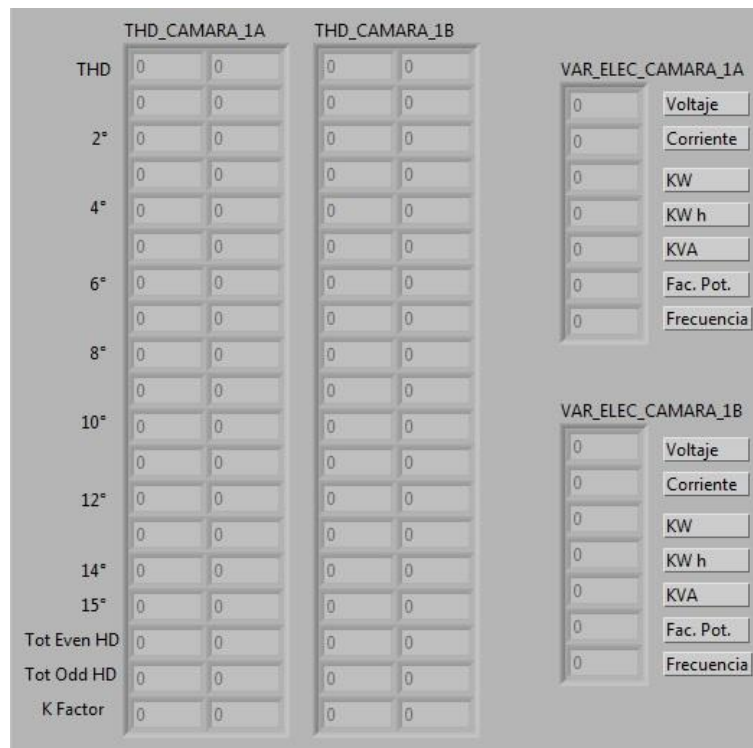


Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

Los arreglos de variables pertenecientes a los datos de distorsiones armónicas son bastante extensos ya que contienen el porcentaje de aporte de los primeros 15 armónicos, la distorsión armónica total THD, aporte de los armónicos pares e impares por separado; esto duplicado ya que contiene los datos para tensión y corriente agregando el factor K a la información de corriente.

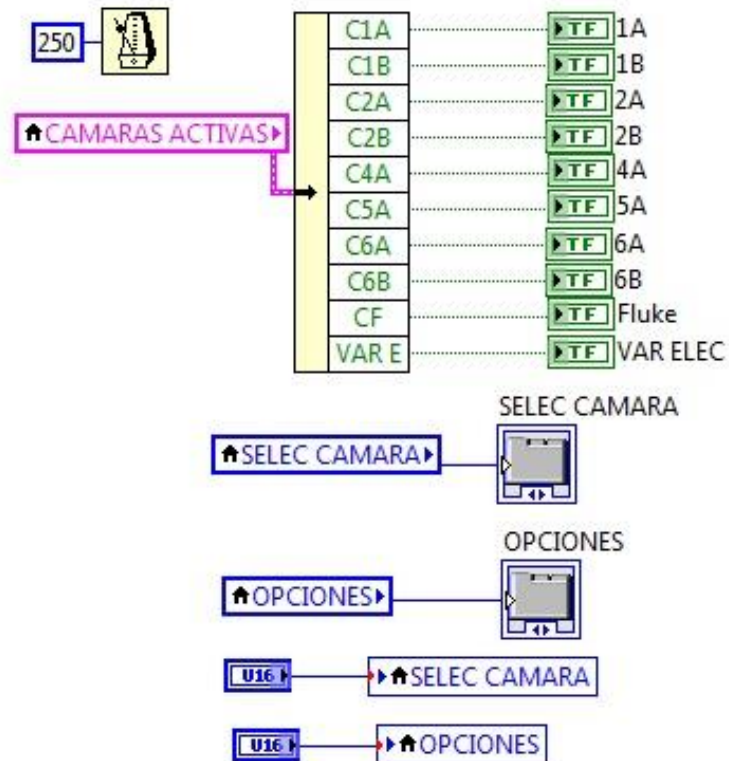
Es debido a esto a que para presentar de forma ordenada toda esta información sobre la interfaz gráfica se recurre a dividir el arreglo de variables en datos para tensión y corriente para luego unirlos como una matriz de 2 filas. Por conveniencia se obtiene la matriz transpuesta del resultado precio para presentar la información en columnas como se observa en la imagen de la figura 59.

Figura 59. **Presentación de variables en la interfaz GUI**



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

Figura 60. **Interfaz gráfica de usuario**



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

Para finalizar con el bucle se tiene la declaración de las variables locales para el control de las pestañas de la interfaz gráfica de usuario, siendo estas empleadas para reducir la cantidad de información simultánea que se muestre en la interfaz, permitiendo un mayor orden al presentar los datos organizados por cámara, además de las pestañas para la configuración de la aplicación.

También se tiene una serie de indicadores booleanos referentes a qué cámara está activada para guardarse sus datos en el reporte de manera que de ser necesario la aplicación esté adaptada para recopilar solamente los datos seleccionados y así ahorrar memoria de ser posible. Se tiene finalmente un

contador para 250 milisegundos como interrupción periódica con el fin de actualizar la información de la interfaz a una frecuencia que no resulte en exceso rápida para saturar al procesador que ejecute la aplicación ni muy lenta para que se dificulte su uso.

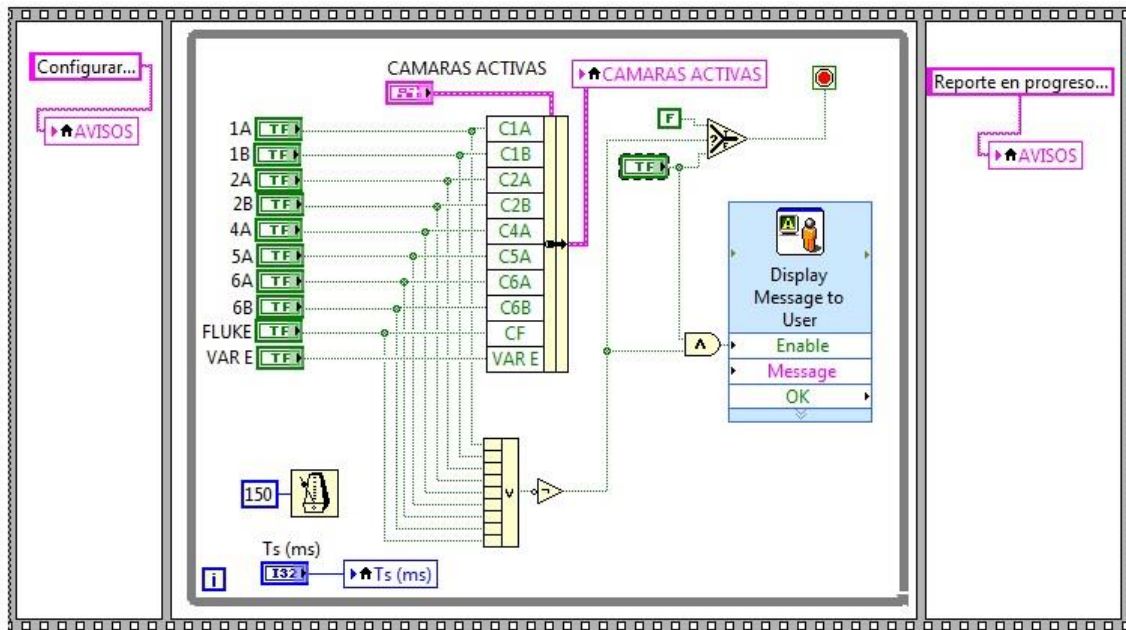
4.4.1.5.2. Secuencia 1

La secuencia 1 tiene como principal función las primeras configuraciones mínimas necesarias para poder iniciar la aplicación. Primeramente, se tiene la declaración de la variable avisos para indicar en pantalla que la aplicación está en fase de configuración, para luego ingresar a un bucle del cual no se puede continuar hasta no cumplir con ciertos requisitos.

Dentro de los requisitos para salir del bucle se tiene una serie de interruptores para seleccionar que cámara activar para el reporte y estos hacia un *cluster* de variables booleanas para ser guardadas con una variable local para su posterior uso, además que estos interruptores están conectados a una compuerta OR negada de manera que si no se activa ninguna y se presiona el botón para iniciar el reporte. La aplicación genera una ventana emergente con un mensaje de instrucción para evitar que se inicie el programa sin guardar datos de ninguna cámara.

También se delimita el período de muestreo que se tomará para almacenar datos en el reporte y finalmente si se cumplen las condiciones para Salir del bucle se procede a cambiar el estado de la variable aviso a reporte en progreso para que en pantalla se visualice que fueron aceptadas las configuraciones.

Figura 61. Configuraciones iniciales



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

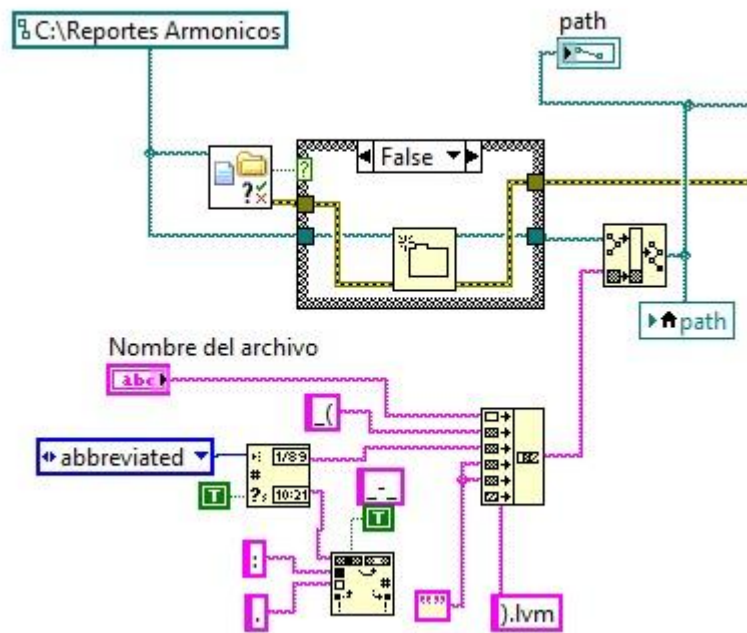
4.4.1.5.3. Secuencia 2

Esta secuencia sirve para verificar el directorio específico donde serán almacenados los reportes y generarlo si este no es encontrado. Se utiliza una ruta directa sobre el disco local C: para minimizar la probabilidad de error con el directorio si la aplicación es usada en distintos ordenadores.

También se genera el nombre y extensión que tendrá el archivo de reporte, siendo el nombre una combinación entre un texto dado por el usuario en la interfaz y la fecha. Esto para minimizar la probabilidad de tener archivos con el mismo nombre. La extensión del archivo empleada en este caso es: lvm la cual permite su correcta visualización delimitada por comas mediante

cualquier software para trabajar hojas de cálculo como por ejemplo Microsoft Excel (incluso si solo se cuenta con la versión de prueba de este).

Figura 62. Creación/verificación del directorio



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

La variable path contiene la dirección donde se ubica el archivo, así como su nombre y extensión. Esta información junto con una señal que acarrea los avisos de error es enviada hacia la siguiente secuencia de forma directa por lo que en la imagen se ve que su conexión se corta a la derecha.

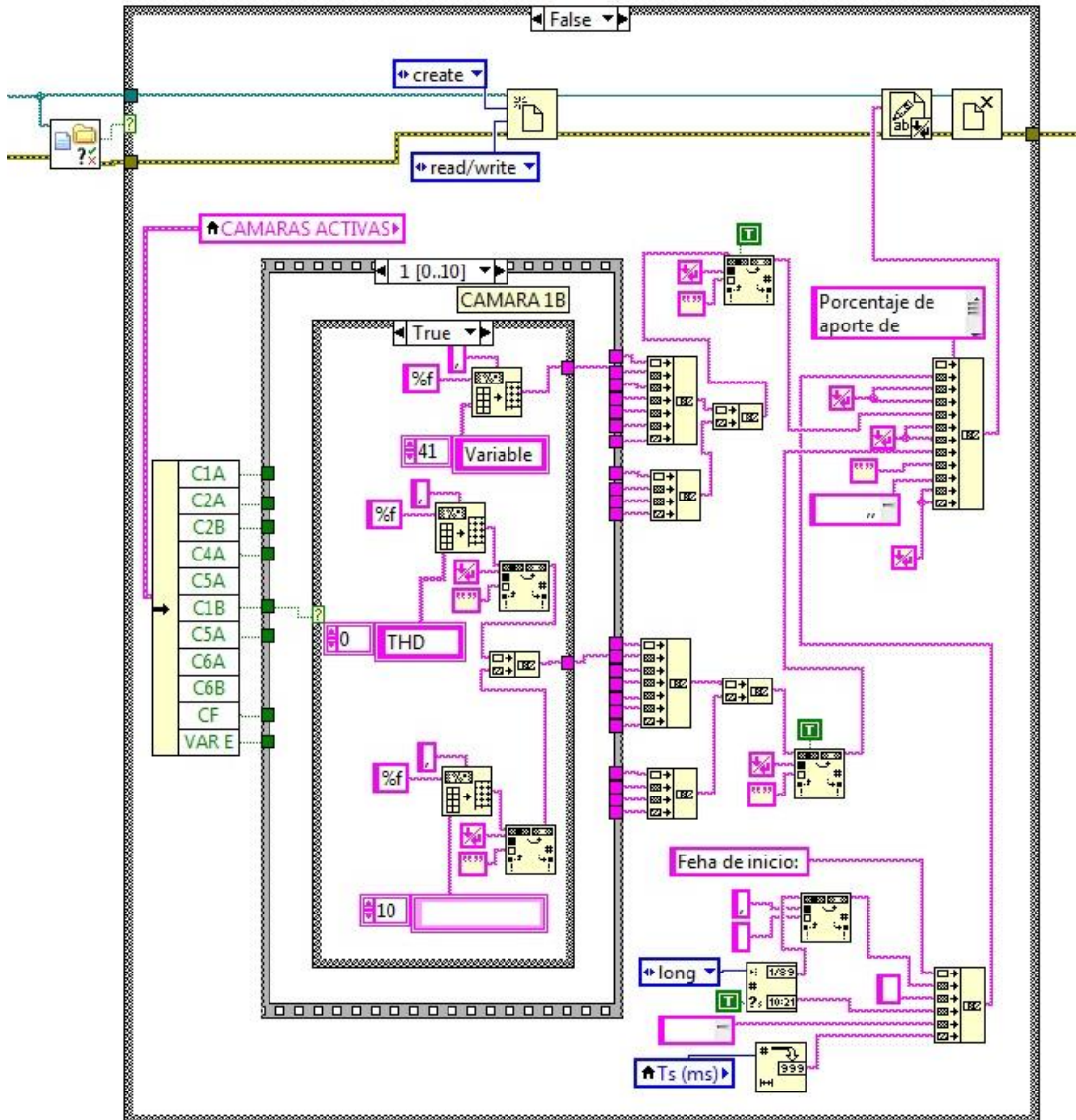
4.4.1.5.4. Secuencia 3

La tercera secuencia tiene el fin de la creación del archivo usando el nombre y ruta definida en la secuencia previa, además de escribir algunos parámetros importantes.

Toda la secuencia depende de una comprobación inicial que vuelve a revisar el directorio con la misma función empleada anteriormente, pero con la diferencia que en esta ocasión también revisa la existencia también del archivo.

Si el archivo ya existe el flujo de error continua a la siguiente secuencia, de lo contrario primero se revisa qué cámaras están activadas para recolectar datos mediante la variable local cámaras activas, esto con el objetivo de escribir en el reporte un encabezado horizontal para dar un título de referencia a cada columna de información facilitando su posterior estudio.

Figura 63. Creación del archivo

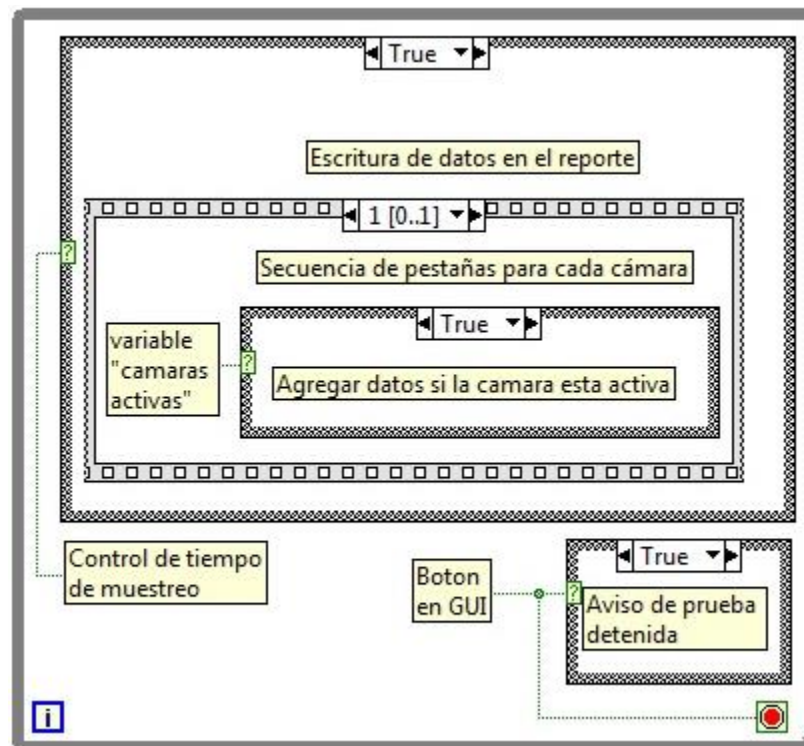


Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

4.4.1.5.5. Secuencia 4

En esta secuencia final se gestiona la escritura periódica de información sobre el archivo de reporte, el funcionamiento de este bloque se observa a grandes rasgos en la siguiente imagen.

Figura 64. Diagrama de bloque de la secuencia 4



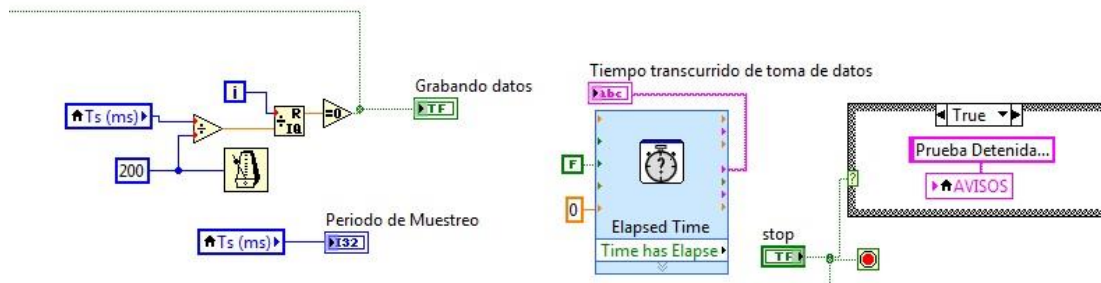
Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

Inicialmente se tiene un bucle del que no se puede salir hasta no presionar un botón ubicado en la interfaz. Dentro del bucle se encuentra una estructura que depende de una variable booleana para su ejecución, esta sentencia calcula el número de interrupciones que se necesitan para aproximarse al período de muestreo escogido, de manera que el software se limitará a

períodos de muestreo que sean múltiplos de 0,2 segundos para ejecutarlos de manera exacta.

El objetivo de esta conversión radica en que si se tomase directamente el período de muestreo para realizar la interrupción y se probara con un valor ligeramente alto como por ejemplo $T_s=10$ segundos. Resultaría que el usuario después de presionar el botón para detener la prueba tendría que esperar un tiempo entre el rango de los 10 segundos a que se dé la siguiente interrupción del proceso para que este se detenga provocando que la aplicación trabaje de forma ineficiente, lo que resultaría aún peor con períodos de muestreo de 30 segundos o 1 minuto.

Figura 65. Interrupción de control



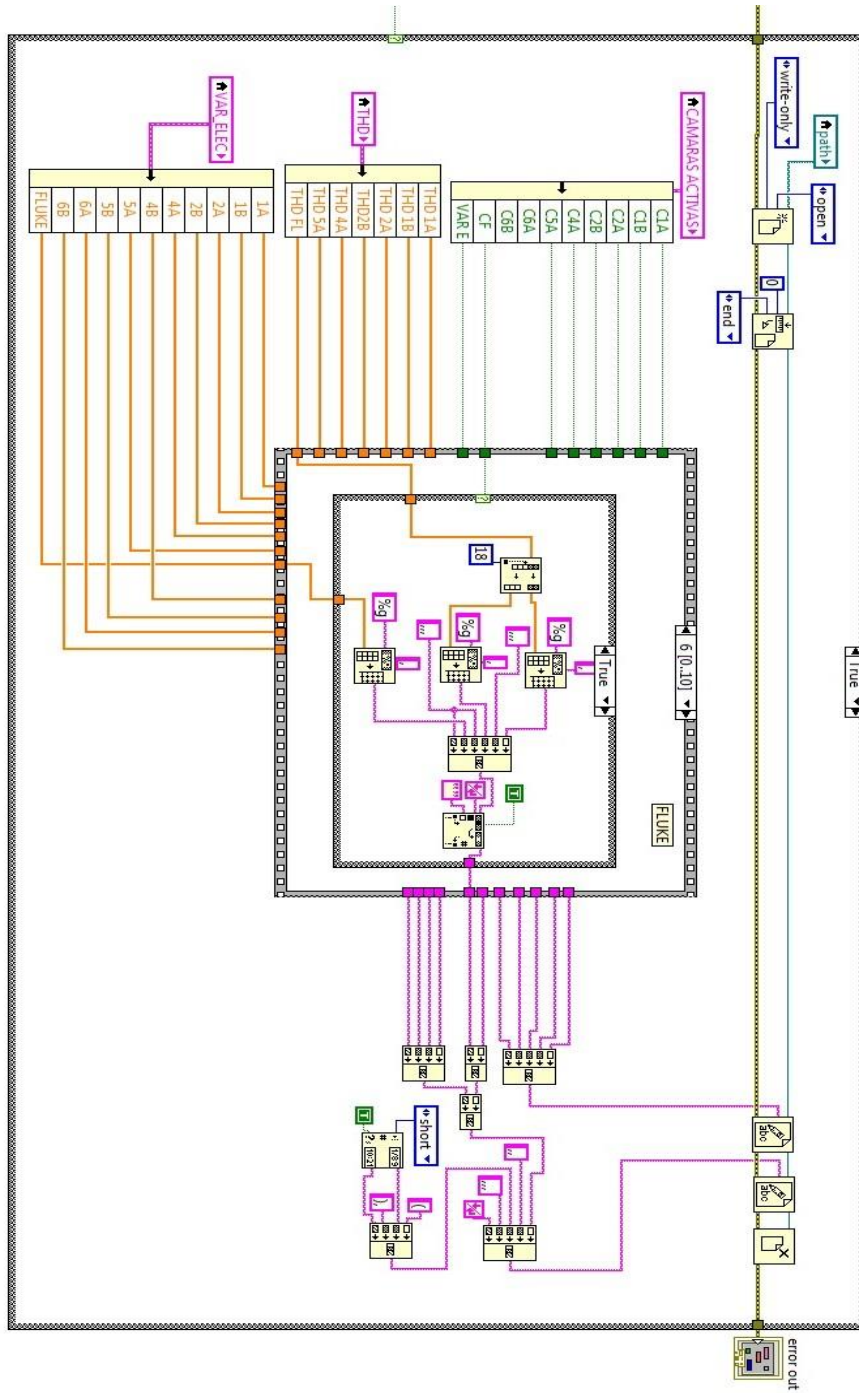
Fuente: elaboración propia, empleando NI LabVIEW.

A continuación, se presenta la secuencia encargada de la escritura periódica de información, la cual se puede dividir en tres partes. La primera (si se ve la imagen horizontal - parte izquierda o en vista vertical – parte superior) se tiene que al abrir el archivo se establece la posición final del mismo para escribir los datos que se escribirán a continuación, esto permite que no se sobrescriba la información en una misma fila y no perder información si se desea emplear un reporte previo.

También se tiene la lectura desglosada de las variables locales de las cámaras seleccionadas para reportarse y sus respectivas mediciones. En el centro de la imagen se tiene una sección que reúne todos los datos provenientes de las cámaras y los procesa para delimitar cada columna por comas.

Finalmente, se tiene (vista horizontal de la imagen – parte derecha o en vista vertical – parte inferior) que se combina la información procesada junto con la fecha y hora para escribirse en el reporte para terminar al cerrar el archivo y esperar a la próxima interrupción del proceso para repetirse hasta que este sea detenido por el usuario.

Figura 66. Escritura en el archivo



Fuente: elaboración propia, empleando NI LabView.

4.4.2. Resultados

Luego de realizarse algunas pruebas con el software y comprobarse su correcto funcionamiento se inició la toma de datos el 26 de agosto de 2019 para concluirse el día 17 de septiembre de 2019 conformando 22 días de los cuales se expondrá solamente los comportamientos que ameriten ser examinados con mayor detenimiento.

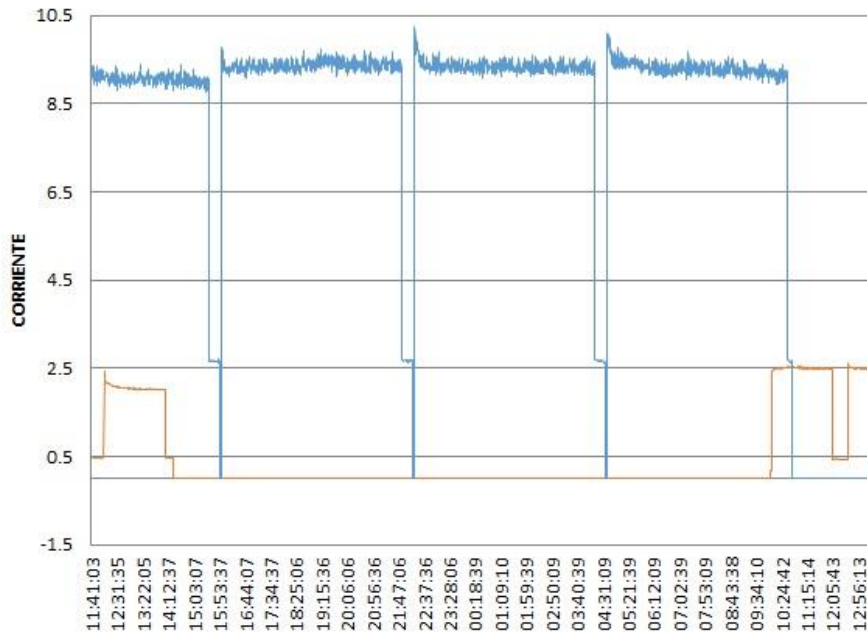
Entre la información recolectada se tiene:

- Tensión de alimentación [AC]
- Corriente de consumo [A]
- Frecuencia de la onda [Hz]
- Potencia aparente [kVA]
- Potencia [kW]
- Medición de consumo [kWh]
- Factor de potencia [%]

En la figura 67 se observa el comportamiento del consumo de corriente para la cámara 1 donde pueden visualizarse dos gráficos de distinto color, siendo estos de la cámara 1A (color celeste) y la cámara 1B (color naranja). En la gráfica se observa un consumo de 8,7 A en promedio en ciclos de aproximadamente de 5 horas para caer a 2.5A por un corto tiempo para dispararse el consumo nuevamente a los 8,7A.

Este comportamiento pertenece solamente a la cámara 1A ya que la 1B para este día en particular solo suministro una cantidad baja de corriente por cortos periodos de tiempo. Será útil para analizar próximas figuras.

Figura 67. Consumo de corriente (26-08-2019) cámara 1



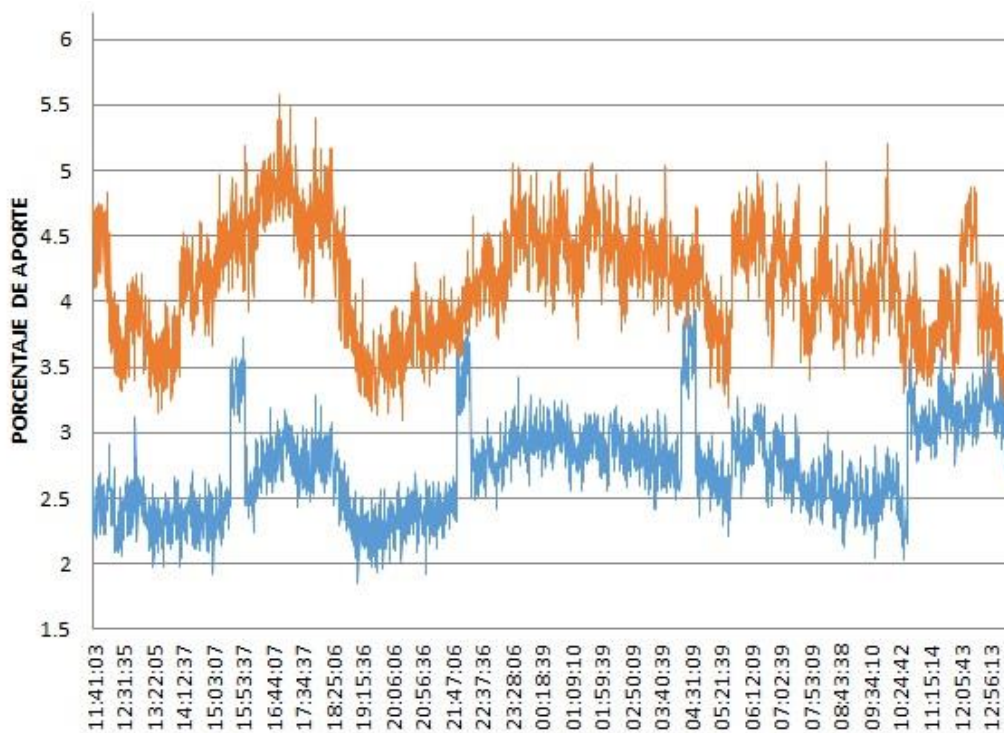
Fuente: elaboración propia.

En la figura 68 se observa el comportamiento de los armónicos de tensión para la figura 67 que correspondiente a la cámara 1. Se observa que tanto para la cámara 1A como para la 1B existe un patrón superpuesto a ambas gráficas que corresponde al aporte de armónicos en etapas previas de la red.

Sin embargo, si se analiza con mayor detalle se observa que en la gráfica de color celeste (cámara 1A) cuando hay un consumo elevado de corriente, el porcentaje de aporte de armónicos de tensión disminuye y en los momentos de consumo moderado se observa un incremento en los armónicos de tensión por lo que se puede corroborar que el consumo de corriente como tal.

No es un factor definitivo para determinar la generación de armónicos de tensión pues se observó un comportamiento inverso, por ello se confirma que tanto el tipo de carga (lineal-no lineal) y su respectivo consumo juegan un papel importante siendo las cargas no lineales de alto consumo las de mayor aporte.

Figura 68. THD en tensión (26-08-2019) cámara 1



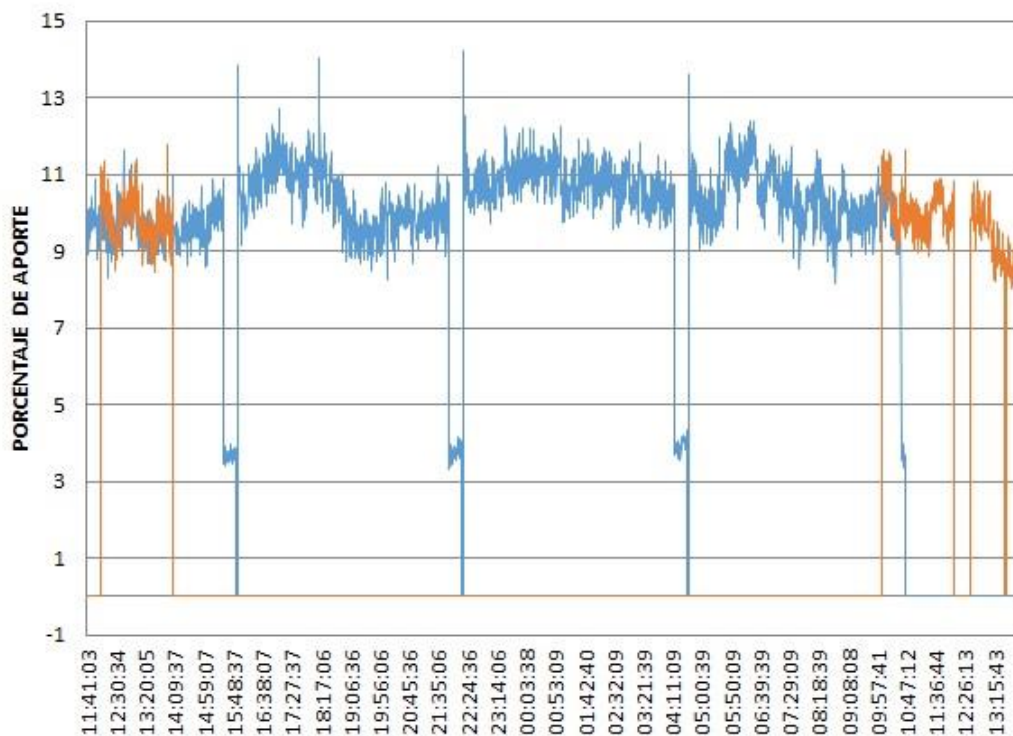
Fuente: elaboración propia.

En la figura 69 se observa el comportamiento de la distorsión armónica total THD en corriente para las figuras 67 y 68. La distorsión armónica en corriente a diferencia de tensión para este día en particular se observa que presenta un comportamiento proporcional al observado en su gráfico de corriente, con la diferencia que tanto para la cámara 1A y 1B se alcanzan

valores similares a pesar de que se observó que el consumo en la 1A (celeste) era aproximadamente 4,5 veces mayor a la 1B (naranja).

También se observan algunos picos generados por el arranque del compresor de los equipos en prueba.

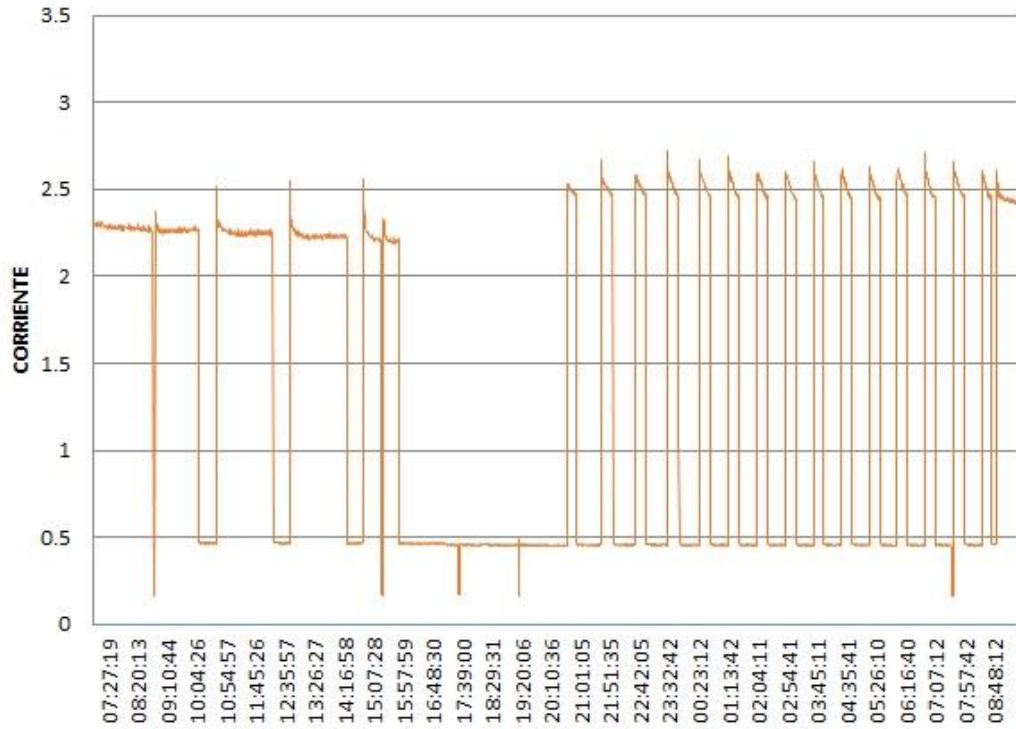
Figura 69. THD en corriente (26-08-2019) cámara 1



Fuente: elaboración propia.

En la figura 70 se expone el consumo de corriente en la cámara 1 donde se observa un comportamiento cíclico entre un bajo y un consumo intermedio de corriente para la cámara 1B ya que en la cámara 1A no se encuentra ningún equipo conectado por lo que su consumo es nulo.

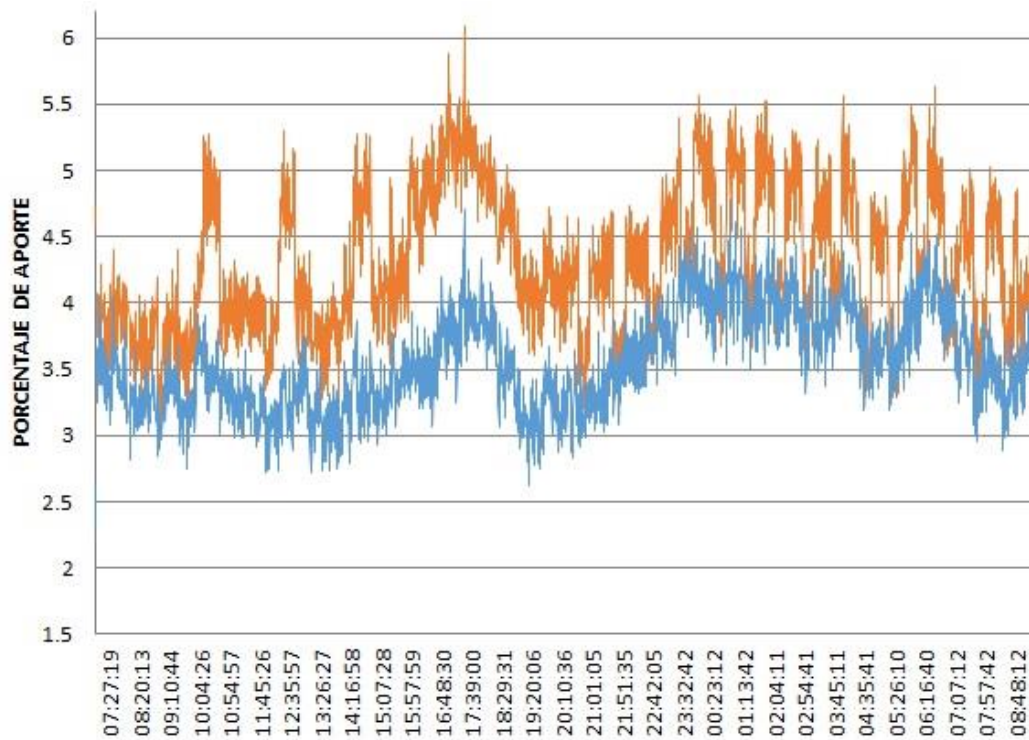
Figura 70. **Consumo de corriente (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 71 se observa que el aporte de armónicos en la cámara 1A corresponde meramente a los derivados de etapas anteriores de la red por lo que si se compara con la cámara 1B se observa cierta similitud proporcional, con la diferencia de ciertas crestas o valles provocados por la carga generada por el equipo conectado a dicha cámara.

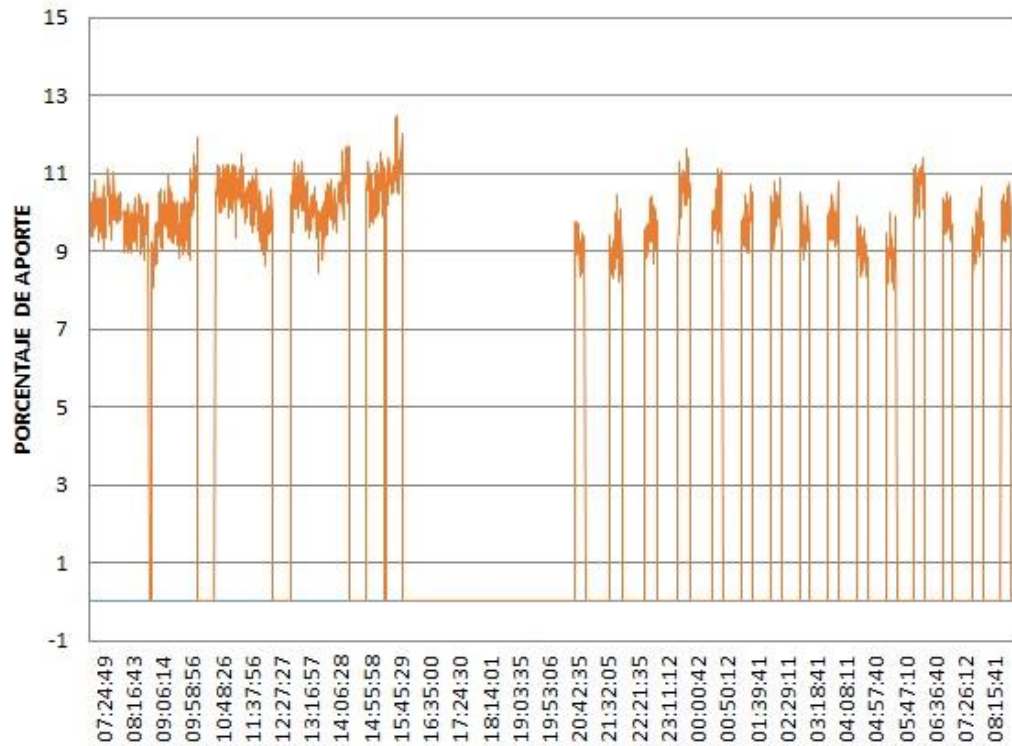
Figura 71. THD en tensión (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1



Fuente: elaboración propia.

En la figura 72 se observa que para los armónicos en corriente el consumo si es determinante ya que a diferencia del caso en tensión visto en la figura 71, sin consumo de corriente no hay aporte en la generación de armónicos por lo que solo hay aporte en la cámara 1B.

Figura 72. THD en corriente (28-08-2019 a 29-08-2019) cámara 1

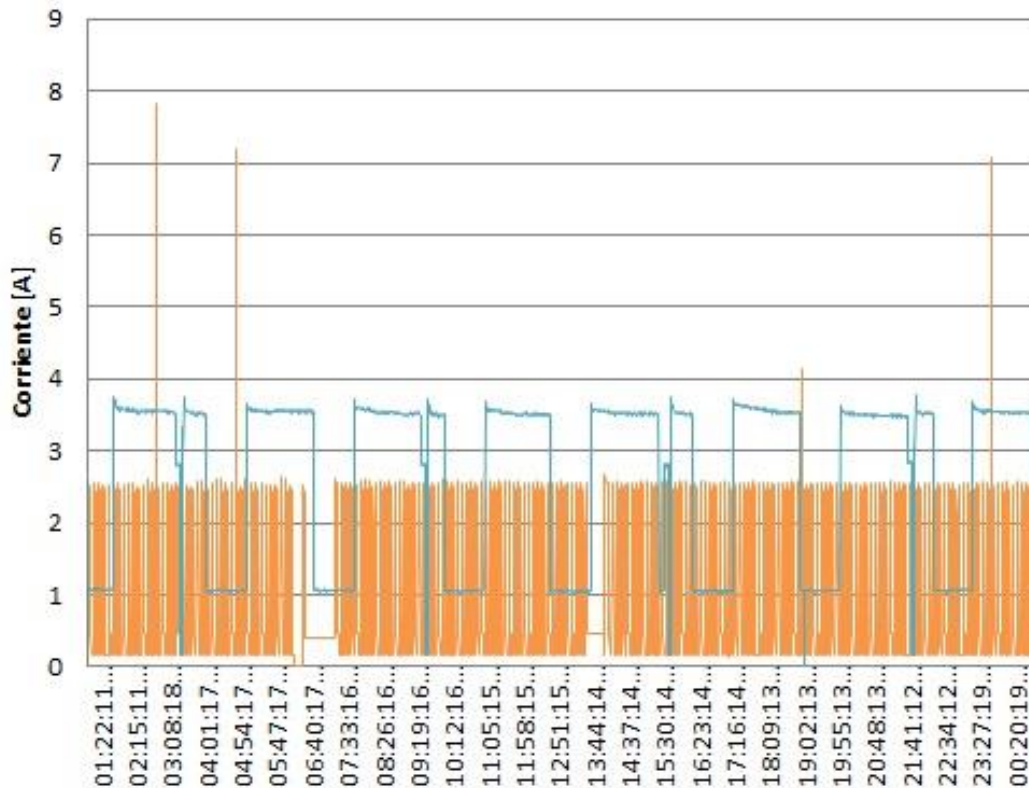


Fuente: elaboración propia.

En la figura 73 se observa el consumo de dos equipos que presentan un comportamiento estable en cuanto al ciclado del compresor. Para la cámara 1B (color naranja) se observan 4 picos de corriente siendo los dos primeros y el último los más altos, estos tres sobre la marca de los 7 amperios.

Estos picos de corriente aparentemente aleatorios son transitorios provocados por arranque de motores que en ciertos casos logran coincidir con el período de muestreo, pero generalmente son demasiado cortos para ser registrados. Esto sugiere que los equipos provocan una serie de transitorios de considerable amplitud.

Figura 73. Consumo de corriente (07-09-2019) cámara 1

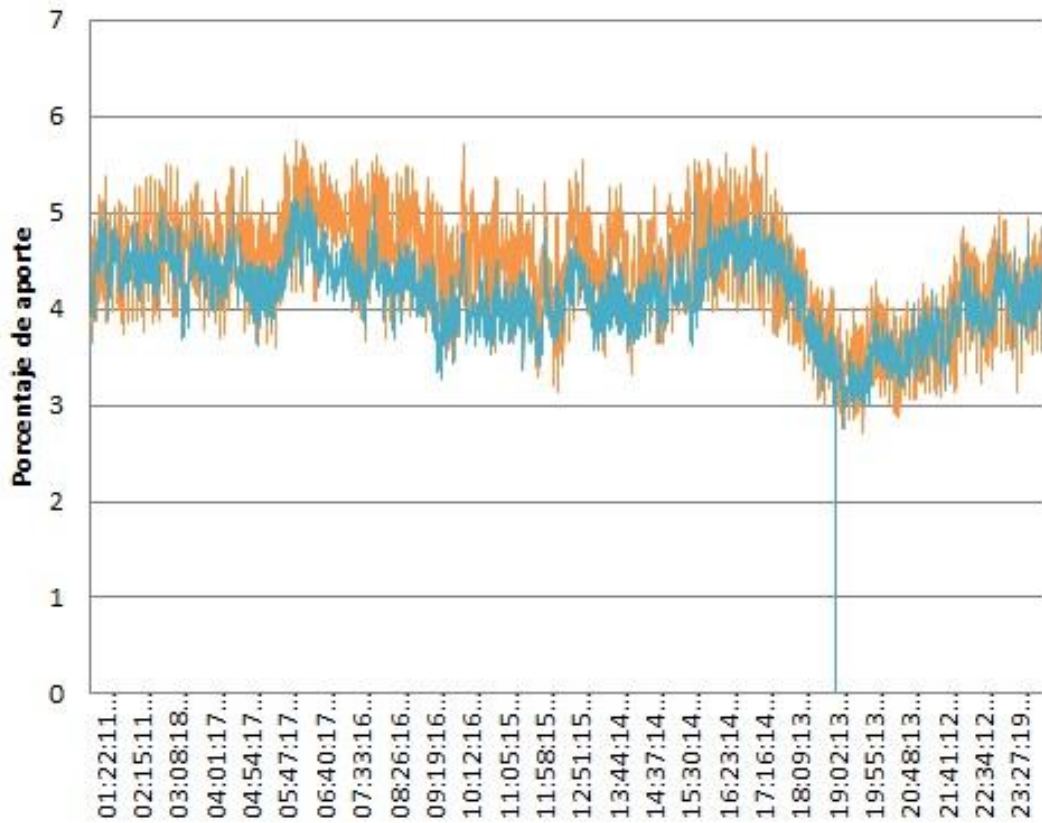


Fuente: elaboración propia.

En la figura 74 se observa el comportamiento de la distorsión armónica total para la cámara 1 del sábado 7 de septiembre de 2019 donde para la cámara 1ª el porcentaje total de armónicos se mantiene por debajo del límite del 5 % establecido por la norma IEEE 519 llegando a sobrepasar este límite por un escaso margen en contadas ocasiones.

En el caso de la estación B se observa que el valor de THD constantemente oscila entre el 4,5 % al 6 % superando en poco al límite deseado, esto durante el periodo que comprende desde las primeras horas del día hasta las 4pm (usual hora de mayor consumo).

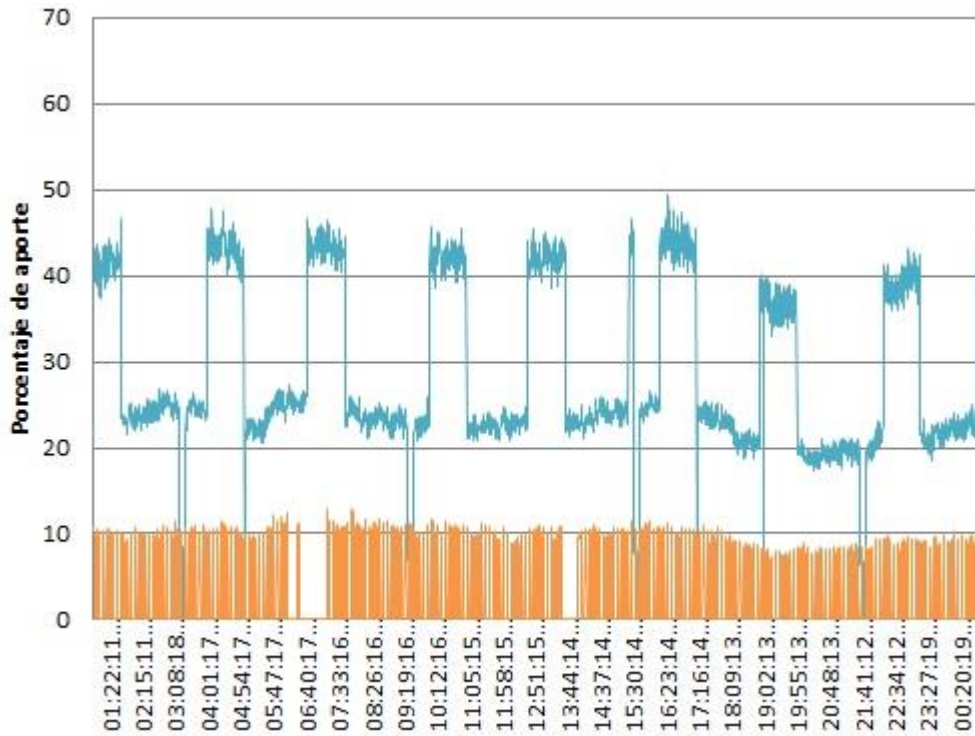
Figura 74. THD en tensión (07-09-2019) cámara 1



Fuente: elaboración propia.

En la figura 75 se observa que el comportamiento de la distorsión armónica total en corriente sigue el patrón general del consumo salvo con la diferencia que el consumo en la estación A (celeste) crea armónicos de alrededor de 4,5 veces mayores al aportado en la estación B (naranja), acercándose al 50 % como máximo.

Figura 75. THD en corriente (07-09-2019) cámara 1



Fuente: elaboración propia.

En la figura 76 puede observarse una cantidad considerable de picos de corriente de amplitudes del doble incluso el triple de la señal, estos se producen en los flancos de subida por lo que se determina que estos transitorios se deben al arranque de motores, generalmente del compresor del equipo en prueba.

Los transitorios son pulsos de corto período, por tanto, generalmente no son registrados por los equipos de medición por el alto período de muestreo en comparación, esto significa que existen una serie de transitorios que no figuran en los datos registrados y los que si figuran en él es meramente probabilidad.

Se utilizaron los datos de este en particular debido a la cantidad de transitorios registrados para exponerlo más claramente.

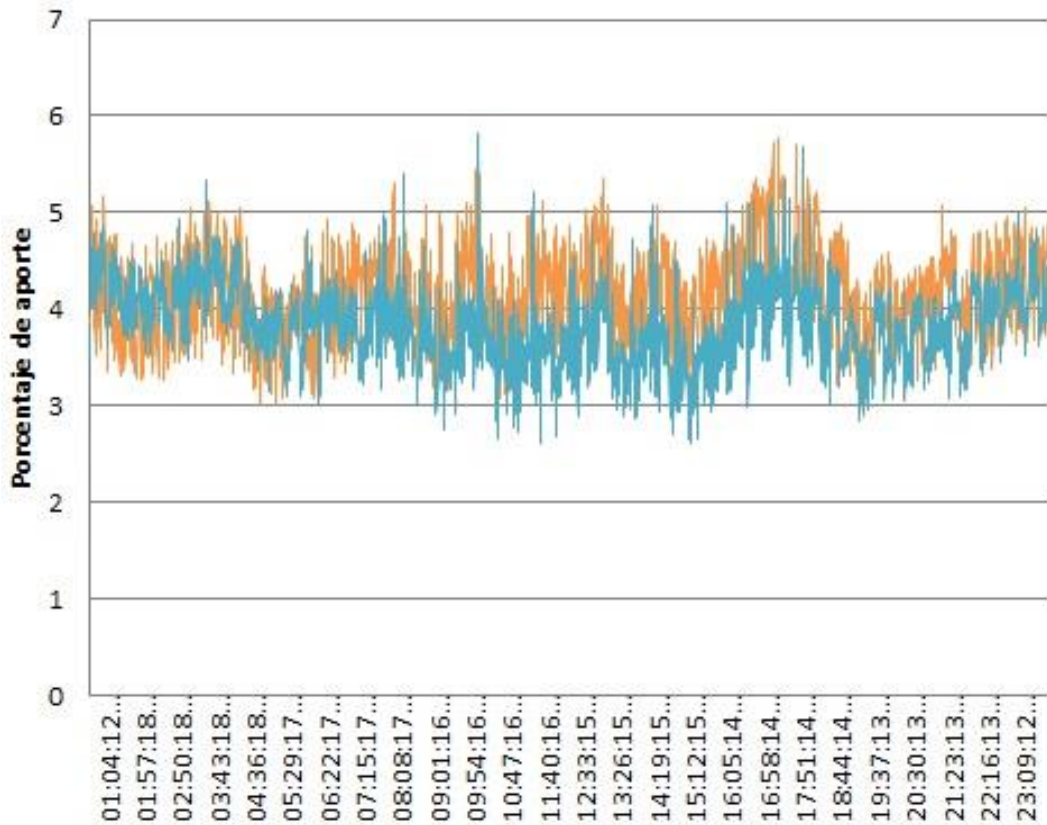
Figura 76. **Consumo de corriente (09-09-2019) cámara 1**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 77 se observa un comportamiento en cuanto a la distorsión armónica total en tensión bastante estable debido a que el consumo de los equipos oscila de forma estable como se aprecia en la figura 76. Los cambios más marcados en el aporte de armónicos vienen de etapas previas de la red ya que en ciertas ocasiones ambas estaciones llegan a superar el límite establecido por la norma IEEE519 de forma poco significativa para este día.

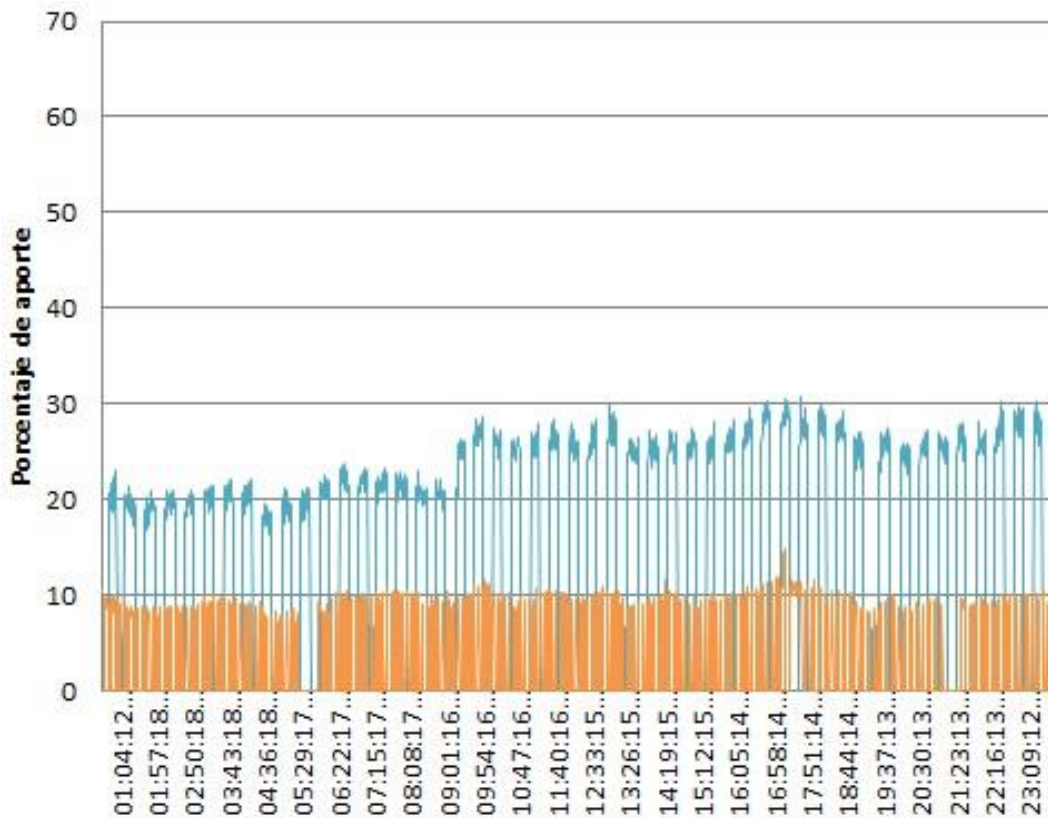
Figura 77. THD en tensión (09-09-2019) cámara 1



Fuente: elaboración propia.

En la figura 78 se observa que el comportamiento de la distorsión armónica total en corriente para esta fecha coincide bastante con respecto a su gráfico de consumo de la figura 76, a excepción de su amplitud, donde se asemeja a la distorsión armónica en tensión y el escalón registrado aproximadamente a las 9:00 am resulta inverso al observado en la figura 77 con respecto al consumo.

Figura 78. THD en corriente (09-09-2019) cámara 1

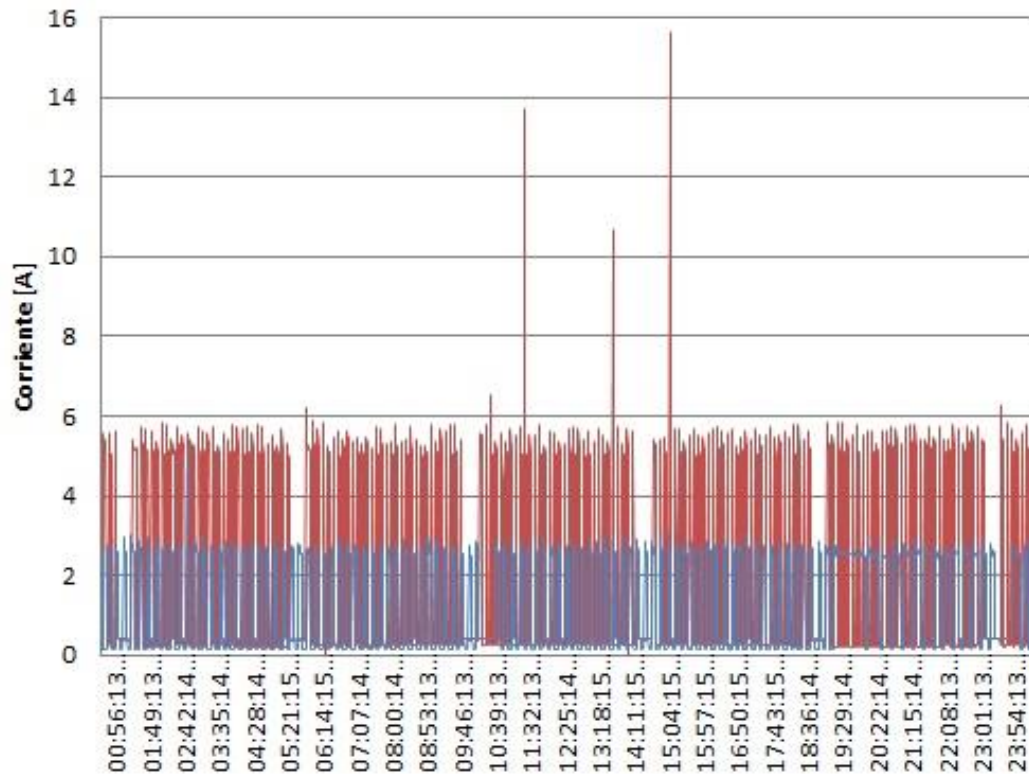


Fuente: elaboración propia.

En la figura 79 se observó que también en la cámara 2 se encuentran presentes transitorios de corriente, estos alcanzan valores de aproximadamente de 16 A, lo sobrepasa por 4A la corriente máxima dada por el fabricante cuando el variac trabaja a 120 VAC (12A max).

Al ser transitorios de corta duración los efectos de estas sobre corrientes con respecto a las especificaciones no presentaran daños inmediatos pero el tiempo de vida de los sistemas de control de tensión se verá mermado.

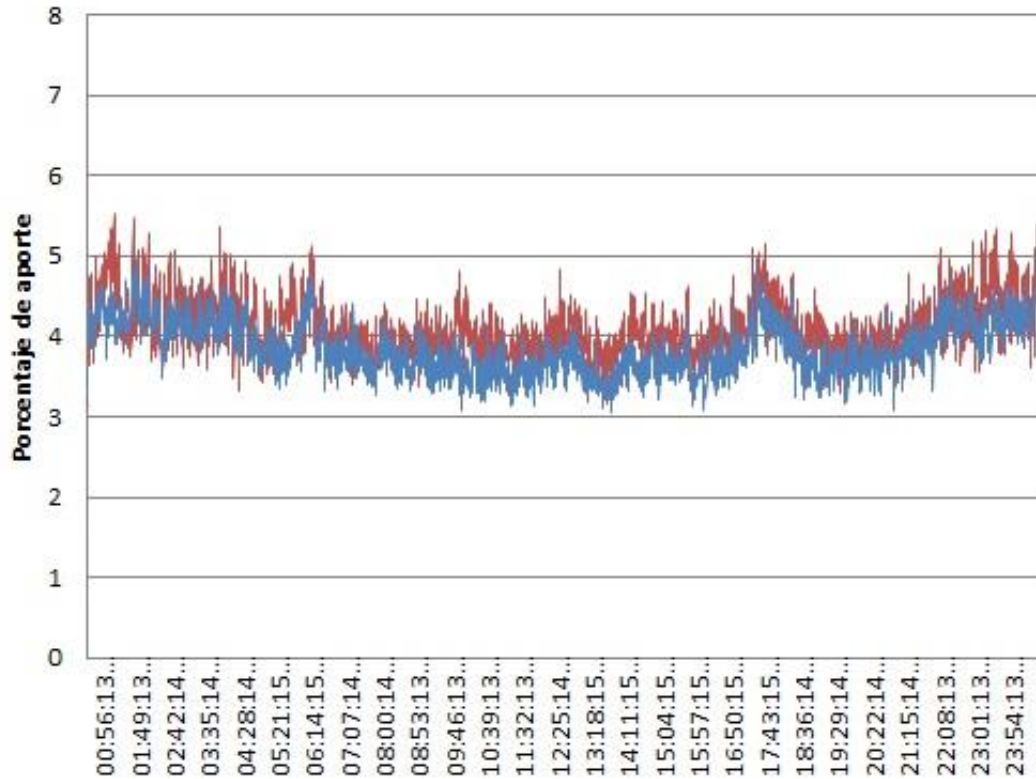
Figura 79. Consumo de corriente (04-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 80 se observa que por lo general el valor de distorsión armónica total en tensión se mantiene por debajo del límite establecido por la norma IEEE519, pero también toma valores por encima de este en ciertas ocasiones, por lo que sería una buena práctica monitorear periódicamente el valor de THD para asegurarse que no sobrepase en exceso los límites deseados.

Figura 80. THD en tensión (04-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 81 se observa que en la estación A de la cámara 2 (color azul) los armónicos medidos en corriente son poco más del doble que en la estación B (color rojo) ya que representan una carga principalmente no lineal dada por equipos electrónicos.

Figura 81. THD en corriente (04-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 82 se observa en la estación A un consumo en forma de pulsos con máximos de aproximadamente 2,7 A y se alcanza a distinguir un transitorio de corriente a las 17:00 pm con un valor cercano a los 6 A. con respecto a la estación B se observó un consumo mayor de aproximadamente 5,6 A con transitorios que sobrepasan el límite de los 12 A máximos de los variacs.

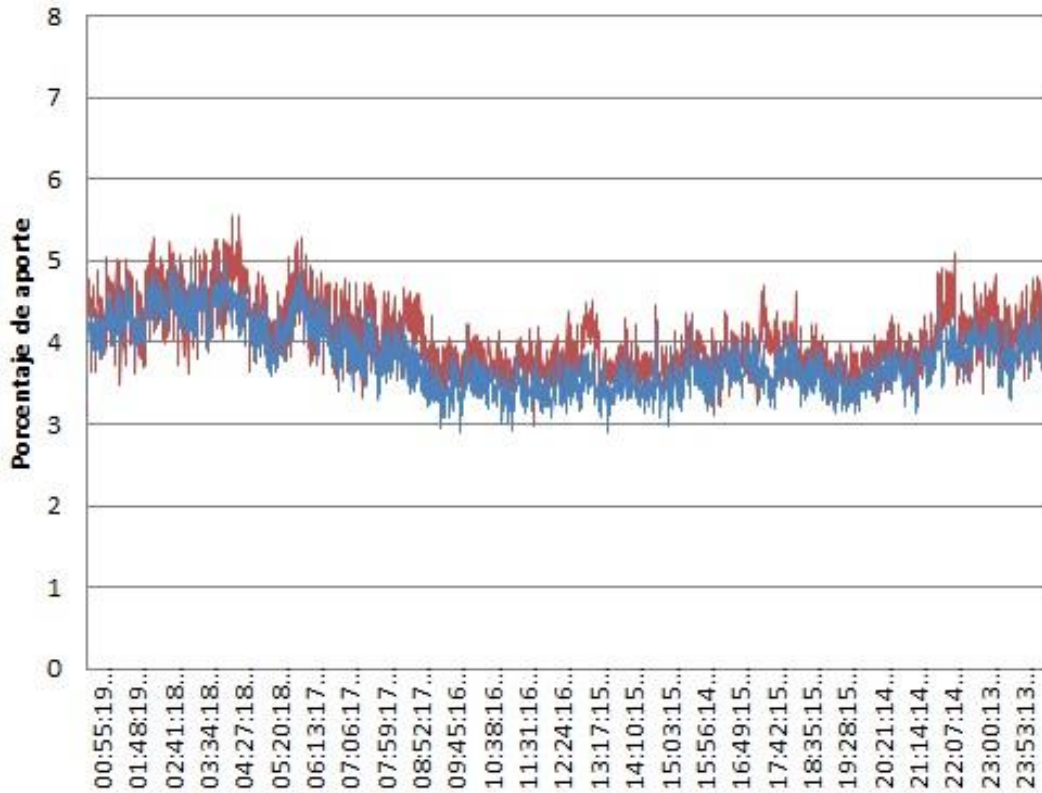
Figura 82. Consumo de corriente (14-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 83 se observó que de igual manera para ambas estaciones de esta cámara se presenta un incremento en el aporte de armónicos registrando sus valores máximos entre las 4 am y las 5 am donde se supera el límite establecido por la norma IEEE519 y a lo largo de la mañana los armónicos van en disminución hasta estabilizarse entre el medio día y primeras horas de la tarde para iniciar en aumento por la noche.

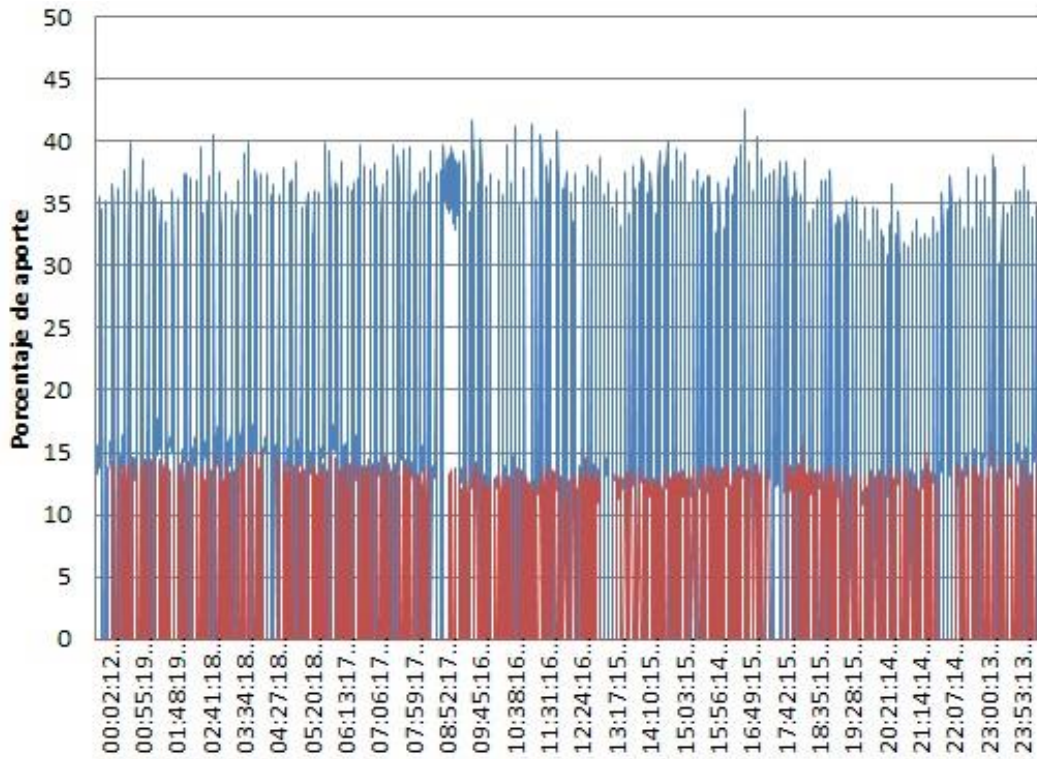
Figura 83. THD en tensión (14-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 84 se observó que de igual manera como se presenta en registros previos, la comparación del porcentaje de aporte de armónicos en corriente es mayor en consumos menores ya que obedece más al tipo de carga (lineal o no lineal) que al propio valor de consumo.

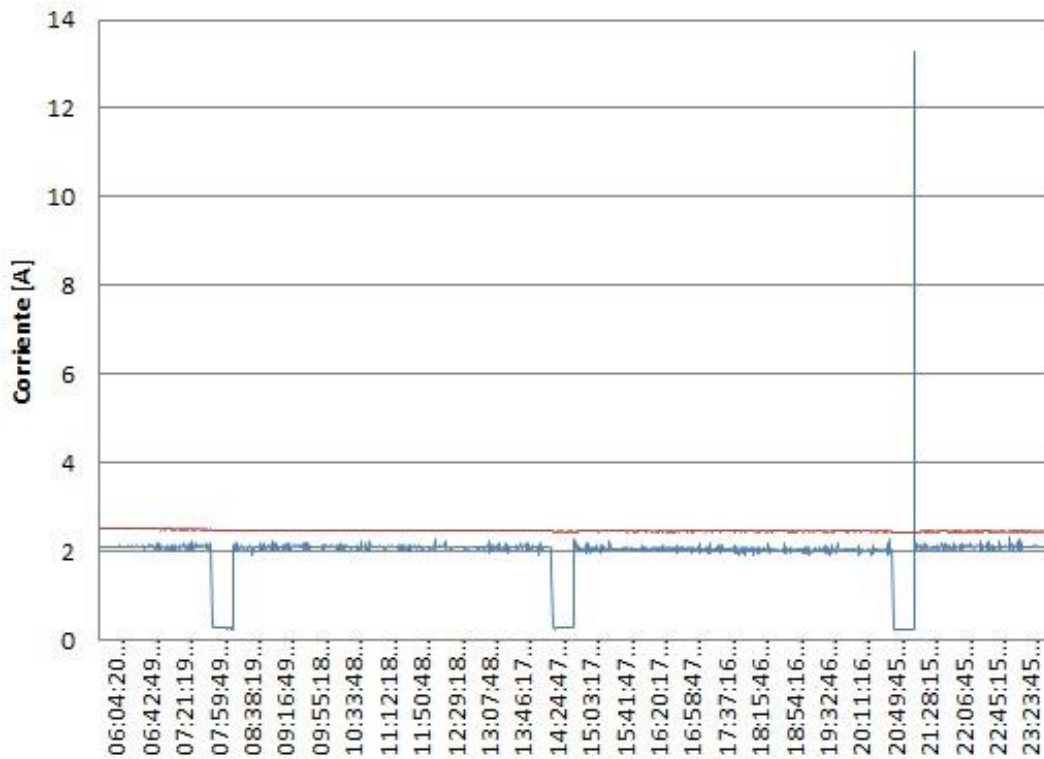
Figura 84. THD en corriente (14-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 85 se observó que los consumos de corriente son estables con una ligera caída en la estación B (rojo) desde los 3 A hasta llegar a un valor de 2,4 A y en la estación A (azul) se da que en los tiempos en alto en consumos de aproximadamente 2,4 A y en tiempo en bajo de 0,3 A, registrándose un transitorio de 13,3 A el cual representa un valor del 554 % de aumento con respecto a los valores máximos registrados (sin tomar en cuenta los transitorios).

Figura 85. Consumo de corriente (15-09-2019) cámara 2

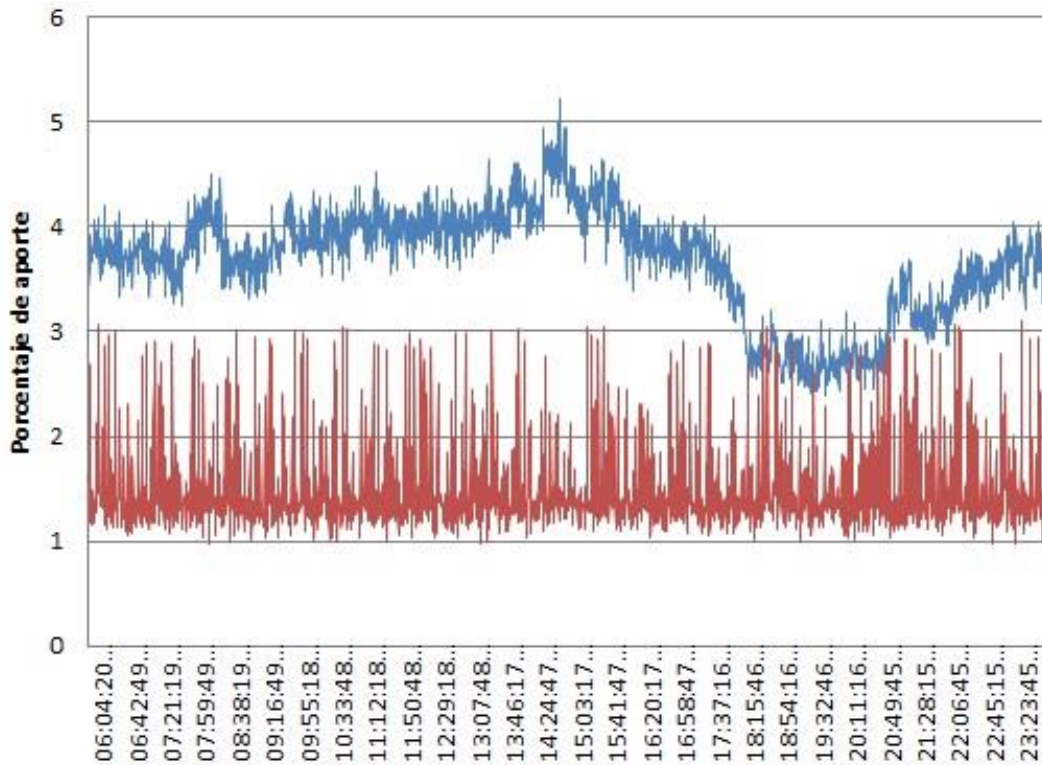


Fuente: elaboración propia.

En la figura 86 se observó que el comportamiento de la distorsión armónica total para este día en particular se ve bastante afectada en la estación A (azul) teniendo una envolvente que no refleja el comportamiento más estable en cuanto a su consumo registra y presentado en la figura 85, incluso se registran pequeñas crestas cuando el consumo cayó a 0.

El comportamiento de la distorsión armónica en la estación B oscila entre 1 % y 3 %, sin embargo, no presenta la envolvente descrita en la otra estación a pesar de esta dentro de la misma cámara.

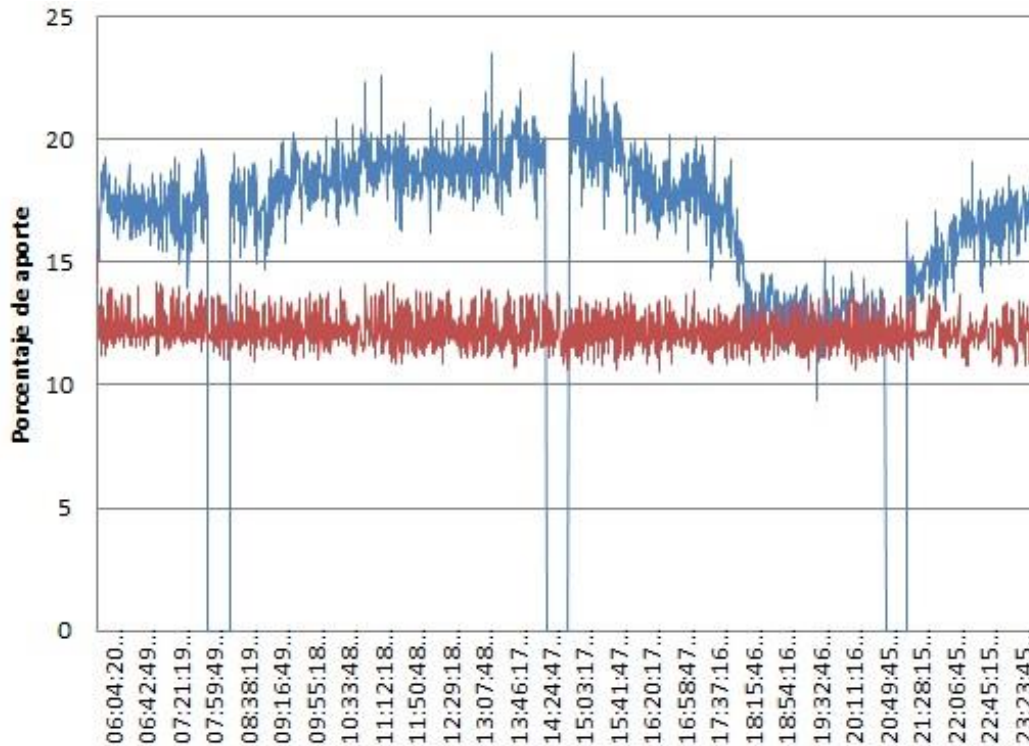
Figura 86. THD en tensión (15-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 87 se observó que el comportamiento de la distorsión armónica en corriente de manera similar a lo observado en la figura 86, ya que se presenta la misma envolvente salvo con la diferencia que cuando el consumo cae a cero la distorsión armónica en corriente también cae a cero para la estación A (azul). La estación B (rojo) de la cámara 2 presenta el mismo comportamiento estable con una ligera pendiente descendente como se observó en su consumo en la figura 85.

Figura 87. THD en corriente (15-09-2019) cámara 2



Fuente: elaboración propia.

En la figura 88 se observa el comportamiento del consumo de corriente para la cámara 4 estación A (verde) y la cámara 5 estación A (morado), la estación 4A presenta una serie de ciclos con picos en los flancos de subida de 5,3 A para luego estabilizarse en 4 A.

En la estación 5 A se observa una serie de ciclos de mayor frecuencia y se registraron algunos de los transitorios presentes, los cuales superan los 12 A máximos dados por el fabricante de los variacs por lo que nuevamente se confirma que es necesario la adición de un circuito supresor de transitorios en estos sistemas para alargar su tiempo de vida útil.

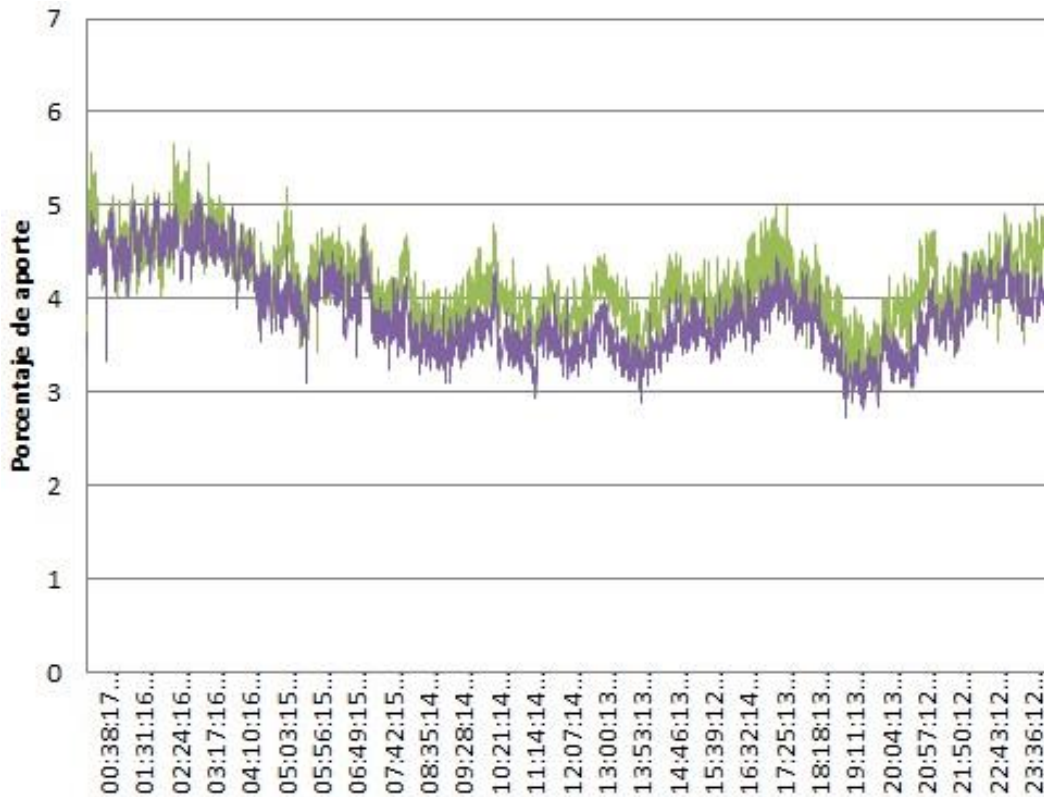
Figura 88. Consumo de corriente (06-09-2019) cámara 4A y 5A



Fuente: elaboración propia.

En la figura 89 se observa que ambas estaciones pese a estar ubicadas en distintas cámaras, comparten la misma envolvente por lo que en este día en particular la distorsión armónica total en tensión obedece principalmente a los armónicos producto de etapas previas en la red.

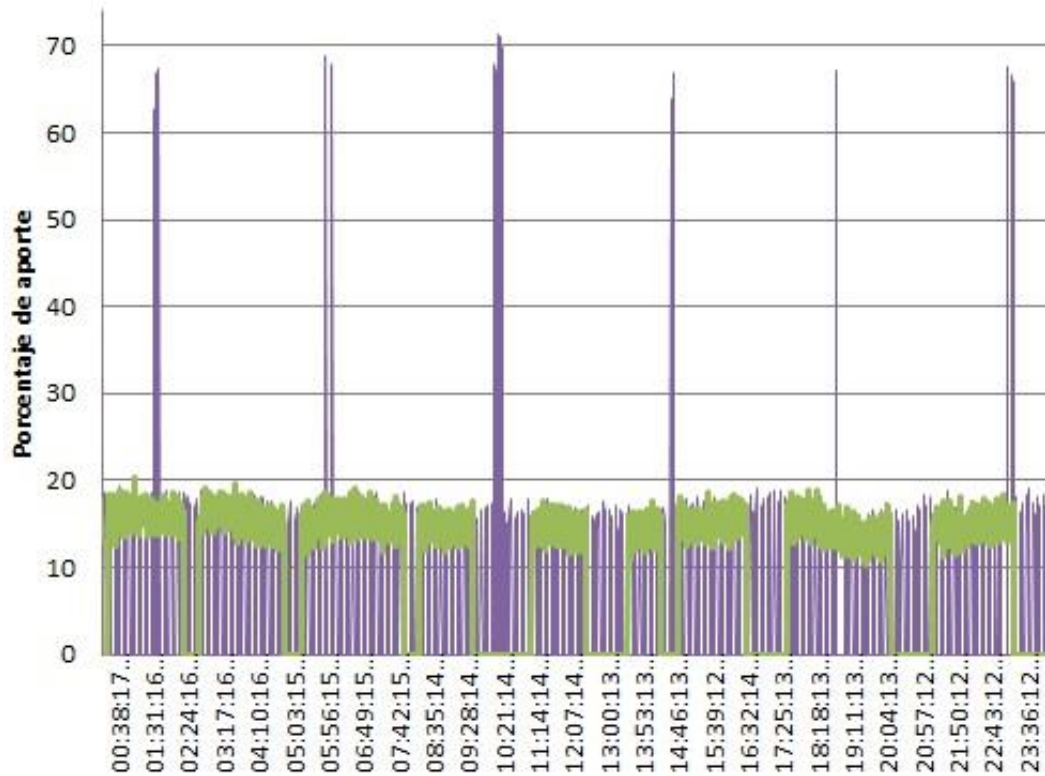
Figura 89. THD en tensión (06-09-2019) cámara 4A y 5A



Fuente: elaboración propia.

En la figura 90 se observa que el comportamiento de la distorsión armónica total en corriente para la estación 4 A refleja una forma similar a la de su consumo, mientras que para la estación 5 A hay presentes una serie de picos producto de los transitorios provocados generalmente por los arranques de los compresores de los equipos en prueba. Alcanza valores de poco más del 70 % en una ocasión, desconociéndose si pueden llegar a ser más altos ya que no se tiene registro de todos los transitorios que existen en la señal.

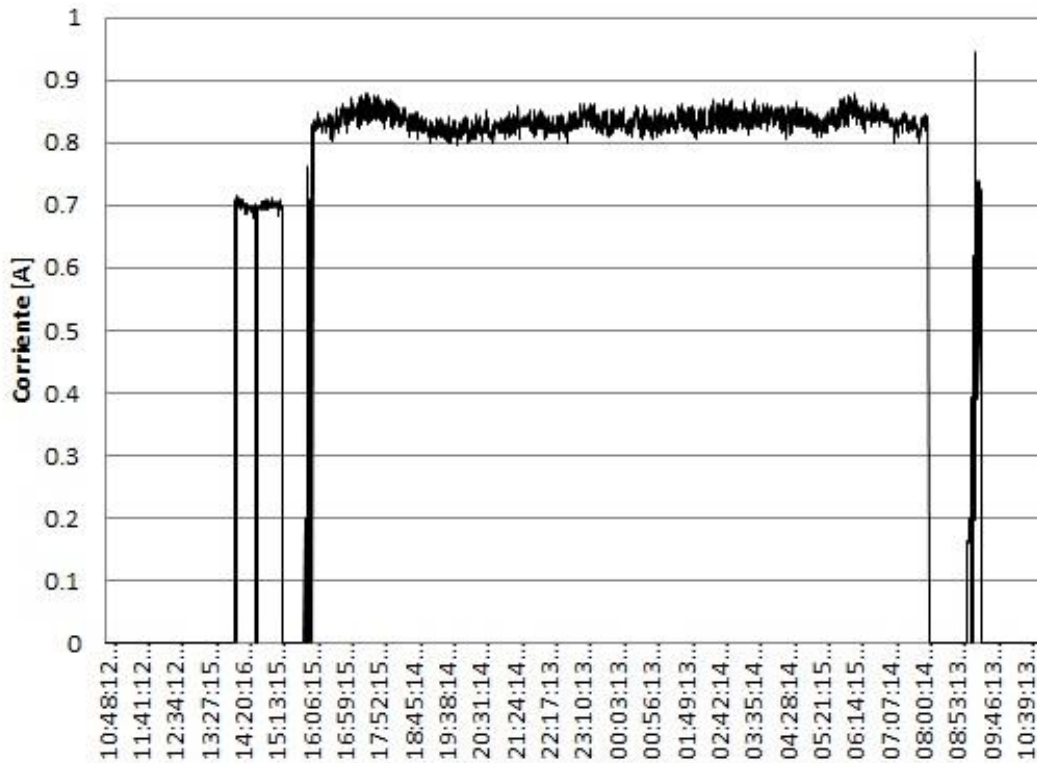
Figura 90. THD en corriente (06-09-2019) cámara 4A y 5A



Fuente: elaboración propia.

En la figura 91 se observa que el consumo en esta cámara no llega a superar en ningún momento el amperio de corriente por lo que se asume que es una carga meramente electrónica conformada por fuentes de tensión conmutada, iluminación led y termostatos de prueba.

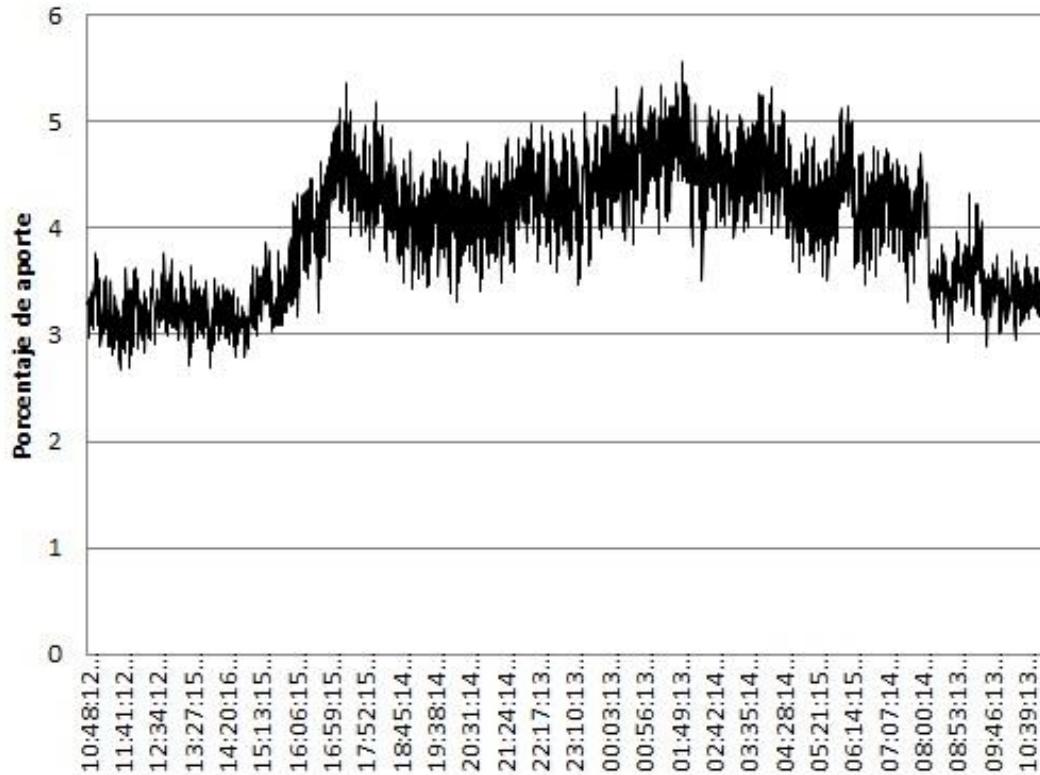
Figura 91. Consumo de corriente (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE



Fuente: elaboración propia.

En la figura 92 se observa que la distorsión armónica total en tensión oscila en el límite establecido por la norma IEEE519 al momento de darse el consumo que inicia aproximadamente a las 15:30H del 03-09-2019.

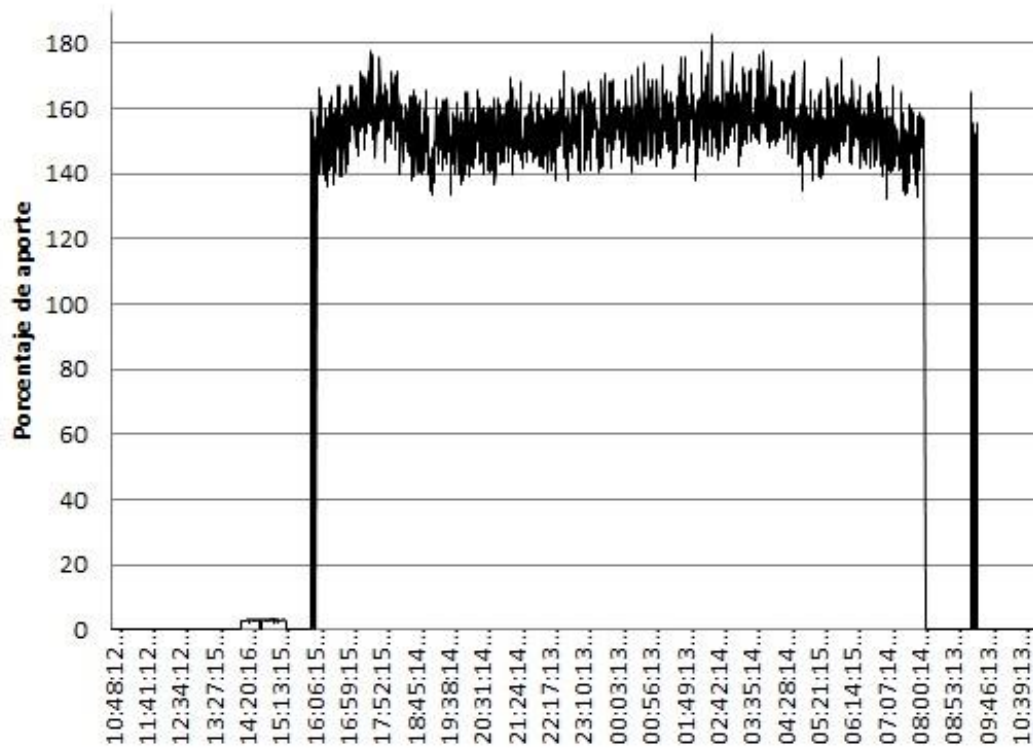
Figura 92. THD en tensión (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE



Fuente: elaboración propia.

En la figura 93 se observa que la distorsión armónica total en corriente alcanza valores en el porcentaje de aporte entre el 140 % hasta el 180 % debido que al ser una carga meramente electrónica (no lineal), presentará una mayor distorsión en la onda del consumo.

Figura 93. THD en corriente (03-09-19 a 04-09-19) cámara FLUKE



Fuente: elaboración propia.

En la tabla III se observó que los armónicos impares son los que provocan mayor porcentaje de aporte en cuanto a la distorsión en tensión, para ambas estaciones el 5° armónico (300 Hz) es el que aportó más del 50 %, seguido por el 7° armónico (420 Hz) con un aporte aproximado del 20 % en ambas estaciones, seguidos por el 3° (180 Hz) y 9° (540 Hz) armónico.

Tabla III. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 1)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Tensión			
		Cámara 1A		Cámara 1B	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	0,071	1	0,040	0,6
3	180	0,816	12	0,285	4,3
4	240	0,034	0,5	0,010	0,1
5	300	3,451	50,9	4,025	60,2
6	360	0,009	0,1	0,006	0,1
7	420	1,479	21,9	1,307	19,6
8	480	0,005	0,1	0,004	0,1
9	540	0,421	6,3	0,382	5,7
10	600	0,006	0,1	0,007	0,1
11	660	0,355	5,2	0,405	6,1
12	720	0,005	0,1	0,005	0,1
13	780	0,061	0,9	0,122	1,8
14	840	0,004	0,1	0,004	0,1
15	900	0,057	0,8	0,071	1,1

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV se observó que en ambas estaciones de la cámara 1 predominan los armónicos impares en corriente, siendo los de mayor aporte el 3° (180 Hz) y 5° (300 Hz) armónico por sobre el 20 % de distorsión. Dejando a los armónicos 7°, 9° y 11° con un porcentaje de aporte significativo pero menor al 20 % de distorsión.

Tabla IV. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 1)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Corriente			
		Cámara 1A		Cámara 1B	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	1,752	5,6	1,057	7,5
3	180	8,917	28,7	3,297	23,3
4	240	0,407	1,3	0,174	1,2
5	300	8,785	28,2	4,444	31,4
6	360	0,213	0,7	0,118	0,8
7	420	5,241	16,9	1,830	12,9
8	480	0,240	0,8	0,096	0,7
9	540	2,213	7,1	1,218	8,6
10	600	0,133	0,4	0,056	0,4
11	660	1,658	5,3	1,059	7,5
12	720	0,058	0,2	0,033	0,2
13	780	0,700	2,3	0,419	3,0
14	840	0,059	0,2	0,029	0,2
15	900	0,725	2,3	0,315	2,2

Fuente: elaboración propia.

En la tabla V se observó que para ambas estaciones la distorsión armónica en tensión el 5° (300 Hz) armónico presenta más del 50 % para la estación 2 A y poco más del 44 % para la estación 2B, aunque su promedio no alcance el límite establecido por la norma IEEE519 (inferior al 5 %) al ser un promedio de las mediciones. También se tiene que el 7° (420Hz) y el 3° (180 Hz) armónico representan un porcentaje significativo de la distorsión armónica total para ambas estaciones por lo que en la cámara 2 se repite la predominancia de los armónicos impares.

Tabla V. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 2)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Tensión			
		Cámara 2A		Cámara 2B	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	0,042	0,7	0,213	3,5
3	180	0,431	7,1	0,764	12,4
4	240	0,016	0,3	0,061	1,0
5	300	3,294	54,3	2,735	44,5
6	360	0,010	0,2	0,036	0,6
7	420	1,401	23,1	1,168	19,0
8	480	0,007	0,1	0,036	0,6
9	540	0,244	4,0	0,285	4,6
10	600	0,009	0,1	0,036	0,6
11	660	0,485	8,0	0,399	6,5
12	720	0,009	0,1	0,038	0,6
13	780	0,067	1,1	0,233	3,8
14	840	0,007	0,1	0,046	0,7
15	900	0,039	0,6	0,090	1,5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VI se observó que para ambas estaciones la distorsión armónica en corriente predomina los armónicos impares principalmente el 5° (300 Hz), 3° (180 Hz) y 7° (420 Hz); aunque en este caso también el 2° (120 Hz) armónico realizó una contribución significativa en mayor manera en la estación 2 B superando el 20 % de aporte.

Tabla VI. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 2)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Corriente			
		Cámara 2A		Cámara 2B	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	1,599	6,1	2,869	23,3
3	180	5,204	19,8	3,740	30,3
4	240	0,407	1,6	0,668	5,4
5	300	7,386	28,2	2,369	19,2
6	360	0,331	1,3	0,170	1,4
7	420	5,056	19,3	1,090	8,8
8	480	0,254	1,0	0,159	1,3
9	540	2,162	8,2	0,261	2,1
10	600	0,166	0,6	0,088	0,7
11	660	2,052	7,8	0,375	3,0
12	720	0,105	0,4	0,051	0,4
13	780	0,848	3,2	0,248	2,0
14	840	0,081	0,3	0,062	0,5
15	900	0,567	2,2	0,182	1,5

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII se observó que en ambas estaciones a pesar de encontrarse en distintas cámaras continua el patrón descrito en las tablas previas, siendo este que el armónico predominante es el 5° (300 Hz), el cual suele tener un porcentaje cercano al 50 %, siéndole el 7° (420 Hz) y 3° (180 Hz) armónico con aportes significativos. Aunque el 3° armónico no supere en promedio el límite establecido por la norma IEEE519, se verá en próximas tablas que en efecto llega a alcanzar valores por encima del máximo deseado.

Tabla VII. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en tensión (cámara 4A y 5A)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Tensión			
		Cámara 4A		Cámara 5A	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	0,13	1,8	0,055	0,9
3	180	1,02	14,1	0,473	7,7
4	240	0,03	0,4	0,008	0,1
5	300	3,40	46,8	3,267	53,5
6	360	0,01	0,1	0,003	0,0
7	420	1,69	23,2	1,471	24,1
8	480	0,01	0,2	0,002	0,0
9	540	0,37	5,0	0,242	4,0
10	600	0,01	0,1	0,002	0,0
11	660	0,23	3,2	0,535	8,8
12	720	0,00	0,1	0,001	0,0
13	780	0,22	3,0	0,033	0,5
14	840	0,00	0,1	0,001	0,0
15	900	0,15	2,0	0,013	0,2

Fuente: elaboración propia.

En la tabla VIII se observó que la distorsión armónica en corriente para la estación 4 A el 3° (180 Hz) armónico representa el mayor porcentaje, seguido por el 5° (300 Hz) armónico y luego el 2° (120 Hz) armónico por lo que se tiene una combinación entre armónicos pares e impares. De manera similar se tiene en la estación 5 A que el 3° (180 Hz) armónico representa el mayor porcentaje de aportes seguido en este caso por el 2° (120 Hz) armónico y luego el 5° (300 Hz) armónico, teniendo también una combinación entre armónicos pares e impares.

Tabla VIII. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte en corriente (cámara 4A y 5A)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Corriente			
		Cámara 4A		Cámara 5A	
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	2,976	13,4	2,403	19,7
3	180	8,116	36,6	4,553	37,3
4	240	0,845	3,8	0,584	4,8
5	300	4,109	18,5	1,793	14,7
6	360	0,261	1,2	0,085	0,7
7	420	1,227	5,5	0,461	3,8
8	480	0,339	1,5	0,237	1,9
9	540	1,353	6,1	0,802	6,6
10	600	0,143	0,6	0,090	0,7
11	660	1,657	7,5	0,735	6,0
12	720	0,065	0,3	0,051	0,4
13	780	0,655	3,0	0,230	1,9
14	840	0,046	0,2	0,041	0,3
15	900	0,400	1,8	0,154	1,3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla IX se observó que la distorsión armónica para la cámara FLUKE de forma similar el 5° (300 Hz) armónico representa el mayor porcentaje de aporte, seguido por el 7° (420 Hz) armónico y luego el 3° (180 Hz) armónico con los valores más significativos.

En corriente se observó que el 3°, 5°, y 7° armónico también son los de mayor aporte por lo que en esta estación tanto como en corriente como en tensión predominan los armónicos impares.

Tabla IX. **Distorsión armónica promedio por frecuencia y porcentaje de aporte (cámara FLUKE)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Tensión		Corriente	
		Cámara FLUKE			
		Promedio	Porcentaje	Promedio	Porcentaje
2	120	0,183	2,4	2,621	6,4
3	180	0,642	8,4	10,791	26,5
4	240	0,156	2,0	0,631	1,5
5	300	3,346	43,7	9,206	22,6
6	360	0,147	1,9	0,324	0,8
7	420	1,358	17,7	7,358	18,1
8	480	0,142	1,9	0,329	0,8
9	540	0,354	4,6	3,890	9,5
10	600	0,140	1,8	0,159	0,4
11	660	0,518	6,8	2,835	7,0
12	720	0,137	1,8	0,085	0,2
13	780	0,208	2,7	1,541	3,8
14	840	0,137	1,8	0,067	0,2
15	900	0,187	2,4	0,924	2,3

Fuente: elaboración propia.

En la tabla X se encuentran los valores máximos de distorsión armónica registrada para cada frecuencia de forma individual por tanto los valores que se presentan para cada estación no corresponden a mediciones de este exacto momento, sino que corresponden a los máximos absolutos medidos.

Se comprueba lo observado en las tablas anteriores, el 5° armónico (300 Hz) el que genera la mayor distorsión armónica llegando a sobrepasar en ocasiones el límite establecido por la norma IEEE519 del 5 % solamente con la contribución de este armónico en específico por lo que resulta el indicado para ser atenuado mediante filtros activos o pasivos y reducir gran parte del

contenido armónico registrado. De igual manera se comprueba que los armónicos impares generan mayor contribución armónica a la señal por lo que el 3° y 7° son los próximos con mayor valor de distorsión.

Tabla X. **Distorsión armónica máxima registrada según su frecuencia (tensión)**

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Tensión						
		C1A	C1B	C2A	C2B	C4A	C5A	CFluke
2	120	2,84	1,41	1,82	2,67	3,91	2,50	1,38
3	180	4,40	1,60	2,18	2,54	2,21	1,12	2,70
4	240	1,71	0,94	0,59	1,09	0,95	1,12	1,25
5	300	5,16	6,34	4,87	5,18	5,02	4,79	5,24
6	360	0,93	0,72	1,13	0,94	0,59	1,82	1,20
7	420	2,96	2,79	2,69	2,95	3,41	2,94	3,16
8	480	0,66	0,46	1,12	0,81	0,65	1,63	1,39
9	540	1,37	1,00	1,14	1,27	1,25	1,44	1,63
10	600	0,71	0,63	0,62	0,83	0,75	0,44	1,54
11	660	1,58	1,88	1,32	1,67	1,13	1,39	2,06
12	720	0,71	0,58	0,53	1,00	0,47	0,39	1,38
13	780	0,85	0,76	0,81	1,53	0,99	0,70	1,39
14	840	0,57	0,57	0,53	1,01	0,48	0,41	1,39
15	900	0,72	0,71	0,78	1,00	1,13	0,62	1,74
	HD par	3,25	2,59	3,59	4,85	1,26	1,08	2,40
	HD impar	6,23	6,46	5,26	7,80	5,84	5,18	5,69
	THD Máximo	6,43	6,37	5,36	7,49	6,46	7,26	5,56

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XI se observó que la distorsión armónica alcanza valores considerablemente altos debido a que en corriente la señal depende del consumo por lo que la distorsión es mayor. En corriente la distorsión no predomina los armónicos impares como se observó en tensión previamente. La

mayor distorsión se encuentra en la estación Fluke debido a una prueba de alta carga de equipos electrónicos.

Tabla XI. Distorsión armónica máxima registrada según su frecuencia (corriente)

# Armónico	Frecuencia [Hz]	Corriente						
		C1A	C1B	C2A	C2B	C4A	C5A	CFluke
		Máximos	Máximos	Máximos	Máximos	Máximos	Máximos	Máximos
2	120	44,96	6,59	54,91	35,26	12,34	20,04	13,47
3	180	29,32	12,03	30,40	25,80	15,83	42,58	99,76
4	240	10,49	2,88	19,11	7,08	4,56	44,94	11,94
5	300	26,22	16,75	23,33	10,17	11,71	40,73	91,00
6	360	13,95	3,32	10,14	5,57	2,58	32,96	9,42
7	420	22,33	14,55	20,40	5,20	4,95	58,52	77,97
8	480	6,95	2,80	9,80	1,73	2,39	26,28	8,41
9	540	16,49	5,51	16,96	3,98	4,48	24,41	63,81
10	600	1,59	2,03	10,69	2,04	1,54	25,97	6,26
11	660	12,37	4,73	13,72	3,60	4,60	31,77	50,07
12	720	1,25	1,81	5,12	1,22	1,42	17,11	4,66
13	780	7,92	2,38	11,28	2,01	2,81	23,48	37,51
14	840	1,60	1,58	3,18	1,16	1,24	21,74	4,73
15	900	748,00	1,94	10,60	6,41	4,21	18,27	31,29
	HD par	12,43	1,94	38,17	73,50	14,67	113,69	20,41
	HD impar	48,23	23,48	44,36	40,32	55,92	107,85	180,05
	THD Máximo	66,39	24,09	72,35	39,04	22,47	77,82	182,78
	Factor K	9,02	2,84	10,44	6,62	5,73	23,50	40,16

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un estudio de diagnóstico enfocado a los paneles eléctricos de control, los sistemas humidificadores, sistemas de control de tensión y las conexiones dentro de las cámaras climáticas.
2. Se instaló ventilación en los paneles eléctricos para disipar el calor generado por fuentes y sistemas de potencia.
3. Se propuso la instalación de contactos dentro de los barriles del sistema de humidificación para monitorear la conductividad del agua y el empleo de pastas y/o esponjas VCI en los contactos de alimentación de los electrodos de los sistemas de humidificación.
4. Se realizó encajonado de los variacs para reducir la acumulación de polvo y suciedad, además de proponerse un diseño para aislar eléctricamente el área de baja y alta tensión para evitar el sobrecalentamiento debido a corrientes de fuga.
5. El estudio de armónicos presentes en la red que alimenta las cámaras climáticas determinó que el 5° (300 Hz) armónico es el de mayor aporte, por lo que sería el principal a atenuar mediante filtrado, seguido por el 3° (180 Hz) y 7° (420 Hz) armónico.

RECOMENDACIONES

1. Instalar electrodos de medición de conductividad y llevar a cabo un estudio más exhaustivo y extenso con el objetivo de determinar si un modelo matemático aplicado a los cambios de conductividad en el agua puede predecir cuándo deban ser limpiados, ya que al superarse cierta acumulación de mineral salino dentro de los barriles el consumo de corriente de los electrodos se dispara y puede dañar los controles de potencia además de arruinar la prueba en curso.
2. Realizar un estudio que permita registrar los períodos transitorios y su aporte armónico.

BIBLIOGRAFÍA

1. CREUS SOLÉ, Antonio. *Instrumentación Industrial*. México: Alfaomega. 2013. Vol. 53. 792 p.
2. *Estándares de armónicos: ¿Qué son y cómo se utilizan?* [en línea]. <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/9901240_ENG_A_W.PDF>. [Consulta: 25 de mayo 2020].
3. Estandar IEEE-519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Nueva York: IEEE. 2014. 29 p.
4. Estandar Internacional IEC 61000-4-7. *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. Suiza: Comisión Electrotécnica Internacional. 2002. 71 p.
5. HELFRICK, Albert; COOPER, William. *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medicion*. México: Pearson. 1991. 461 p.
6. HOEVENAARS, Tony; LEDOUX, Kurt; COLOSINO, Matt. *Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications. Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*. Houston, Texas: IEEE 2003. 6 p.

7. Power Electronics. *Armónicos en Sectores Industriales*. [en línea].
<<https://docplayer.es/10930056-1-que-son-los-armonicos.html>>.
[Consulta: 2 de marzo 2020].