



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

**ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO
DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA**

Julio Roberto Marroquín Hernández

Asesorado por el Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes

Guatemala, noviembre de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO
DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO ROBERTO MARROQUIN HERNANDEZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ALBERTO NAVARRO FUENTES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020

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:

ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería de Mecánica Eléctrica, con fecha 4 de febrero de 2019.


Julio Roberto Marroquin Hernandez

Guatemala, 13 de enero de 2020

Ing. Fernando Moscoso
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Presente

Respetable Ing. Moscoso

Por este medio hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del trabajo de graduación del estudiante **Julio Roberto Marroquin Hernández** con numero de CUI **3595 75358 0101** y registro académico **199911707** con título **"ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA"**, considerando que el mismo cumple a cabalidad con los objetivos propuestos al momento de su aprobación.

Por lo tanto, lo remito a su persona que sirva continuar con el tramite respectivo, además de que el autor como el suscrito en calidad de ASESOR NOMBRADO, somos responsables del contenido del trabajo de graduación.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes
Asesor

Carlos Alberto Fernando Navarro Fuentes
Ingeniero Electricista
Colegiado 6338

Guatemala, 07 de julio de 2020.
Ref.EPS.DOC.130.06.2020.

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 **Julio Roberto Marroquin Hernández** de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Registro Académico No. **199911707** y CUI **3595 75358 0101**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA"**.

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. Nataaniel Requena Gómez
Asesor Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Eléctrica



c.c. Archivo
NJRJG/ra

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE EPS

Guatemala, 10 de julio de 2020
REF.EPS. D.04.07.2020

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

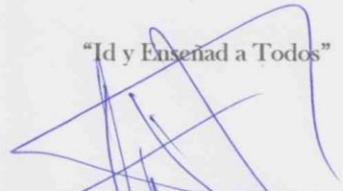
Estimado Ingeniero Rivera Carrillo:

Por este medio, le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA"**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Julio Roberto Marroquín Hernández**, CUI 3595 75358 0101 y **Registro Académico 199911707**, quien fue debidamente asesorado por el Ing. Carlos Alberto Navarro Fuentes y supervisado por el Ing. Natanael Jonathan Requena Gómez.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación por parte del Supervisor, como 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



OAH

Nota: esta carta es una copia de la original, la cual se sustituirá por la original al momento de que se normalicen las actividades en la Universidad.

REF. EIME 253 2020
17 de septiembre de 2020

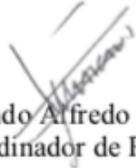
Señor Director
Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: **Estudio de calidad de energía y eficiencia energética en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores, zona 10, Guatemala.** del estudiante; Julio Roberto Marroquín Hernández, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
Coordinador de Potencia



REF. EIME 254.2020.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área , al trabajo de Graduación del estudiante Julio Roberto Marroquín Hernández titulado: **Estudio de calidad de energía y eficiencia energética en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores, zona 10, Guatemala,,** procede a la autorización del mismo.



Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo

Guatemala, 01 de octubre de 2020.



Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102

DTG. 396.2020.

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: **ESTUDIO DE CALIDAD DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL EDIFICIO DEL MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES, ZONA 10, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Julio Roberto Marroquín Hernández**, 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



Guatemala, noviembre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Mi familia

Roberto Marroquin y María Hernandez, por enseñarme a esforzarme en cada etapa de mi vida; Bryan y Fernanda Marroquin que son mi fuente de inspiración para seguir adelante, y que puedan continuar mis pasos.

“La energía que se obtiene a través de la destrucción de los elementos naturales es un crimen contra la naturaleza”.

-Nikola Tesla-

AGRADECIMIENTOS A:

Al Ser Supremo

Por la existencia y su compañía a lo largo de mi vida.

Mis hermanos

Que Dios los bendiga en su camino, en especial a Sergio y Luis López, por sus consejos y apoyo.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios y formarme como profesional en sus aulas.

Proelectric

Por ser mi fuente de desarrollo profesional, en especial al Ing. Jorge Carlos Escobar, por su apoyo a la realización de este trabajo de graduación.

**Ministerio de Relaciones
Exteriores**

Por abrirme sus puertas y brindarme todas las facilidades para la realización de este proyecto.

Mis amigos

En Guatemala, México y Estados Unidos, por ser parte importante para superar las pruebas del camino.

**Compañeros de la
Facultad de Ingeniería**

Por haberme brindado el privilegio de su amistad, sabiduría y compartir un shuco en más de una ocasión.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XVII
GLOSARIO	XIX
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. GENERALIDADES DE LA INSTITUCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes históricos.....	1
1.2. Misión	2
1.3. Visión.....	3
1.4. Valores y principios	3
1.5. Organigrama.....	4
1.6. Marco legal	5
1.6.1. Ley General de Electricidad.....	6
1.6.2. Política Energética 2013 - 2027	6
1.6.3. Plan Nacional de Energía 2017 – 2032	7
1.6.4. Convenio MEM-USAC	8
1.7. Acuerdo Gubernativo 229 - 2014.....	9
1.8. Normas ISO.....	9
1.8.1. ISO 50001:2018.....	10
2. CONCEPTOS GENERALES.....	13
2.1. Instalación eléctrica	13
2.1.1. Voltaje.....	13

2.1.2.	Corriente.....	13
2.1.3.	Potencia	14
2.1.4.	Instalaciones monofásicas y trifásicas	14
2.1.4.1.	Conexión estrella.....	14
2.1.4.2.	Conexión en triángulo o delta.....	17
2.2.	Elementos de una instalación eléctrica	18
2.2.1.	Acometida	18
2.2.2.	Conductores.....	19
2.2.2.1.	Prueba de resistencia de aislamiento de los conductores	20
2.2.2.1.1.	Método de medida puntual o a corto plazo	23
2.2.2.1.2.	Índice de polarización ...	23
2.2.2.1.3.	Relación de absorción dieléctrica (DAR)	24
2.2.2.2.	Pruebas de alta tensión <i>Hi-Pot</i>	26
2.2.2.3.	Pruebas de descargas parciales	31
2.2.3.	Termografía a conductores eléctricos	32
2.2.4.	Termografía en interruptores de baja tensión.....	34
2.2.5.	Calibres de conductores.....	38
2.2.6.	Centro de carga.....	39
2.2.7.	Canalización.....	40
2.2.7.1.	Canalizaciones de PVCE	41
2.2.7.2.	Canalizaciones metálicas EMT	41
2.2.7.3.	Tubo conduit.....	42
2.2.7.4.	Bandejas porta cables	43
2.2.7.5.	Canaletas	43
2.2.8.	Protecciones eléctricas.....	44

	2.2.8.1.	Interruptor termo magnético.....	45
		2.2.8.1.1.	Curvas de disparo 48
		2.2.8.1.2.	Interruptores automáticos (IA) 50
2.3.		Diagramas unifilares.....	52
2.4.		Normas utilizadas en los diagramas unifilares.....	53
	2.4.1.	NEMA ICS 19-2002 (R2007)	53
	2.4.2.	IEC 60617.....	54
2.5.		Equipos de medición de calidad de energía	55
	2.5.1.	Analizador de calidad de energía Fluke 430 Series II	56
	2.5.2.	Programa Power Log 5,6.....	56
2.6.		Sistema de puesta a tierra.....	57
	2.6.1.	Resistividad eléctrica de los suelos	58
	2.6.2.	Medición de la resistividad del suelo	59
		2.6.2.1.	Método de Wenner
		2.6.2.2.	Método de Schlumberger
		2.6.2.3.	Método de caída de potencial.....
			59
			62
			63
2.7.		Sistemas de pararrayos.....	64
	2.7.1.	Mapa isocerámico de Guatemala	64
2.8.		Supresores de transientes.....	66
	2.8.1.	Categorías de supresores	67
2.9.		Corriente de cortocircuito.....	68
	2.9.1.	Método de las componentes simétricas.....	70
		2.9.1.1.	Tipos de fallas.....
		2.9.1.2.	Representación de las fallas.....
			73
			74
		2.9.1.2.1.	Falla monofásica (línea–tierra)
			75

	2.9.1.2.2.	Falla bifásica (línea - línea).....	76
	2.9.1.2.3.	Falla línea - línea a tierra o falla bifásica a tierra.....	78
	2.9.1.3.	Cálculo de la corriente de cortocircuito.....	79
	2.9.1.3.1.	Cortocircuito trifásico.....	80
	2.9.1.3.2.	Cortocircuito bifásico aislado de tierra.....	81
	2.9.1.3.3.	Cortocircuito monofásico entre una fase y neutro	82
	2.9.1.3.4.	Cortocircuito monofásico entre una fase y tierra	83
3.		USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MINEX	85
	3.1.	Identificación de las fuentes de energía.....	85
	3.2.	Evaluación de uso y consumo de energía.....	87
	3.3.	Ubicación del edificio.....	87
	3.4.	Condiciones generales del edificio	88
	3.5.	Departamentos que conforman el Minex.....	90
	3.5.1.	Acometida principal	92
	3.5.2.	Subestación eléctrica del edificio	93
	3.5.3.	Fuente de alimentación de emergencia	97
	3.5.4.	Transferencia automática	100
	3.6.	Caracterización de cargas.....	105
	3.7.	Inspección de las instalaciones eléctricas.....	107

3.7.1.	Termografía del interruptor principal.....	108
3.7.2.	Coordinación de protecciones	109
3.7.3.	Corriente de cortocircuito.....	112
3.8.	Diagrama unifilar de la red principal	114
3.9.	Diagramas unificares de los tableros secundarios	116
3.9.1.	Diagrama unifilar tablero Q1	116
3.9.2.	Diagrama unifilar tablero Q2	117
3.9.3.	Diagrama unifilar tablero Q3	117
3.9.4.	Diagrama unifilar tablero Q4	118
3.9.5.	Diagrama unifilar tablero Q5	119
3.9.6.	Diagrama unifilar tablero Q6	120
3.9.7.	Diagrama unifilar tablero Q7	121
3.9.8.	Diagrama unifilar tablero Q12	122
3.9.9.	Diagrama unifilar tablero Q13	123
3.9.10.	Diagrama unifilar tablero Q14	124
3.9.11.	Diagrama unifilar tablero Q15	125
3.9.12.	Diagrama unifilar tablero Q16	126
3.10.	Sistema de tierra física y pararrayos	127
3.10.1.	Medición del punto de descarga del pararrayos ...	128
3.11.	Cobertura del pararrayos.....	130
4.	CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MINEX.....	139
4.1.	Análisis del histórico de facturación.....	139
4.2.	Análisis económico proyectado	143
4.3.	Generalidad de la medición en el edificio	149
4.3.1.	Desbalance de tensión según norma NTSD.....	149
4.3.2.	Regulación de tensión	150
4.3.3.	Parametro de medición Flicker	151
4.3.4.	Distorsión armónica total de voltaje	152

4.3.5.	Distorsión armónica total de corriente	154
4.3.6.	Análisis de voltaje banco 1	155
4.3.7.	Análisis de corriente	157
4.3.8.	Análisis de carga de un día laboral	158
4.3.9.	Análisis de potencia activa	159
4.3.10.	Energía.....	160
4.3.11.	Factor de potencia.....	161
4.3.12.	Análisis de voltaje banco 2.....	166
4.3.13.	Análisis de corriente	168
4.3.14.	Análisis de carga de un día laboral	169
4.3.15.	Análisis de potencia activa	170
4.3.16.	Energía.....	171
4.3.17.	Factor de potencia.....	172
4.4.	Selección del sistema de puesta a tierra para Minex	177
4.5.	Método estadístico para descargas atmosféricas	182
4.5.1.	Coordinación de protección.....	187
4.5.2.	Parámetros de selección de un supresor	188
4.5.3.	Diseño de protección en cascada para el Minex ...	189
4.6.	Análisis teórico de las instalaciones eléctricas.....	191
4.7.	Potencia instalada.....	191
4.8.	Potencia aparente instalada.....	191
4.9.	Demanda máxima estimada (DME)	192
4.10.	Factor de utilización (k_u)	192
4.11.	Factor de simultaneidad (k_s).....	192
4.12.	Dimensionamiento de conductores	193
4.12.1.	Método por corriente	193
4.12.2.	Método por caída de tensión	194
4.12.3.	Selección de conductores	196
4.13.	Selección de tableros.....	201

4.14.	Selección de interruptores	202
5.	EFICIENCIA ENERGÉTICA	203
5.1.	Indicadores de desempeño energético.....	204
5.1.1.	Compromiso para la implementación de un SGEN	204
5.2.	Evaluación del desempeño energético del Minex.....	205
5.3.	Indicadores energéticos.....	205
5.3.1.	Índice de la utilización de la energía.....	206
5.3.2.	Índice de costo de energía.....	207
5.4.	Uso significativo de la energía.....	209
5.5.	Hábitos de consumo	209
5.6.	Propuesta de eficiencia energética con base en la encuesta	211
6.	PROPUESTAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	215
6.1.	Cambio de iluminación actual por iluminación led	215
6.2.	Características de la iluminación del Minex.....	216
6.2.1.	Luminaria tipo led propuesta para el Minex	219
6.3.	Propuesta de un sistema de generación renovable fotovoltaico	221
6.4.	Sistema fotovoltaico	222
6.4.1.	Elementos que conforman un sistema de generación fotovoltaico	223
6.5.	Radiación de la luz solar en Guatemala	223
6.6.	Propuesta fotovoltaica para el Minex.....	225
6.7.	Ubicación del proyecto fotovoltaico	226
6.8.	Diseño del sistema de generación fotovoltaico.....	228
6.9.	Energía ahorrada por cambio de iluminación a led según RETScreen.....	232

6.10.	Emisiones de gases de efecto de invernadero.....	234
7.	PROYECCIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	237
7.1.	Cambio de iluminación actual por iluminación led.....	237
7.1.1.	Sistema fotovoltaico	239
7.1.2.	Buenas prácticas y hábitos de ahorro	242
7.2.	Emisiones de gases de efecto de invernadero.....	247
	CONCLUSIONES.....	249
	RECOMENDACIONES	251
	BIBLIOGRAFIA.....	253

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Edificio de Atención al Migrante	2
2.	Organigrama del Ministerio de Relaciones Exteriores.....	5
3.	Diagrama vectorial sistema trifásico.....	15
4.	Módulo entre tensión de fase y tensión de línea	16
5.	Diagrama vectorial generador conectado en triángulo	17
6.	Equipo de medición de aislamiento.....	22
7.	Tensiones de prueba IEEE 400.2-2013	29
8.	Prueba de <i>Hi-Pot</i> a terminal mufa 69 kV	30
9.	Centro de carga	39
10.	Tubería PVC eléctrico	41
11.	Tubería EMT pared delgada	42
12.	Tubería HG conduit.....	43
13.	Canaleta tipo escalera.....	44
14.	Interruptor de caja moldeada (MCCB).....	46
15.	Interruptor de potencia de baja tensión (LVPCB)	48
16.	Partes de la curva de disparo.....	49
17.	Curvas de disparo de interruptores	50
18.	Curva de disparo interruptores automáticos (IA).....	51
19.	Simbología NEMA.....	54
20.	Simbología IEC	55
21.	Fluke 430 <i>Series II</i>	56
22.	Esquema del método de Wenner	60
23.	Esquema de conexión en el instrumento de medición	61

24.	Método de Schlumberger.....	62
25.	Esquema de conexiones Fluke EG 1625.....	63
26.	Mapa isoceráunico de Guatemala	65
27.	Componentes de secuencia positiva, negativa y cero	70
28.	Diagrama fasorial descomposición vectorial.....	71
29.	Circuito equivalente para red de secuencia cero	73
30.	Falla monofásica línea a tierra	75
31.	Circuito equivalente falla monofásica línea a tierra.....	76
32.	Representación de falla bifásica (línea – línea)	77
33.	Circuito de fallo línea a línea.....	78
34.	Circuito de fallo línea – línea a tierra.....	79
35.	Circuito equivalente de corto circuito trifásico	81
36.	Circuito equivalente de cortocircuito bifásico aislado.....	82
37.	Circuito equivalente de cortocircuito fase y neutro.....	83
38.	Circuito equivalente de cortocircuito monofásico	84
39.	Potencia registrada en el banco 500 kVA	86
40.	Potencia registrada en el banco de 300 kVA	86
41.	Vista aérea del Minex	87
42.	Edificio lado oeste.....	89
43.	Edificio lado sur.....	90
44.	Distribución del edificio por dependencias.....	91
45.	Número de poste	92
46.	Acometida principal del Minex	93
47.	Ubicación de transformadores y subestación eléctrica	94
48.	Banco de transformadores.....	95
49.	Banco de transformadores 2.....	96
50.	Celda con interruptor principal	97
51.	Planta de emergencia Daewoo	98
52.	Planta de emergencia Stamford	99

53.	Placa de características de planta de emergencia	99
54.	Transferencia automática	100
55.	Interruptor principal, celda 1	101
56.	Interruptores ramales, celda 2.....	102
57.	Interruptores ramales, celda 3.....	103
58.	Barraje 240 V en celda principal	104
59.	Cargas eléctricas en el Minex	107
60.	Termografía del interruptor principal de 2 000A	108
61.	I_{cu} del interruptor principal	109
62.	Termomagnético ajustable del interruptor principal.....	109
63.	Curva de disparo interruptor automático Siemens	111
64.	Diagrama unifilar del punto de entrega de energía	112
65.	Circuito equivalente.....	113
66.	Diagrama de la acometida del Minex	115
67.	Diagrama unifilar del tablero principal	115
68.	Diagrama unifilar tablero Q1	116
69.	Diagrama unifilar tablero Q2	117
70.	Diagrama unifilar tablero Q3	118
71.	Diagrama unifilar tablero Q4	119
72.	Diagrama unifilar tablero Q5	120
73.	Diagrama unifilar tablero Q6	121
74.	Diagrama unifilar tablero Q7	122
75.	Diagrama unifilar tablero Q12	123
76.	Diagrama unifilar tablero Q13	124
77.	Diagrama unifilar tablero Q14	125
78.	Diagrama unifilar tablero Q15	126
79.	Diagrama unifilar tablero Q16	127
80.	Pararrayos del Minex	128
81.	Proyección de cobertura del pararrayos.....	130

82.	Densidad de potencia de luminarias por departamento.....	132
83.	Cargas que contribuyen al consumo diario de energía.....	135
84.	Pareto entre cargas del edificio.....	136
85.	Cargabilidad de los transformadores	137
86.	Datos de la factura.....	140
87.	Energía consumida según facturación.....	142
88.	Potencia activa día laboral.....	143
89.	Potencia para día no laboral.....	144
90.	Costo por consumo de energía eléctrica según mediciones.....	146
91.	Comparación de facturación versus mediciones	147
92.	Demanda registrada del Minex	148
93.	Demanda registrada versus potencia contratada	148
94.	Perfiles de voltaje de línea a neutro.....	155
95.	Gráfica de desbalance de tensión.....	156
96.	Regulación de tensión	157
97.	Corrientes por fase	158
98.	Carga día laboral	159
99.	Potencia activa.....	160
100.	Energía Activa Total.....	161
101.	Factor de potencia	162
102.	Flicker generado por el usuario	163
103.	Distorsión armónica total de voltaje	164
104.	Distorsión armónica total de corriente.....	165
105.	Perfiles de voltaje línea a neutro.....	167
106.	Desbalance de tensión	167
107.	Regulación de tensión	168
108.	Corrientes por fase	169
109.	Carga de un día laboral	170
110.	Potencia activa.....	171

111.	Energía registrada en el interruptor principal 2	172
112.	Factor de potencia.....	173
113.	Flicker generado por el usuario	174
114.	Distorsión armónica total de voltaje	175
115.	Distorsión armónica total de corriente	175
116.	Ubicación de las picas.....	177
117.	Sistema de puesta a tierra para Minex.....	182
118.	Proyección de cobertura del pararrayos.....	184
119.	Comparación del uso de energía en un edificio público en USA.....	207
120.	Benchmarking para el Minex	208
121.	Tubo T8 en lámpara de 24 "x48 "	218
122.	Energía utilizada por la iluminación fluorescente	218
123.	Ahorro en energía entre el tubo fluorescente y el tubo led.....	220
124.	Matriz energética de fuentes de generación de energía en Guatemala.....	221
125.	Radiación solar en energía por día para Guatemala.....	224
126.	Irradiación global horizontal (GHI) para el Minex	225
127.	Valores de irradiación para el Minex	226
128.	Ubicación global del Edificio de Atención al Migrante	227
129.	Horas de luz solar en el Minex	228
130.	Características del panel solar	229
131.	Panel solar de 330 W	230
132.	Costo del inversor y paneles solares.....	231
133.	Energía ahorrada por cambio de iluminación a led	233
134.	Comparacion de emisión de gases de efecto de invernadero (GEI) entre dos edificios públicos	235
135.	Reducción de gases de efecto de invernadero mediante la reforestación de árboles.....	236
136.	Potencia día laboral con iluminación actual y con cambio a led.....	238

137.	Comparación de consumo entre la medición y el cambio de iluminación led proyectado hasta 2027	239
138.	Potencia día laboral según mediciones y con paneles solares	241
139.	Comparación de consumo entre la medición y el sistema fotovoltaico instalado proyectado hasta 2027	242
140.	Potencia día laboral según mediciones y realizando cambios de buenas prácticas y hábitos de ahorro	246
141.	Comparación de consumo entre la medición y el cambio de buenas practicas y hábitos de ahorro proyectado hasta 2027	246
142.	Comparación entre proyecciones de gases de efecto de invernadero actuales y la aplicación de las medidas de ahorro energético	248

TABLAS

I.	IEEE 43-2000 Tensión de prueba	21
II.	Índice de polarización según IEEE43-2000	24
III.	Relación de absorción según IEEE 43-2000	25
IV.	Valores de voltaje para pruebas de descargas parciales.....	32
V.	Valores de referencia para cambios de temperatura	33
VI.	Estandares de referencia para temperatura	35
VII.	Valores de temperatura para interruptores de baja tensión	36
VIII.	Valores de torque para tornillos en conexiones eléctricas	37
IX.	Calibre de conductor para el sistema de puesta a tierra	38
X.	Porcentaje de uso de la sección transversal en conduit	40
XI.	Promedio de descargas atmosféricas por región.....	66
XII.	Categorías de supresores según IEEE & IEC	67
XIII.	Distribución de cargas en el Minex	106
XIV.	Resultados de la termografía del interruptor principal.....	108
XV.	Mediciones de tierra física	129

XVI.	Inventario de luminaria por departamento	131
XVII.	Densidad de potencia por departamento	132
XVIII.	Consumo diario por iluminación	133
XIX.	Tomacorrientes utilizados en el edificio.....	134
XX.	Equipo de mayor demanda de energía	135
XXI.	Histórico de facturación del Minex.....	141
XXII.	Costo anual de energía sin IVA.....	142
XXIII.	Proyección de consumo de energía durante un día laboral	143
XXIV.	Proyección de consumo de energía durante un día no laboral	144
XXV.	Proyección de consumo de energía según mediciones	145
XXVI.	Comparación de facturación versus mediciones	146
XXVII.	Valores de desbalance de tensión según NTSD	150
XXVIII.	Tolerancia para la regulación de tensión.....	151
XXIX.	Flicker generado por el usuario	151
XXX.	Tolerancia para la distorsión armónica de tensión	153
XXXI.	Tolerancia para la distorsión armónica de corriente.....	154
XXXII.	Resumen de parámetros de calidad de energía banco 1	166
XXXIII.	Resumen de parámetros de calidad de energía banco 2.....	176
XXXIV.	Mediciones de la resistividad del terreno	178
XXXV.	Fórmulas para el cálculo de la resistencia	179
XXXVI.	Factores multiplicativos para agregar varillas	180
XXXVII.	Coeficiente de nivel de riesgo C_1	183
XXXVIII.	Coeficientes de nivel de riesgo C_2 y C_3	185
XXXIX.	Coeficientes de nivel de riesgo C_4 y C_5	186
XL.	Parámetros de selección de un supresor	188
XLI.	Selección de supresores según IEEE C62.41.1-2002	189
XLII.	Valor de exposición para el Minex	190
XLIII.	Supresores para las instalaciones del Minex	190
XLIV.	Selección de conductores tablero Q1.....	196

XLV.	Conductores por método de la corriente	196
XLVI.	Cálculo de conductor alimentador del tablero principal.....	198
XLVII.	Cálculo de alimentadores por método de corriente	199
XLVIII.	Cálculo de alimentadores por método de caída de tensión	200
XLIX.	Conductores seleccionados para alimentadores	200
L.	Tableros para el edificio	201
LI.	Selección de interruptores	202
LII.	Índice de uso de la energía del Minex	206
LIII.	Indicadores para el minex.....	208
LIV.	Resultados de la encuesta.....	210
LV.	Inventario de lámparas en el Minex	217
LVI.	Energía utilizada por el tubo led T8	219
LVII.	Retorno de Inversión.....	220
LVIII.	Retorno de inversión sistema fotovoltaico	232
LIX.	Retorno de inversión proyecto de iluminación	233
LX.	Proyección de consumo de energía con iluminación led	238
LXI.	Proyección de consumo de energía con sistema fotovoltaico	240
LXII.	Proyección de consumo de energía con buenas prácticas y hábitos de ahorro	245
LXIII.	Comparación entre proyecciones de gases de efecto de invernadero actuales y la aplicación de las medidas de ahorro energético	247

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperios o amperes. Es la unidad de medida del sistema internacional para la intensidad de corriente.
F	Faradios es la unidad de medida del sistema internacional para la capacitancia.
GEI	Gas de efecto de Invernadero.
kA	Kiloamperio, sufijo que equivale a mil amperios.
kW	Kilovatio, sufijo que equivale a mil vatios.
kWh	Kilovatio hora, sufijo que equivale a mil vatios hora.
kV	Kilovoltio, sufijo que equivale a mil voltios.
kVA	Kilovoltio amper, sufijo que equivale a mil voltios amperes.
kVAR	Kilovoltio amper reactivos, sufijo que equivale a mil voltios amperes.
lm	Lumen es la unidad de medida del sistema internacional para el flujo luminoso.
lx	Lux es la unidad de medida del sistema internacional para el nivel de iluminación.
MW	Megavatios, sufijo que equivale a un millón de vatios.
mm	Milímetro, sufijo que equivale a una milésima de metro.
Q	Quetzal, moneda nacional de Guatemala.
GΩ	Sufijo que equivale a mil millones de ohmios.

W	Vatio es la unidad de medida del sistema internacional para la potencia eléctrica.
Wh	Vatio hora es la cantidad de energía necesaria para mantener una potencia constante de 1 vatio en una hora.
V	Voltio es la unidad de medida del sistema internacional para el voltaje eléctrico.
VA	Voltio amperes es la unidad de medida para la potencia aparente.
Ω	Ohmio es la unidad de medida del sistema internacional para la resistencia eléctrica.

GLOSARIO

Acometida	Es la derivación que se hace en la red de distribución de la empresa que suministra la energía eléctrica hasta la medición de energía del usuario.
Armónicos	Es un componente sinusoidal en múltiplos de la frecuencia fundamental y es un defecto en la forma de onda de voltaje o corriente eléctrica.
AWG	Acrónimo del inglés <i>American Wire Gauge</i> / calibre de alambre estadounidense.
Banco de capacitores	Elemento de compensación de potencia reactiva capacitiva con el objetivo de elevar el factor de potencia.
Calidad de energía	Características de una red eléctrica que son evaluadas de acuerdo a un conjunto de parámetros técnicos de referencia.
Cámara termográfica	Dispositivo que muestra en pantalla una imagen de la radiación calorífica que emite un cuerpo.
CO2	Dióxido de carbono, es el principal causante del efecto invernadero y del calentamiento global.

EIME	Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
IEC	Acrónimo del inglés para <i>International Electrotechnical Commission</i> / Comisión Electrotécnica Internacional.
IEEE	Acrónimo del inglés para <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> / Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
ISO	Acrónimo del inglés para <i>International Organization for Standardization</i> / Organización Internacional de Normalización.
MINEX	Ministerio de Relaciones Exteriores.
MEM	Ministerio de Energía y Minas.
NEC	Acrónimo del inglés para <i>National Electrical Code</i> / Código Eléctrico Nacional.
NFPA	Acrónimo del inglés para <i>National Fire Protection Administration</i> / Administración Nacional de protección contra Incendios.
NTSD	Normas técnicas del servicio de distribución.
SGEn	Sistema de Gestión de la Energía.

RESUMEN

La contribución de los sistemas de gestión mediante la norma internacional ISO 50001:2011 a la eficiencia de energía eléctrica tiene como objetivo incentivar a cualquier organización a mejorar su desempeño energético.

En el capítulo 1 se describen las actividades propias del Ministerio de Relaciones Exteriores (Minex), así como se da a conocer el convenio entre la EIME y el MEM, el cual dio origen al presente trabajo. Se establece el concepto de desempeño energético según la norma ISO50001:2011.

En el capítulo 2 se hace un repaso de los conceptos generales y parámetros eléctricos, así como también la ubicación de los principales equipos eléctricos del Minex.

En el capítulo 3 se estudia la forma en la que el Minex hace uso de la energía de entrada. Se revisa la cargabilidad de sus componentes eléctricos.

En el capítulo 4 se estudia el historial de consumo y calidad de la energía eléctrica utilizada por el Minex.

En el capítulo 5 se realizan indicadores de acuerdo a las actividades del Minex para conocer su desempeño energético.

En el capítulo 6 se proponen cambios de equipos eléctricos para reducir el consumo energético.

En el capítulo 7, de acuerdo a la política energética, se presentan las proyecciones de las propuestas de ahorro de energía eléctrica hasta el año 2027.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio de calidad de energía en el edificio del Ministerio de Relaciones Exteriores para conocer el estado actual de las instalaciones eléctricas y proponer mejoras que promuevan una disminución en el consumo de energía eléctrica para reducir los efectos ambientales que producen la generación de electricidad.

Específicos

1. Realizar mediciones de calidad de energía para conocer los parámetros eléctricos de las instalaciones eléctricas y ser comparados con las normas NTSD.
2. Realizar el inventario de los equipos eléctricos que se encuentran demandando energía en todas las áreas del edificio, para proponer equipos de última tecnología que sean más eficientes.
3. Promover el uso de fuentes de energía renovables como los paneles solares.

INTRODUCCIÓN

En el año 2013, el Ministerio de Energía y Minas elabora la Política Energética 2017-2032, aprobada bajo el Acuerdo Gubernativo 80-2013, con la finalidad de contribuir al desarrollo energético sostenible del país y con respeto al medio ambiente.

Con el objetivo del cumplimiento del eje número 2 del Plan Nacional de Energía 2017-2032 se realiza el convenio de cooperación entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y el Ministerio de Energía y Minas, el cual tiene como objetivo llevar a cabo auditorías energéticas en los edificios públicos del país.

Estas auditorías se basan en la recopilación de información técnica y económica de las fuentes de energía del edificio y se realizan mediciones con el objetivo de conocer la situación actual de las instalaciones eléctricas.

Este trabajo pretende promover las buenas prácticas para el ahorro de energía y el uso eficiente de los equipos eléctricos que se utilizan diariamente, así como fomentar la sustitución de fuentes de energía por generación por medio de fuentes renovables. Se espera con ello disminuir la contaminación de la atmósfera y reducir los gases de efecto de invernadero en la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, y en base a los resultados obtenidos proponer las soluciones que sean física y económicamente más factibles.

1. GENERALIDADES DE LA INSTITUCIÓN

Al Ministerio de Relaciones Exteriores le corresponden las funciones generales y funciones sustantivas establecidas en el artículo 38 de la Ley del Organismo Ejecutivo y las que en ejercicio de la función asignada por el presidente de la República en el artículo 183 inciso o) de la Constitución Política de la República.

1.1. Antecedentes históricos

A partir del siglo XIX, inmediatamente después de la independencia, se organizó paulatinamente la administración pública. Primero el Estado de Guatemala, como parte de las provincias unidas de Centro América y después a partir de 1847 como República independiente, organizó en Secretarías los diferentes ramos de la administración, de acuerdo a la denominación española. Esta terminología incluyó en nuestro caso a la Secretaría de Relaciones Exteriores, que conservó esta denominación después de la Revolución del 20 de Octubre de 1944, como puede verse en la Ley del Organismo ejecutivo contenida en el Decreto No. 47 de la Junta Revolucionaria, y emitido en fecha 27 de diciembre de 1944.

El período de vigencia fue corto, ya que al entrar en vigor la Constitución de la República de fecha 15 de marzo, ese ordenamiento constitucional ya no hablaba de secretarías, sino de Ministerios de Estado. Por tanto, el Congreso de la República tuvo que promulgar una ley del Organismo Ejecutivo, emitida en el Decreto No. 93 del Congreso de la República, de fecha 25 de abril de 1945, en

la que por primera vez se habla en la sección XVIII, Artículo 21, Ministerio de Relaciones Exteriores.

Figura 1. **Edificio de Atención al Migrante**



Fuente: elaboración propia.

1.2. Misión

Es la institución del Estado a quien le corresponde, bajo la dirección del presidente de la República, la formulación de las políticas y la aplicación del régimen jurídico relativo a las relaciones del Estado de Guatemala con otros Estados y personas o instituciones jurídicas de derecho internacional, así como la representación diplomática del Estado, la nacionalidad guatemalteca y los asuntos diplomáticos y consulares.

1.3. Visión

Ser la dependencia que gestiona, coordina y ejecuta la política exterior con eficiencia y eficacia, respondiendo a los intereses del Estado de Guatemala en el marco del contexto internacional y a las necesidades de la población guatemalteca en el exterior.

1.4. Valores y principios

Los valores y principios con los cuales el personal diplomático, técnico y operativo trabaja son:

- Respeto
- Honestidad
- Integridad
- Dignidad
- Responsabilidad
- Mística de Trabajo
- Trabajo en Equipo

En el marco de esos valores se mantienen aquellos otros relacionados con los principios y valores establecidos para las relaciones internacionales:

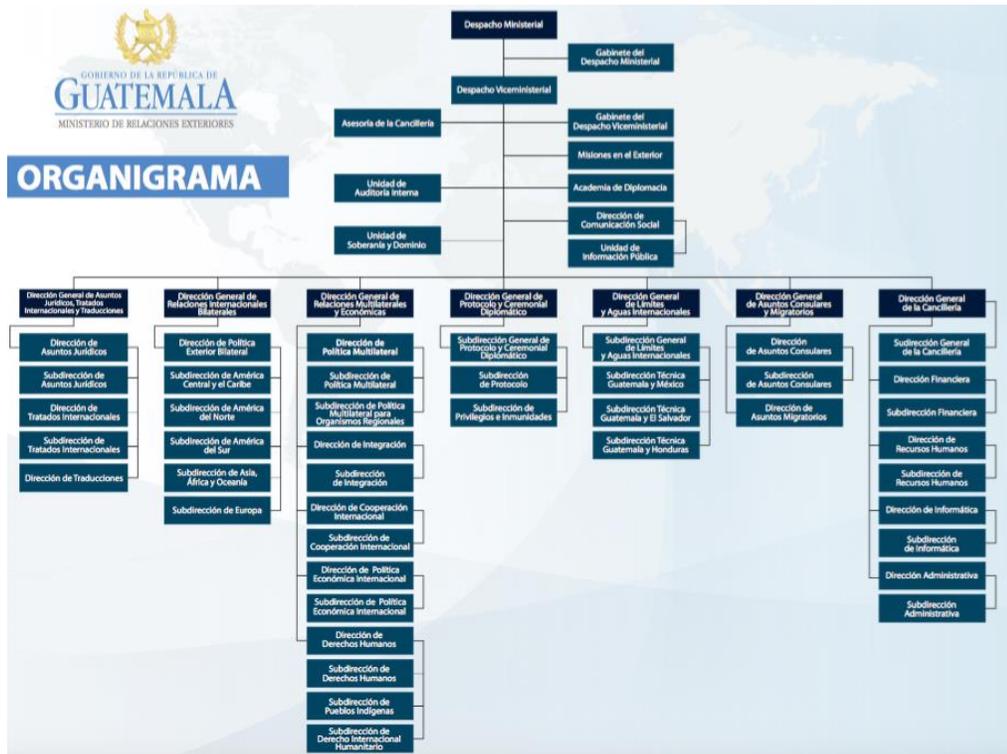
- Respeto a la dignidad y valor de la persona.
- Apego al Derecho Internacional y respeto a las obligaciones emanadas de los tratados.

- Fortalecimiento de la paz universal y mantenimiento de la seguridad internacional.
- Igualdad de derechos de hombres y mujeres y de las naciones grandes y pequeñas.
- Autodeterminación de los pueblos.
- No intervención en los asuntos internos de otros Estados soberanos.
- Promoción del progreso económico y social.
- Amistad, solidaridad y cooperación con todos los Estados que observan un patrón de conducta acorde con la Carta de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y fundamentalmente con los países centroamericanos.
- Apego a la solución pacífica de las controversias.

1.5. Organigrama

A continuación, se presenta el organigrama del Ministerio de Relaciones Exteriores, Minex:

Figura 2. Organigrama del Ministerio de Relaciones Exteriores



Fuente: Ministerio de Relaciones Exteriores .Organigrama.

www.minex.gob.gt/Visor_Pagina.aspx?PaginaID=12. Consulta: mayo de 2019.

1.6. Marco legal

En Guatemala, el fundamento del marco legal es la Constitución Política de la República, la cual proporciona las bases sobre las cuales las instituciones determinan el alcance de su participación con la creación de normas y leyes para establecer los lineamientos y elaborar estrategias, programas y planes de acción que promuevan el desarrollo en el sector que tienen a su cargo.

1.6.1. Ley General de Electricidad

En noviembre de 1996, el Congreso de la República de Guatemala aprobó bajo el Decreto No. 93-96 la creación de la Ley General de Electricidad y en el Acuerdo Gubernativo Número 256-97, Reglamento de la Ley General de Electricidad, con el objetivo de proporcionar los lineamientos legales para regular a las empresas que se encargan de generar, transportar y distribuir energía eléctrica al país. Dejó al Ministerio de Energía y Minas como el responsable de coordinar las políticas, planes y programas relacionados al subsector eléctrico.

1.6.2. Política Energética 2013 - 2027

La nueva Política Energética 2013-2027 fue actualizada para maximizar el aprovechamiento de los recursos que el país necesita para dar energía al país en los próximos años con el uso de fuentes renovables y utilizar buenas prácticas con respecto al consumo energético.

Para el cumplimiento de los objetivos de la Política Energética 2013-2027 se han identificado las siguientes líneas de intervención denominadas ejes estratégicos de acción:

- Primer eje: seguridad del abastecimiento de electricidad a precios competitivos. Cuenta con las instituciones públicas y privadas relacionadas al MEM, CNEE, INDE, MARN para alcanzar sus objetivos operativos y metas a largo plazo mediante acciones que impulsen la generación de electricidad por medio de fuentes renovables y promuevan la capacitación y tecnificación del capital humano del sector energético del país.

- Segundo eje: seguridad del abastecimiento de combustibles a precios competitivos. Una de las metas más importantes es introducir el gas natural como una fuente de energía.
- Tercer eje: exploración y explotación de reservas petroleras con miras al autoabastecimiento nacional. Se busca incrementar la exploración y explotación de las reservas de petróleo en el país hasta en un 100 %, así como modernizar la infraestructura para la producción y transporte del mismo.
- Cuarto eje: ahorro y uso eficiente de la energía. Tiene como objetivo operativo que el 30 % de las instituciones públicas utilicen eficientemente la energía y, como meta a largo plazo, fomentar en el sector industrial y comercial el ahorro de energía hasta en un 25 %.
- Quinto eje: reducción del uso de leña en el país: tiene como objetivo la disminución del uso de leña como fuente de energía en las residencias y en el sector industrial al promover el uso de estufas ahorradoras y sustituir el uso de leña por otras fuentes energéticas.

Las principales estrategias para la implementación de la Política Energética 2013-2027 son: plan de acción, monitoreo y evaluación de las entidades vinculadas con la ejecución de las acciones.

1.6.3. Plan Nacional de Energía 2017 – 2032

El Ministerio de Energía y Minas presenta el Plan de Nacional de Energía como una herramienta de mitigación para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los efectos adversos del cambio climático.

Dicho plan identifica las siguientes líneas de intervención denominadas como ejes estratégicos:

- Primer eje: aprovechamiento sostenible de los recursos renovables: Consumo de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables, promoviendo su uso y reduciendo el consumo de leña.
- Segundo eje: eficiencia y ahorro energético. En este eje se presenta el motivo por el cual se realiza el presente trabajo, que es la realización de auditorías energéticas con el objetivo de concientizar en el consumo actual y que con prácticas de buen uso de la energía se puede reducir el consumo energético.
- Tercer eje: reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Como objetivo principal de los cambios en hábitos y en el consumo eficiente de la energía se tiene el objetivo de reducir los gases de efecto de invernadero hasta en un 29,2 %, lo cual se traduce en la reducción de liberación de 16,82 millones de toneladas de CO₂ a 11,91 millones de toneladas para el año 2032.

1.6.4. Convenio MEM-USAC

Como un apoyo para la realización de las auditorías energéticas y en cumplimiento con el Plan Nacional de Energía 2017-2032, el Ministerio de Energía y Minas realiza un convenio con la Escuela de Mecánica Eléctrica de la Facultad de ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En este convenio se fijan las condiciones y compromisos entre las instituciones responsables para que los estudiantes de dicha escuela apliquen los conocimientos adquiridos durante el periodo de estudio de su carrera.

1.7. Acuerdo Gubernativo 229 - 2014

Reglamento de Salud y Seguridad Ocupacional creado por el Ministerio de Trabajo y Previsión Social y aprobado por el Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus reformas 33-2016.

ARTÍCULO 17. Los lugares de trabajo deben contar con iluminación adecuada para la seguridad y conservación de la salud de los trabajadores. Cuando la iluminación natural no sea factible o suficiente, se debe proveer de luz artificial en cualquiera de sus formas, siempre que ofrezca garantías de seguridad, no vicie la atmósfera del local y no ofrezca peligro de incendio. El número de fuentes de luz, su distribución e intensidad, deben estar en relación con la altura, superficie del local y trabajo que se realice como lo establece el artículo 168 de este reglamento. Los lugares que vulneren y pongan en riesgo al trabajador, deben estar especialmente iluminados. La iluminación natural, directa o refleja, no debe ser tan intensa que exponga a los trabajadores a sufrir accidentes o daños en su salud.¹

1.8. Normas ISO

Las normas ISO (por sus siglas en inglés, International Organization for Standardization u Organización Internacional para la Normalización) con la colaboración de la IEC (por sus siglas en inglés, *International Electrotechnical Commission* o Comisión Internacional Electrotécnica), en todos los aspectos referidos a la normalización eléctrica, ha creado la normatividad que proporcionan los lineamientos y requisitos que debe poseer un sistema de gestión energética, con el objetivo de realizar mejoras continuas para utilizar de manera más eficiente las fuentes de energía de una organización o establecimiento.

¹ Congreso de la Republica de Guatemala. *Reglamento Sobre Higiene y Seguridad en el trabajo*. p.7.

1.8.1. ISO 50001:2018

En el año 2018 se publicó la norma ISO 50001 con el objetivo de que las organizaciones puedan establecer sistemas y procesos que ayuden a mejorar el rendimiento del uso de la energía, reducción de costo y disminución de la emisión de gases contaminantes a nivel mundial. Los principales objetivos de esta norma son:

- Reducir el consumo energético.
- Permitir la transparencia y la comunicación sobre la gestión de la energía.
- Adquirir conocimientos para la optimización de los recursos.
- Identificar y fomentar las buenas prácticas de gestión energética para cada organización.

La norma define el desempeño energético y permite a la organización elegir las prácticas más convenientes para conseguir el mejor desempeño energético.

El consumo de la energía es la forma de sustitución de las fuentes de energía utilizadas actualmente y métodos de conservación de la energía, como el uso de paredes con colores que no atraigan la luz solar, y mantener la oficina a una temperatura confortable de tal manera que no sea necesaria la utilización del aire acondicionado.

La eficiencia energética se refiere a la sustitución de equipos con nueva tecnología para el uso más inteligente de la energía sin afectar la calidad de vida ni al medio ambiente.

El uso de la energía es la forma en la que la utilizamos en nuestra vida cotidiana y las buenas prácticas del manejo de la misma para reducir, con poca inversión, el consumo energético.

Para el análisis energético del Minex se lleva a cabo una comparativa de consumo actual mediante los datos de facturación de años anteriores y mediciones realizadas en las instalaciones eléctricas. Se identifican los equipos que utilizan energía de manera significativa y se efectúan estudios de calidad de energía para identificar oportunidades de mejora.

Se establecen líneas base e indicadores energéticos mediante gráfica de historial de consumo, benchmarking, curvas de demanda por día, diagrama de Pareto para la identificación de sustitución de equipos más eficientes con tecnología actual.

2. CONCEPTOS GENERALES

2.1. Instalación eléctrica

Se le llama instalación eléctrica al conjunto de elementos que permiten la distribución de energía eléctrica a todos los aparatos eléctricos de una residencia, industria o edificio. Algunos de estos elementos son los transformadores, tableros eléctricos, interruptores, conductores, canalización y todo elemento que sirve de medio para tener el control sobre la corriente eléctrica.

2.1.1. Voltaje

Se conoce como voltaje, diferencia de potencial eléctrico o tensión eléctrica, a la magnitud que da cuenta de la diferencia en el potencial eléctrico entre dos puntos determinados. También se entiende como el trabajo por unidad de carga eléctrica que ejerce sobre una partícula un campo eléctrico, para lograr moverla entre dos puntos determinados.

2.1.2. Corriente

Le llamamos corriente eléctrica al flujo de una carga eléctrica a través de un material que generalmente es cobre o aluminio, que se debe al desplazamiento de los electrones dentro de su estructura molecular, el cual genera al mismo tiempo un campo eléctrico a su alrededor.

2.1.3. Potencia

La potencia eléctrica es la magnitud utilizada para cuantificar el consumo de generación de energía eléctrica. La potencia es un parámetro que indica la cantidad de energía eléctrica transferida de una fuente generadora a un elemento consumido por unidad de tiempo.

2.1.4. Instalaciones monofásicas y trifásicas

Las instalaciones monofásicas constan de dos o tres hilos. Los voltajes más comunes son 120 V para redes de 2 hilos y 240 V para redes de 3 hilos; en esta última configuración aparece el término voltaje de línea a línea igual a 240 V y voltaje de fase, que es de 120 V.

En las instalaciones trifásicas se consideran dos configuraciones: la conexión estrella, que consta de 4 hilos, y la conexión en delta, que consta de 3 hilos. El voltaje de línea a línea se define como el valor de la tensión que se tiene al medir entre dos conductores, mientras el voltaje de fase es el valor que se obtiene al medir entre un conductor y el neutro.

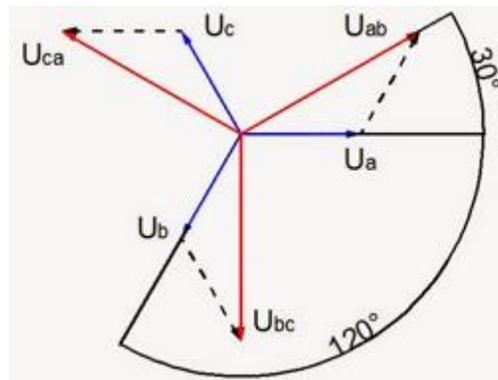
2.1.4.1. Conexión estrella

La conexión en estrella es muy utilizada en un sistema de baja debaja tensión por que contiene un conductor neutro, el es utilizado por los equipos monofásicos de 120 V y 240 V.

Una de las desventajas que tiene este sistema es que lleva un conductor adicional por todo el recorrido de las instalaciones eléctricas lo que hace que se

eleve su costo, este conductor neutro debe estar sólidamente aterrizado para evitar llegar a una condición de neutro flotante.

Figura 3. **Diagrama vectorial sistema trifásico**



Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama vectorial se representan las tensiones de fase (U_F), también llamadas tensiones simples en color azul y las tensiones de línea (U_L) también llamadas tensiones compuestas en color rojo.

Considerando una secuencia positiva (ABC) para las tensiones de fase obtenemos las siguientes ecuaciones:

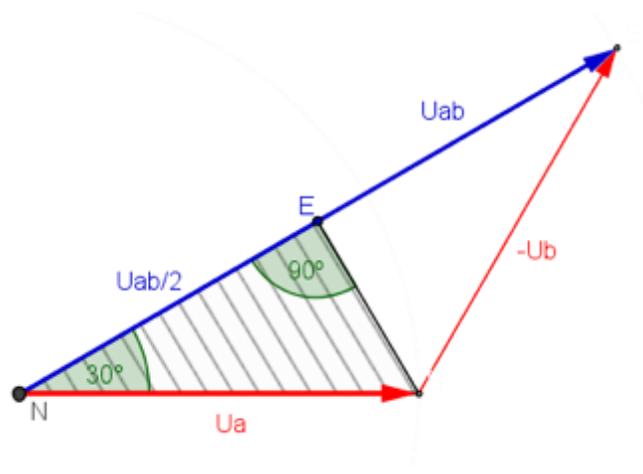
$$U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}$$

U_{AB} = Tensión de línea (U_L)

U_{AN} = Tensión de fase (U_F)

De acuerdo al diagrama vectorial se deduce que las tensiones de línea están adelantadas 30° respecto de las tensiones de fase y su módulo es la raíz de tres.

Figura 4. **Módulo entre tensión de fase y tensión de línea**



Fuente: Sistemas Trifasicos . *Triangulo Isósceles*. www.proyecto987.es/trifasica_2.html.

Consulta: septiembre de 2019.

$$\frac{U_{ab}}{2} = U_a \cos 30^\circ$$

$$U_{ab} = 2 * U_a * \cos 30^\circ$$

$$U_L = \sqrt{3} * U_F$$

Para la corriente, como los devanados del generador se conectan en serie con el conductor de línea, se deduce que la corriente de línea y fase son iguales.

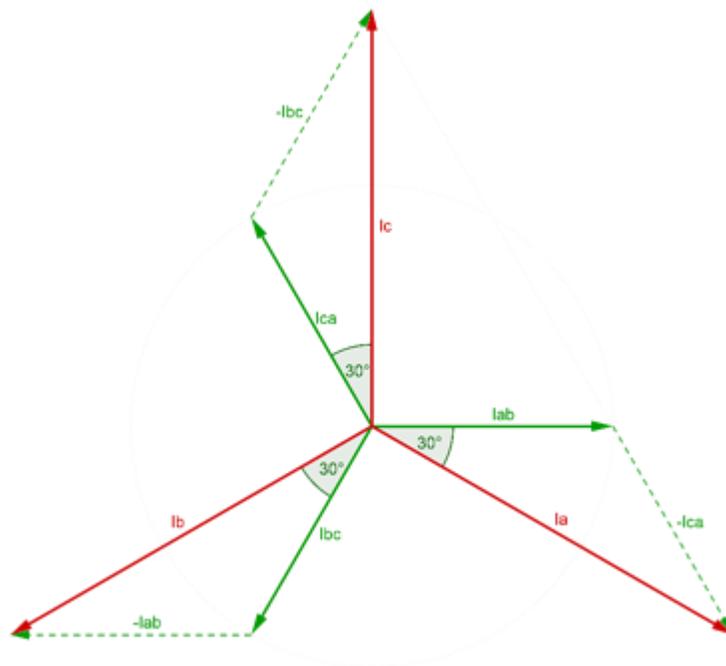
$$I_L = I_F$$

2.1.4.2. Conexión en triángulo o delta

Esta conexión no posee punto neutro, cada bobina se une al final de la siguiente formando un sistema cerrado y de los vértices del triángulo salen las líneas de distribución. Las tensiones de línea coinciden con las fuerzas electromotrices de las bobinas del alternador, por lo que se deduce que la tensión de línea es igual que la tensión de fase.

$$U_L = U_F$$

Figura 5. Diagrama vectorial generador conectado en triángulo



Fuente: Sistemas Trifasicos .*Diagrama Vectorial de Fuerzas Electromotrices.*
www.proyecto987.es/trifasica_2.html. Consulta: septiembre de 2019.

De todas las intensidades de la fase A se obtienen dos triángulos rectángulos iguales como el de la figura de la conexión en estrella, el cual se utiliza para encontrar la relación de las corrientes de línea con respecto de las corrientes de fase:

$$\frac{I_{ab}}{2} = I_a \cos 30^\circ$$
$$I_{ab} = 2 * I_a * \cos 30^\circ$$
$$I_L = \sqrt{3} * I_F$$

2.2. Elementos de una instalación eléctrica

Los elementos de una instalación eléctrica van a diferir según sea el voltaje de la misma. Este es el primer paso para la determinación de los elementos y materiales para la realización de la misma, así como su ubicación, interior o exterior, subterránea o aérea. A continuación, presentamos algunos elementos que constituyen una instalación eléctrica.

2.2.1. Acometida

La acometida es el punto que une la red de distribución de la empresa de distribución de energía con la instalación del edificio. Las acometidas se clasifican según el nivel de voltaje y el tipo de construcción.

- Según nivel de voltaje:
 - Baja tensión: para servicios con cargas de voltaje menor a 1 000 V.
 - Media tensión: para servicios de 1 000 V hasta 13 200 V.

- Según tipo de construcción:

- Acometida aérea: la alimentación se realiza desde el acople de la red de distribución hasta el punto de entrega por medio de un poste y con cable expuesto a una altura determinada.
- Acometida subterránea: cuando la alimentación al punto de entrega se realiza por medio de un tubo enterrado hasta llegar al contador.

2.2.2. Conductores

En las instalaciones eléctricas los conductores son los encargados de proveer una trayectoria segura a la circulación de la corriente eléctrica. Los conductores están fabricados de cobre o de aluminio. Este último es más económico, pero con menor capacidad de conducción de corriente por su alta resistencia al paso de la corriente comparado con el cobre.

El aislamiento de los conductores es material de alta resistencia y limita la circulación de la corriente. Sufre cambios con el paso del tiempo por sobrecarga en el circuito, aumento de temperatura, etc. Estos cambios provocan una alteración de las propiedades aislantes que afectan la resistividad eléctrica, lo que da lugar al aumento de las llamadas corrientes de fuga que pueden provocar fallas de cortocircuito o por arco eléctrico.

La pérdida de las propiedades aislantes de los conductores se clasifica en cinco diferentes grupos, teniendo en cuenta que el fallo puede deberse a una o más causas que se detallan a continuación:

- Fatiga por origen eléctrico
 - Asociada a sobretensiones y sobrecarga en los circuitos

- Fatiga de origen mecánico
 - Asociada a arranques y paros frecuentes.
 - Vibraciones constantes de máquinas rotativas.
 - Golpes directos al conductor.

- Fatiga de origen químico
 - Proximidad a los productos químicos.
 - Vapores corrosivos.
 - Aceites.
 - Agentes externos como polvo, pelusa, entre otros.

- Fatiga por cambio de temperatura
 - Dilatación y contracción factores que afectan de gran manera las propiedades del aislante.
 - Funcionamiento a temperaturas extremas es también un factor de envejecimiento prematuro.

- Fatiga de origen ambiental
 - Contaminación ambiental.
 - Ambientes calurosos y húmedos permiten la aparición de moho que degradan el aislamiento de conductores.

2.2.2.1. Prueba de resistencia de aislamiento de los conductores

El principio de la medición presenta valores elevados, pero no infinitos, mediante la medición de la circulación de una pequeña corriente, el equipo indica el valor de la resistencia del aislamiento con resultados de valores en $K\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$ y en ocasiones hasta $T\Omega$, dependiendo del equipo.

El estándar de la IEEE 43-2000 sugiere el voltaje que debe aplicarse al dispositivo eléctrico de acuerdo a su tensión de operación nominal, con el objetivo de no dañarlo y obtener resultados precisos.

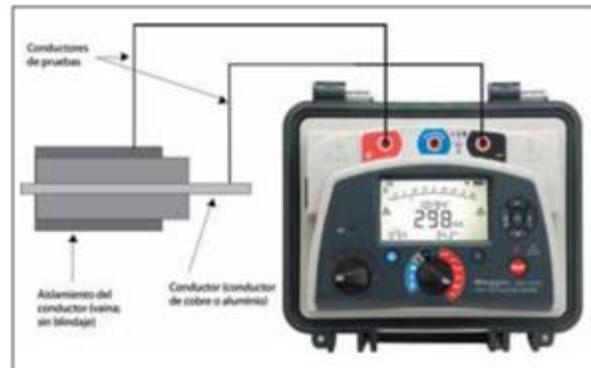
Tabla I. **IEEE 43-2000 Tensión de prueba**

Tensión de Servicio cable/equipo	Tensión continua de prueba
24 a 50 V	50 a 100 Vdc
50 a 100 V	100 a 250 Vdc
100 a 240 V	250 a 500 Vdc
440 a 550 V	500 a 1 000 Vdc
2 400 V	1 000 a 2 500 Vdc
4 100 V	1 000 a 5 000 Vdc
5 000 a 12 000 V	2 500 a 5 000 Vdc
> 12 000 V	5 000 a 10 000 Vdc

Fuente: elaboración propia, IEEE std 43-2000.

En la misma norma se explica que a valores menores de 1 000 V, un valor mínimo aceptable de resistencia para el aislamiento es de 1 MΩ por kV; la IEEE relaciona a las máquinas rotativas con un valor de resistencia de aislamiento mínimo de $(n+1)$ MΩ, siendo n el número de kV de la tensión de servicio.

Figura 6. **Equipo de medición de aislamiento**



Fuente: Instrumart . Equipo de Medición de Aislamiento. www.instrumart.com/assets/Megger-Insulation-Testing-Above-1kV-Brochure.pdf. Consulta: septiembre de 2019.

Para la explicación de la medición se considera únicamente la naturaleza de la corriente a través del aislamiento y el efecto del tiempo que se aplica la tensión. Esta corriente es la suma de tres corrientes.

La corriente de carga capacitiva corresponde a la carga de la capacidad del aislamiento probado. Esta corriente es transitoria, relativamente elevada al principio, y disminuye exponencialmente hacia un valor cercano a cero una vez el circuito probado está cargado eléctricamente. Después de unos segundos o de unas decenas de segundos, esta corriente resulta inapreciable comparada con la corriente que se mide.

La corriente de absorción corresponde a la aportación de energía necesaria para que las moléculas del aislante se reorienten bajo el efecto del campo eléctrico aplicado. Esta corriente decrece mucho más lentamente que la corriente de carga capacitiva y requiere más minutos para alcanzar un valor próximo a cero.

La corriente de fuga o corriente de conducción indica la calidad del aislamiento y es estable en el tiempo.

Uno de los factores importantes de la medición es la temperatura que hace variar el valor de la resistencia casi de forma exponencial.

2.2.2.1.1. Método de medida puntual o a corto plazo

Consiste en la aplicación del voltaje por la norma IEEE 43-2000 por un tiempo de 30 o 60 segundos y tomar el valor que se registró en el medidor. Este método es altamente influenciado por las condiciones del ambiente caluroso o húmedo y de la temperatura, por lo cual conviene realizar una normalización de las mediciones, así como un histórico de mediciones y compararlas para verificar si el valor se mantiene y darlo como válido.

2.2.2.1.2. Índice de polarización

Está basado en mediciones sobre la influencia del tiempo de aplicación de la tensión de ensayo. Se efectúan dos lecturas de 1 y de 10 minutos. Se determina una relación de la resistencia de aislamiento de la medición de 10 minutos sobre la de 1 minuto, a la cual se le denomina índice de polarización y permite definir la calidad del aislamiento.

$$PI = \frac{R_{10\text{minutos}}}{R_{1\text{minutos}}}$$

La recomendación de la norma IEEE 43-2000 define el valor mínimo del índice de polarización PI para máquinas rotativas AC y DC de clase de aislamiento B, F y H de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla II. **Índice de polarización según IEEE43-2000**

Índice de polarización	Condición del aislamiento
< 1	Pobre
1-2	Regular
2-4	Bueno
>4	Excelente

Fuente: elaboración propia, IEEE std 43-2000.

Este método de medición mediante lectura del índice de polarización es apropiado para circuitos aislantes sólidos. No se recomienda para transformadores sumergidos en aceite.

2.2.2.1.3. Relación de absorción dieléctrica (DAR)

En las instalaciones o equipos que contengan aislantes en los cuales la corriente de absorción disminuye rápidamente, la lectura de las resistencias de aislamiento a los 30 y 60 segundos puede ser suficiente para calificar el aislamiento. El DAR viene dado por la relación de los valores de resistencia de aislamiento a los 60 segundos sobre el valor de resistencia a los 30 segundos

$$DAR = \frac{R_{60segundos}}{R_{30segundos}}$$

Según la norma IEEE 43-2000, *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*, define los valores para la interpretación de los resultados de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla III. **Relación de absorción según IEEE 43-2000**

Valor del DAR	Condición del aislamiento
< 1,25	Insuficiente
< 1,6	Bueno
> 1,6	Excelente

Fuente: elaboración propia, IEEE std 43-2000.

Según la norma IEEE std 400.2 estable dos categorías para ensayos en campo para cables de energía con pantalla:

- Categoría de ensayos de tensión resistida (*withstand tests*): son aquellos denominados del tipo “pasa / no pasa” (*pass/fail – go/no go*), sin producir mayores conclusiones sobre el estado del aislamiento. Su principio de operación es que si durante la realización del ensayo los cables soportan una determinada sobretensión, entonces serán considerados como aceptables, sin tener en cuenta qué estado de deterioro interno poseen. Dentro de ellos están las pruebas de *Hi-Pot* o alta tensión.
- Categoría de ensayos predictivos o de evaluación de estado (*condition assessment testing*): a diferencia de la categoría anterior, están basados en determinar o medir las características de la aislación y en qué grado de deterioro se encuentra. En esta categoría destaca el ensayo de descargas parciales.

2.2.2.2. Pruebas de alta tensión *Hi-Pot*

La interconexión de todos los elementos de un sistema eléctrico requiere de conductores y de accesorios como terminales o empalmes para su instalación. Cada tipo de terminal requiere en su preparación el retirar la pantalla semiconductora del aislamiento. Este proceso puede dañar o contaminar el aislamiento del cable y provocar que falle en condiciones incluso normales de operación.

Existen dos tipos de pruebas en alta tensión que depende del tipo de corriente que se le inyecta al conductor, terminal o empalme, estas pruebas se realizan de acuerdo a la corriente aplicada y pueden ser:

- Pruebas de *Hi-Pot* con corriente continua.
- Pruebas de *Hi-Pot* de corriente alterna.

Estas últimas, a su vez, se dividen en pruebas de corriente alterna a frecuencia nominal y pruebas de corriente alterna a muy bajas frecuencia (VLF). La realización de cualquiera de estos ensayos requiere de la aplicación de una sobretensión que puede conducir a la ruptura del aislante (*breakdown*) durante el procedimiento de prueba. En los puntos de tensión en el aislamiento donde hay protuberancias, huecos o contaminantes puede ocurrir un fenómeno llamado arborización o arbolado, debido a su estructura ramificada de la cual existen dos tipos:

- Árbol de agua: producido por el electro oxidación alimentada por la tensión eléctrica y entrada de agua al aislamiento. Este tipo de árboles no emiten descargas parciales, pero pueden aumentar el campo eléctrico y crear

tensiones mecánicas locales. Si llegan a ser suficientemente altas, se puede iniciar un árbol eléctrico.

- **Árbol eléctrico:** son microcanales de carbonización o de falta de aislamiento que se encuentra en un material dañado irreversiblemente. Este arbolado eléctrico conducirá a una ruta de falla completa y a una falla de aislamiento prematuro.

Durante muchos años se ha utilizado la prueba en dc para probar el cable con aislamiento de papel aislado de plomo (PILC), pero al término de una edad considerable de unos 15 y 20 años después de su instalación, el aislamiento empezó a fallar. Luego de extensos estudios y pruebas se determinó que el cable dieléctrico sólido es propenso a desarrollar árboles de agua que al momento de hacer pruebas de dc a altas tensiones crean cargas espaciales negativas (*negative space charges*) dentro de estos árboles. Luego de retirar el equipo que realizaba las pruebas, estos espacios cargados de forma negativa quedaban atrapados dentro de estos espacios. Al aplicarse su tensión en corriente alterna nominal creaba una gran diferencia de potencial en estos espacios, que quedaban propensos a convertirse en arboles eléctricos que, tal como se explicó, es un daño irreversible.

La diferencia de las pruebas que se realizan a prueba nominal con las pruebas a muy baja frecuencia radica en la cantidad de corriente que maneja cada una, haciendo las pruebas VLF más seguras de acuerdo a su bajo valor de corriente. El principio radica en la reactancia capacitiva del conductor. Tomemos como ejemplo un conductor de 3 000 metros de longitud a un voltaje de 15 kV y que tiene una capacitancia de 1 μ f:

$$X_{C60hz} = \frac{1}{2 * \pi * f * C} = \frac{1}{2 * \pi * 60 * (1 * 10^{-6})} = 2\,650 \, \Omega$$

De acuerdo a la ley de ohm y aplicando el voltaje de prueba recomendado según la norma IEEE 400-2004 obtenemos la corriente de la siguiente forma:

$$I = \frac{V}{X_{C60hz}} = \frac{22\,000}{2\,650} = 8,3 \, A$$

El equipo de corriente alterna para realizar esta prueba tiene que tener una capacidad de 183 kVA, algo que es muy complicado de transportar.

Si utilizamos en cambio una corriente alterna, pero a una frecuencia de 0,1Hz obtenemos los siguientes resultados:

$$X_{C0.1hz} = \frac{1}{2 * \pi * f * C} = \frac{1}{2 * \pi * 0,1 * (1 * 10^{-6})} = 1,6 \, M\Omega$$

Aplicando el voltaje de prueba encontramos la corriente:

$$I = \frac{V}{X_{C60hz}} = \frac{22,000}{1,6 * 10^6} = 14 \, mA$$

En este caso, el equipo a utilizar requiere una capacidad de 0,302 kVA, lo que representa un equipo menor en tamaño y en corriente pudiendo llegar a tener una capacidad para prueba de conductores más alto que la prueba a frecuencia nominal.

Según la norma IEEE 400.2-2013, los voltajes de aceptación son de 2,5 - 3 veces el voltaje de línea a tierra del sistema. Las pruebas de VLF deben

durar entre 15 y 60 minutos con una duración mínima recomendada de 30 minutos para instalación y aceptación y 15 minutos para mantenimiento.

$$V_{pk} = 3 U_0$$

U_0 es el voltaje de fase a tierra del conductor a prueba.

El estándar de la IEEE 400.2-2013 sugiere el voltaje que debe aplicarse al dispositivo eléctrico de acuerdo a su tensión de operación nominal, con el objetivo de no dañarlo y obtener resultados precisos.

Figura 7. **Tensiones de prueba IEEE 400.2-2013**

Cable System Rating (Phase to Phase) [kV]	Installation (Phase to Ground)		Acceptance (Phase to Ground)		Maintenance ² (Phase to Ground)	
	[kV rms]	[kV peak]	[kV rms]	[kV peak]	[kV rms]	[kV peak]
5	9	13	10	14	7	10
8	11	16	13	18	10	14
15	19	27	21	30	16	22
20	24 ³	34 ³	26	37	20	28
25	29 ³	41 ³	32	45	24 ³	34 ³
28	32	45	36 ³	51 ³	27	38
30	34	48	38	54	29 ³	41 ³
35	39	55	44	62	33	47
46	51	72	57	81	43	61
69	75	106	84	119	63	89

- Note 1: If the operating voltage is a voltage less than rated voltage, it is recommended that the **maintenance** test voltages should be those corresponding to the operating voltage class.
- Note 2: The maintenance voltage is about 75% of the acceptance test voltage magnitude.
- Note 3: Some existing test sets have a maximum voltage that is up to 5% below the values listed in the Table. These test sets are acceptable to be used. However, there is a risk that the cable may be "undertested" due to a combination of lower test voltage and allowed uncertainty of the measuring circuit.

Fuente: IEEE std 400.2-2013.

Las pruebas de Hi-Pot tienen una aplicación muy amplia en los mantenimientos programados brindan mucha información sobre la condición del aislamiento y llevando una base de datos se puede determinar en que momento el conductor o equipo puede fallar, lo importante de esta información es estar preparado y comprar los suministros con anticipación y evitar caer en precios sobrevalorados debido a la condición de emergencia, no es lo mismo realizar trabajos programados donde se realiza una consulta con todos los departamentos involucrados hasta llegar a un consenso de fecha y hora para realizarlo sin afectar la producción, a realizar un mantenimiento por la falla de un componente eléctrico.

Figura 8. **Prueba de *Hi-Pot* a terminal mufa 69 kV**



Fuente: Sector de Electricidad. *Pruebas de Potencial.*

www.sectorelectricidad.com/16887/pruebas-de-potencial-aplicado-vlf-voltaje-a-baja-frecuencia/.

Consulta: octubre de 2019.

Como se mencionó, esta es una prueba de pasa/ no pasa, lo que representa que se lleva al conductor a un voltaje de ruptura por 30 minutos. Si en un caso el conductor no soporta la aplicación de $3 U_0$, es un cable que de todas formas fallará (hoy, mañana o alguna vez) y, por lo tanto, se obtiene la ventaja que la falla es forzada a exponerse ahora, y no en de forma imprevista cuando esté en operación normal.

2.2.2.3. Pruebas de descargas parciales

La producción de descargas parciales es originada por cavidades con gas de baja rigidez dieléctrica que, al energizar el material y, como consecuencia de la diferencia de potencial, el esfuerzo pueda alcanzar el valor disruptivo del gas. Se presenta una descarga a través de las paredes opuestas y en dirección del campo eléctrico, originando así una descarga parcial ya que no puentea completamente los electrodos. Aunque su magnitud y energía son pequeñas, ocasionan deterioro progresivo y puede llevar a la falta total del material a largo plazo.

Este tipo de pruebas son de monitoreo o de predicción del envejecimiento del aislamiento. Una descarga parcial es una descarga eléctrica en el aislamiento entre el conductor y la pantalla se debe a cavidades que resultan de un proceso defectuoso de fabricación, así como contaminación o al proceso de envejecimiento térmico o por esfuerzos mecánicos mayores a los que fue construido.

Tabla IV. **Valores de voltaje para pruebas de descargas parciales**

Rated Circuit Voltage Phase-to-Phase Volts	Minimum Partial Discharge Extinction Level, kV	
	100% Insulation Level	133% Insulation Level
2001-5000	4	5
5001-8000	6	8
8001-15000	11	15

Fuente: ANSI Neta/2017.

2.2.3. **Termografía a conductores eléctricos**

La termografía es un método de adquisición de datos que utiliza cámaras infrarrojas para la toma de imágenes sin contacto con los equipos que se encuentran en operación. Brinda información de suma utilidad para conocer el estado de los conductores.

La termografía permite inspeccionar térmicamente equipos eléctricos sin necesidad de interactuar físicamente con ellos. Es utilizada para los análisis predictivos y preventivos de las instalaciones industriales. Es una herramienta muy importante para la detección de puntos calientes en componentes tanto mecánicos como eléctricos, y permite evaluar dichos componentes a distancias seguras.

El principio de funcionamiento se basa en la transferencia de calor y la física de radiación infrarroja, que es una radiación electromagnética con longitudes de onda mayores que la luz visible y menores que las microondas. Por lo tanto, este calor radiado no puede ser visto por el ojo humano, pero puede ser sentido en la

piel. Todos los cuerpos emiten radiación infrarroja y la intensidad de esta dependerá de la temperatura y de la emisividad, que es una de las propiedades de la superficie de los cuerpos que se encuentra en análisis. Esta propiedad es diferente para cada cuerpo, para lo cual la misma cámara viene con una corrección automática respecto a esta diversidad de valores de emisividad.

Para el análisis de los resultados se utiliza un parámetro llamado Delta T o (T) que representa la severidad de sobrecalentamiento de un conductor eléctrico. La tabla 100.18 de la ANSI/NETA MTS 2011 presenta una tabla que se descompone en 3 categorías de severidad indicando prioridades de reparaciones: mientras más alto es el aumento de un conductor a temperatura ambiente más grande será el potencial de posible falla.

Tabla V. **Valores de referencia para cambios de temperatura**

**Thermographic Survey
Suggested Actions Based on Temperature Rise**

Temperature difference (ΔT) based on comparisons between similar components under similar loading.	Temperature difference (ΔT) based upon comparisons between component and ambient air temperatures.	Recommended Action
1°C - 3°C	1°C - 10°C	Possible deficiency; warrants investigation
4°C - 15°C	11°C - 20°C	Indicates probable deficiency; repair as time permits
-----	21°C - 40°C	Monitor until corrective measures can be accomplished
>15°C	>40°C	Major discrepancy; repair immediately

Fuente: ANSI/NETA ATS-2011.

2.2.4. Termografía en interruptores de baja tensión

Para el análisis de los resultados de las termografías de los interruptores de baja tensión nos apoyamos de la siguiente tabla que encontramos en el documento de la ANSI/NETA ATS 2011.

Tabla VI. Estandares de referencia para temperatura

TABLE 8.13

ANSI/IEEE/NEMA Temperature Standards References

NEMA	AB-1	Molded case circuit breakers
ANSI/IEEE	C37.04-2006	Rating structure for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis
ANSI/IEEE	C37.010-2005	Application guide for AC high-voltage circuit breakers rated on a symmetrical current basis
ANSI/IEEE	C37.13-1995	Standard for low-voltage AC power circuit breakers used in enclosures
ANSI/IEEE	C37.14-2002	Standard for low-voltage AC power circuit breakers used in enclosures
ANSI/IEEE	C37.20.1-2006	Standard for metal-enclosed low-voltage power circuit breaker switchgear
ANSI/IEEE	C37.20.2-2005	Standard for metal-clad and station-type cubicle switchgear
ANSI/IEEE	Standard C37.16-2000	Low-voltage power circuit breakers and AC power circuit protectors preferred ratings, related requirements, and application recommendation
ANSI/IEEE	C37.20.3-2001	Standard for metal-enclosed interrupter switchgear
ANSI/IEEE	C37.23-2003	Guide for metal-enclosed bus and calculating losses in isolated-phase bus
ANSI/IEEE	C37.30-1997	Definitions and requirements for high-voltage air switches, insulators, and bus supports
ANSI/IEEE	C37.40-2003	Service conditions and definitions for high-voltage fuses, distribution enclosed single-pole air switches, fuse disconnecting switches, and accessories
ANSI/IEEE	Standard 242-2001	IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems
ANSI/IEEE	Standard 141-1993	IEEE recommended practice for electrical power distribution system for industrial plants (Red Book)
ANSI/IEEE	Standard 241-1997	IEEE recommended practice for electrical power distribution system for commercial buildings (Gray Book)

the temperatures need to be adjusted or corrected for ambient temperature and load deviations from the stated assumptions. Several of the reference standards listed in Table 8.13 include a formula for making these corrections. This formula using simplified symbols and terminology can be written as follows:

$$T_{tc} = (T_{rt} - T_{ra})(I_m/I_r)^n + T_{ma}$$

where

T_{tc} is the total allowable temperature, corrected for measured load and ambient temperature

T_{rt} is the total rated temperature

T_{ra} is the rated ambient temperature

I_m is the measured current (A)

I_r is the rated current (A)

Fuente: PAUL, Gil. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. p.491.

El valor obtenido debe ser ajustado o corregido a la temperatura ambiente y la diferencia en porcentaje de carga al momento de la toma de la termografía. Para realizar esta corrección se utiliza la siguiente fórmula:

$$T_{tc} = (T_{rt} - T_{ra}) * \left(\frac{I_m}{I_t}\right)^n + T_{ma}$$

T_{tc} = temperatura corregida para carga y temperatura ambiente

T_{rt} = temperatura al valor de la tabla

T_{ra} = temperatura ambiente de la tabla

I_m = la corriente medida en (A)

I_t = Capacidad de corriente nominal

n = exponente, promedio de 1,8 (varía entre 1,6 y 2,0)

T_{ma} = medida de la temperatura ambiente

Tabla VII. **Valores de temperatura para interruptores de baja tensión**

Equipment	Component	Rated Temperatures (°C)		
		Ambient, T_{ra}	Rise	Total, T_{rt}
Low-voltage circuit breaker	Terminal connection to bus (or cable)	40	55	95

Source: From ANSI/IEEE C37.13-1995, Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.

Fuente: PAUL, Gil. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. p.492.

Luego de determinar el valor de la temperatura a la que se encuentran las conexiones del interruptor, tanto los cables que entran como los cables que salen,

y con el interruptor des energizado se puede revisar el torque de apriete al que se encuentran los bornes del interruptor.

Tabla VIII. **Valores de torque para tornillos en conexiones eléctricas**

TABLE 100.12.1
Bolt-Torque Values for Electrical Connections
US Standard Fasteners ^a
Heat-Treated Steel – Cadmium or Zinc Plated ^b

Grade	SAE 1&2	SAE 5	SAE 7	SAE 8
Head Marking				
Minimum Tensile (Strength) (lb/in ²)	64K	105K	133K	150K
Bolt Diameter (Inches)	Torque (Pound-Feet)			
1/4	4	6	8	8
5/16	7	11	15	18
3/8	12	20	27	30
7/16	19	32	44	48
1/2	30	48	68	74
9/16	42	70	96	105
5/8	59	96	135	145
3/4	96	160	225	235
7/8	150	240	350	380
1.0	225	370	530	570

a. Consult manufacturer for equipment supplied with metric fasteners.

b. Table is based on national coarse thread pitch.

Fuente: ANSI/NETA ATS-2011.

En el anexo se comparten las tablas para tornillos fabricados en otros materiales diferentes del metal tratado al calor de cadmio y zinc plateado.

2.2.5. Calibres de conductores

Por calibre de conductores se entiende al tamaño y capacidad de corriente que los conductores pueden transportar según el material de elaboración, tanto cobre como aluminio.

El sistema más popular de calibre de conductores está designado por la American Wire Gauge (AWG, por sus siglas en inglés), el cual propone una numeración descendiente con respecto a su número. Mientras más grande es, menor capacidad de corriente, y mientras menor sea su número, mayor capacidad de corriente tendrá el conductor. Los valores de ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones nominales de 0 a 2 000 voltios y 60 °C a 90 °C (140 ° F a 194 ° F) lo encontramos en la tabla 310-16 del Código eléctrico nacional de los Estados Unidos.

Tabla IX. **Calibre de conductor para el sistema de puesta a tierra**

Calibre del mayor conductor no puesto a tierra de entrada de la acometida, o área equivalente para conductores en paralelo ^a (AWG/kcmil)		Calibre del conductor del electrodo de puesta a tierra (AWG/kcmil)	
Cobre	Aluminio o aluminio recubierto de cobre ^b	Cobre	Aluminio o aluminio recubierto de cobre ^b
2 o menor	1/0 o menor	8	6
1 ó 1/0	2/0 ó 3/0	6	4
2/0 ó 3/0	4/0 ó 250	4	2
Más de 3/0 hasta 350	Más de 250 hasta 500	2	1/0
Más de 350 hasta 600	Más de 500 hasta 900	1/0	3/0
Más de 600 hasta 1,100	Más de 900 hasta 1,750	2/0	4/0
Más de 1,100	Más de 1,750	3/0	250

Fuente: NFPA 70. National Electric Code (NEC) 2017. p.181.

2.2.6. Centro de carga

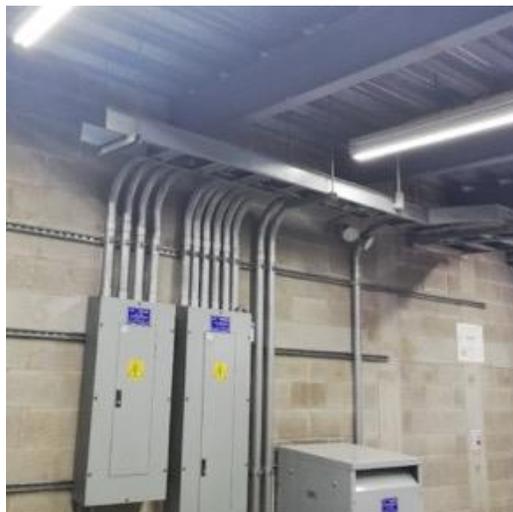
En los centros de carga es donde se tiene el control de seccionamiento de las instalaciones eléctricas por medio de los interruptores que aloja, activan y desactivan el circuito que protege.

Para el cálculo de los centros de cargas se debe tener en cuenta la cantidad de interruptores que demandarán energía de este centro de carga y utilizar un factor de crecimiento del 25 % y encontrar el tablero con el número de polos comercial.

$$\text{No. de polos} = \text{total polos} * 1,25$$

Para la selección de las barras se utiliza la corriente de diseño calculada para la demanda máxima estimada.

Figura 9. Centro de carga



Fuente: elaboración propia.

2.2.7. Canalización

La canalización eléctrica tiene el objetivo de proteger los conductores de cualquier daño, ya sea mecánico, químico, ambiental o derivado de la acción de agentes del medio como la corrosión, y limita el desgaste natural de los conductores.

Otra función de la canalización eléctrica es contribuir a la organización y ordenamiento de los conductores en instalaciones muy complejas. La canalización puede instalarse ya sea de forma aérea o subterránea, para lo cual se debe seleccionar el material y canalización adecuada. Estas pueden ser metálicas, fabricadas de materiales como aluminio, hierro o acero y las canalizaciones no metálicas fabricadas con material PVCE policloruro de vinilo eléctrico, diferente al utilizado para circulación de agua.

El código eléctrico nacional de los Estados Unidos también proporciona un porcentaje de la sección transversal en tubería con el llenado de conductores según la tabla 1 del capítulo 9.

Tabla X. **Porcentaje de uso de la sección transversal en conduit**

Número de conductores	Todos los tipos de conductores
1	53
2	31
Más de 2	40

Fuente: elaboración propia, NEC 2014

2.2.7.1. Canalizaciones de PVCE

Es un tipo de material termoplástico que tiene su principal aplicación en zonas con un ambiente húmedo altamente corrosivo. Puede ser instalado tanto subterráneo como aéreo. Dentro las canalizaciones hechas a base de PVC se encuentran los tubos flexibles, que son resistentes y su índice de hermeticidad es alto; son bien manejables, fáciles de hacer curvas sin necesidad de ningún accesorio o herramienta dobladora. Son bastante livianos y cuentan con una superficie corrugada. El interior es liso, que es una ventaja a la hora de introducir el cable.

Figura 10. Tubería PVC eléctrico



Fuente: Durman. *Conduit PVC*. www.durman.com.co/soluciones. Consulta: septiembre de 2019.

2.2.7.2. Canalizaciones metálicas EMT

Eléctric Metallic Tubing, por sus siglas en inglés EMT, son tubos eléctricos metálicos muy utilizados en la industria o residenciales. Es un grado menor que las canalizaciones metálicas del tipo conduit, por lo cual son más económicos.

Se caracterizan por ser fácilmente moldeables y son prácticos para adaptarlos a diferentes trayectorias del cableado dentro de la distribución de las

instalaciones eléctricas. Generalmente son sometidos a la galvanización para aumentar su duración y resistencia a la corrosión.

Los tubos EMT se encuentran en tamaños desde ½ " hasta 4 " de diámetro, su principal aplicación es en instalaciones de superficie visibles, ya que son capaces de soportar daños mecánicos más fuertes que los materiales plásticos.

Figura 11. **Tubería EMT pared delgada**



Fuente:Downlight. *Tubería EMT*. www.web.downlight.cl/prueba/producto/tuberia-conduit-metalica-emt-liviana-12/. Consulta: septiembre de 2019.

2.2.7.3. Tubo conduit

También llamados HG o hierro galvanizado, este tipo de tubería es más robusta y pensada para resistir daños mecánicos de media a alta intensidad. Debido a que son más resistentes los hace menos flexibles que los tubos EMT. Traen en los extremos conectores genéricos de tipo roscado llamados coplas o niples. Existen herramientas para hacer roscado en esta tubería y así ajustar el tamaño del tubo a la necesidad requerida.

La tubería conduit tiene un tratamiento de galvanizado por inmersión en caliente que permite su galvanizado tanto exterior como interior. Se diferencia de los tubos EMT por el grosor de sus paredes siendo el tubo conduit más grueso.

Esta propiedad de galvanizado es la que se aprovecha para utilizar este tipo de tubo en instalaciones subterráneas, donde quedará en un ambiente altamente corrosivo por los minerales que se encuentran en la tierra. La tubería conduit se puede encontrar en tamaños desde ½ " hasta 6 " de diámetro.

Figura 12. **Tubería HG conduit**



Fuente: Electroma. *Tubo Conduit*. www.electroma.com/products/tubo-conduit-galvanizado-2-1-2-rosca-y-copla. Consulta: septiembre de 2019.

2.2.7.4. Bandejas porta cables

Las bandejas se utilizan para aprovechar la capacidad de corriente de los conductores al aire, que es mayor que cuando se encuentran encerrados en canalizaciones. Las bandejas pueden ser del tipo canaleta con tapadera o sin tapadera, perforadas y tipo escalera. Esta última es la más popular por su precio en el mercado comparado con las anteriores y por su alta capacidad de soportar más cableado.

2.2.7.5. Canaletas

Las canaletas son un tipo de canalización donde se concentran una gran cantidad de cables que llevarán una trayectoria similar que la hace muy práctica para instalaciones eléctricas más complejas. Se aprovecha de mejor forma la

capacidad de corriente de cada conductor eléctrico y tiene como medio de aislamiento el aire.

Las canaletas pueden ser fabricadas de diferentes tamaños, así como de diferentes aleaciones de metal. Las canaletas de acero inoxidable son las más robustas, de mayor costo, pero es la ideal para ser instalada en donde el ambiente es altamente corrosivo y donde una canaleta galvanizada se deteriora más rápidamente.

Figura 13. **Canaleta tipo escalera**



Fuente: elaboración propia.

2.2.8. Protecciones eléctricas

El sistema de protecciones de una instalación eléctrica debe garantizar un correcto desempeño económico y funcional, así como minimizar los problemas causados por las condiciones anómalas de operación o malfuncionamiento.

Las protecciones deben garantizar la seguridad de las personas y de las instalaciones en todo momento, aislar rápidamente la zona donde ha ocurrido el problema y no cortar inútilmente el suministro a zonas no afectadas. Además, deben garantizar la continuidad del servicio y proveer al usuario y al sistema la información necesaria para restablecer el servicio en el menor tiempo posible.

2.2.8.1. Interruptor termo magnético

El interruptor termo magnético posee la habilidad de proteger las instalaciones eléctricas contra sobrecarga, la cual tiene un efecto de elevación de temperatura que es detectado por una pieza bimetálica que se expande y llevará al interruptor a la desconexión automática. El interruptor también protege contra cortocircuito, para lo cual posee un elemento magnético que al detectar una elevación de corriente en un corto tiempo activa una bobina que propicia al disparo. Además, secciona el circuito que está protegiendo para que no se propague a los demás circuitos que se encuentran dentro del mismo tablero eléctrico.

Según la norma IEEE 1015-2006 existen dos clasificaciones para los interruptores de baja tensión:

- MCCB: Interruptores de caja moldeada (*Molded-Case Circuit Breaker*).
- ICCB: Interruptores aislados (*Insulated-Case Circuit Breaker*).
- LVPCB: interruptores de potencia de baja tensión (*Low-Voltage Power Circuit Breaker*).

Cada uno de estos interruptores tiene diferente diseño y características y, en algunos casos, tienen diferentes requerimientos para aplicaciones especiales.

MCCB o interruptores de caja moldeada son fabricados bajo las normas UL 489-2002. Sus partes que están en contacto directamente con la corriente y mecanismos de disparo están dentro de una caja de material del tipo aislante. La tapa y base de pequeños MCCB están diseñados para no ser abiertos para propósitos de mantenimiento, mientras que interruptores con capacidad de corriente más grandes vienen con termo magnético o dispositivos de disparo electrónicos ajustables.

Figura 14. **Interruptor de caja moldeada (MCCB)**



Fuente: elaboración propia. *cuarto eléctrico del Minex.*

ICCB también son construidos bajo el estándar UL 489-2002 y al igual que los MCCB, todas sus partes vienen en una caja con material aislante. La diferencia es que estos pueden ser abiertos para inspección de contactos y para mantenimiento limitado. Algunos fabricantes ofrecen repuestos para estos interruptores y vienen equipados con dispositivos electrónicos para disparos ajustables como fabricación estándar.

LVPCB son fabricados y cumplen con las siguientes pruebas.

- ANSI C37.16-2000.
- ANSI C37.17-1997.
- ANSI C37.50-1989 (R2000).
- UL 1558-1999.

Este tipo de interruptores se caracterizan generalmente por tener tamaños más grandes construcción tipo drawout y el tiempo más corto de apertura de los circuitos de baja tensión. Su construcción permite la inspección y mantenimiento de las partes mecánicas y el fabricante ofrece repuestos en caso de ser necesario. Los LVPCB también tienen termomagnéticos electrónicos ajustables.

Figura 15. **Interruptor de potencia de baja tensión (LVPCB)**

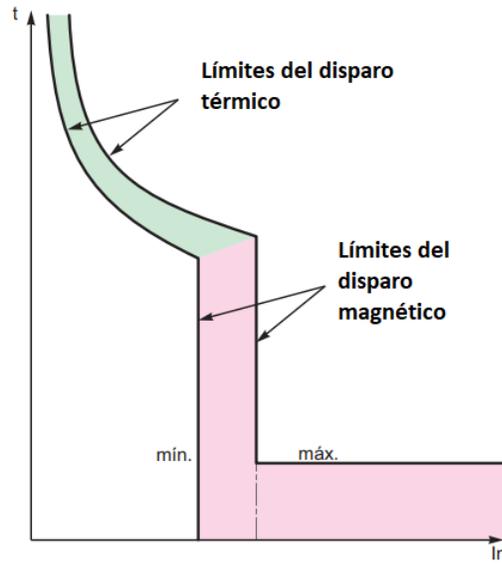


Fuente: Akorm.LVPCB. www.akorm.com/industrial/hhi/uas1.htm. Consulta: septiembre de 2019.

2.2.8.1.1. Curvas de disparo

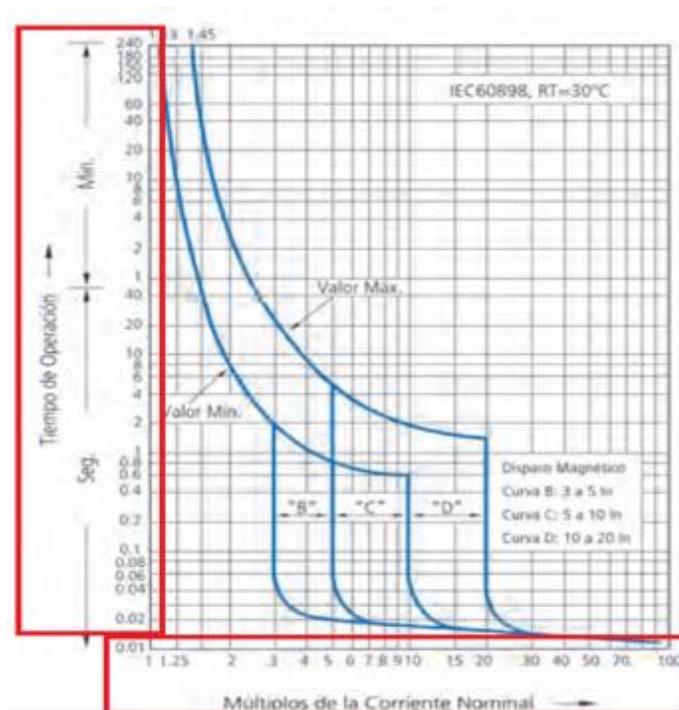
Las curvas de disparo vienen dibujadas en hojas de papel logarítmico con el eje vertical que representa tiempo y el eje horizontal la corriente y el valor en el que se intercepta. Nos da la combinación tiempo-corriente que provocan la actuación o corte del interruptor. Estas curvas tienen dos partes que corresponden a los dos mecanismos internos de disparo de un interruptor: la parte térmica, cuando actúa el bimetálico por sobrecarga, y la parte magnética, por corto circuito.

Figura 16. Partes de la curva de disparo



Fuente: *Schneider Electric. Curva de Disparo. p.1.* Consulta: septiembre de 2019.

Figura 17. **Curvas de disparo de interruptores**



Fuente: Profetolocka. *Curvas de Disparo*. www.profetolocka.com.ar/2019/04/18/entendiendo-las-curvas-de-disparo-de-los-interruptores-automaticos/. Consulta: septiembre de 2019.

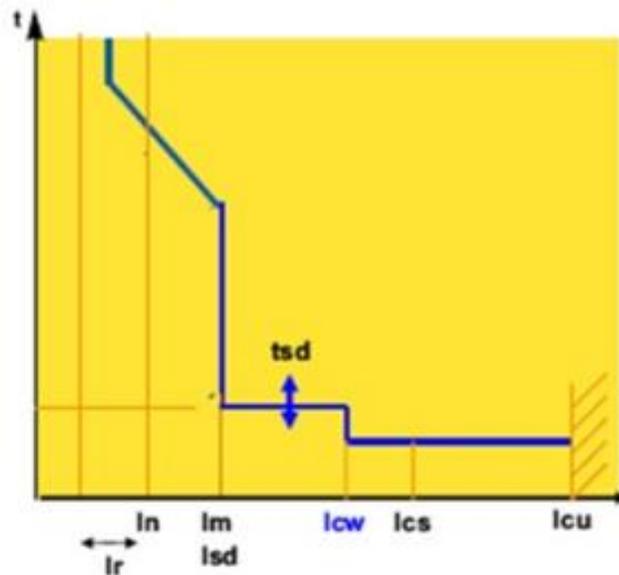
Las curvas B se utilizan para interruptores de aplicaciones generales. Las curvas C se utilizan para interruptores que protegerán motores y las curvas D se utilizan para interruptores que protegen motores de gran tamaño.

2.2.8.1.2. Interruptores automáticos (IA)

Según la norma IEC 60947-2 determina dos categorías de interruptores en voltajes hasta 1 500 V según su modo de empleo:

- En la categoría A están los interruptores que no están previstos para forzar su capacidad de corto circuito.
- En la categoría B son los interruptores previstos para optimizar la selectividad de corto circuito ya que permiten un retardo del disparo a cierto valor de corriente de cortocircuito.

Figura 18. **Curva de disparo interruptores automáticos (IA)**



Fuente: Slideplayer.*Curva de Disparo*.slideplayer.es/slide/10203782/. Consulta: septiembre de 2019.

Donde:

- I_n = corriente nominal: corriente máxima en Amperes que puede conducir a temperatura ambiente sin calentamiento anormal.

- I_r = Corriente de regulación: corriente regulada a partir de la cual se verifica la protección contra sobrecargas viene dada en amperes y es función de I_n .
- I_m (I_{sd}) = corriente de operación magnética o de corto retardo: corriente a partir de la cual se asegura la apertura instantánea (mseg) del interruptor. Esta dada en unidades de Amperes o en múltiplos de I_n o I_r .
- I_{cu} = corriente de corte último: máxima corriente de cortocircuito que el interruptor puede cortar dos veces consecutivas.
- I_{cs} = corriente de poder de corte en servicio: porcentaje de valor de corriente último. En interruptores robustos son del 100 % y es el valor que puede cortar hasta 3 veces consecutivas.
- I_{cw} = corriente asignada de corta duración admisible: es la máxima corriente de corto circuito que un interruptor puede soportar durante una corta duración sin alterar sus características. El tiempo de retardo normalizado es de 0,5 – 0,1 -0,25 – 1 seg.

2.3. Diagramas unifilares

Los diagramas unifilares son de suma importancia para cualquier instalación eléctrica. Sirven de guía para conocer todos los circuitos del sistema que lo componen. Se utilizan para referencia y saber si es posible un aumento de carga o si es necesario realizar instalaciones nuevas. Debido a esto último es muy importante mantenerlos actualizados para tener la información con los últimos cambios realizados.

2.4. Normas utilizadas en los diagramas unifilares

Con el crecimiento de nuevas tecnologías e intercambio de equipos de un continente hacia otro ha sido necesario normalizar los símbolos eléctricos que se utilizan en los diagramas unifilares, con el objetivo de que una persona de cualquier parte del mundo pueda leer los diagramas unifilares sin importar su lugar de fabricación.

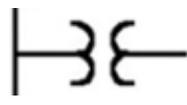
Dos entidades internacionales fueron las encargadas de crear esta normalización: *The National Electrical Manufacturers Association* (NEMA por sus siglas en inglés) o Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, con sus normas que rigen en los Estados Unidos, y la *International Electrotechnical Commission* (IEC por sus siglas en inglés) o Comisión Internacional Electrotécnica y su sistema internacional.

2.4.1. NEMA ICS 19-2002 (R2007)

Los símbolos que contiene este estándar son utilizados en los Estados Unidos y en algunos países de latinoamerica, en el caso de Guatemala se utilizan las dos simbologías tanto Nema como IEC.

Estos son algunos de los símbolos utilizados en los diagramas unifilares y que están normalizados por la norma NEMA ICS 19-2002.

Figura 19. **Simbología NEMA**

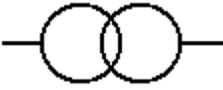
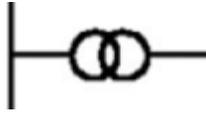
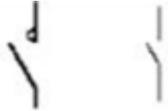
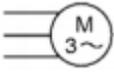
Transformador	Transformador de Potencial
	
Motor	Seccionadores
	
Tierra	Contacto de Apertura
	

Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

2.4.2. IEC 60617

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) es mas utilizada en los países europeos, cuando se realiza la compra de equipos que están fabricados en estos países y se instalan en países donde el estándar es nema se crea la necesidad de tener una referencia para pasar de un sistema a otro. La IEC 60617 establece una gran cantidad de símbolos gráficos para su aplicación en diagramas electrotécnicos.

Figura 20. **Simbología IEC**

Transformador	Transformador de potencial
	
Fusible	Contacto de Cierre
	
Motor de Inducción	Seccionadores
	
Tierra Física	Contacto de apertura
	

Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

2.5. Equipos de medición de calidad de energía

Existe una gran cantidad de equipos de medición para la calidad de energía, pero su calidad dependerá de su buen uso, mantenimiento y, sobre todo, de la calibración anual por parte de un ente que respalde su calibración.

Para nuestro estudio de calidad de energía se utilizó el equipo de calidad de energía marca Fluke 430 *Series II* y para el procesamiento de la información, el software desarrollado por Fluke, llamado *Power log* versión 5,6.

2.5.1. Analizador de calidad de energía Fluke 430 *Series II*

El analizador marca Fluke es un medidor de clase A en cumplimiento con la norma IEC 61000-4-30 que es utilizada para la selección de los instrumentos de medición de calidad de energía, la cual define los métodos de medición para cada parámetro, con el fin de obtener resultados confiables.

Figura 21. Fluke 430 *Series II*



Fuente: Fluke. *Fluke 430*. solutions.fluke.com/m2en/fluke-430. Consulta mayo de 2019.

2.5.2. Programa Power Log 5,6

Programa para plataforma Windows que permite el procesamiento de los datos obtenidos en las mediciones y, de esta forma, visualizar de forma gráfica todos los valores de los parámetros eléctricos registrados para su respectiva comparación con la norma adoptada y así proporcionar un resultado de las mismas.

2.6. Sistema de puesta a tierra

El sistema de puesta a tierra es la base de las protecciones eléctricas. Todos los sistemas eléctricos deben contar con una puesta a tierra que proporcione una trayectoria segura a las corrientes de falla que se producen en los equipos para proteger a las personas y a las instalaciones.

Un sistema de puesta a tierra está compuesto por los siguientes elementos:

- **Electrodos:** son varillas de acero recubiertas de cobre que van enterrados directamente en el suelo y son los encargados de disipar las corrientes de falla hacia el planeta.
- **Conductores de tierra física:** es el elemento que transporta la corriente desde su origen hasta el electrodo para su respectiva disipación.
- **Barras de unión:** son barras de cobre de diferentes tamaños que se encargan de unir varios conductores de puesta a tierra para luego ser direccionados por medio del conductor entre la barra y el electrodo.

Para el diseño de un sistema de puesta a tierra se debe tomar en cuenta diversos factores. El principal es la medición del terreno en donde se instalará la tierra física; de esta forma se puede tomar las directrices correctas y utilizar la cantidad correcta de varillas por enterrar. Se podrá utilizar un mejorador de terreno en caso sea necesario, para garantizar un valor de resistencia lo más bajo posible.

2.6.1. Resistividad eléctrica de los suelos

La resistividad del terreno se define como la resistencia eléctrica que este presenta ante la circulación de una corriente eléctrica. Para representarla se utiliza la unidad de Ω -m la cual hace referencia a la medida de la resistencia entre las caras opuestas de un metro cúbico de suelo.

El valor de resistencia de cualquier sistema de tierra o electrodo puede ser calculado usando la siguiente fórmula:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Donde:

ρ = Resistividad del terreno en Ω -m

L = Longitud de la trayectoria del conductor en m

A = Área transversal del trayecto m^2

Como parte del diseño del sistema de puesta a tierra es importante medir la resistividad del terreno. Esta puede variar en diferentes medios del terreno.

En general, la resistencia total que presenta un sistema de puesta a tierra está definido por la suma de la resistencia del conductor, tanto la línea de tierra como la línea de enlace con el electrodo que conecta el electrodo de tierra con el sistema o equipo que debe ponerse a tierra, la resistencia de contacto entre la superficie del electrodo y el terreno y, por último, la resistencia del suelo en el que está enterrado el electrodo.

2.6.2. Medición de la resistividad del suelo

El valor de la resistencia del sistema de tierra física dependerá del valor de la resistividad del terreno. Existen varios métodos para medir la resistividad del terreno. Entre ellos están:

- Método de Wenner
- Método de Schlumberger o método simétrico

El valor de la resistividad del terreno dependerá de los diferentes estratos o capas que componen el terreo y su espesor. Para la medición del terreno se utiliza el mismo equipo para cualquiera de los dos métodos que consiste en:

- Equipo marca Fluke *Earth Ground* 1625 con cuatro bornes
- Cuatro picas que se utilizan como electrodos
- Cuatro cables aislados

El espesor de la capa de terreno sobre el cual se realiza las mediciones de la resistividad dependerá de la distancia de separación entre los electrodos, y no del tamaño y material de los electrodos, pero sí dependen del contacto que los electrodos hagan con la tierra.

2.6.2.1. Método de Wenner

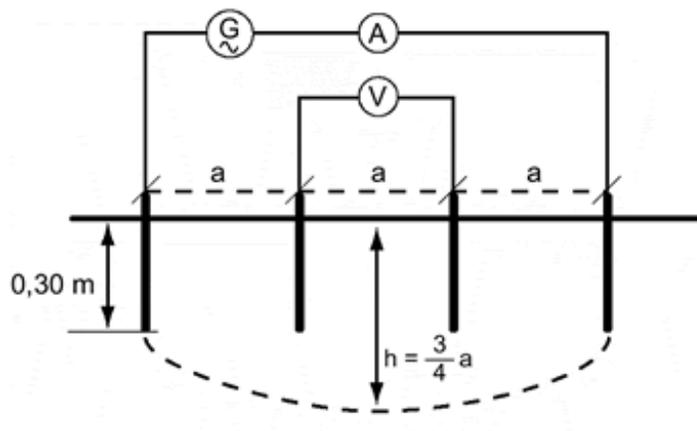
Este procedimiento fue descrito por el Dr. Frank Wenner del Buró Normas de los Estados Unidos, en 1915. Este método se basa en la inyección de una corriente directa y de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos que se colocan en los extremos, mientras que medimos el potencial que aparece

entre los dos electrodos que se incrustan en el centro del terreno a medir. Por medio de la ley de ohm se conoce que:

$$R = \frac{V}{I}$$

Esta formula es conocida como resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

Figura 22. **Esquema del método de Wenner**

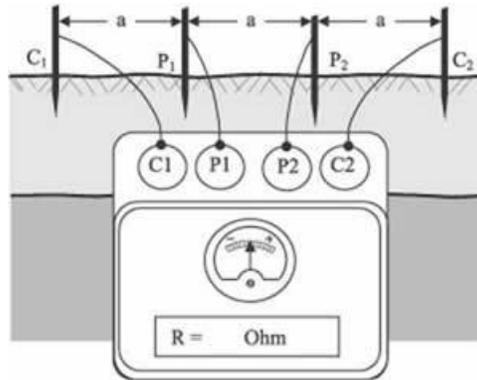


Fuente: Birth. *Método de Wenner.*

https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/website_911_mtodo_de_wenner.html. Consulta: mayo de 2019.

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio del terreno a una profundidad de $3/4a$.

Figura 23. Esquema de conexión en el instrumento de medición



Fuente: Birtlh. *Método de Wenner*.

https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/website_911_mtodo_d_e_wenner.html. Consulta: mayo de 2019.

Luego de obtener el valor de la resistencia aparente en ohms se utiliza la siguiente expresión para calcular la resistividad del terreno:

$$\rho = \frac{4 * \pi * A * R}{\left[1 + \frac{2 * A}{(A^2 + 4 * B^2)^{1/2}} \right] - \frac{2 * A}{(4 * A + 4 * B^2)^{1/2}}}$$

Donde:

ρ = Resistividad promedio a la profundidad (A) en Ω -m

A = Distancia entre electrodos en metros.

B = Tamaño de los electrodos en metros

R = Lectura del telurómetro en ohms.

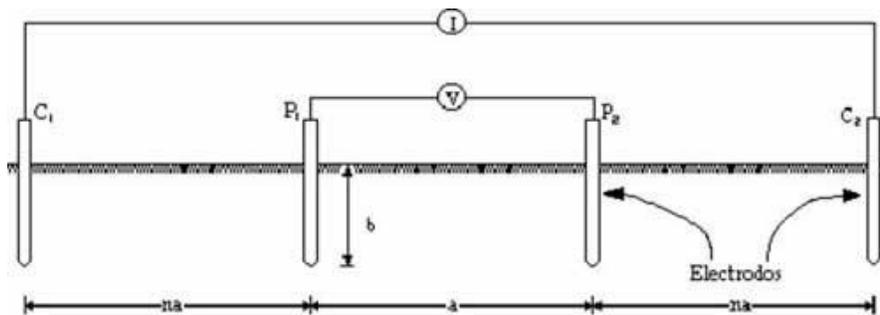
Si la distancia enterrada de los electrodos (B) es pequeña comparada con la distancia de separación entre electrodos (A) podemos aplicar la siguiente fórmula simplificada:

$$\rho = 2 * \pi * A * R$$

2.6.2.2. Método de Schlumberger

El método de Schlumberger es una modificación al método de Wenner, el cual emplea cuatro electrodos o picas pero, en este caso, la separación de los electrodos centrales (a) es constante y únicamente los exteriores varían una distancia que está en múltiplos (na) de la separación de los electrodos centrales (a).

Figura 24. Método de Schlumberger



Fuente: Birtlh. *Método de Schlumberger*.

https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/IEI/IEI05/es_IEA_IEI05_Contenidos/IEI05_CONT_R134_pi_c111.jpg. Consulta: mayo de 2019

La resistividad está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = 2 * \pi * R * (n + 1) * na$$

Este método es utilizado principalmente cuando se requiere conocer la resistividad de las capas más profundas y sin necesidad de hacer muchas

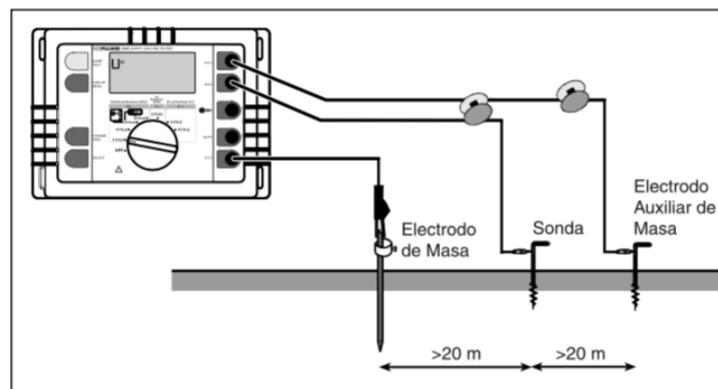
mediciones, como en el método de Wenner. Solamente se requiere hacer mediciones a 90° y que no existan estructuras subterráneas en el terreno a medir.

2.6.2.3. Método de caída de potencial

Este método es utilizado para edificios de nueva construcción y edificios existentes como parte del mantenimiento anual de las instalaciones de tierra física.

Para medir la resistencia de la toma de tierra es necesario desconectar el electrodo de puesta a tierra de la instalación. El telurómetro requiere de tres electrodos para realizar la medición de la resistencia. En el equipo Fluke *Earth Ground* 1625 se emplea el siguiente diagrama de conexiones:

Figura 25. Esquema de conexiones Fluke EG 1625



Fuente: Fluke. *Manual Fluke Earth Ground 1625*. p.21. Consulta: mayo de 2019

El telurómetro inyecta una corriente alterna en la tierra por el electrodo de masa y en el electrodo auxiliar de masa; a continuación, mide la caída de

potencial entre la sonda y el electrodo de más y, por último, utiliza la Ley de Ohm para calcular la resistencia.

Existe un método de medición que se utiliza cuando por alguna circunstancia en el terreno no se pueden introducir las sondas o picas debido a la compactación del terreno o porque el electrodo de prueba queda encerrado a todos sus alrededores por concreto y es difícil incrustar las picas. Se procederá a envolver las sondas con un trapo mojado y se colocan sobre el terreno regándolas con agua. El valor obtenido por este método es muy similar al real.

2.7. Sistemas de pararrayos

Un sistema de pararrayos forma parte del sistema de protección externo contra descargas atmosféricas. Son los encargados de recibir directamente los rayos que se forman debido a una tormenta eléctrica y conducir toda esa energía hasta el planeta tierra para una disipación segura y sin poner en riesgo a las personas y al edificio.

2.7.1. Mapa isoceráunico de Guatemala

En Guatemala, la entidad encargada del estudio los fenómenos naturales es el Instituto de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología (Insivumeh) el cual presenta en su página (insivumeh.gob.gt) el atlas con los niveles isoceráunicos de días con descargas eléctricas o truenos promedio anual. Estos datos fueron registrados desde 1971 hasta 2003.

El atlas contiene líneas de color magenta que son el número promedio de descargas atmosféricas al año, que tienen como unidad los días.

Tabla XI. **Promedio de descargas atmosféricas por región**

Región	Promedio de descargas atmosféricas al año
Escuintla, Retalhuleu, Costa Sur	150
Zona Central, Guatemala, Sololá	60
Zona norte, Petén, Izabal	80

Fuente: Elaboración propia. Empleando, *Datos Atlas Isoceráunico*. Consulta: septiembre de 2019.

2.8. Supresores de transientes

Anteriormente hablábamos sobre los efectos de los rayos directos e indirectos. Entre los efectos indirectos podemos mencionar que los rayos impactan las líneas aéreas; en un terreno cercano a nuestras instalaciones crean elevaciones de potencial. Un rayo se puede considerar como una antena que emite un campo electromagnético, el cual puede inducir voltajes muy elevados.

También existen las sobretensiones creadas dentro de nuestras instalaciones provocadas por la marcha o apagado de equipos eléctricos, cebadores para el alumbrado público, conmutación de redes de alimentación. Estas sobretensiones se les llaman transientes o transitorios. Su diferencia a una elevación de voltaje es la duración, ya que duran únicamente $\frac{1}{2}$ ciclo u 8,33 mseg.

Los supresores de transientes son también llamados dispositivos de sacrificio, ya que utilizan varistores de óxido de metal. Al estar frente a un sobrevoltaje se convierten en conductores, haciendo que a través de ellos pasen

corrientes muy elevadas y las drenan a tierra, hasta el punto que pueden llegar a dañarse parcial o totalmente mientras protegen los equipos electrónicos de estos transitorios.

2.8.1. Categorías de supresores

La norma IEEE C62.41 los clasifica según el lugar de instalación del supresor. Los transientes de valores más altos son los producidos por las descargas electroatmosféricas, las cuales inducen un voltaje muy elevado en las líneas de distribución que llegan hasta nuestras instalaciones y es aquí el primer punto de instalación de un supresor de categoría C. El transitorio puede no haber sido eliminado completamente y aún continúa dentro de las instalaciones. Llega al siguiente tablero de distribución secundario, para lo cual se determina utilizar un supresor categoría B de menor kiloamperaje que los de categoría C. Como protección más cercana a la carga por proteger se instalan los supresores de categoría A, que incluso tienen menor valor de kiloamperes que los de la categoría B. Lo antes expuesto lo representamos en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Categorías de supresores según IEEE & IEC**

IEEE / IEC	Ubicación de la instalación
Categoría C <i>Tipo 1</i>	Circuito alimentador principal, o tablero principal cercano a la acometida del edificio.
Categoría B <i>Tipo 2</i>	Tableros secundarios a una distancia mayor de 10 metros del interruptor principal.
Categoría A <i>Tipo 3</i>	Tableros de distribución más cercanos a la carga, se instalan en el interruptor que la alimenta, directamente en el tablero de control y mando. Redes y comunicaciones.

Fuente: elaboración propia, IEEE C62.4.

2.9. Corriente de cortocircuito

Una falla eléctrica es cualquier evento que se interfiere en la trayectoria segura de la corriente y que ocasiona en el sistema una operación anormal conocida como contingencia. Esta contingencia debe ser liberada del sistema por medio del sistema de protecciones, que deben actuar rápidamente para que el sistema se recupere sin mayores daños a los equipos, en especial al generador, que es el que recibe estas fallas.

La mayoría de las fallas en un sistema eléctrico se origina por la conexión del conductor de fase a otro conductor de fase o tierra o algún material que sirva como tierra física pero no esté instalado para esa intención. Al establecerse un camino entre el conductor y el otro conductor se produce un flameo, que es consecuencia de la diferencia de tensión creado por la falla. Esta gran diferencia de tensión origina la ionización del aire y de esta manera se forma una trayectoria a tierra de baja impedancia. La falla es alimentada por el sistema mismo que comprenden los elementos con capacidad de entregar energía como los generadores sincrónicos, asíncronos, sistemas accionados por convertidores estáticos, motores síncronos y asíncronos.

Después de presentarse la falla entra el sistema de protecciones a actuar con el fin de cortar el suministro de energía en el punto de fallo, eliminando de esta manera el camino que se había formado entre los conductores que interactuaron y que dieron lugar a lo que se le conoce como cortocircuito. Los interruptores se reconectan en un intervalo de aproximadamente 20 ciclos para que se lleve a cabo la deionización, sin que se pueda restablecer un arco eléctrico.

La duración del corto circuito dependerá sobre todo de los dispositivos de protección y de los aparatos que sean empleados para este propósito dentro del sistema. La ubicación del corto circuito decide si las máquinas síncronas influyen más o menos sobre el desarrollo de la falla. Las fallas pueden venir de diferentes fuentes tales como:

- Pérdida de aislamiento.
- Fallas humanas.
- Cortos producidos por animales y árboles.
- Choque de conductores debido a fuertes vientos, entre otras.

Entre los efectos de los cortocircuitos podemos mencionar los siguientes:

- Corrientes muy elevadas que pueden provocar un calentamiento perjudicial en la red, lo que disminuye el periodo de vida al aislamiento en los equipos que utilizan devanados, conductores, entre otros. Se puede llegar al punto de fundirlos.
- Esfuerzos electromecánicos excesivos que pueden romper los aisladores de sujeción, o los propios conductores. En el caso de los transformadores pueden presentar grandes esfuerzos en las bobinas y llegan a causar daños físicos en las mismas.

Caída de tensión que puede producir desconexión de motores debido a la caída de contactores en los cortocircuitos monofásicos a tierra, los cuales, dependiendo del grado de aterrizaje del sistema en el punto de falla, pueden originar aumentos en la tensión de las fases que no estén directamente en cortocircuito.

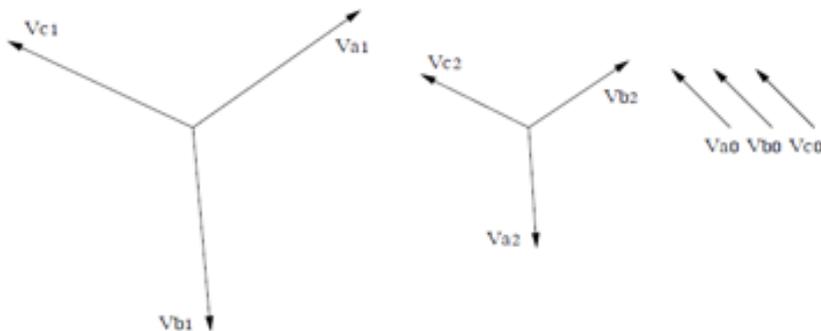
Riesgo para la estabilidad del sistema: los cortocircuitos amenazan con romper el sincronismo de los generadores al producir un cambio sustancial a las condiciones operativas del sistema. También influye la distancia que posee el generador al punto de falla, así, los más cercanos al punto de fallo contribuyen en mayor porcentaje a alimentar el fallo.

2.9.1. Método de las componentes simétricas

El método de las componentes simétricas es utilizado para el estudio de circuitos eléctricos polifásicos, con el cual se realiza el cálculo de las fallas asimétricas de una forma más sencilla como en una falla trifásica equilibrada.

Este método utiliza el teorema de Fortescue, que nos dice que tres fasores desbalanceados se pueden descomponer en tres sistemas balanceados de la siguiente forma:

Figura 27. Componentes de secuencia positiva, negativa y cero



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Se trata de la descomposición de un sistema de vectores (a, b, c) en un sistema de la forma (0,1,2) y con el siguiente conjunto de ecuaciones para el voltaje:

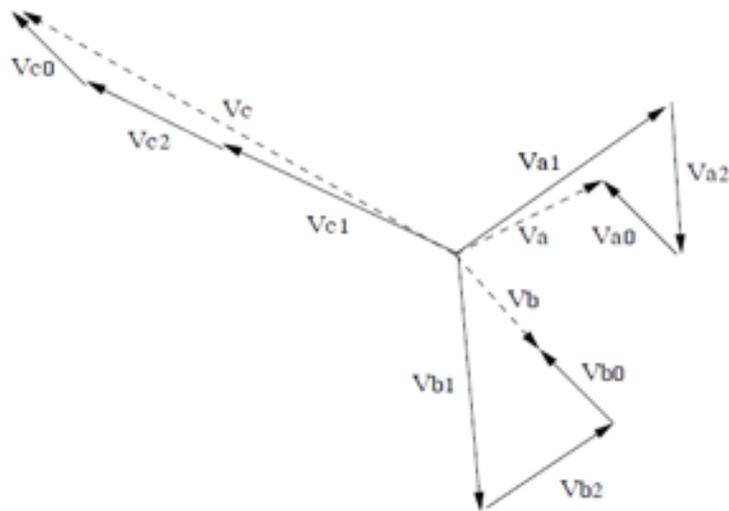
$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)}$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)}$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)}$$

De las ecuaciones anteriores nos queda el siguiente diagrama fasorial:

Figura 28. **Diagrama fasorial descomposición vectorial**



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Del conjunto de ecuaciones anterior, las componentes V_b y V_c se expresan en función de V_a para obtener la matriz (A) de la siguiente forma:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Siendo el inverso de la matriz (A):

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a & a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} A^*$$

Los voltajes en componentes simetrías (0, 1, 2) quedan expresados en función del voltaje en componentes (a, b, c) de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} V_{a(0)} \\ V_{a(1)} \\ V_{a(2)} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

De este último conjunto de ecuaciones se puede observar que $V_{a(0)} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$. Para el caso de sistemas balanceados se cumple que $(V_a + V_b + V_c) = 0$, por consiguiente, no existe componente de secuencia cero.

En la siguiente figura se representa el circuito equivalente de la red de secuencia cero para la conexión de los transformadores trifásicos.

Figura 29. Circuito equivalente para red de secuencia cero

CASO	SÍMBOLOS	DIAGRAMAS DE CONEXIÓN	CIRCUITOS EQUIV. DE SECUENCIA CERO
1			
2			
3			
4			
5			

Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

2.9.1.1. Tipos de fallas

Por lo general, las fallas que ocurren en un sistema de potencia involucran una de las fases provocando desbalance en el sistema conocido como cortocircuito desequilibrado, llamado corto asimétrico y que puede ser:

- Línea a tierra.
- Línea a línea.
- Línea a línea a tierra.

- Falla serie cuando un conductor no cierra completamente.

Para el cálculo de fallas es necesario determinar las matrices de impedancia de secuencia positiva negativa y cero.

2.9.1.2. Representación de las fallas

La impedancia de falla se representa por Z_F y aparece en los modelos de fallas monofásicas, bifásicas y trifásicas. El cálculo se realiza con la información de fallos presentados en las redes eléctricas.

La impedancia Z_F depende de una serie de parámetros, entre los que podemos mencionar la resistencia del arco producido durante el corto circuito, resistencia de la tierra.

El cálculo del corto de mayor uso es el trifásico, en este fluyen corrientes de secuencia positiva únicamente. El modelo incluye la impedancia Z_F y equivalente de Thévenin del sistema (secuencia positiva). El cálculo de la corriente de falla trifásica en un punto k es:

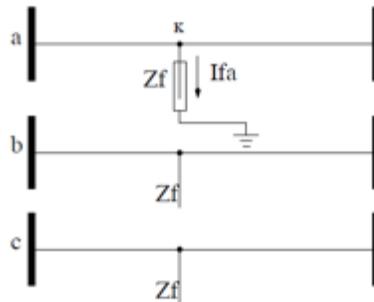
$$I_{Fa}^1 = \frac{V_F}{Z_{kk}^1 + Z_F}$$

Los elementos Z_{kk} se denominan impedancias de Thévenin y corresponden a los elementos de la diagonal de la matriz Z_{bus} . En el cálculo los elementos de la matriz se determinan los elementos de la columna correspondientes al nodo de fallo k y se determina el elemento Z_{kk} y los elementos Z_{kj} con $j= 1$, nodos que corresponde a la columna k de la matriz Z_{bus} .

2.9.1.2.1. Falla monofásica (línea-tierra)

Este es el tipo de falla más común originado por descargas atmosféricas o por conductores al hacer contacto con estructuras con potencial 0 o a la tierra física misma.

Figura 30. Falla monofásica línea a tierra



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Se plantean las ecuaciones de corriente y voltaje según la falla presentada. Para esta falla solo por una de las fases circula la corriente de falla y se plantea de la siguiente forma:

$$i_{Fb} = 0 \quad i_{Fc} = 0; \quad V_{ka} = Z_F * i_{Fa}$$

De la conversión de componentes simétricas (a, b, c) y realizando las operaciones se obtiene que:

$$i_{Fa}^0 = 3i_{Fa}$$

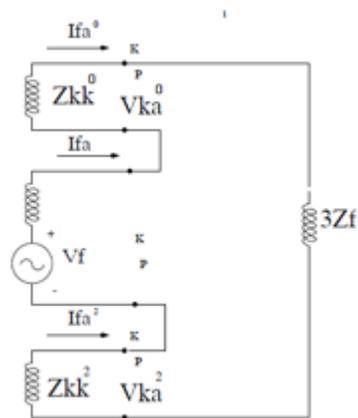
Para el voltaje obtenemos la siguiente ecuación:

$$V_F = (Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_F)i_{Fa}^0$$

La corriente de falla de la secuencia cero es calculada con la siguiente ecuación.

$$i_{Fa}^0 = \frac{V_F}{Z_{kk}^0 + Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + 3Z_F}$$

Figura 31. **Circuito equivalente falla monofásica línea a tierra**

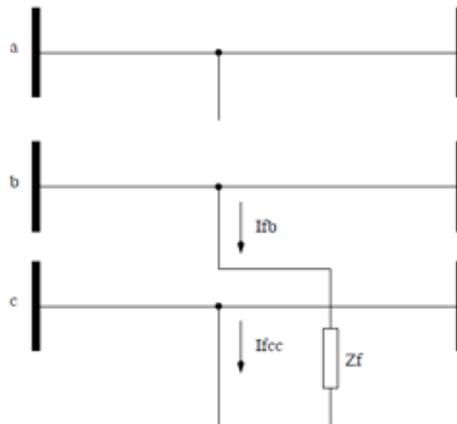


Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. Análisis de sistemas de potencia. p. 245.

2.9.1.2.2. **Falla bifásica (línea - línea)**

La falla bifásica esta dada entre dos de las fases del sistema.

Figura 32. Representación de falla bifásica (línea – línea)



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Se plantean las ecuaciones de voltaje y de corriente según la falla que se presentó, de acuerdo con las siguientes condiciones:

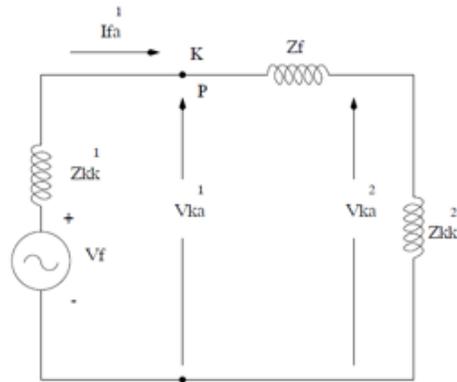
$$i_{Fa} = 0$$

$$i_{Fb} = -i_{Fc}$$

$$V_{kb} - V_{kc} = i_{Fb} * Z_F$$

De las condiciones de $i_{Fa}=0$ y $i_{Fa}^1 = -i_{Fa}^2$ se observa que el voltaje de la red de secuencia es cero, por lo que no se incluye esta red. Así llegamos al circuito:

Figura 33. Circuito de fallo línea a línea



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Del circuito anterior obtenemos la siguiente ecuación:

$$i_{Fa}^1 = i_{Fa}^2 = \frac{V_F}{(Z_{kk}^1 + Z_{kk}^2 + Z_F)}$$

2.9.1.2.3. Falla línea - línea a tierra o falla bifásica a tierra

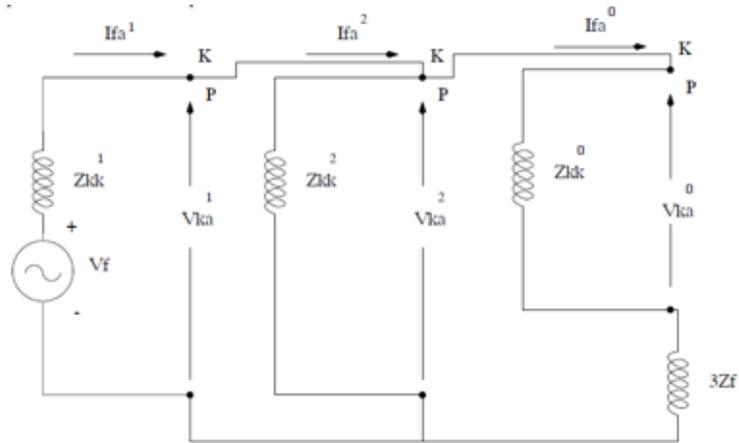
Las condiciones del circuito para esta falla son:

$$i_{Fa} = 0; V_{kb} = V_{kc} = (i_{Fb} + i_{Fc}) Z_F$$

Se procede al cambio de las componentes de corriente (a, b, c) por componentes (0, 1, 2) por medio de la matriz:

$$\begin{bmatrix} i_{Fa}^0 \\ i_{Fa}^1 \\ i_{Fa}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_{Fb} \\ i_{Fc} \end{bmatrix}$$

Figura 34. Circuito de fallo línea – línea a tierra



Fuente: GRAINGER, John J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de sistemas de potencia*. p. 245.

Para obtener las corrientes de fallo a las componentes (0, 1, 2) tenemos las siguientes ecuaciones:

$$i_{Fa}^1 = \frac{V_F}{Z_{kk}^1 + \left[\frac{Z_{kk}^2 (Z_{kk}^0 + 3Z_F)}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]}$$

$$i_{Fa}^2 = -i_{Fa}^1 \left[\frac{Z_{kk}^0 + 3Z_F}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]$$

$$i_{Fa}^0 = -i_{Fa}^1 \left[\frac{Z_{kk}^2}{Z_{kk}^2 + Z_{kk}^0 + 3Z_F} \right]$$

2.9.1.3. Cálculo de la corriente de cortocircuito

Dentro de un sistema eléctrico, las fuentes que aportan al corto circuito son:

- Red de suministro de energía.

- Máquinas síncronas, generadores y motores.
- Máquinas asíncronas, motores.

Para el cálculo de corto circuito se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- Tener los datos de corto circuito del punto de entrega de energía.
- Los motores que se encuentran instalados en el sistema.
- La impedancia y longitud de los conductores.
- Marca y capacidad de cortocircuito de los interruptores.

En el cálculo se utilizan las siguientes fórmulas:

$$S_n = \sqrt{3} * U_n * I_n \text{ Potencia aparente}$$

$$Z(\Omega) = \frac{z (\%)}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \text{ Impedancia en ohms}$$

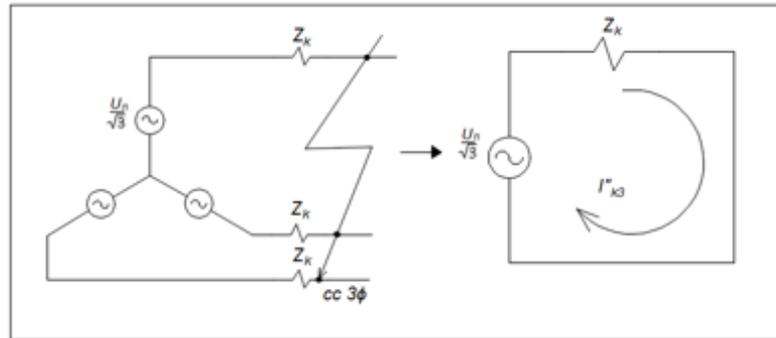
Donde:

$$U_n = \sqrt{3} * V_n \text{ Tensión compuesta o voltaje de línea}$$

2.9.1.3.1. Cortocircuito trifásico

Corresponde a un cortocircuito entre las tres fases de forma simultánea:

Figura 35. **Circuito equivalente de corto circuito trifásico**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

$$I''_{k3} = \frac{U_n}{\sqrt{3} * Z_k}$$

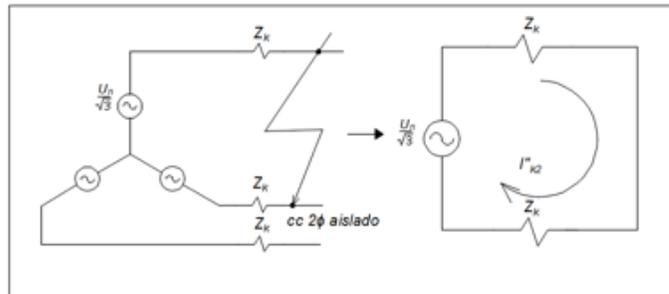
I''_{k3} Corriente inicial simétrica de cortocircuito trifásico

Z_K Impedancia equivalente del circuito de falla

2.9.1.3.2. **Cortocircuito bifásico aislado de tierra**

Corresponde a un cortocircuito entre dos fases sin contacto con tierra.

Figura 36. **Circuito equivalente de cortocircuito bifásico aislado**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

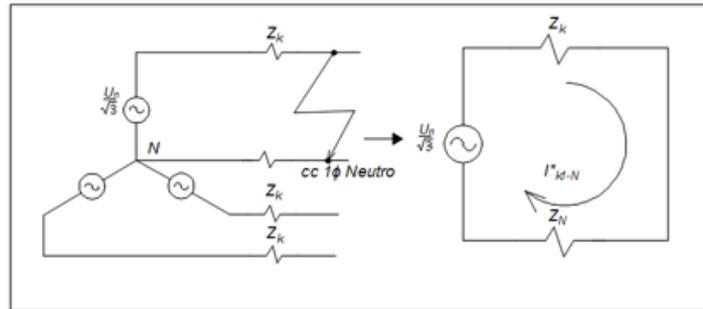
$$I''_{K_2} = \frac{U_n}{2 * Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I''_{k_3}$$

I''_{k_2} Corriente de cortocircuito bifásico aislado de tierra.

2.9.1.3.3. Cortocircuito monofásico entre una fase y neutro

Corresponde a un cortocircuito entre una fase y neutro:

Figura 37. **Circuito equivalente de cortocircuito fase y neutro**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

$$I''_{k_{1N}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_k + Z_n)}$$

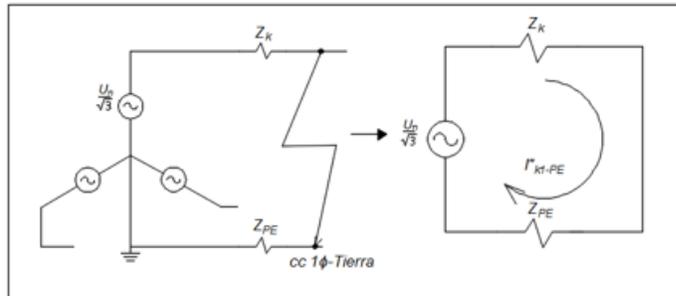
$I''_{k_{1N}}$ Corriente de cortocircuito entre una fase y neutro.

Z_n Impedancia equivalente del conductor del neutro de retorno

2.9.1.3.4. **Cortocircuito monofásico entre una fase y tierra**

Corresponde a un cortocircuito entre una fase y tierra. En este caso dependerá del sistema de distribución (neutro aterrado o neutro aislado), pero en general podemos considerar como Z_{PE} la impedancia del retorno por tierra.

Figura 38. **Circuito equivalente de cortocircuito monofásico**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Autocad Eléctrico 2018.

$$I''_{K1PE} = \frac{U_n}{\sqrt{3}(Z_k + Z_{PE})}$$

I''_{K1PE} Corriente de cortocircuito entre fase y tierra.

Z_{PE} Impedancia equivalente del retorno por tierra.

Para el diseño de las instalaciones eléctricas es muy importante realizar estos cálculos, ya que nos ayudan a determinar los poderes de corte y cierre de los interruptores.

Del posible cortocircuito, el de mayor impacto será el trifásico, mientras que el mínimo será el de fase a neutro en sistemas con neutro o bifásico en sistemas donde no se tiene un conductor neutro.

3. USO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MINEX

3.1. Identificación de las fuentes de energía

Una revisión de los tipos de energía y de evaluación del uso y consumo energético nos conduce a determinar las áreas de uso significativo de energía e identificar las oportunidades de mejora para un mejor desempeño energético.

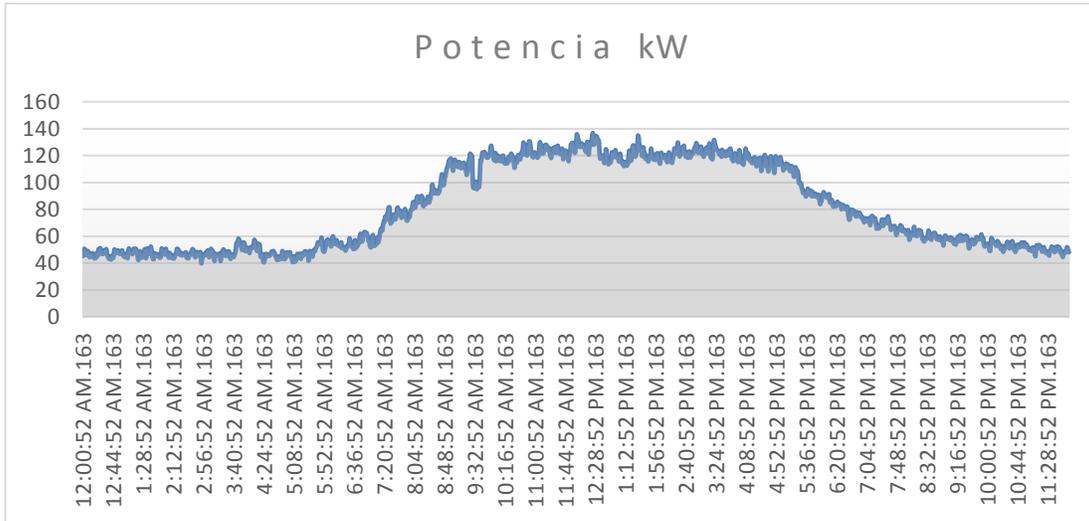
Para el Minex, la principal fuente de energía en general es la electricidad que se emplea para el bombeo del suministro de agua, la climatización del edificio y el funcionamiento de los aparatos electrónicos y de calefacción de alimentos.

El objetivo principal de esta etapa es identificar patrones y tendencias en el uso y consumo de la electricidad en el Minex que se utilizará para comprender cómo es actualmente el desempeño energético, estimar comportamientos futuros y establecer las áreas de mayor consumo y algunos potenciales de mejora.

El Minex cuenta con un banco de transformadores de 300 kVA, el cual alimenta el aire acondicionado central para la climatización de todo el edificio.

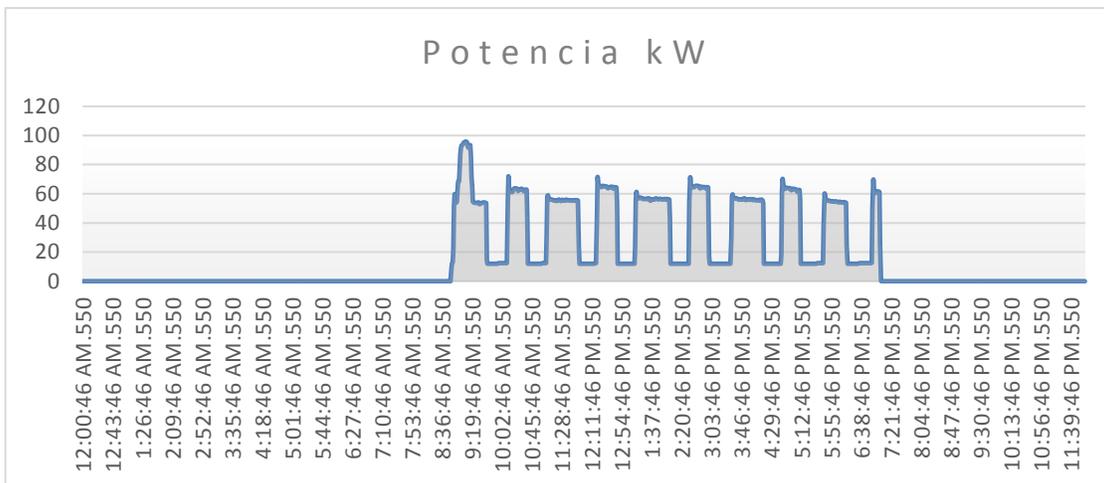
Un día típico laboral en el Minex tiene la siguiente gráfica característica de consumo de energía.

Figura 39. **Potencia registrada en el banco 500 kVA**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

Figura 40. **Potencia registrada en el banco de 300 kVA**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En la grafica se observa el horario de funcionamiento del aire acondicionado.

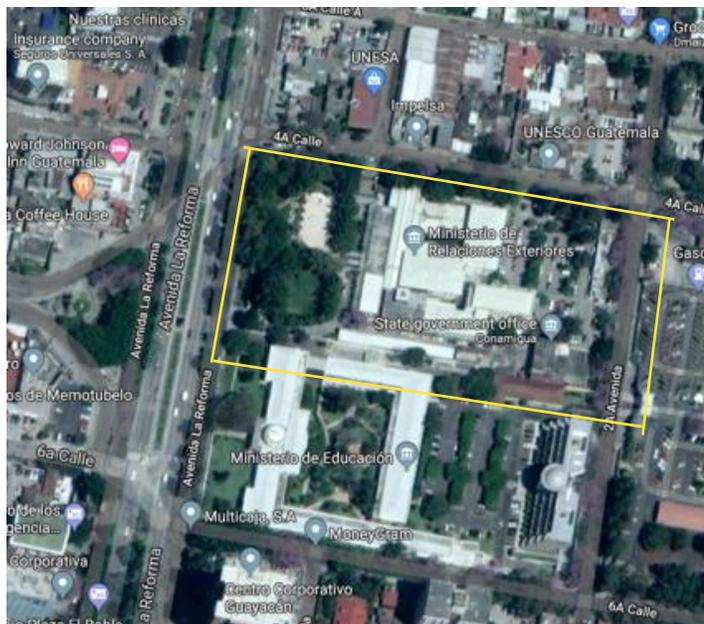
3.2. Evaluación de uso y consumo de energía

Consiste en una revisión de cada elemento eléctrico y electrónico que contribuye al consumo diario de energía, para lo cual haremos un recorrido por todo el edificio en busca de estos elementos.

3.3. Ubicación del edificio

El Minex colinda al norte por la 4ª calle zona 10, al sur con el Ministerio de Educación, al este con la Avenida Reforma y al oeste con la 2ª Avenida de la zona 10. Su dirección catastral es 2ª Ave. 4-17 zona 10 Ciudad de Guatemala.

Figura 41. Vista aérea del Minex



Fuente: Google Maps. Vista Minex.

www.google.com/maps/place/Ministry+of+Foreign+Affairs/@14.6099104,-90.5136234,390m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8589a3cce36928d3:0x445abf766f7f99a6!8m2!3d14.609523!4d-90.5137845. Consulta: mayo de 2019.

3.4. Condiciones generales del edificio

Se llevó a cabo un recorrido por las instalaciones para realizar una inspección visual y proporcionar una condición general del edificio. Se obtuvieron los siguientes datos:

- Edificación de hormigón solido.
- Bases y columnas con fundición en sitio.
- Ventanas con marco de aluminio y doble vidrio un 10 % polarizado.
- Puertas algunas principales de vidrio y puertas de oficinas de madera.
- Piso cerámico en el edificio administrativo en todos los niveles, así como en el edificio de transporte y atención al migrante.
- Lámparas fluorescentes con difusor de aluminio y tapa de plástico nevado, iluminación decorativa con ojos de buey en mostradores y salón de biblioteca.
- En el edificio administrativo, en un 95 % de las oficinas se aprovecha la luz natural con ventanas, a excepción de algunos pasillos donde la luz es 100 % iluminación artificial.
- El edificio cuenta con un chiller que fue instalado con el propósito de proveer aire acondicionado a los salones de reuniones de los distintos departamentos. Con el tiempo se ha utilizado para la climatización de

diversas oficinas, lo que hace que el chiller deba estar encendido en horario de oficina, aunque no haya reuniones en los salones.

- Con respecto a las instalaciones eléctricas, cuenta con dos acometidas. Le suministra energía la Empresa Eléctrica de Guatemala.
- Suministro de agua potable por medio de 1 pozo y bombeo interno.

El edificio fue construido con ventanas en los cuatro puntos cardinales, con el objetivo del aprovechamiento de la luz solar y el ahorro en la iluminación de las instalaciones, que principalmente son oficinas y tienen un horario diurno. Este aprovechamiento solar también puede ser contraproducente con la climatización del mismo, ya que por la tarde las oficinas del lado del poniente pueden requerir más calefacción que las que están en la orientación opuesta. La pintura del edificio puede contribuir mucho en este factor, ya que con colores más claros se mitigan en gran parte los rayos solares.

Figura 42. **Edificio lado oeste**



Fuente: edificio del Minex.

Figura 43. **Edificio lado sur**

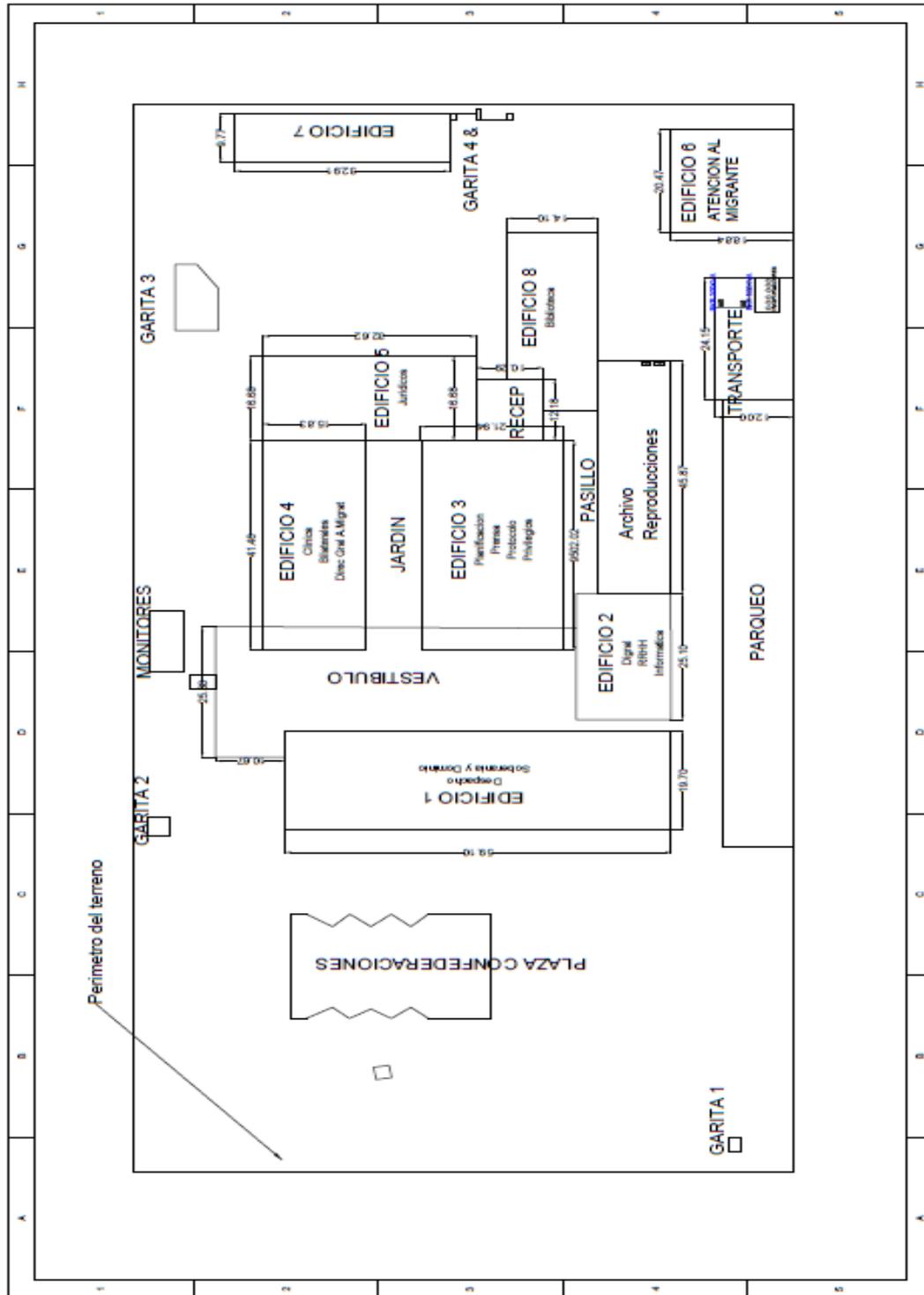


Fuente: edificio del Minex.

3.5. Departamentos que conforman el Minex

Se realizó un recorrido por todo el edificio y con la ayuda de planos y de los encargados de la seguridad y mantenimiento del edificio se logró realizar un plano aproximado de la ubicación de los diferentes departamentos que lo conforman.

Figura 44. Distribución del edificio por dependencias



Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.5.1. Acometida principal

El ingreso de la energía se hace por medio de la acometida principal en voltaje de distribución por parte de la empresa eléctrica a 13,2 kV en el poste No. 330 603 que está ubicado sobre la 2^a Avenida 4-17 zona 10.

Figura 45. Número de poste



Fuente: 2da avenida Zona 10, Ciudad de Guatemala

Este es el poste número 330 603 que recibe los conductores del punto de acople de las líneas de la Empresa Eléctrica desde el poste número 160 308, que se encuentra al otro lado de la calle.

En el poste se observan unos cortacircuitos que protegen el cableado entre este poste y el próximo, que se encuentra a 45 metros, y que contiene el contador que registra el consumo del Minex.

Figura 46. **Acometida principal del Minex**



Fuente: parqueo del edificio del Minex.

La acometida principal del edificio se encuentra en el poste número 106 127 y posee una medición indirecta con transformadores de corriente y potencial y el contador, así como las mufas y el tubo conduit de 4 " que llevan los conductores URD 1/0 en 13,2 kV de forma subterránea hasta el cuarto de transformadores.

3.5.2. Subestación eléctrica del edificio

El edificio cuenta con un banco de transformadores del tipo distribución sumergidos en aceite con una capacidad de 167 kVA cada uno para tener una

capacidad total de 500 kVA, con una conexión en el primario 13,2 kV en estrella y en el secundario en estrella 208-120 V. Este banco de transformadores es el que se encarga de suministrar energía a la mayor parte de la carga eléctrica en el edificio.

Se tiene otro banco de transformadores del tipo distribución sumergidos en aceite, con una capacidad de 100 kVA cada uno, para tener una capacidad total de 300 kVA con una conexión en el primario 13,2 kV en estrella y en el secundario en estrella 208-120 V. Este banco se utiliza para suministrar energía al aire acondicionado central del edificio.

Figura 47. **Ubicación de transformadores y subestación eléctrica**



Fuente: parqueo del edificio del Minex.

Figura 48. **Banco de transformadores**



Fuente: cuarto de transformación del edificio del Minex.

En el banco de transformadores se tiene el ingreso de la acometida hacia el cuarto donde energiza tres conductores de aluminio que atraviesan el cuarto y de los cuales se alimentan los transformadores. El acceso al cuarto está prohibido debido al peligro de estar muy cerca de un voltaje de media tensión, por lo que se mantiene con candado.

Figura 49. **Banco de transformadores 2**



Fuente: cuarto de transformación del edificio del Minex.

La subestación se encuentra ubicada en el primer nivel contiguo al banco de transformadores y al edificio de transportes. Está conformada por:

- 2 plantas generadoras
- 2 transferencias
- 2 celdas para la distribución de circuitos principales

Figura 50. **Celda con interruptor principal**



Fuente: cuarto eléctrico del edificio del Minex.

El edificio está constituido por 16 circuitos que llevan los alimentadores para los tableros secundarios que están dentro de cada uno de los departamentos que tiene el Minex.

3.5.3. Fuente de alimentación de emergencia

En caso de falta de suministro de energía por parte de la distribuidora se utiliza una planta generadora de electricidad, que entra a operar al momento de la ausencia de voltaje para mantener la continuidad de la electricidad en el edificio o en parte del mismo donde se considera necesario.

El Minex cuenta con dos plantas de emergencia: una con una capacidad de 556kVA/445 kW voltaje 208 trifásico marca Daewoo y otra planta con generador Stamford de 437,5 kVA/350 kW utilizando dos transferencias. Están configuradas

como un respaldo de la otra en caso de ser necesario. Utilizan un sistema de alimentación de combustible directo por medio de su propio contenedor en la base de la planta generadora.

Figura 51. **Planta de emergencia Daewoo**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Figura 52. **Planta de emergencia Stamford**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Figura 53. **Placa de características de planta de emergencia**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

3.5.4. Transferencia automática

La transferencia es la encargada de realizar el cambio de suministro de energía al edificio ya sea la energía que entra por parte de la empresa eléctrica o por la planta de emergencia para garantizar la continuidad del suministro eléctrico. Las transferencias pueden ser manuales o automáticas que al momento de la ausencia de voltaje realiza el cambio sin la necesidad de un operador.

En el Minex se encuentran dos transferencias con las mismas características, encerradas cada una en su propia celda.

Figura 54. Transferencia automática



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Debido a la ubicación de las cargas con respecto de la celda principal de interruptores, el edificio fue diseñado con tableros secundarios que se encargan

de la distribución de la energía hasta su punto de conexión; esto con el objetivo de reducir el calibre de conductor alimentador y de los ramales, como para evitar la caída de tensión debido a la distancia mencionada.

En el cuarto eléctrico se encuentran tres celdas con interruptores termomagnéticos. En la primera celda se encuentra el interruptor principal que según la norma IEC 60947-2 es de categoría MCCB (*molded Case Circuit Breaker*) conocido como interruptor de caja moldeada con ajustes para su poder de interrupción última de cortocircuito (I_{cu})

Figura 55. **Interruptor principal, celda 1**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Figura 56. **Interruptores ramales, celda 2**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Figura 57. **Interruptores ramales, celda 3**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Las celdas se encuentran interconectadas por medio de barras de cobre de 2 x 50 x10 mm. La celda número 3 aloja el interruptor principal del banco de transformadores de 300 kVA.

Figura 58. **Barraje 240V en celda principal**



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

En la celda 2 de interruptores secundarios se observan interruptores de caja moldeada (MCCB) algunos de ellos con características de corto circuito ajustable para la coordinación de protecciones. Dentro de las instalaciones, la mayoría de tableros son del tipo trifásico con interruptores sin ajuste a la corriente de cortocircuito.

Según la norma IEC 60947-2, el interruptor principal del Minex pertenece a la categoría B de interruptores automáticos, lo que significa que puede cambiar sus características de corto circuito por medio de ajustes en el termo magnético y de los siguientes valores que posee el interruptor.

3.6. Caracterización de cargas

La actividad principal del Minex es atención del cliente y establecer relaciones con el resto de las naciones del mundo, por lo cual las cargas que tiene el edificio son puramente electrónicas debido a las computadoras que se encuentran en todos los departamentos.

Los equipos con mayor capacidad son los que se utilizan para la climatización de las oficinas, los aires acondicionados individuales. Además, tienen instalada una máquina de enfriamiento de las conocidos como chillers.

El siguiente aspecto es la iluminación de las oficinas, la plaza confederaciones y los diferentes parqueos que existen en el edificio. Se utiliza la tecnología de iluminación CFL y lámparas fluorescentes con dispositivos electrónicos para su accionamiento, llamados balastos.

Por medio de las mediciones realizadas en el tablero principal que viene de los transformadores se determina la caracterización de la carga en el Minex, así como el horario donde se concentra el mayor consumo de energía eléctrica.

Para fortalecer los datos que se obtuvieron en las mediciones y con la colaboración del personal que está a cargo de la seguridad y del mantenimiento del Minex se realizó un recorrido por todos los departamentos, cuartos eléctricos, centro de datos, sanitarios, perímetro exterior y parqueo que se encuentran dentro de las terreno del Minex.

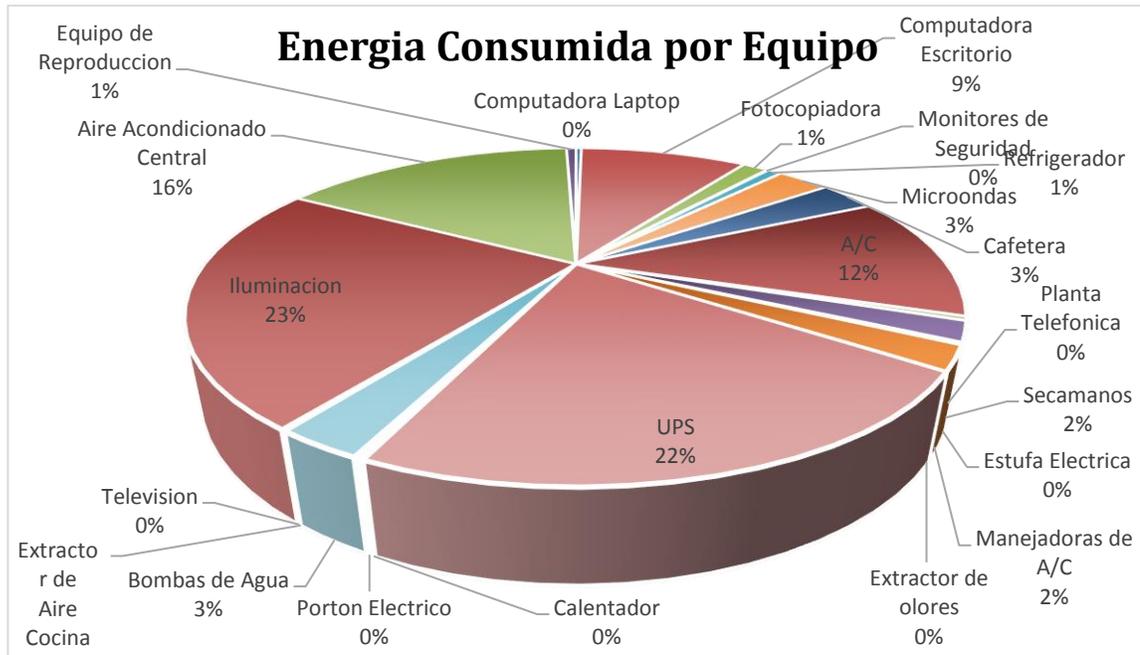
La actividad principal del Minex es mantener la comunicación de Guatemala con el mundo, por lo cual su mobiliario y equipo así como sus instalaciones están adecuadas mayormente en oficinas.

Tabla XIII. **Distribución de cargas en el Minex**

No.	Equipo	Cantidad	Consumo (w)	Horas de uso	Energía consumida diaria (kwh)/dia	Energía mes (kwh)	Energía %
1	Computadora Laptop	24	75	8	14,4	288	0,30
2	Computadora Escritorio	324	170	8	440,64	8 812,8	9,31
3	Fotocopiadora	30	560	4	67,2	1 344	1,42
4	Monitores de Seguridad	6	24	24	3,456	69,12	0,07
5	Refrigerador	18	85	24	36,72	734,4	0,78
6	Microondas	45	1 500	2	135	2 700	2,85
7	Cafetera	45	1 090	3	147,15	2 943	3,11
8	A/C	60	1 200	8	576	11 520	12,18
9	Planta Telefonica	1	750	24	18	360	0,38
10	Secamanos	15	1 200	5	90	1 800	1,90
11	Estufa Electrica	2	5 000	1	10	200	0,21
12	Manejadoras de A/C	15	900	8	108	2 160	2,28
1	Extractor de olores	1	1 200	1	1,2	24	0,03
14	UPS	246	350	12	1033,2	20 664	21,84
15	Calentador	3	2 300	1	6,9	138	0,15
16	Porton Electrico	8	2 235	0.5	8,94	178,8	0,19
17	Bombas de Agua	3	3 750	12	135	2 700	2,85
18	Extractor de Aire Cocina	1	2 500	2	5	100	0,11
19	Television	8	150	2	2,4	48	0,05
20	Iluminacion	4 302	32	8	1101,31	22 026,24	23,28
21	Aire Acondicionado Central	1	85 000	9	765	15 300	16,17
22	Equipo de Reproduccion	4	1585	4	25,36	507,2	0,54
TOTALES					4730,87	9 4617,56	100,00

Fuente: elaboración propia, mediante conteo de aparatos eléctricos instalados.

Figura 59. Cargas eléctricas en el Minex



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XII.

En la gráfica observamos que el mayor consumo en energía es debido a la climatización, 30 % entre A/C, aire acondicionado central y las manejadoras seguido por iluminación del edificio con 23 %, seguido por los UPS, con un 22 %.

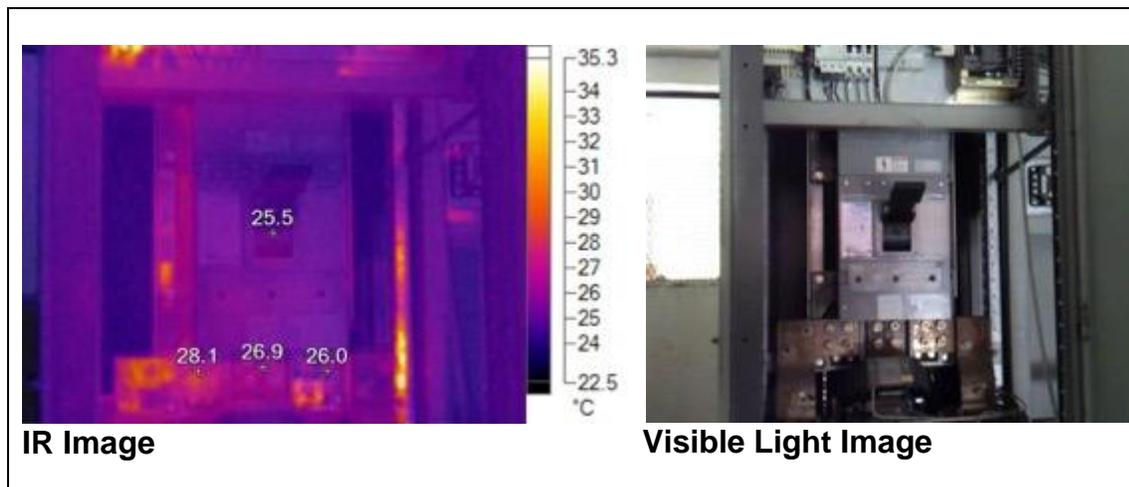
3.7. Inspección de las instalaciones eléctricas

Se procede a realizar inspecciones con cámaras de termografía y una inspección visual a los elementos que componen las instalaciones eléctricas.

3.7.1. Termografía del interruptor principal

Se realizó una inspección termográfica al interruptor principal que se encuentra en el cuarto de los generadores. Se registraron los valores de las conexiones mecánicas en cada interruptor para conocer si existen puntos calientes o conexiones que necesiten limpieza y reapriete con el torque adecuado.

Figura 60. Termografía del interruptor principal de 2 000A



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Tabla XIV. Resultados de la termografía del interruptor principal

P1	28,1	Los bornes presentan una diferencia de 2,1 °C la cual se considera aceptable según ANSI/NETA 2011
P2	26,9	
P3	26	
Temp. Central	25,5	

Fuente: elaboración propia, empleando programa *Smart View*.

3.7.2. Coordinación de protecciones

Según la norma IEC 60947-2, el interruptor principal del Minex pertenece a la categoría B de interruptores automáticos, lo que significa que puede cambiar sus características de corto circuito por medio de ajustes en el termo magnético.

Figura 61. I_{cu} del interruptor principal

Volts U_n	RMS Symm kA	
	I_{cu}	I_{cs}
220/240	65	33
380/415	40	10
500	30	8

Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

Figura 62. Termomagnético ajustable del interruptor principal



Fuente: cuarto eléctrico del Minex.

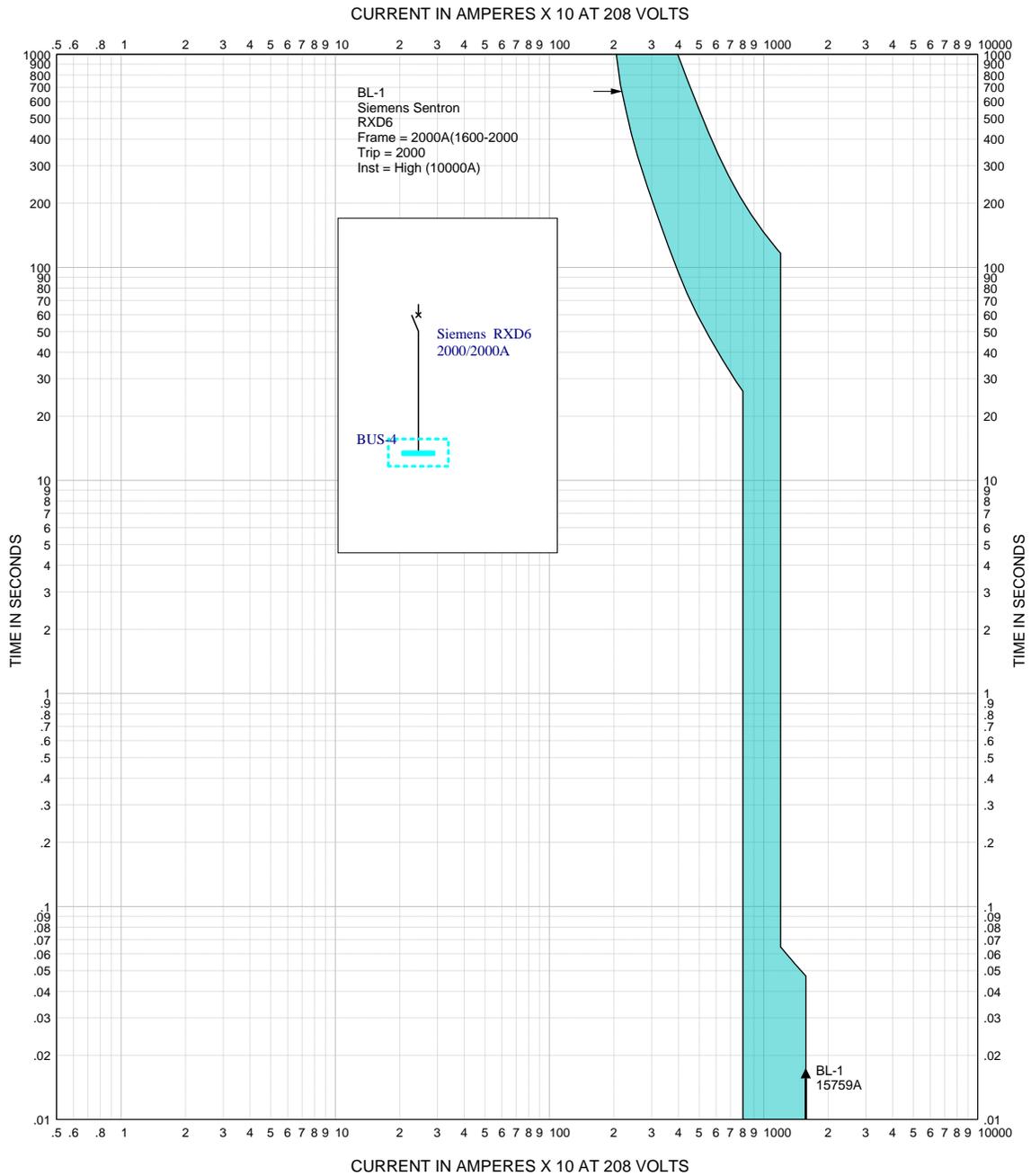
Los valores ajustados para el interruptor automático principal son los siguientes:

- $I_n = 2\ 000\ \text{A}$
- $I_r = 528\ \text{A}$ (según mediciones)
- $I_{sd} = LO = 1 \times I_n = 2\ 000\ \text{A}$
- $I_{cw} = LO = 1 \times I_n = 2\ 000\ \text{A}$

Para la curva tiempo corriente obtenemos la relación I/I_r :

$$\frac{I_r}{I_n} = \frac{528}{2\ 000} = 0,264$$

Figura 63. Curva de disparo interruptor automático Siemens

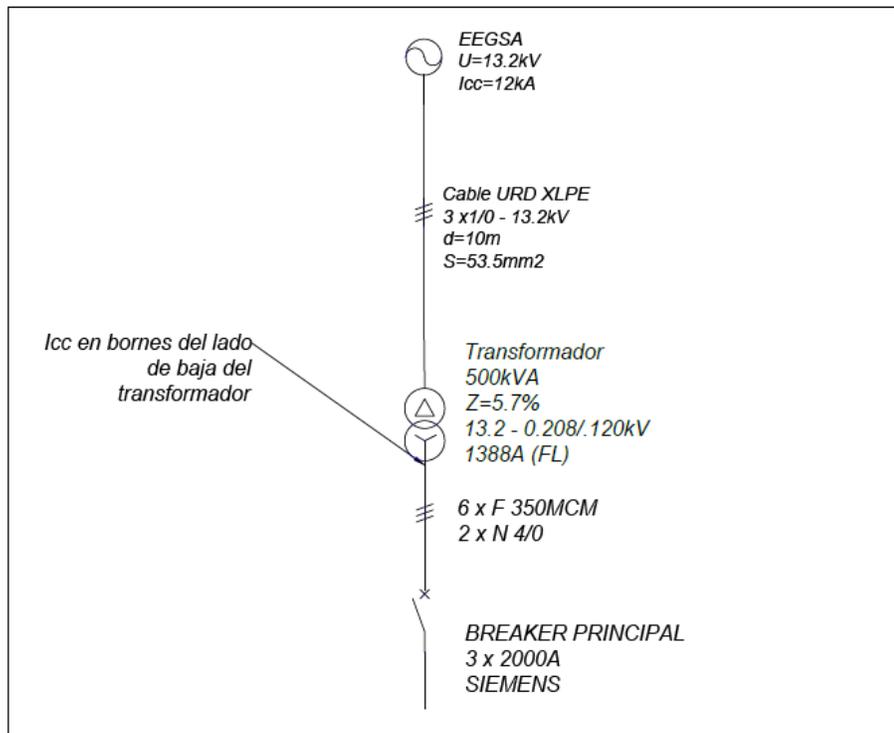


Fuente: elaboración propia, empleando programa Easy Power.

3.7.3. Corriente de cortocircuito

Se realizará el cálculo de la corriente de cortocircuito en los bornes del secundario del transformador. Para esto se solicitó a la Empresa Eléctrica el valor de corriente de cortocircuito de la red que es de 12 kA.

Figura 64. Diagrama unifilar del punto de entrega de energía



Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Electrico 2018.

Potencia de cortocircuito de la red:

$$S_{cc\ red} = \sqrt{3} * U_n * I_{cc\ red}$$

$$S_{cc\ red} = \sqrt{3} * 13,2\text{kV} * 12\text{ kA} = 274\text{ MVA}$$

Impedancia de la red vista en los bornes de baja del transformador:

$$X_{cc\ red} = \frac{V_{Trafo}^2}{S_{cc\ red}}$$

$$X_{cc} = \frac{208^2}{274} = j0,157\ m\Omega$$

Para la impedancia del transformador utilizamos las siguientes fórmulas:

$$Z_{Trafo\ 1} = \left(\frac{Z_T\ \%}{100}\right) * \left(\frac{V_{Trafo}^2}{S_n\ Trafo}\right)$$

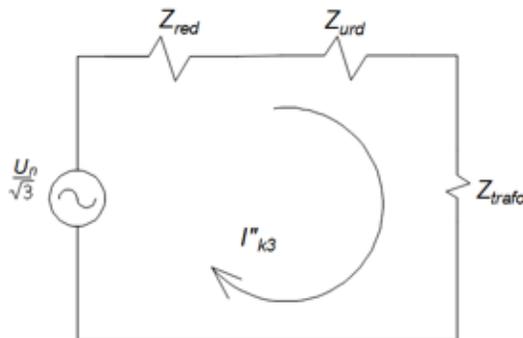
$$Z_{Trafo\ 1} = \left(\frac{5,7}{100}\right) * \left(\frac{208^2}{500}\right) = 4,93\ m\Omega$$

Impedancia del conductor URD calibre 1/0 XLPE:

$$X_{urd\ 1/0} = 0,155\ \Omega/km$$

$$X_{urd\ 1/0} = (0,155) * (0,01) = 1,55\ m\Omega$$

Figura 65. **Circuito equivalente**



Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

Impedancia de falla:

$$Z_k = Z_{red} + Z_{Trafo 1} + Z_{urd}$$
$$Z_k = 0,157 + 1,55 + 4,93 = 6,637 \text{ m}\Omega$$

Procedemos a encontrar la corriente simétrica de corto circuito trifásica:

$$I_{k3}'' = \frac{V_n}{\sqrt{3} * Z_k}$$

$$I_{k3}'' = \frac{208}{\sqrt{3} * 6,637} = 18,09 \text{ kA}$$

Corriente simétrica bifásica:

$$I_{k2}'' = \frac{\sqrt{3} * I_{k3}''}{2} = \frac{\sqrt{3} * 18,09}{2} = 15,66 \text{ kA}$$

3.8. Diagrama unifilar de la red principal

Utilizaremos la norma IEC para la realización de los siguientes diagramas unificables.

El primero es del punto de entrega del suministro de energía por parte de la Empresa Electrica, el segundo pertenece a las barras principales del Minex, en el cual se observan los interruptores de los diferentes departamentos y servicios exteriores dentro del edificio.

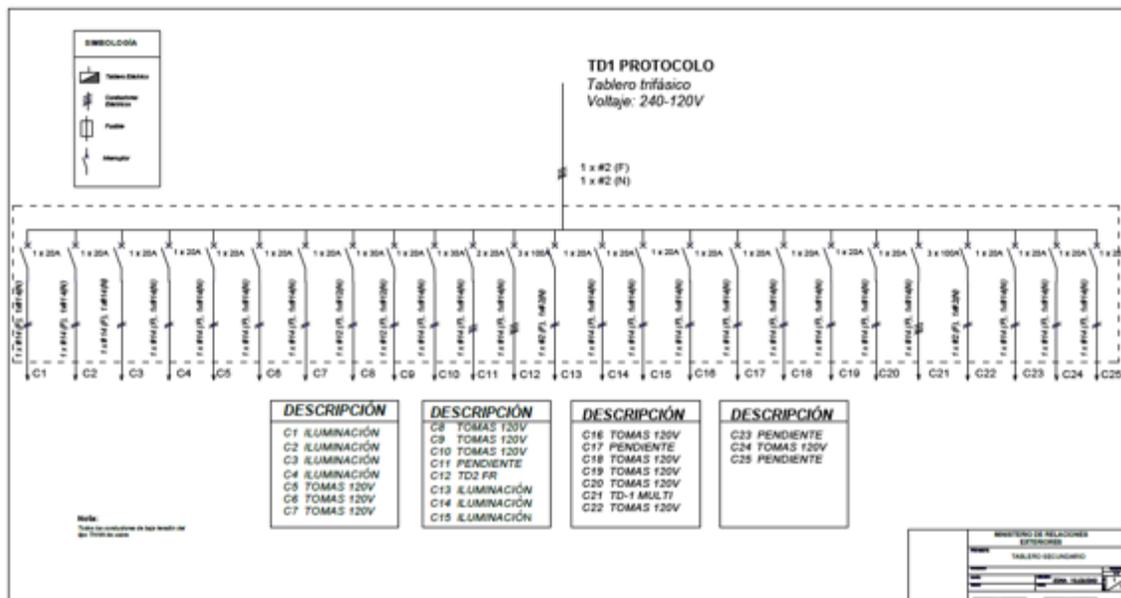
3.9. Diagramas unifilares de los tableros secundarios

Para una descripción más detallada de la carga instalada presentamos los diagramas unifilares secundarios.

3.9.1. Diagrama unifilar tablero Q1

El diagrama unifilar de Q1 protocolo consta de 25 circuitos que alimenta las cargas del departamento de Protocolo. Debido a su tamaño se dibuja como Q1 A y B, de la siguiente forma.

Figura 68. Diagrama unifilar tablero Q1

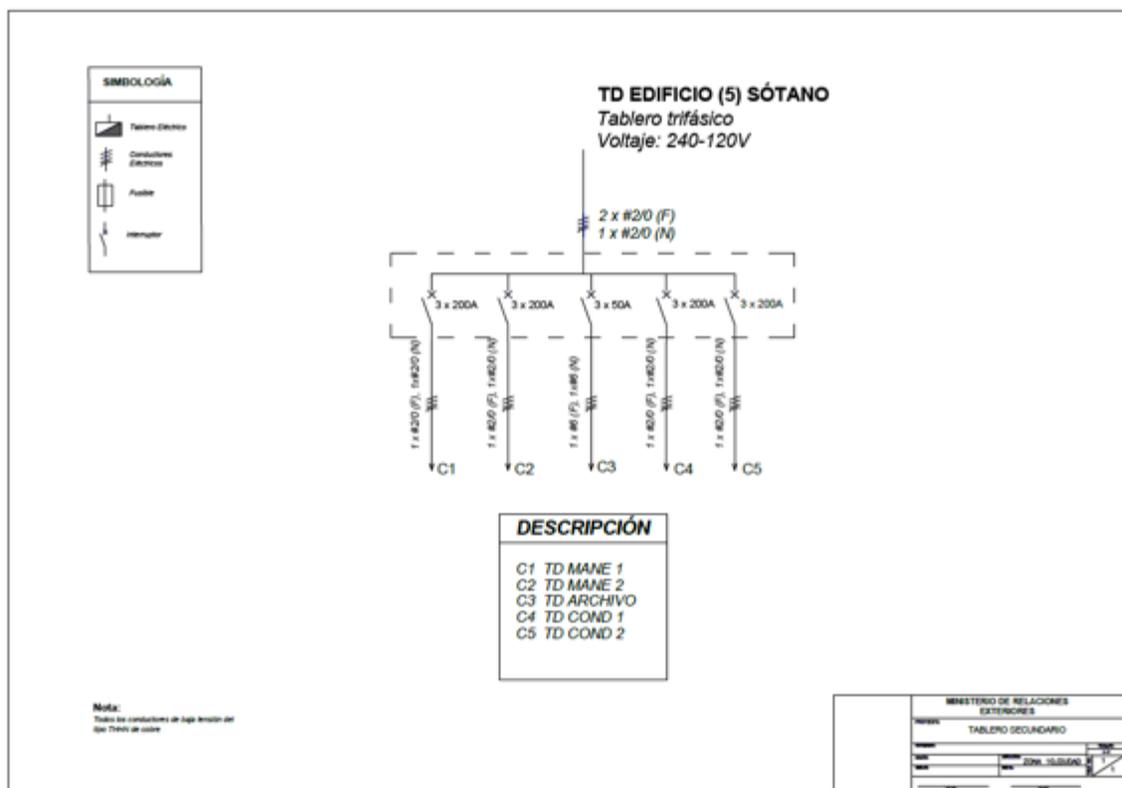


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.2. Diagrama unifilar tablero Q2

El diagrama unifilar de Q2 se ubica en el cuarto eléctrico principal y está conformado por 5 circuitos de la siguiente forma.

Figura 69. Diagrama unifilar tablero Q2

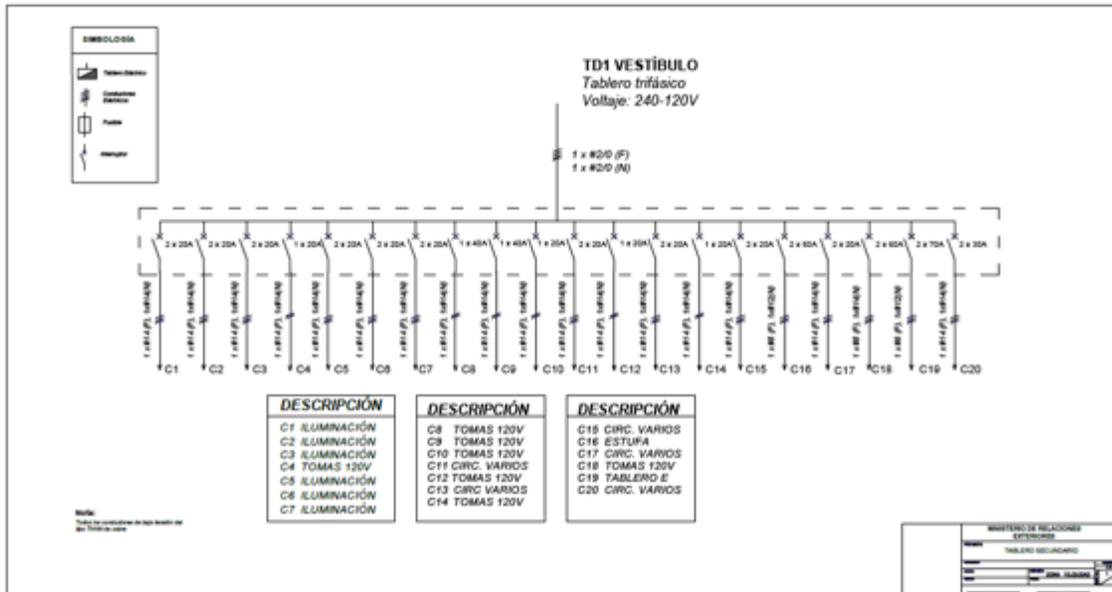


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.3. Diagrama unifilar tablero Q3

El diagrama unifilar de Q3 se encuentra en el edificio 1 y está conformado por 20 circuitos de la siguiente forma.

Figura 70. Diagrama unifilar tablero Q3

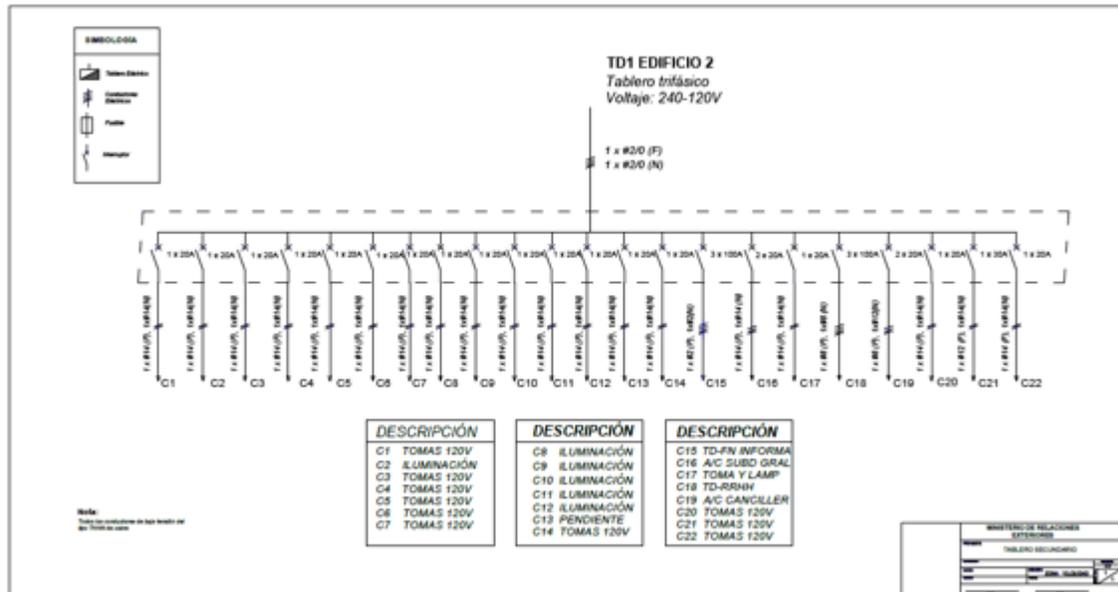


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.4. Diagrama unifilar tablero Q4

El diagrama unifilar de Q4 cubre el área de Informática y Despacho y está conformado por 22 circuitos de la siguiente forma.

Figura 71. Diagrama unifilar tablero Q4

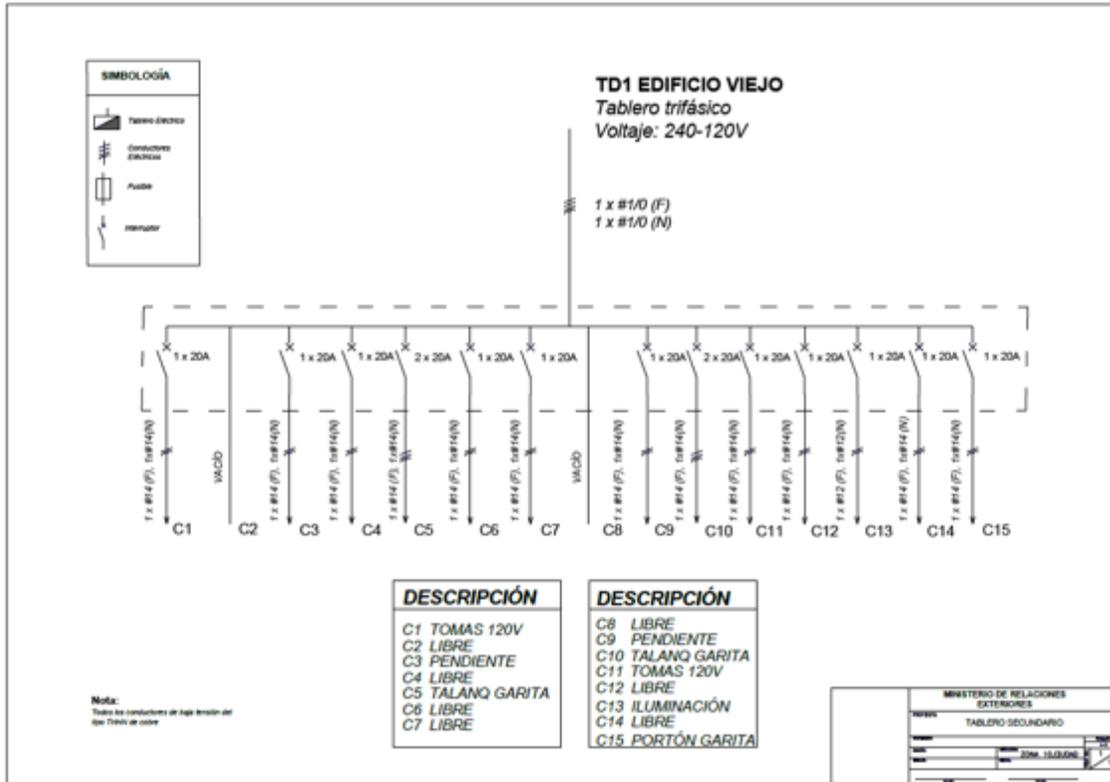


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.5. Diagrama unifilar tablero Q5

El diagrama unifilar de Q5 está en la ubicación denominada como Edificio Viejo y está conformado por 15 circuitos, de la siguiente forma.

Figura 72. Diagrama unifilar tablero Q5

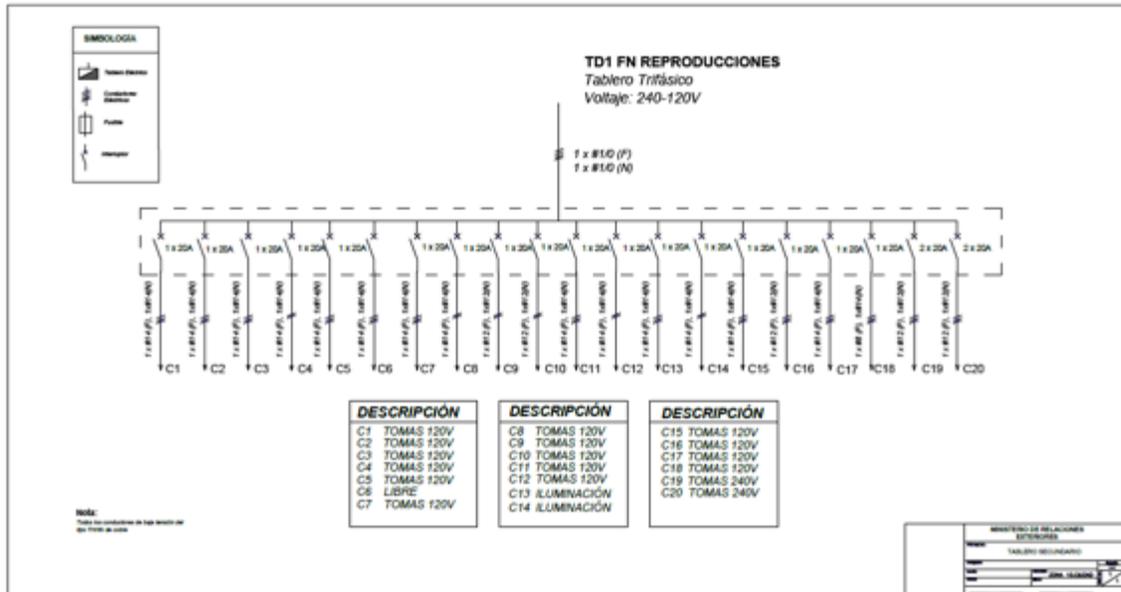


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.6. Diagrama unifilar tablero Q6

El diagrama Unifilar de Q6 está en la ubicación de Reproducciones y cuenta con 20 circuitos, de la siguiente forma.

Figura 73. Diagrama unifilar tablero Q6

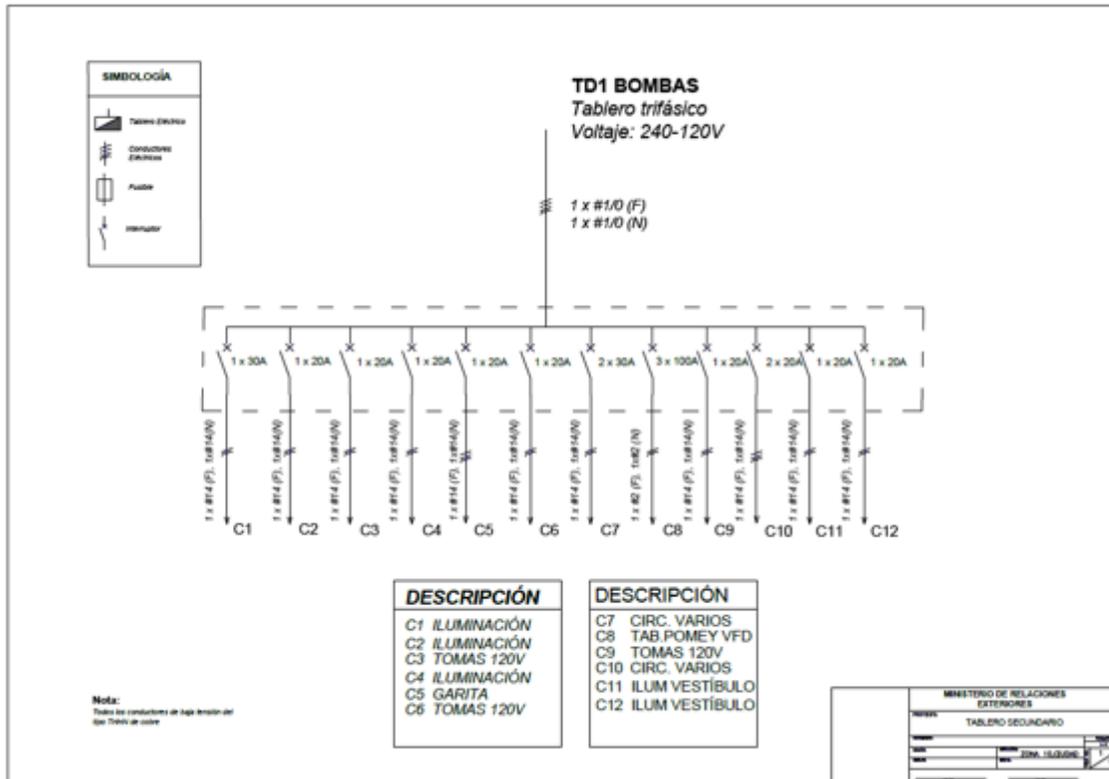


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.7. Diagrama unifilar tablero Q7

El diagrama unifilar de Q7 está en el cuarto de bombas y está conformado por 12 circuitos, de la siguiente forma.

Figura 74. Diagrama unifilar tablero Q7

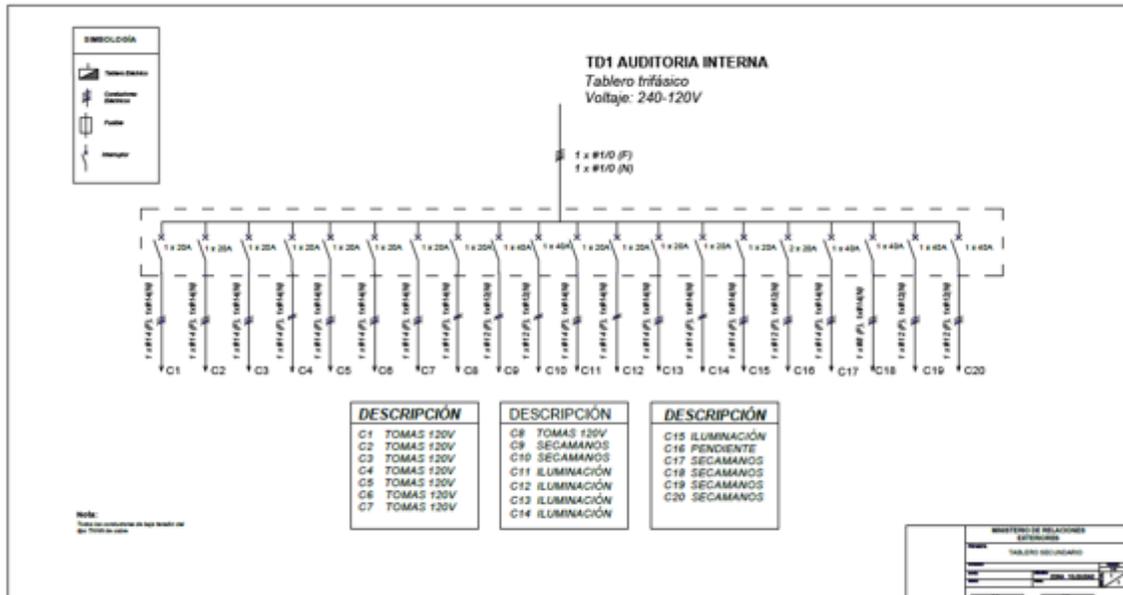


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.8. Diagrama unifilar tablero Q12

El diagrama unifilar de Q12 está en la ubicación denominada Auditoría Interna y está conformado por 20 circuitos de la siguiente forma.

Figura 75. Diagrama unifilar tablero Q12

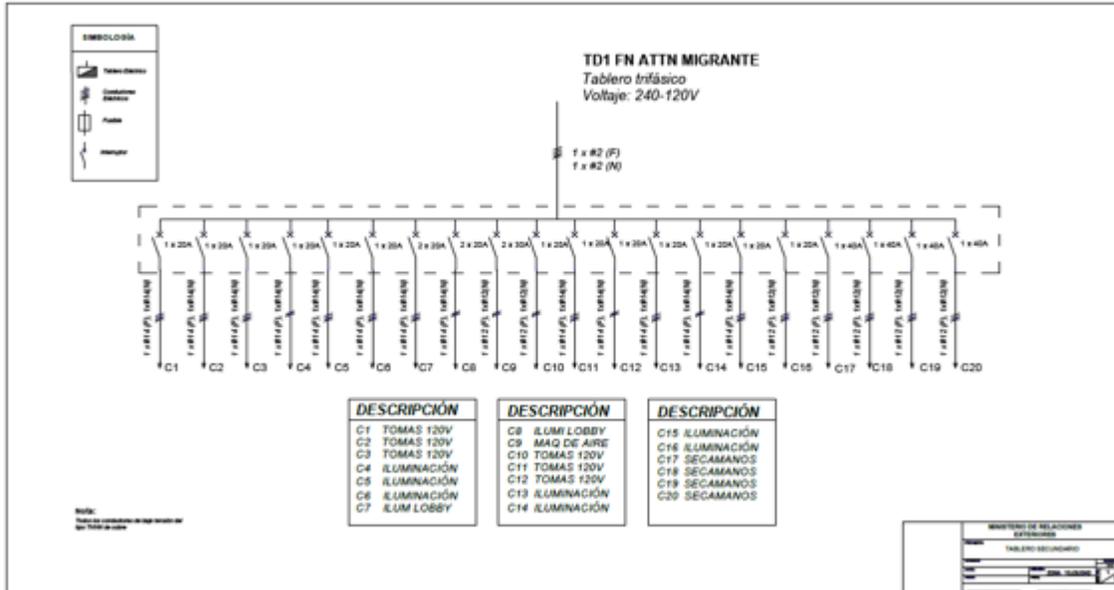


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.9. Diagrama unifilar tablero Q13

El diagrama Unifilar de Q13 está ubicado en el Edificio de Atención al Migrante y está conformado por 20 circuitos de la siguiente forma.

Figura 76. Diagrama unifilar tablero Q13

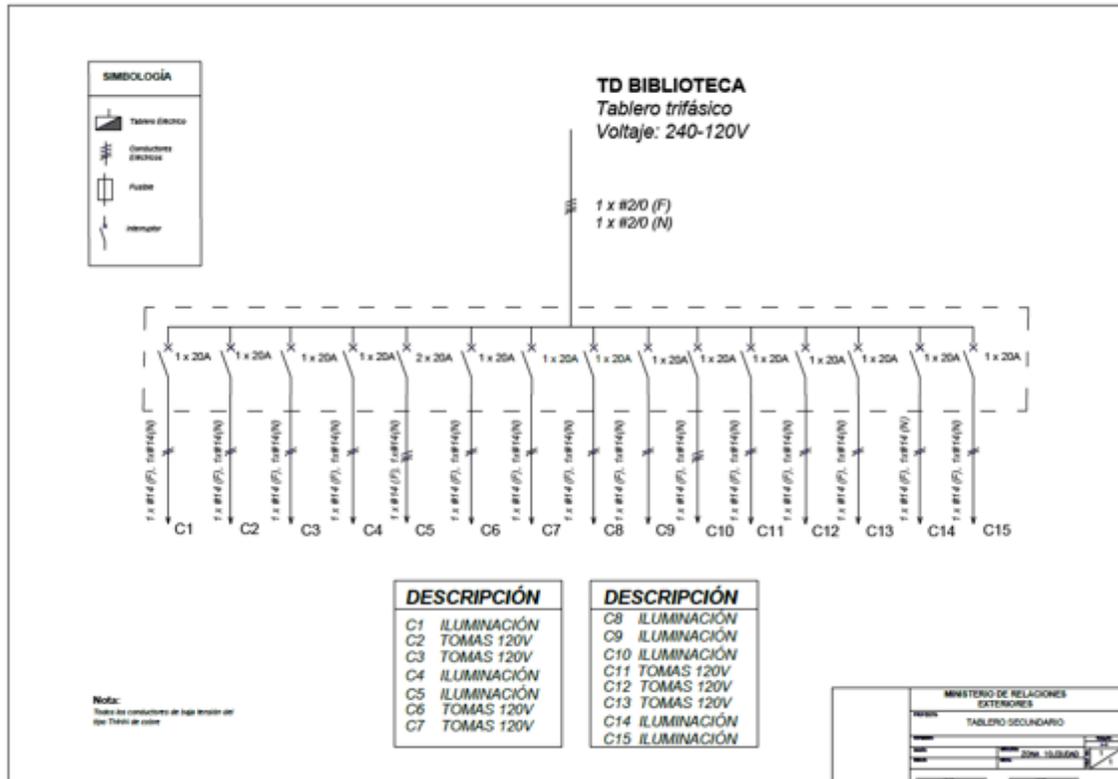


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.10. Diagrama unifilar tablero Q14

El diagrama unifilar de Q14 está en la Biblioteca y está conformado por 15 circuitos de la siguiente forma.

Figura 77. Diagrama unifilar tablero Q14

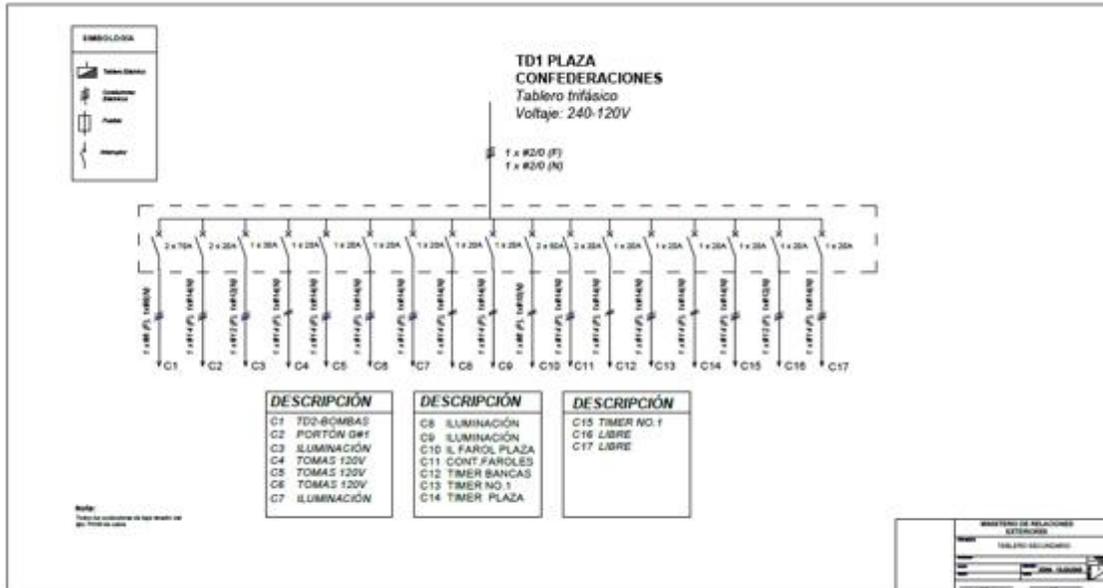


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.11. Diagrama unifilar tablero Q15

El diagrama Unifilar de Q15 está en la Plaza Confederaciones y está conformado por 17 circuitos de la siguiente forma.

Figura 78. Diagrama unifilar tablero Q15

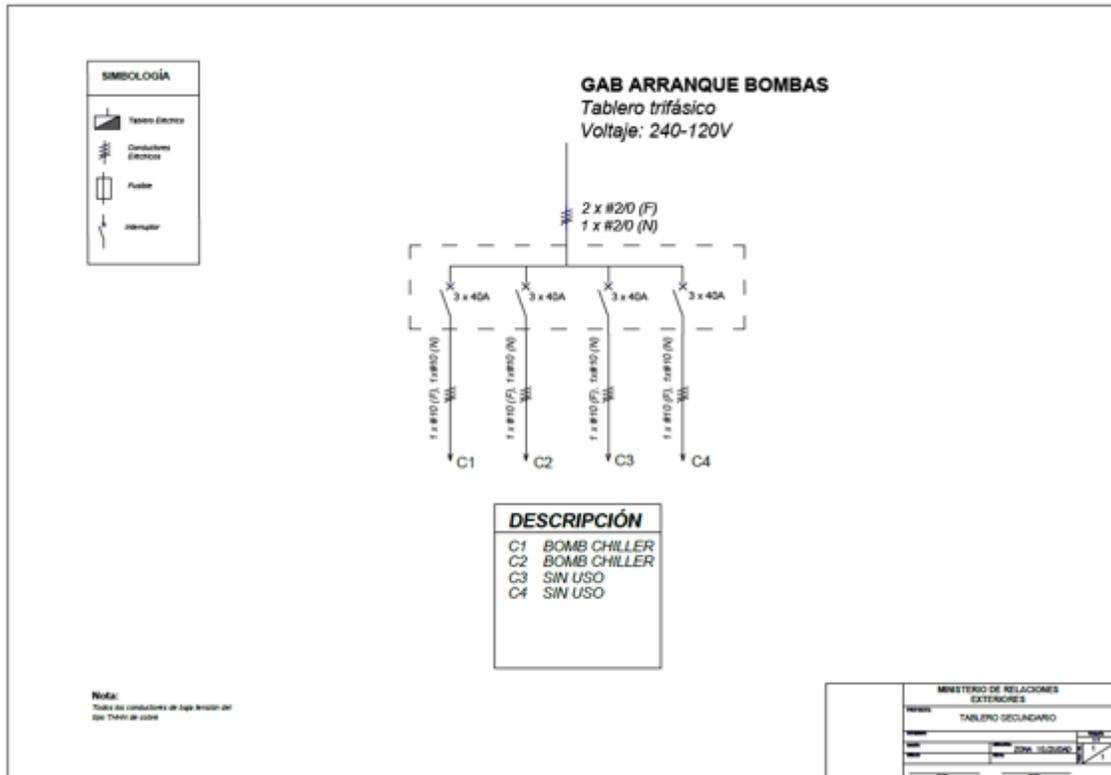


Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.9.12. Diagrama unifilar tablero Q16

El diagrama Unifilar de Q16 está ubicado en el Cuarto Eléctrico Principal y está conformado por 4 circuitos de los cuales únicamente están funcionando 2, que son los que se utilizan para arrancar las bombas del aire acondicionado central.

Figura 79. Diagrama unifilar tablero Q16



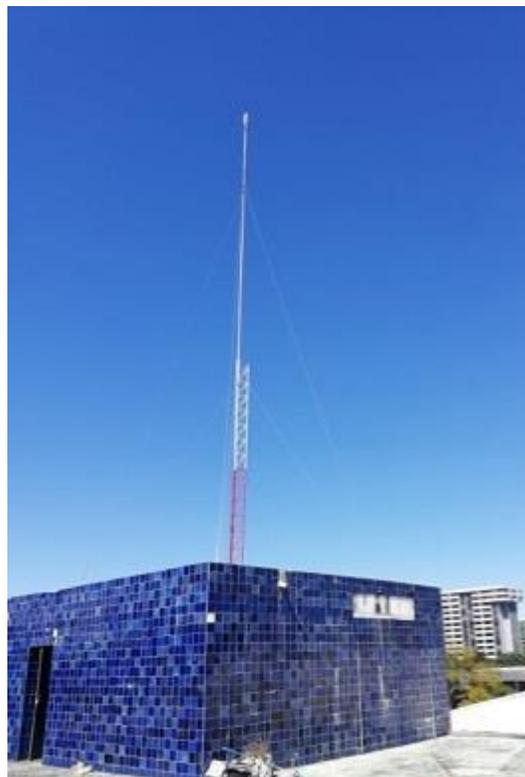
Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018.

3.10. Sistema de tierra física y pararrayos

Las instalaciones eléctricas del Minex se encuentra un transformador de conexión estrella en el secundario y con una configuración TN-S según la norma IEC 61324, en la cual se especifica que salen los 3 conductores de Fase, otro conductor para Neutro y un conductor de tierra física separado. El único punto en el que está unido la tierra con el neutro es en el transformador, con lo cual se determina que el neutro está sólidamente aterrizado.

El Minex cuenta con un pararrayos del tipo nimbus 60 de la marca CPT con un avance de cebado de 60 μ s y una máxima corriente de descarga soporta (10/350) de 2 00 kA y con una altura h=5 metros del edificio proporciona un radio de protección nivel 1 de 79 metros.

Figura 80. **Pararrayos del Minex**



Fuente: terraza del edificio del Minex.

3.10.1. Medición del punto de descarga del pararrayos

Para el sistema de puesta a tierra del pararrayos se revisó el bajante del mismo y las varillas de cobre que están de forma lineal instaladas en el jardín frente al parqueo del Edificio de Dirección General.

Para las mediciones se utilizó en el equipo Fluke *Earth Ground 1630* y se procedió de la siguiente forma: en la pared del Edificio se encuentra una barra de acoplamiento de la cual se tomaron las mediciones y otra medición directamente en la varilla de acero recubierta de cobre.

Tabla XV. **Mediciones de tierra física**

MEDICIONES	
FLUKE EARTH GROUND 1623	FLUKE EARTH GROUND 1621
	
0,053 Ω	0,70 Ω

Fuente: jardín lateral del edificio del Minex.

Las dos mediciones son excelentes valores para un sistema de puesta a tierra. Se utilizará el valor 0,70 Ω como resultado final para esta medición.

3.11. Cobertura del pararrayos

El pararrayos es de fabricación con tecnología de cebado y con un radio de cobertura de 105 metros. Se encuentra instalado en la terraza del edificio más alto de todo el terreno del Ministerio de Relaciones Exteriores, donde es Informática del edificio de la Dirección General, conocido como Edificio No. 2.

Figura 81. **Proyección de cobertura del pararrayos**



Fuente: Google Maps. Vista Minex.

<https://www.google.com/maps/place/Ministry+of+Foreign+Affairs/@14.6088023,-90.5145827,390m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x0:0x445abf766f7f99a6!8m2!3d14.609523!4d-90.5137842>. Consulta: octubre de 2019.

Como podemos observar en la figura anterior, el pararrayos que está instalado tiene un alcance de 105 metros de radio de cobertura a nivel 4 y alcanza a cubrir la mayor parte del terreno del Minex. Quedan expuestas las dos esquinas del lado derecho la parte inferior, que es el Edificio de Atención al Migrante, y la parte superior, conocida como el Edificio Viejo.

Tabla XVI. Inventario de luminaria por departamento

Tipo de Lampara		Liston 21 000 lm x tubo 32Watts		Tipo U 16 000 lm x tubo 32 Watts		CFL Empotradas Redondas, 16 000 lm x 36 Watts		Lampara tipo Cobra		Reflectores, CFL 150Watts		Ojos de Buey		Focos, 75 Watts	
Ubicación	Lux	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas	Instalado	Quemadas
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	183	156	2	54	4	15	0	2	0	0	0	5	0	3	0
EDIFICIO DE TRANSPORTES	175	0	0	5	0	29	0	0	0	3	0	0	0	0	0
SALON DE BIBLIOTECA	210	0	0	131	0	2	0	0	0	0	0	30	0	0	0
PROTOCOLO	222	128	1	14	0	9	0	0	0	0	0	55	0	0	0
ARCHIVO	124	368	0	41	0										
PASILLO BODEGA GENERAL	10	248	0	20	4	10	0							6	0
PASILLO FINANCIERA	190	200	0	61	0									4	0
SALON GUATEMALA	165	168	0	116	0									2	0
MULTILATERALES	122	292	0	20	0							16	0		
INFORMATICA	280	240	0			13	0							12	0
DIRECCION GENERAL	510	148	0			4	0					8	0		
SOBERANIA Y DOMINIO	480	120	0									24	0		
SALON SAENZ	140											25	0		
CLINICA	160	12	0												
SALA DE PRENSA	189	16	0	20	0	7	0								
DESPACHO CENTRAL	169	128	0	2	0									2	0
VICE-DESPACHO 1 & 2	261	60	0	5	0							18	0	4	0
EXTERIOR		148	1	14	0	38	4	11	0	27	3				
TOTAL		2 964	4	503	8	127	4	13	0	30	3	181	0	33	0

Fuente: elaboración propia, mediante conteo de lámparas en el edificio del Minex.

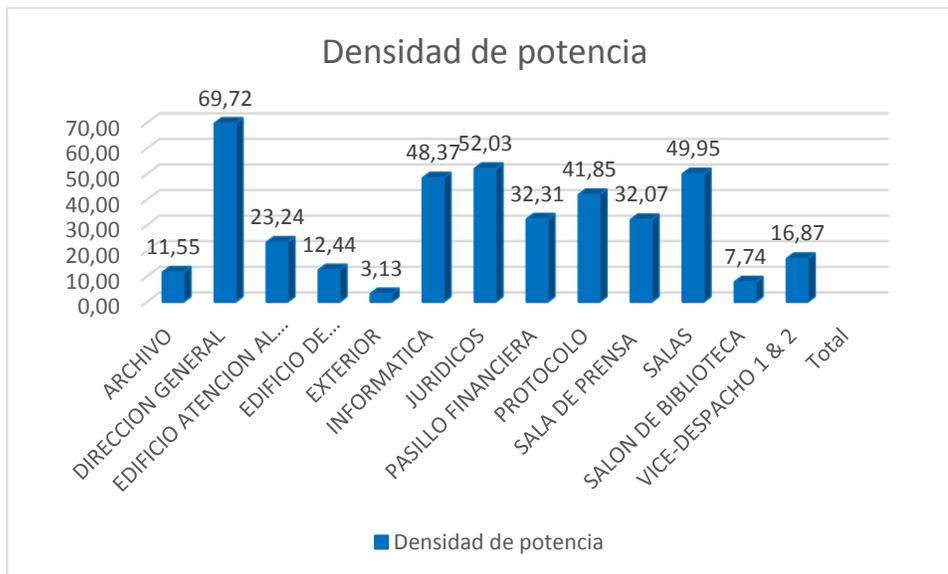
Tabla XVII. **Densidad de potencia por departamento**

UBICACION	Liston 2100 lm 32watts	Liston 1,350 lm 17watts	CFL 2100 lm 32Watts	Lampara tipo cobra	Reflectores	Ojos de buey 50	Foco 75 Watts	Total Watts	Area	Densidad de potencia
ARCHIVO	368	41	0	0	0	0	0	12473	1080	11.55
DIRECCION GENERAL	332	2	4	0	0	52	0	13386	192	69.72
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	228	58	15	2	0	5	3	9297	400	23.24
EDIFICIO DE TRANSPORTES	80	17	29	0	7	0	0	4477	360	12.44
EXTERIOR	152	14	54	11	38	0	0	10960	3500	3.13
INFORMATICA	276	0	13	0	3	0	12	10448	216	48.37
JURIDICOS	372	38	10	0	0	0	6	13320	256	52.03
PASILLO FINANCIERA	200	62	0	0	0	0	4	7754	240	32.31
PROTOCOLO	264	26	9	0	0	55	0	11928	285	41.85
SALA DE PRENSA	168	24	7	0	0	0	2	6158	192	32.07
SALAS	460	136	0	0	0	16	2	17982	360	49.95
SALON DE BIBLIOTECA	0	131	2	0	0	30	0	3791	490	7.74
VICE-DESPACHO 1 & 2	60	7	0	0	0	18	4	3239	192	16.87
Total	2960	556	143	13	48	176	33	125213		

Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XV

Se tiene un total de 86,778 Watts instalados en iluminación.

Figura 82. **Densidad de potencia de luminarias por departamento**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XVI.

Tabla XVIII. **Consumo diario por iluminación**

UBICACION	Horas	Total, watts	Total, kWh/diario
ARCHIVO	8	12 473	99,78
DIRECCION GENERAL	8	13 386	107,09
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	8	9 297	74,38
EDIFICIO DE TRANSPORTES	8	4 477	35,82
EXTERIOR	8	10 960	87,68
INFORMATICA	8	10 448	83,58
JURIDICOS	8	13 320	106,56
PASILLO FINANCIERA	8	7 754	62,03
PROTOCOLO	8	11 928	95,42
SALA DE PRENSA	8	6 158	49,26
SALAS	8	17 982	143,86
SALON DE BIBLIOTECA	8	3 791	30,33
VICE-DESPACHO 1 & 2	8	3 239	25,91
Total			1 001,70

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla anterior, todos los departamentos tienen un día laboral con una duración de 8 horas, con pocas oficinas que se quedan un corto periodo de tiempo después del horario laboral aproximadamente una hora lo máximo, según comentarios del personal del Minex.

En promedio el consumo por iluminación en el periodo laboral se sitúa en un valor de 1 001,70 kW para la iluminación de las oficinas y diferentes áreas del edificio.

Se debe tomar en cuenta que el edificio cuenta con buena iluminación de forma natural ya que cuenta con ventanas en su mayor parte de paredes exteriores, pero también tiene muchas oficinas que se encuentran dentro de pasillos donde la iluminación natural es completamente nula.

Tabla XIX. **Tomacorrientes utilizados en el edificio**

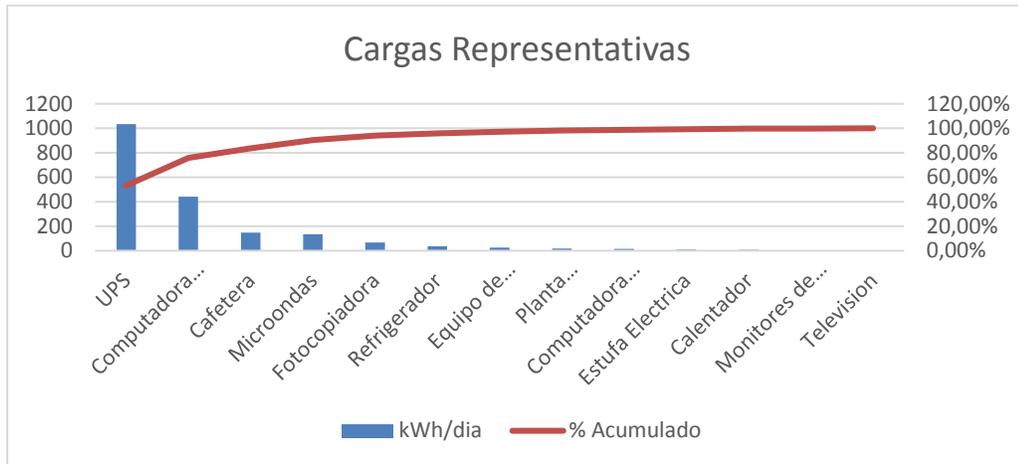
Equipo	Cantidad	Total, Watts	Horas/día	kWh/día
Cafetera	45	1 090	3	147,15
Calentador	3	2 300	1	6,9
Computadora Escritorio	324	170	8	440,64
Computadora Laptop	24	75	8	14,4
Equipo de Reproducción	4	1 585	4	25,36
Estufa eléctrica	2	5 000	1	10
Fotocopiadora	30	560	4	67,2
Microondas	45	1 500	2	135
Monitores de Seguridad	6	24	24	3,456
Planta Telefónica	1	750	24	18
Refrigerador	18	85	24	36,72
Televisión	8	150	2	2,4
UPS	246	350	12	1 033,2
Total				1 940,43

Fuente: elaboración propia, mediante conteo de dispositivos instalados en el edificio del Minex.

La cantidad de tomacorrientes que se encuentran conectados tienen un consumo diario de 1 940,43 kWh.

Los equipos que están conectados a tomacorrientes como cafeteras, computadoras de escritorio y los UPS's son los que tienen el mayor consumo de energía, por la cantidad de unidades y no por su capacidad.

Figura 83. **Cargas que contribuyen al consumo diario de energía**



Fuente: elaboración propia, mediante datos de la tabla XVIII.

Tabla XX. **Equipo de mayor demanda de energía**

Equipo	Cantidad	Total, Watts	Horas/día	kWh/día
A/C	60	1 200	8	576
Bombas de Agua	3	3 750	12	135
A/C central	1	85 000	9	765
Extractor de Aire Cocina	1	2 500	2	5
Extractor de olores	1	1 200	1	1,2
Manejadoras de A/C	15	900	8	108
Portón Eléctrico	8	2 235	0.5	8,94
Secamanos	15	1 200	5	90
Total				1 689,14

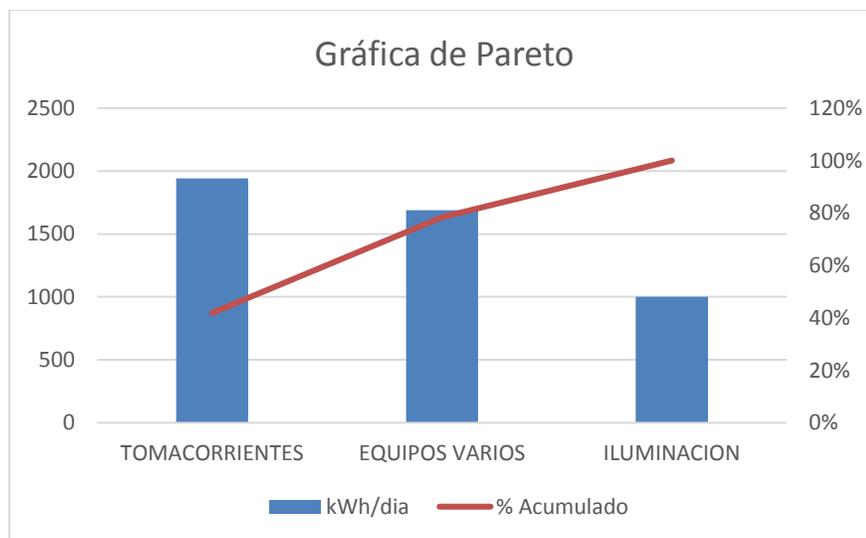
Fuente: elaboración propia.

Los equipos que contienen resistencias, motores, tienen un consumo diario de 1 689,14 kWh.

Las gráficas de Pareto se utilizan para la toma de decisiones sobre algún problema que esté ocasionando algún tipo de situación adversa.

La carga en el Minex se ha distribuido en 3 secciones para determinar la gráfica de Pareto.

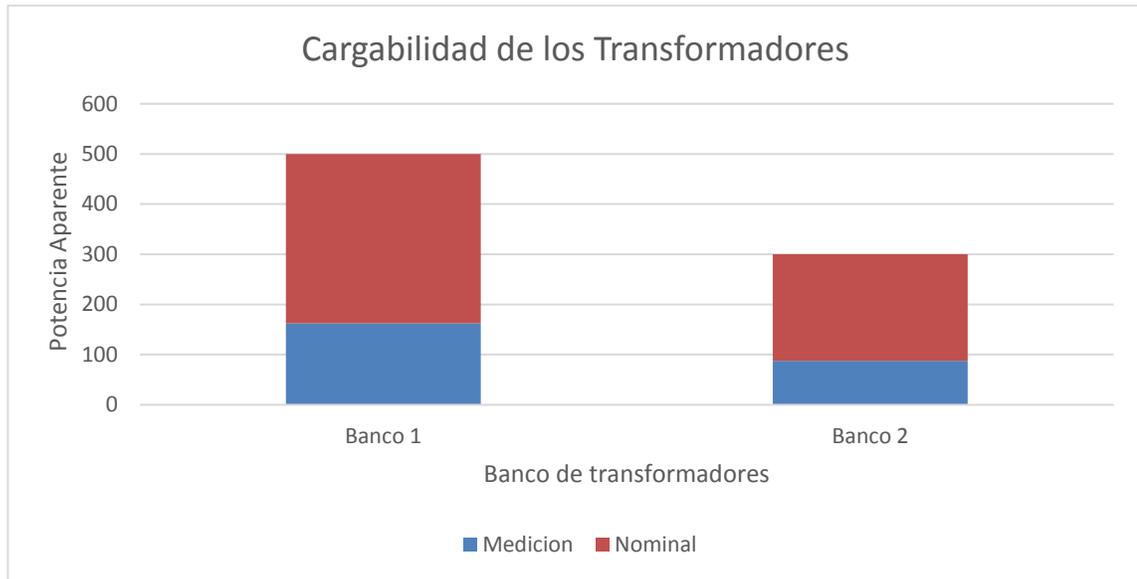
Figura 84. **Pareto entre cargas del edificio**



Fuente: elaboración propia, con datos de tablas anteriores.

Como se observa en la gráfica los equipos que están utilizando más consumo son los elementos resistivos y motorizados en el Minex, según la gráfica de caracterización de cargas, la iluminación es únicamente el 40 % el resto está distribuido entre climatización y equipos conectados a tomacorrientes varios.

Figura 85. **Cargabilidad de los transformadores**



Fuente: elaboración propia.

La cargabilidad se refiere a la cantidad de carga instalada comparada con su capacidad nominal de los transformadores, según la gráfica anterior, el banco de transformadores no. 1 es capaz de suministrar energía a toda la carga instalada del Minex.

El uso de la energía eléctrica está presente prácticamente en todo el Minex, como se mencionó; sin embargo, hay un número reducido de equipos en los que se concentra la mayor parte del consumo total de energía, tal y como se demostró en las graficas de Pareto.

4. CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL MINEX

El Minex cuenta con un contador de energía eléctrica que registra el consumo diario de los dos bancos de transformadores que suministran de energía a los equipos, bombas y equipos de aire acondicionado.

El historial de consumo energético se utiliza como línea base para comparar entre el consumo anterior, actual y la tendencia del consumo futuro.

No solo es importante lo que consumen los aparatos eléctricos sino también la calidad de energía que se les proporciona. Para ello se utilizó un medidor de calidad de energía que registra todos los datos obtenidos en los dos bancos de transformadores, de los cuales se presentan las gráficas y un resumen de la información después de validarla con las normas aplicables de la Norma Técnica del Servicio de Distribución para cada uno de los parámetros evaluados.

4.1. Análisis del histórico de facturación

Para el análisis del consumo energético fue necesario tener a la vista los históricos de las facturas emitidas por la Empresa Electrica de Guatemala.

Se tienen a la vista los datos de consumo de energía durante los años 2018 y 2019, los cuales presentan un comportamiento muy similar entre meses. Por tanto, se concluye que el Minex ha mantenido la capacidad eléctrica instalada y no presenta crecimiento alguno.

Figura 86. **Datos de la factura**

Contador No.	K22755
Correlativo	999607
Tarifa	BTDFP
Descripción	Precios Q
Cargo fijo por cliente	Q 732,203227
Energía (Sin IVA)	Q 0,847378
Demanda Registrada (Sin IVA)	Q 25,159099
Potencia Contratada (Sin IVA)	Q 10,855422
Tasa Municipal A.P.	13 %

Fuente: elaboración propia, con factura de electricidad del Minex.

Tabla XXI. **Histórico de facturación del Minex**

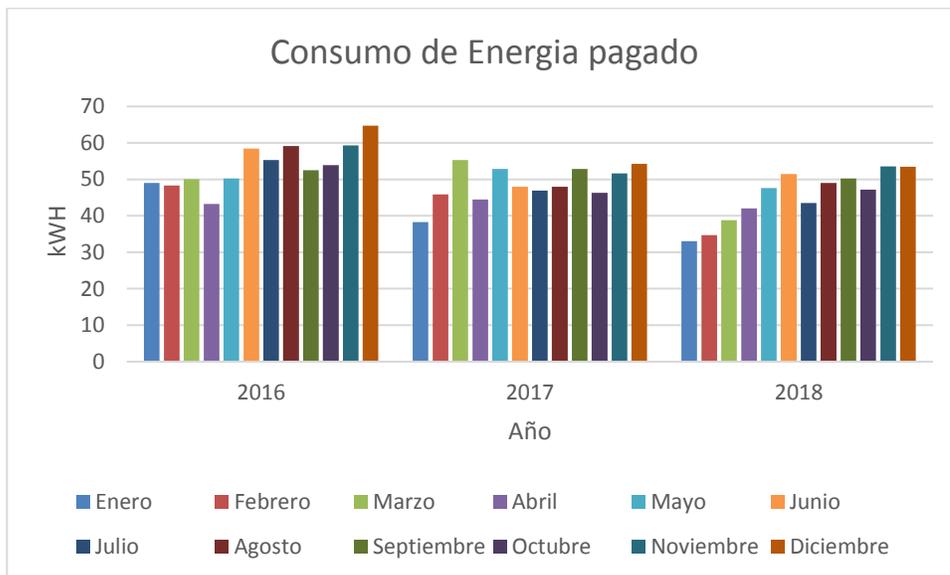
Año	Mes	Cargo Fijo Por Cliente	Energía kWh	Energía sin IVA	Demanda Registrada kW	Potencia Contratada	Total Cargos Sin IVA	Tasa Municipal A.P.	Total Factura con Iva
2016	Enero	Q 732.20	49000	Q 41,521.52	318	580	Q 56,550.46	Q 7,351.56	Q 70,688.08
	Febrero	Q 732.20	48300	Q 40,928.36	322	580	Q 56,057.94	Q 7,287.53	Q 70,072.42
	Marzo	Q 732.20	50050	Q 42,411.27	320	580	Q 57,490.53	Q 7,473.77	Q 71,863.16
	Abril	Q 732.20	43237	Q 36,638.08	315	580	Q 51,591.55	Q 6,706.90	Q 64,489.43
	Mayo	Q 732.20	50255	Q 42,584.56	317	580	Q 57,588.34	Q 7,486.48	Q 71,985.43
	Junio	Q 732.20	58450	Q 49,529.24	321	580	Q 64,633.66	Q 8,402.38	Q 80,792.08
	Julio	Q 732.20	55300	Q 46,860.00	316	580	Q 61,838.63	Q 8,039.02	Q 77,298.28
	Agosto	Q 732.20	59150	Q 50,122.41	301	580	Q 64,723.65	Q 8,414.07	Q 80,904.56
	Septiembre	Q 732.20	52500	Q 44,487.35	325	580	Q 59,692.40	Q 7,760.01	Q 74,615.50
	Octubre	Q 732.20	53900	Q 45,673.67	311	580	Q 60,526.50	Q 7,868.45	Q 75,658.13
	Noviembre	Q 732.20	59325	Q 50,270.70	316	580	Q 65,249.32	Q 8,482.41	Q 81,561.65
	Diciembre	Q 732.20	64750	Q 54,867.73	322	580	Q 69,997.30	Q 9,099.65	Q 87,496.63
2017	Enero	Q 732.20	40488	Q 34,308.64	313	580	Q 49,211.79	Q 6,397.53	Q 61,514.73
	Febrero	Q 732.20	45850	Q 38,852.28	300	580	Q 53,428.36	Q 6,945.69	Q 66,785.45
	Marzo	Q 732.20	55300	Q 46,860.00	304	580	Q 61,536.72	Q 7,999.77	Q 76,920.90
	Abril	Q 732.20	44450	Q 37,665.95	298	580	Q 52,191.71	Q 6,784.92	Q 65,239.64
	Mayo	Q 732.20	52850	Q 44,783.93	312	580	Q 59,661.91	Q 7,756.05	Q 74,577.39
	Junio	Q 732.20	47950	Q 40,631.78	320	580	Q 55,711.03	Q 7,242.43	Q 69,638.79
	Julio	Q 732.20	46900	Q 39,742.03	288	580	Q 54,016.20	Q 7,022.11	Q 67,520.25
	Agosto	Q 732.20	47950	Q 40,631.78	321	580	Q 55,736.19	Q 7,245.71	Q 69,670.24
	Septiembre	Q 732.20	52850	Q 44,783.93	329	580	Q 60,089.62	Q 7,811.65	Q 75,112.02
	Octubre	Q 732.20	46350	Q 39,275.97	312	580	Q 54,153.96	Q 7,040.01	Q 67,692.45
	Noviembre	Q 732.20	51650	Q 43,767.07	301	580	Q 58,368.31	Q 7,587.88	Q 72,960.39
	Diciembre	Q 732.20	54276	Q 45,992.29	323	580	Q 61,147.03	Q 7,949.11	Q 76,433.78
2018	Enero	Q 732.20	33025	Q 27,984.66	322	580	Q 43,114.24	Q 5,604.85	Q 53,892.80
	Febrero	Q 732.20	34744	Q 29,441.30	322	580	Q 44,570.88	Q 5,794.21	Q 55,713.60
	Marzo	Q 732.20	38803	Q 32,880.81	324	580	Q 48,060.70	Q 6,247.89	Q 60,075.88
	Abril	Q 732.20	42024	Q 35,610.21	322	580	Q 50,739.79	Q 6,596.17	Q 63,424.74
	Mayo	Q 732.20	47659	Q 40,385.19	322	580	Q 55,514.77	Q 7,216.92	Q 69,393.46
	Junio	Q 732.20	51436	Q 43,585.73	320	580	Q 58,664.99	Q 7,626.45	Q 73,331.24
	Julio	Q 732.20	43502	Q 36,862.64	319	580	Q 51,916.74	Q 6,749.18	Q 64,895.92
	Agosto	Q 732.20	49034	Q 41,550.33	320	580	Q 56,629.59	Q 7,361.85	Q 70,786.99
	Septiembre	Q 732.20	50271	Q 42,598.54	322	580	Q 57,728.12	Q 7,504.66	Q 72,160.15
	Octubre	Q 732.20	47177	Q 39,976.75	315	580	Q 54,930.22	Q 7,140.93	Q 68,662.77
	Noviembre	Q 732.20	53530	Q 45,360.14	323	580	Q 60,503.81	Q 7,865.50	Q 75,629.76
	Diciembre	Q 732.20	53427	Q 45,272.86	321	580	Q 60,367.27	Q 7,847.75	Q 75,459.09
2019	Enero	Q 732.20	47950	Q 40,631.78	175	580	Q 52,051.69	Q 6,766.72	Q 65,064.62
	Febrero	Q 732.20	47250	Q 40,038.61	284	580	Q 54,199.56	Q 7,045.94	Q 67,749.45
	Marzo	Q 732.20	58450	Q 49,529.24	312	580	Q 64,394.65	Q 8,371.30	Q 80,493.31
	Abril	Q 732.20	56700	Q 48,046.33	322	580	Q 63,175.91	Q 8,212.87	Q 78,969.89
Total			1986063	Q 644,216.50	312	580	Q725,940.28	Q94,372.24	Q 2,847,195.05

Fuente: elaboración propia, con histórico de la facturación de electricidad.

En la tabla anterior se muestra una tendencia horizontal, la cual evidencia que el Minex no ha obtenido mayores cambios en el consumo a excepción de algunos meses, donde es probable que haya habido eventos o reuniones continuas que propiciaron un leve aumento de consumo de electricidad. En otros

casos se presentó un leve decremento que puede deberse a que el personal se encontraba de comisión en el extranjero o tomó vacaciones.

Figura 87. **Energía consumida según facturación**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XX.

Tabla XXII. **Costo anual de energía sin IVA**

Año	Energía anual kWh	Costo Energía
2016	644 217	Q 545 894,89
2017	586 864	Q 497 295,64
2018	544 632	Q 461 509,17
2019	210 350	Q 178 245,96

Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XX.

4.2. Análisis económico proyectado

Para la proyección del costo de electricidad anual se utilizan los datos de las mediciones y el historial de facturas por el servicio de electricidad.

Tabla XXIII. **Proyección de consumo de energía durante un día laboral**

CONSUMO POR DIA LABORAL		
Actividad	Horario	Kwh
Jornada Laboral	8:00 - 4:00	1 238
Horario Extra	4:00 - 21:00	574
Horario Nocturno	21:00 - 7:59	527
Total		2 339

Fuente: elaboración propia.

Figura 88. **Potencia activa día laboral**



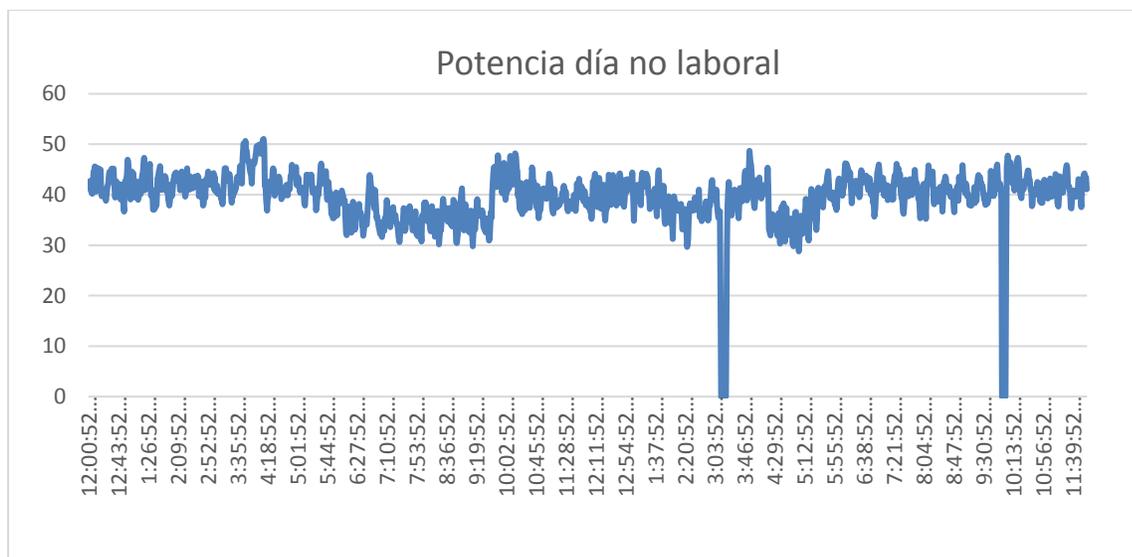
Fuente: elaboración propia, empleando Power Log 5,6.

Tabla XXIV. **Proyección de consumo de energía durante un día no laboral**

CONSUMO DIA NO LABORAL	
Horario	KWh
8:00 - 4:00	633
4:00 - 21:00	254
21:00 - 7:59	188
Total	1 075

Fuente: elaboración propia.

Figura 89. **Potencia para día no laboral**



Fuente: elaboración propia, empleando Power Log 5,6.

Tabla XXV. **Proyección de consumo de energía según mediciones**

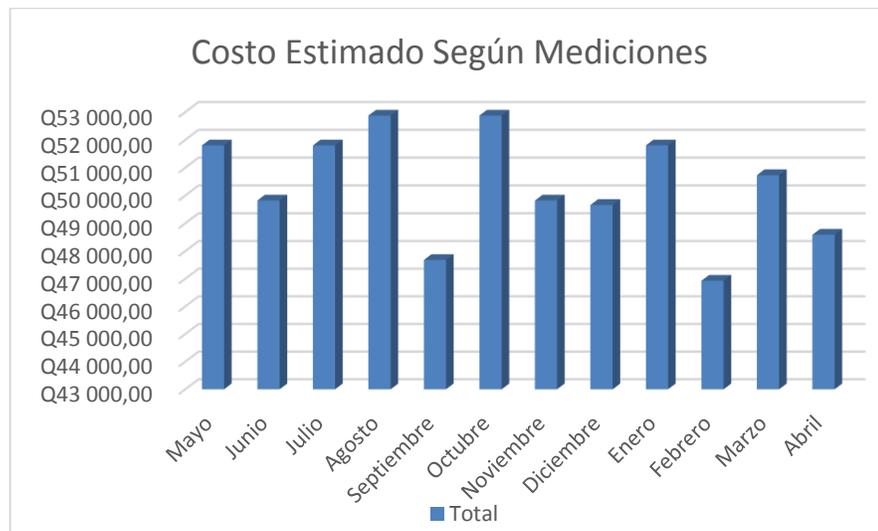
Mes	Día laboral	Día No laboral	Día Laboral	Día No laboral	Total
Mayo	22	9	Q 43 604,38	Q 8 198,38	Q 51 802,76
Junio	21	9	Q 41 622,36	Q 8 198,38	Q 49 820,74
Julio	22	9	Q 43 604,38	Q 8 198,38	Q 51 802,76
Agosto	23	8	Q 45 586,39	Q 7 287,45	Q 52 873,85
Septiembre	19	11	Q 37 658,33	Q10 020,24	Q 47 678,57
Octubre	23	8	Q 45 586,39	Q 7 287,45	Q 52 873,85
Noviembre	21	9	Q 41 622,36	Q 8 198,38	Q 49 820,74
Diciembre	20	11	Q 39 640,34	Q10 020,24	Q 49 660,59
Enero	22	9	Q 43 604,38	Q 8 198,38	Q 51 802,76
Febrero	20	8	Q 39 640,34	Q 7 287,45	Q 46 927,79
Marzo	21	10	Q 41 622,36	Q 9 109,31	Q 50 731,67
Abril	19	12	Q 37 658,33	Q10 931,18	Q 48 589,50

Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron los datos obtenidos por las mediciones para realizar una proyección del costo de energía durante los próximos meses.

Para la realización de la tabla XXIV se contabilizaron los días laborales y no laborales que tiene un mes calendario. Según la gráfica de carga de un día laboral y no laboral se obtuvo el dato de consumo de energía, el cual se multiplicó por el costo en quetzales del kwh para obtener la siguiente gráfica.

Figura 90. **Costo por consumo de energía eléctrica según mediciones**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XXIV.

Se realiza una comparación de datos de las mediciones y lo facturado.

Tabla XXVI. **Comparación de facturación versus mediciones**

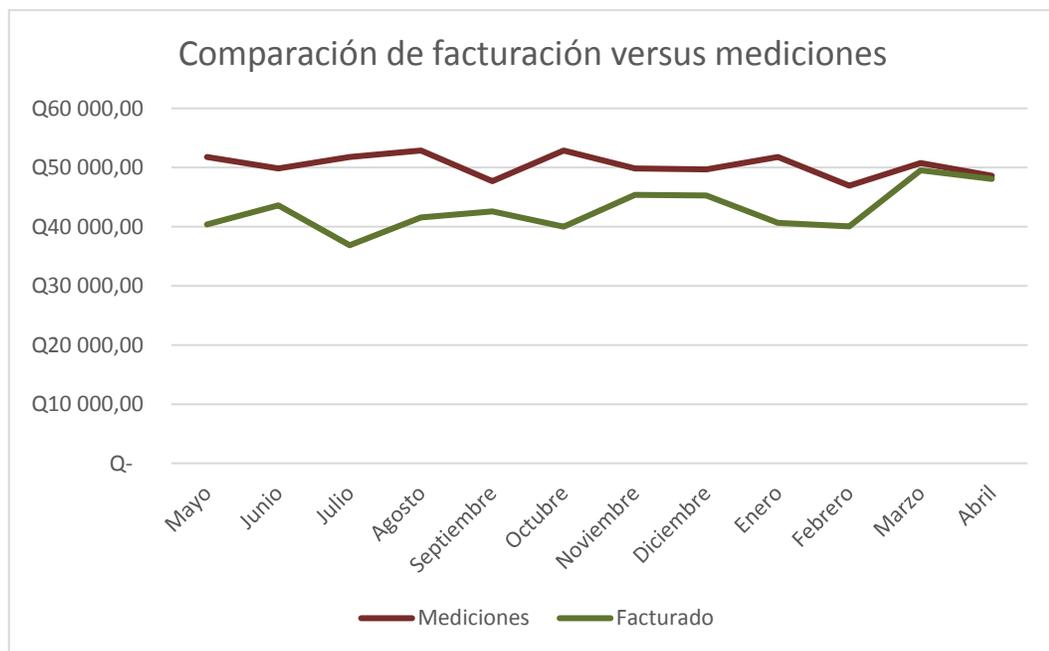
Mes	Mediciones	Facturado
Mayo	Q 51 802,76	Q 40 385,19
Junio	Q 49 820,74	Q 43 586,58
Julio	Q 51 802,76	Q 36 862,64
Agosto	Q 52 873,85	Q 41 549,49
Septiembre	Q 47 678,57	Q 42 598,54
Octubre	Q 52 873,85	Q 39 976,75
Noviembre	Q 49 820,74	Q 45 360,14
Diciembre	Q 49 660,59	Q 45 272,86
Enero	Q 51 802,76	Q 40 631,78
Febrero	Q 46 927,79	Q 40 038,61
Marzo	Q 50 731,67	Q 49 529,24
Abril	Q 48 589,50	Q 48 046,33

Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla XX y XXIV.

En la tabla XXV observamos cómo el costo proyectado por medio de las mediciones para los meses de mayo 2018 a abril 2019 es mayor que lo facturado, lo que significa que es indispensable realizar mejoras de ahorro y utilizar la energía de forma más eficiente.

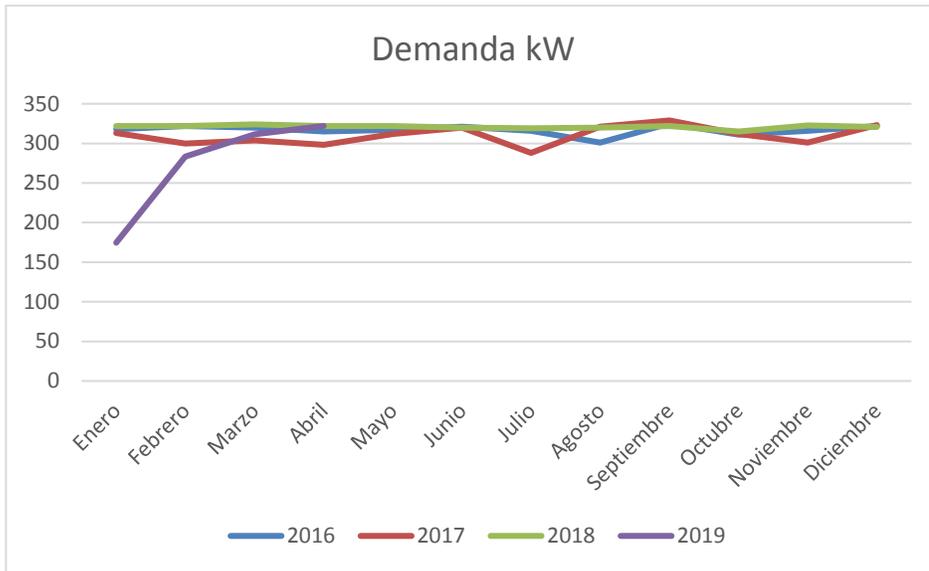
Estos valores no incluyen IVA ni los cargos fijos que pueden resultar en costos más altos en la factura del servicio eléctrico.

Figura 91. Comparación de facturación versus mediciones



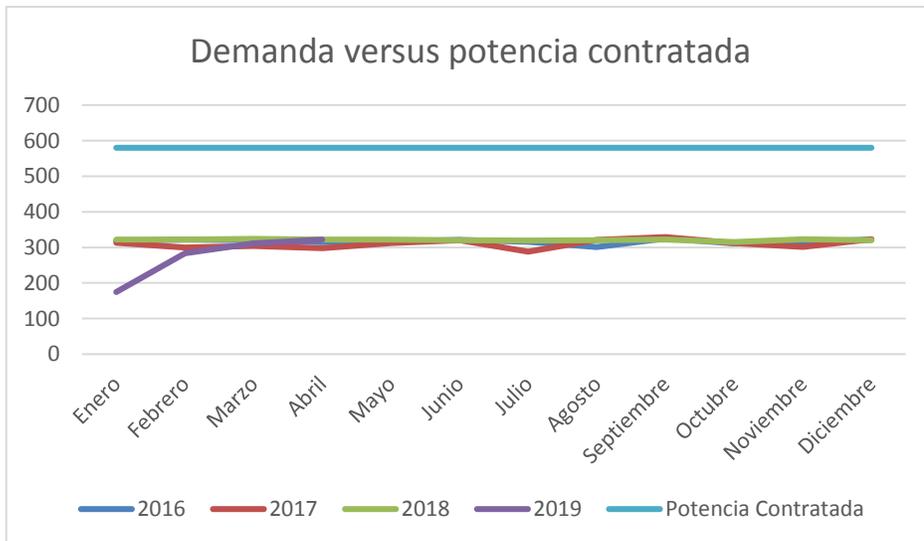
Fuente: elaboración propia, empleando datos de tabla XXV.

Figura 92. **Demanda registrada del Minex**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XX.

Figura 93. **Demanda registrada versus potencia contratada**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XX.

En la gráfica anterior se observa una potencia contratada muy elevada comparada con la demanda de potencia del Minex. Durante los últimos 4 años la demanda no ha rebasado del 50 % de la potencia contratada, la cual tiene un valor de Q 10,855422, se puede concluir que una forma de ahorro en el recibo de energía eléctrica es reducir la potencia contratada a un valor de 400 kW, lo que representa un ahorro de Q 23 447,65 anuales.

4.3. Generalidad de la medición en el edificio

Para la medición en el edificio se dejó conectado el equipo de medición por un periodo de 165 horas, que abarca días laborales y días no laborales.

El equipo se instaló de manera correcta de acuerdo con su diagrama de conexiones. Se colocaron las sondas de corriente en los cables que salen del interruptor principal de 2 000 amperios y los conectores tipo lagarto en la toma de referencia de voltaje. El mismo procedimiento fue para el neutro y la tierra física.

Se procedió a la verificación de voltaje entre línea a línea y línea a tierra para conocer la conexión del sistema que viene desde el transformador, que se determinó que es 208-120 V conexión estrella. Posteriormente, se visualizaron los fasores para tener una secuencia de fases positiva en contra de las manecillas del reloj y que cada fasor de corriente corresponda con el de voltaje.

4.3.1. Desbalance de tensión según norma NTSD

Según la norma NTSD, proporciona valores aceptables de desbalance de la tensión en servicios trifásicos sobre la base de comparación de los valores

eficaces (RMS) de tensión de cada fase, medidos en el punto de entrega y registradas en cada intervalo de medición (k).

$$\Delta DTD (\%) = \frac{3 * (v_{max} - V_{min})}{(v_a + v_b + v_c)} * 100$$

Los valores normalizados los encontramos en la siguiente tabla:

Tabla XXVII. **Valores de desbalance de tensión según NTSD**

TENSION	DESBALANCE DE TENSION, ΔDTD , EN %
	ETAPA DE REGIMEN A Partir del Mes 13
BAJA Y MEDIA	3
ALTA	1

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *normas NTSD*. p. 19.

4.3.2. Regulación de tensión

Este índice de evaluación de tensión según la norma NTSD, en un intervalo (k) será el valor absoluto de la diferencia de los valores de tensión eficaces (RMS) expresados en un valor porcentual de la tensión nominal:

$$\Delta V_k (\%) = \frac{|(V_k - V_n)|}{V_n} * 100$$

En la misma norma se establecen tolerancias de regulación según la siguiente tabla:

Tabla XXVIII. Tolerancia para la regulación de tensión

TENSION	TOLERANCIA ADMISIBLE RESPECTO DEL VALOR NOMINAL, EN %					
	ETAPA					
	TRANSICION		REGIMEN A partir del Mes 1 hasta el 12		REGIMEN A partir del Mes 13	
	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL	SERVICIO O URBANO	SERVICIO O RURAL	SERVICIO URBANO	SERVICIO RURAL
BAJA	12	15	10	12	8	10
MEDIA	10	13	8	10	6	7
ALTA	TRANSICION		REGIMEN A partir del Mes 1 hasta el 12		REGIMEN A partir del Mes 13	
	7		6		5	

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *normas NTSD*. p. 16.

4.3.3. Parametro de medición Flicker

Flicker es un valor que se utiliza para medir si la energía que reciben los equipos es de buena calidad. Según la norma NTSD, el índice de severidad de corto plazo (PST) tiene un límite máximo recomendado de 1, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla XXIX. Flicker generado por el usuario

Carga (SI) kW	Pst
Tensión: (≤ 1 kV)	
SI ≤ 20	1.00
20 < SI ≤ 30	1.26
30 < SI ≤ 50	1.58
SI > 50	1.86
Tensión: (1kV < V ≤ 230 kV)	
SI / Scc ≤ 0.005	0.37
0.005 < SI / Scc ≤ 0.02	0.58
0.02 < SI / Scc ≤ 0.04	0.74
SI / Scc > 0.04	0.80

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *normas NTSD*. p. 28.

4.3.4. Distorsión armónica total de voltaje

Según la norma NTSD, Entre los parámetros de calidad de energía se encuentra el índice de la distorsión armónica de la tensión, que está dado en valores porcentuales y se calcula con la siguiente fórmula:

$$DATT(\%) = \left(\sqrt{\sum \frac{V_i^2}{V_1^2}} \right) * 100$$

DATT: Distorsión armónica total de tensión

V_i : componente de tensión de la armónica de orden i .

V_1 componente de tensión de frecuencia fundamental (60 Hz).

La norma nos presenta los valores aceptables en la siguiente tabla:

Tabla XXX. **Tolerancia para la distorsión armónica de tensión**

ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	DISTORSIÓN ARMÓNICA INDIVIDUAL DE TENSIÓN, DAIT (%)	
	BAJA Y MEDIA TENSIÓN $V \leq 60\text{kV}$	ALTA TENSIÓN $60\text{kV} < V \leq 230\text{kV}$
IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3		
5	6,0	2,0
7	5,0	2,0
11	3,5	1,5
13	3,0	1,5
17	2,0	1,0
19	1,5	1,0
23	1,5	0,7
25	1,5	0,7
>25	$0,2 + 1,3 \cdot 25/n$	$0,1 + 0,6 \cdot 25/n$
IMPARES MÚLTIPLOS DE 3		
3	5,0	
9	1,5	
15	0,3	
21	0,2	
>21	0,2	
PARES		
2	2,0	2
4	1,0	1
6	0,5	0,5
8	0,5	0,4
10	0,5	0,4
12	0,2	0,2
>12	0,2	0,2
DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE TENSIÓN, DATT, EN %	8	3

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *normas NTSD*. p. 22.

4.3.5. Distorsión armónica total de corriente

Según la norma NTSD, la distorsión armónica de corriente dependerá de la potencia del usuario, nivel de tensión y del de la armónica. En la siguiente tabla se establecen los valores de corriente armónicos aceptados.

Tabla XXXI. Tolerancia para la distorsión armónica de corriente

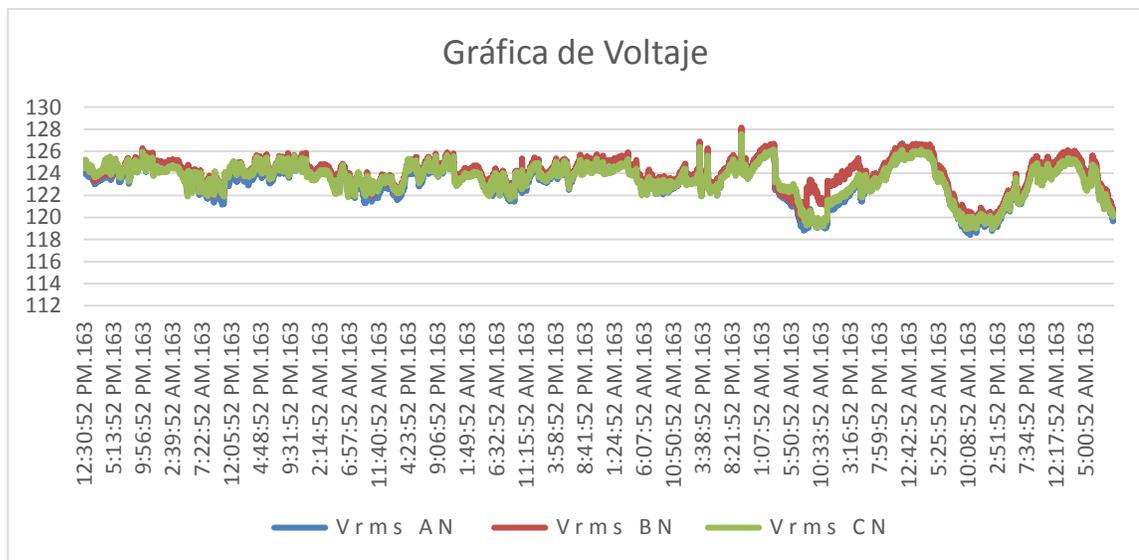
ORDEN DE LA ARMÓNICA (n)	P ≤ 10 kW V ≤ 1kV	P >10Kw 1kV < V ≤ 60kV	P >50kW v > 60kV
	INTENSIDAD ARMONICA MAXIMA (AMP)	DISTORSION ARMONICA INDIVIDUAL DE CORRIENTE DAII, EN %	
IMPARES NO MULTIPLOS DE 3			
5	2.28	12.0	6.0
7	1.54	8.5	5.1
11	0.66	4.3	2.9
13	0.42	3.0	2.2
17	0.26	2.7	1.8
19	0.24	1.9	1.7
23	0.20	1.6	1.1
25	0.18	1.6	1.1
> 25	4.5/n	0.2 + 0.8*25/n	0.4
IMPARES MULTIPLOS DE 3			
3	4.60	16.6	7.5
9	0.80	2.2	2.2
15	0.30	0.6	0.8
21	0.21	0.4	0.4
> 21	4.5/n	0.3	0.4
PARES			
2	2.16	10.0	10.0
4	0.86	2.5	3.8
6	0.60	1.0	1.5
8	0.46	0.8	0.5
10	0.37	0.8	0.5
12	0.31	0.4	0.5
> 12	3.68/n	0.3	0.5
DISTORSION ARMONICA TOTAL DE CORRIENTE DATI, EN %	--	20	12

Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *normas NTSD*. p. 26.

4.3.6. Análisis de voltaje banco 1

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento del voltaje durante el periodo de medición.

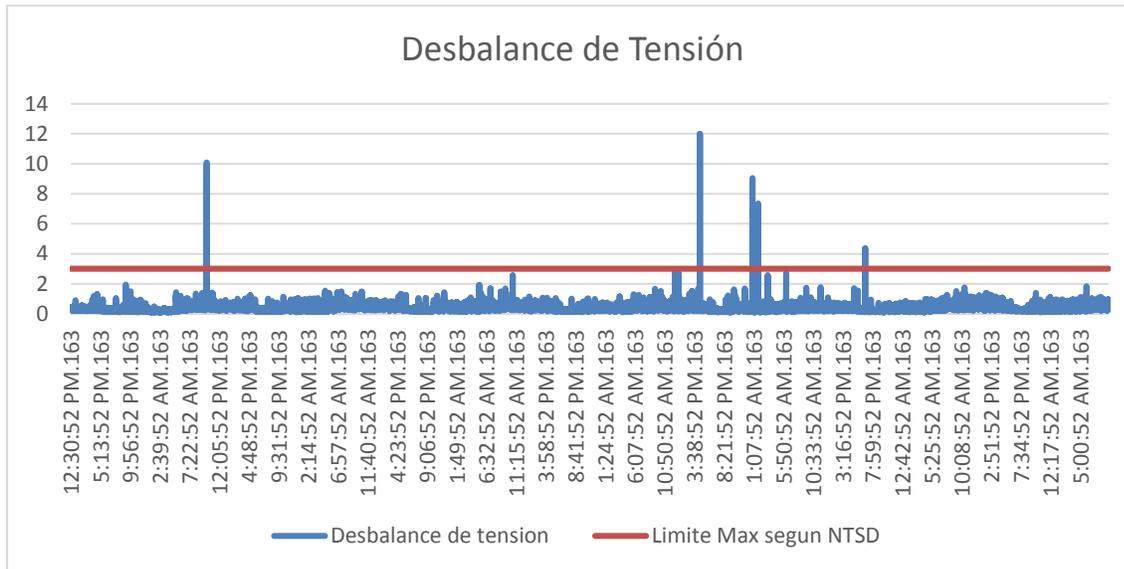
Figura 94. Perfiles de voltaje de línea a neutro



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica observamos los cambios que tiene el voltaje durante el periodo de medición. Se puede ver un voltaje máximo de 125 V y un valor mínimo de 114 V.

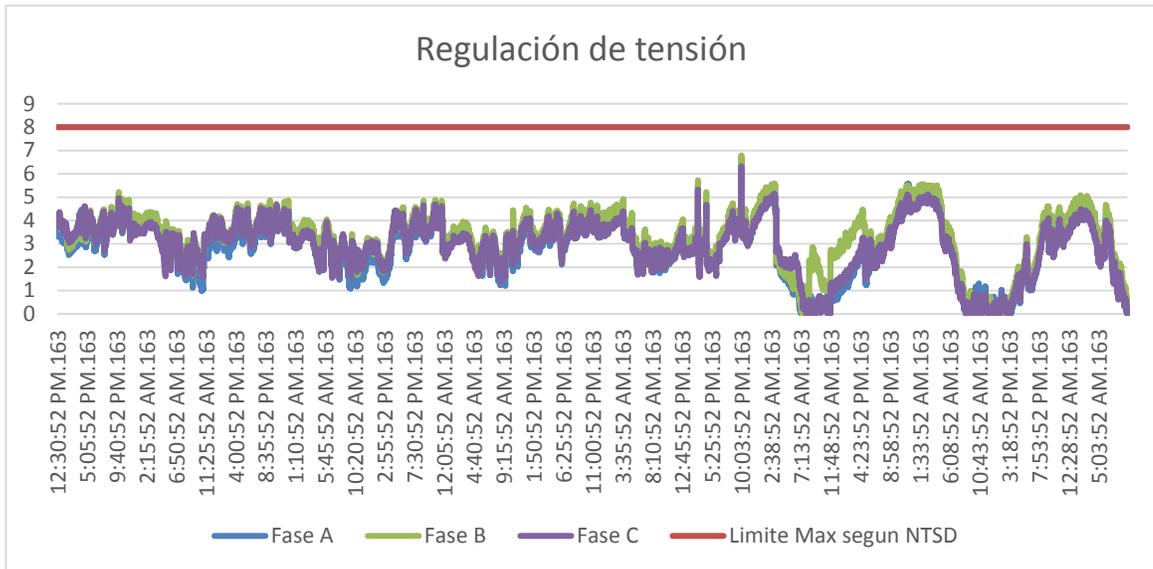
Figura 95. **Gráfica de desbalance de tensión**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

De acuerdo a la gráfica se observan puntos de desbalance debido a que en esos puntos existieron microcortes de voltaje en ese periodo de medición. Tomando en cuenta que en la norma toma como aceptable el valor si la cantidad de valores sobre los límites es menor que el 3 % del total de la medición, se determina que el valor de desbalance es aceptable.

Figura 96. Regulación de tensión



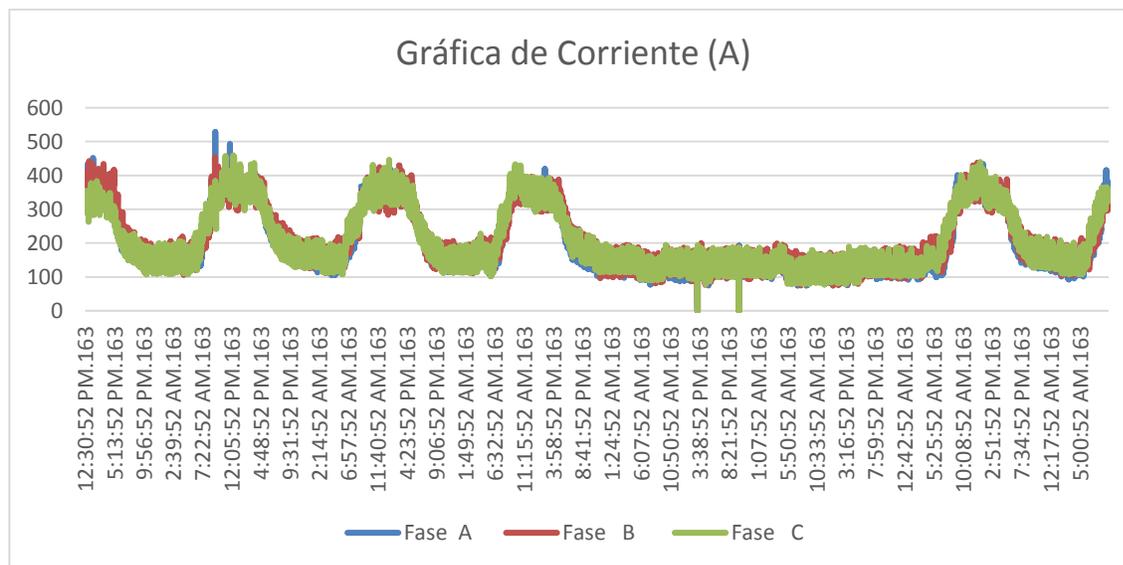
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En la gráfica se compara la regulación de tensión con el límite máximo aceptado por la norma. Se observa que los valores registrados están dentro del valor aceptado por la misma.

4.3.7. Análisis de corriente

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la corriente o carga del Minex durante el periodo de medición.

Figura 97. Corrientes por fase



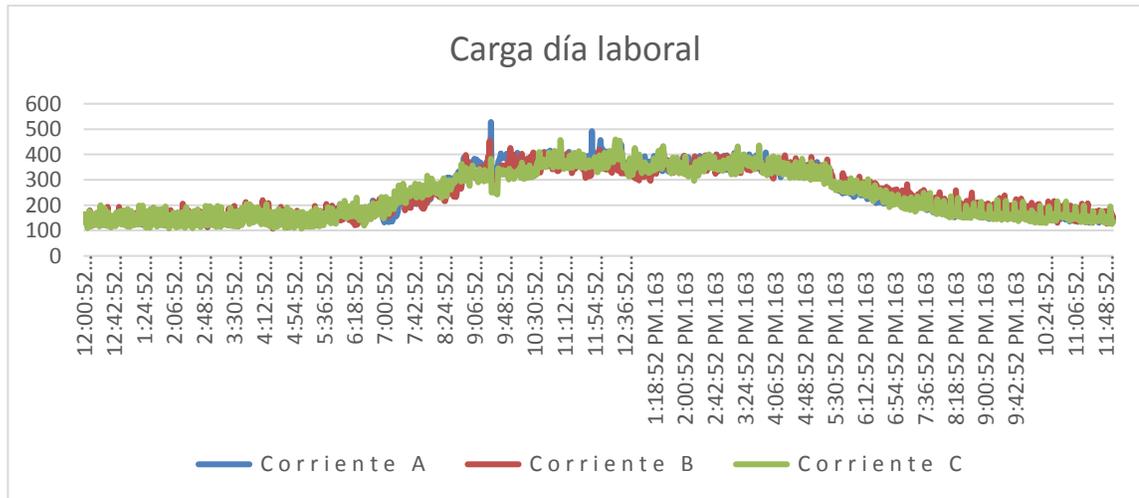
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica se observa la carga que tiene el transformador de 500 KVA. Se visualizan los valles que corresponden a días hábiles desde la mañana hasta la noche y una sección en la gráfica con menor carga y constante que corresponde a los días sábados y domingos.

4.3.8. Análisis de carga de un día laboral

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la corriente en un día laboral en el Minex durante el periodo de medición de 24 horas.

Figura 98. Carga día Laboral



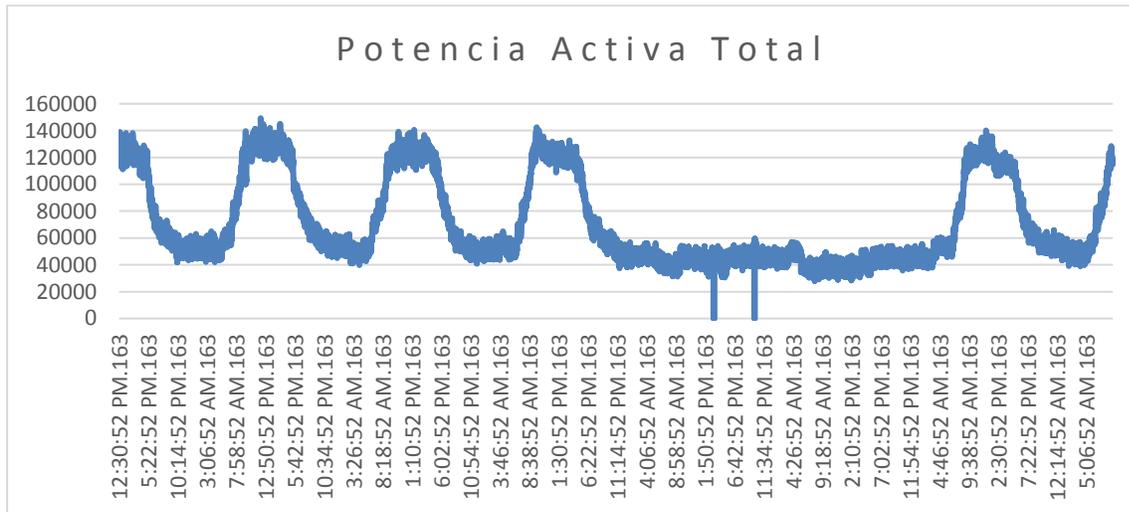
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica se presenta la carga de un día laboral con un valor promedio de 360 A y una elevación de voltaje de 528 A. En base a estas dos gráficas observamos que el transformador de 500 KVA con una capacidad nominal de 1 200 A son: Fase (A) 456 A, Fase (B) 437 A y Fase (C) 457 A, con lo cual concluimos que el transformador está operando a un 38,08 %.

4.3.9. Análisis de potencia activa

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la potencia del Minex durante el periodo de medición.

Figura 99. **Potencia activa**



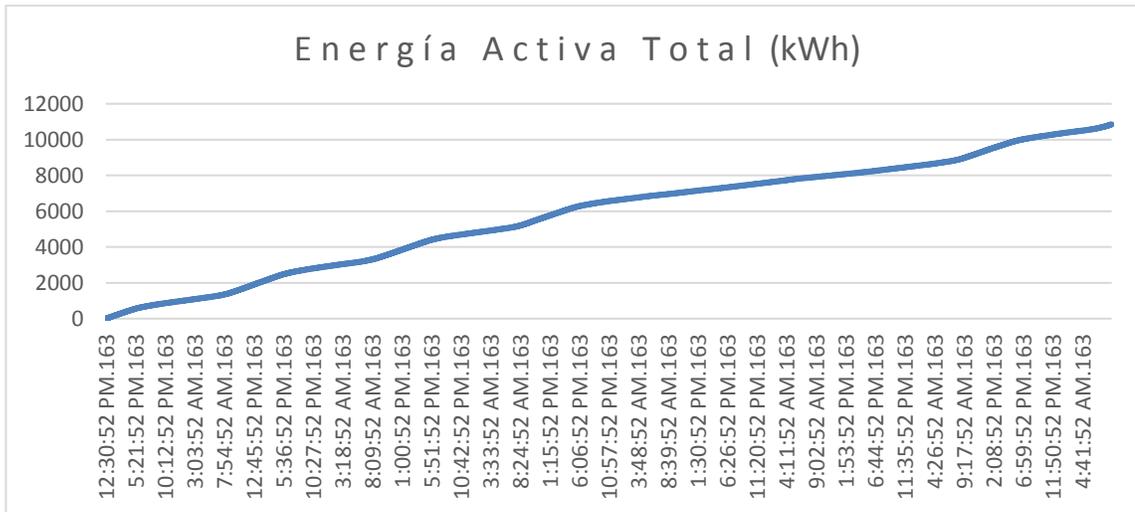
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En la gráfica se registra una potencia promedio de 149,25 kw durante un día de medición.

4.3.10. **Energía**

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la energía consumida por el Minex durante el periodo de medición.

Figura 100. **Energía Activa Total**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

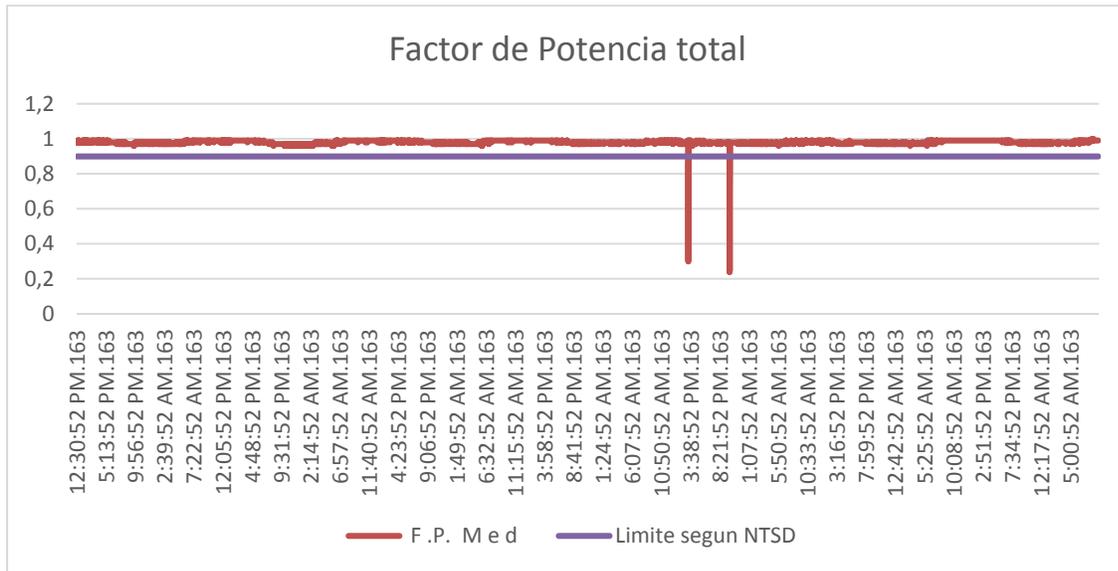
En la gráfica de energía se registra un consumo de 10,528 MWH en un periodo de 165,5 horas de medición.

4.3.11. **Factor de potencia**

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento del factor de potencia del Minex durante el periodo de medición.

Según la norma NTSD establece un valor de 0,85 para usuarios con potencias menores de 11 kW.

Figura 101. **Factor de potencia**

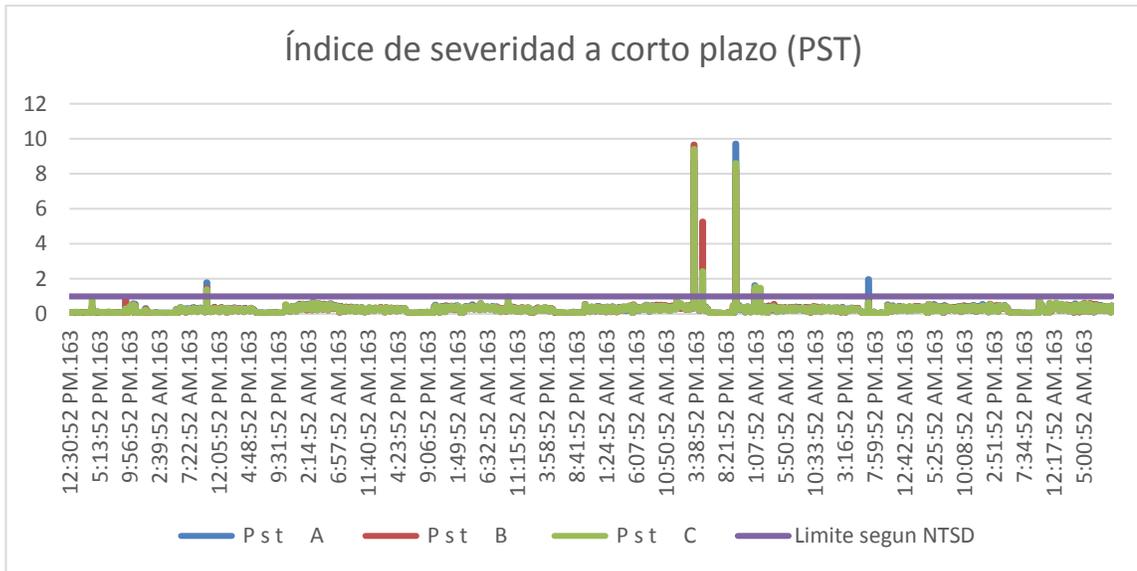


Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica se observa cómo el factor de potencia sigue a la carga y cuando la carga baja el factor llega a su valor de 0,97 promedio. Cumple con este valor la normativa NTSD.

Según la normativa de EEGSA se debe mantener un factor de potencia de 0,9 o mayor para evitar penalizaciones por incumplimiento de este valor.

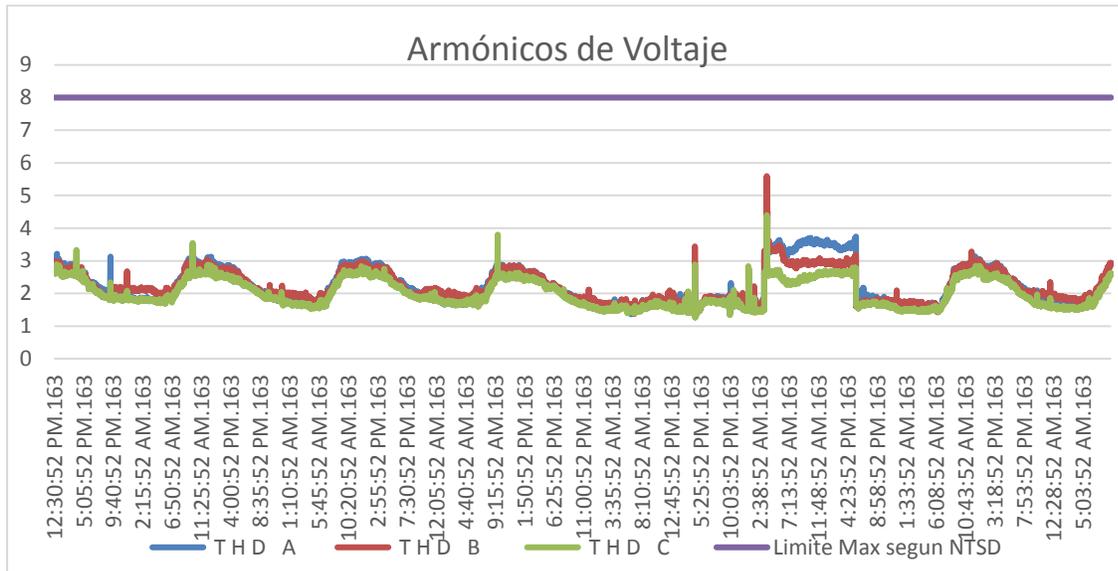
Figura 102. **Flicker generado por el usuario**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

De acuerdo a la gráfica solo se obtuvo por un instante un valor superior a 1, que es el límite máximo establecido por las normas NTSD, por lo que se concluye que la calidad de la energía es de buena calidad.

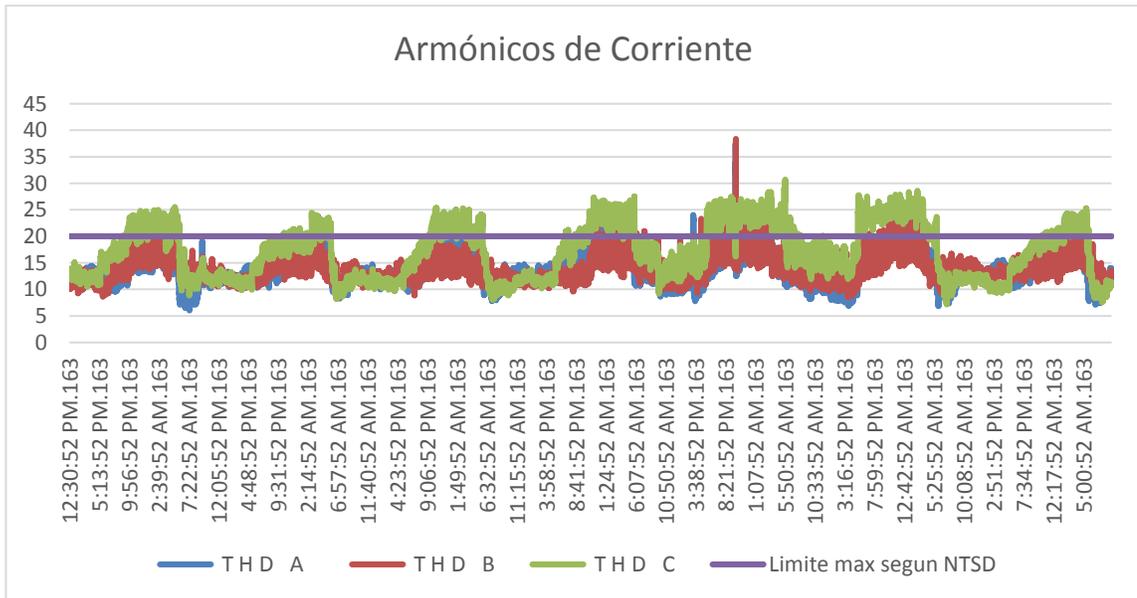
Figura 103. **Distorsión armónica total de voltaje**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

Según la tabla de la tolerancia de distorsión armónica se especifica un valor de DATT de 8 %, en las mediciones registradas encontramos que este valor está dentro del rango aceptable de armónicos de voltaje.

Figura 104. **Distorsión armónica total de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5.6.

Fase A: 19,1 %

Fase B: 20,79 %

Fase C: 23,51 %

Según la tabla de tolerancia para la distorsión armónica total de corriente de la norma NTSD, un valor aceptable de armónicos de corriente es del 20 %. En las mediciones registradas los valores no son aceptables.

Tabla XXXII. **Resumen de parámetros de calidad de energía banco 1**

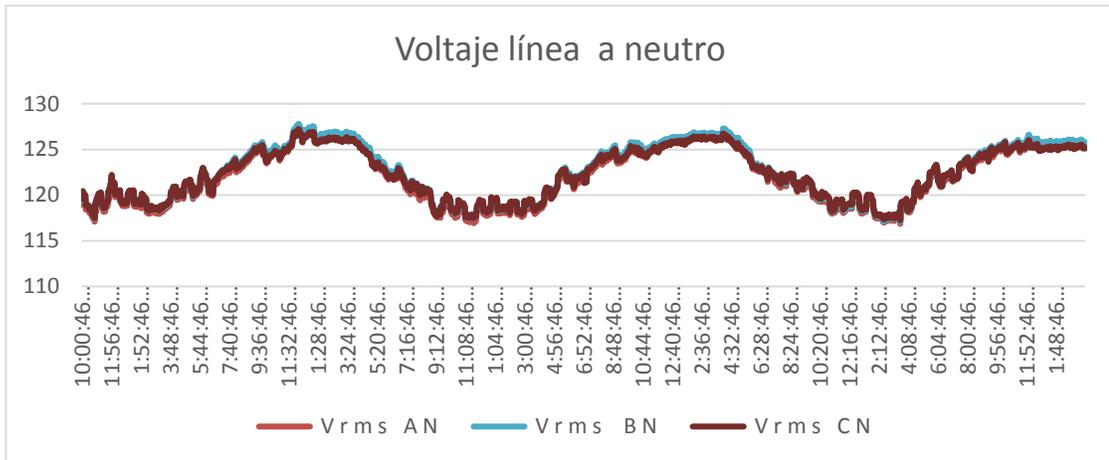
Evento	Norma Valores	Mediciones Valores	Resultado
Desbalance de voltaje	Norma NTSD baja y media Δ DTD 3 %	1,50 %	Cumple con la norma
Regulación de voltaje	Norma NTSD tensión baja servicio urbano 8 %	4,10 %	Cumple con la norma
Flicker	Norma NTSD tensión (\leq 1 kv) si \leq 20 1,00	0,45	Cumple con la norma
Factor de potencia	Usuarios con potencia de hasta 11 kw 0,85	0,97	Cumple con la norma
Total, armónicos de voltaje	Norma NTSD distorsión armónica DATT, en 8 %	3 %	Cumple con la norma
Total, armónicos de corriente	Norma NTSD distorsión armónica total de corriente DATI, en 20 %	19,1 %	Cumple con la norma

Fuente: elaboración propia, con datos de las mediciones realizadas.

4.3.12. Análisis de voltaje banco 2

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento del voltaje durante el periodo de medición.

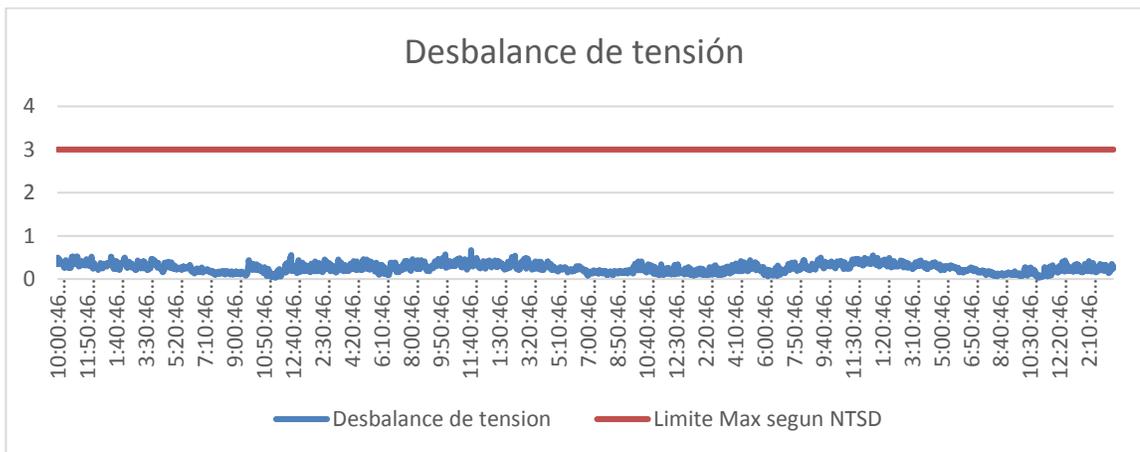
Figura 105. **Perfiles de voltaje línea a neutro**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica observamos los cambios que tiene el voltaje durante el periodo de medición. Se observa un voltaje máximo de 125 V y un valor mínimo de 114 V.

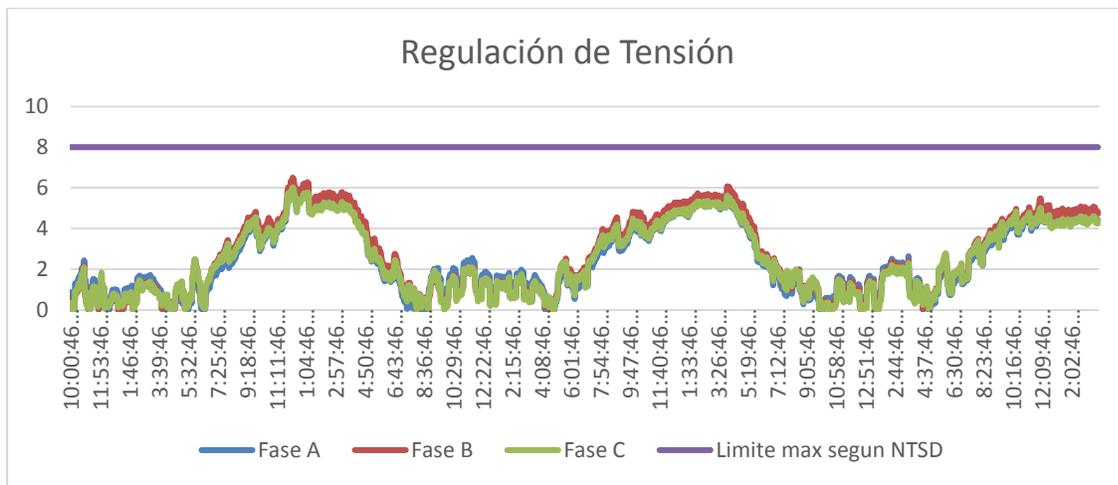
Figura 106. **Desbalance de tensión**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

De acuerdo a la gráfica se observan los límites menores que el 5 % del total de la medición. Se determina que el valor de desbalance es aceptable.

Figura 107. **Regulación de tensión**



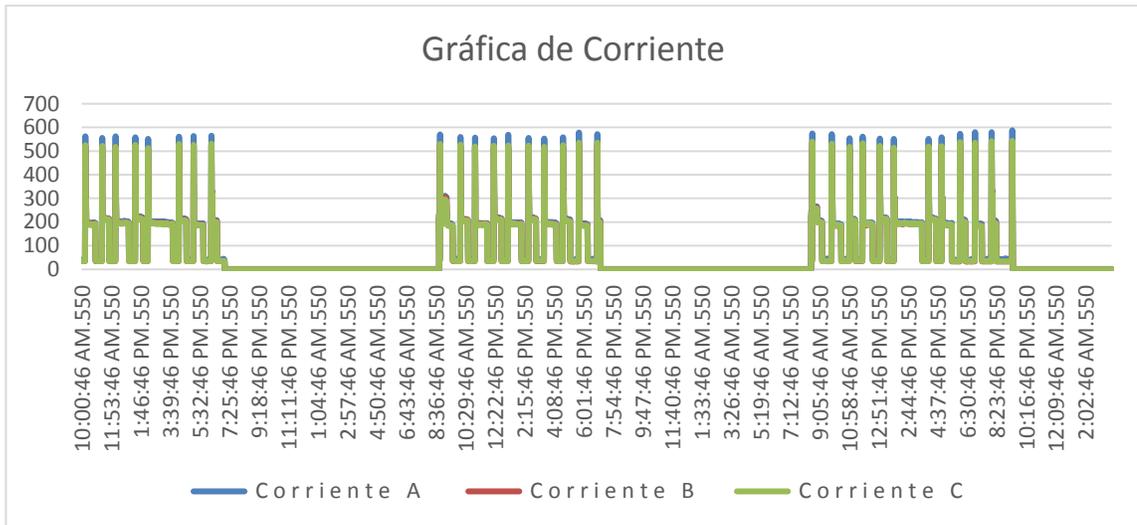
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En la gráfica se compara la regulación de tensión con el límite máximo aceptado por la norma. Se observa que los valores registrados están dentro del valor aceptado por la misma.

4.3.13. Análisis de corriente

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la corriente o carga del Minex durante el periodo de medición.

Figura 108. Corrientes por fase



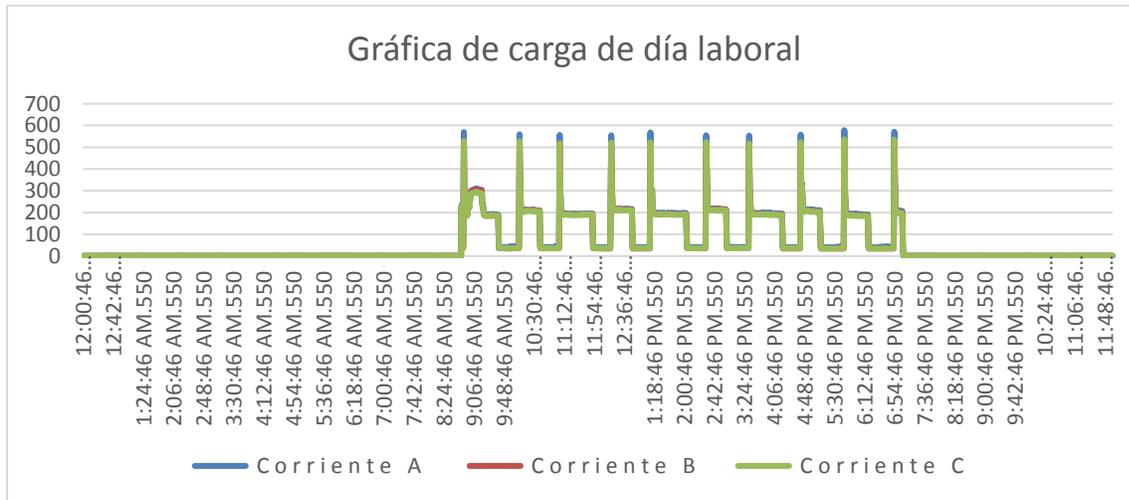
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica se observa la carga que tiene el transformador de 500 KVA. Se visualizan los valles que corresponden a días hábiles desde la mañana hasta la noche, y una sección en la gráfica con menor carga y constante que corresponde a los días sábados y domingos.

4.3.14. Análisis de carga de un día laboral

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la corriente en un día laboral en el Minex durante el periodo de medición de 24 horas.

Figura 109. **Carga de un día laboral**



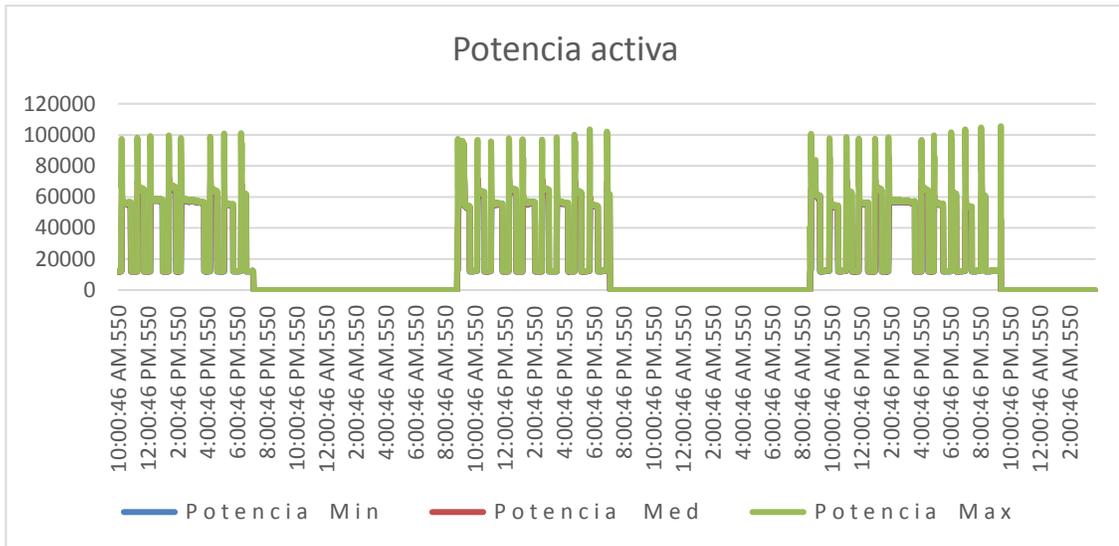
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

Este es el banco de transformadores que suministra energía al chiller del edificio. En la gráfica se observa los arranques que tiene el equipo a diferentes horas del día 10 arranques que tienen un pico de arranque de más de 500 A.

4.3.15. **Análisis de potencia activa**

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la potencia del Minex durante el periodo de medición.

Figura 110. **Potencia activa**



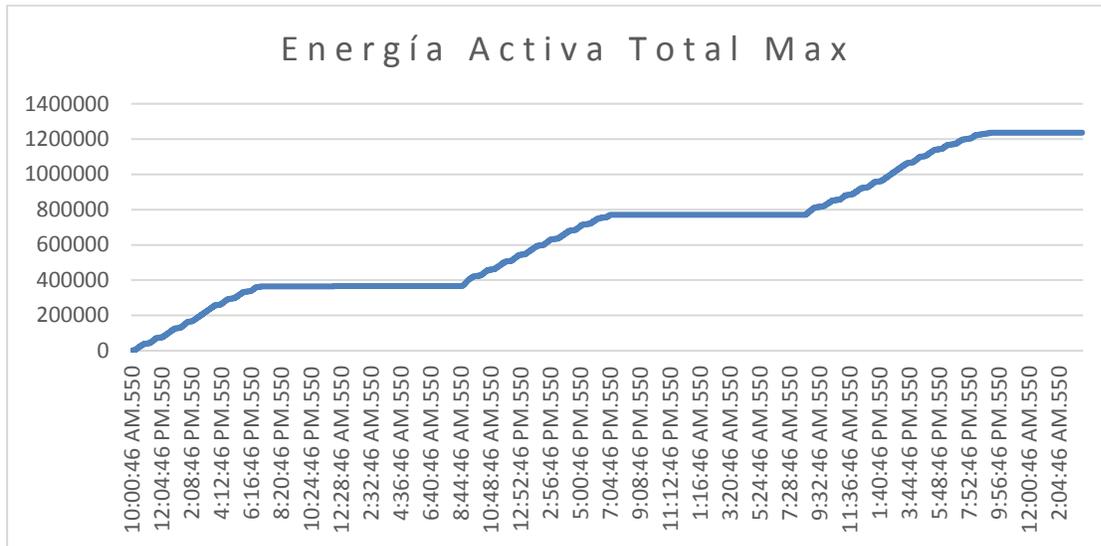
Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En la gráfica se registra una potencia promedio de 105,48 kW.

4.3.16. **Energía**

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento de la energía consumida por el Minex durante el periodo de medición.

Figura 111. **Energía registrada en el interruptor principal 2**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

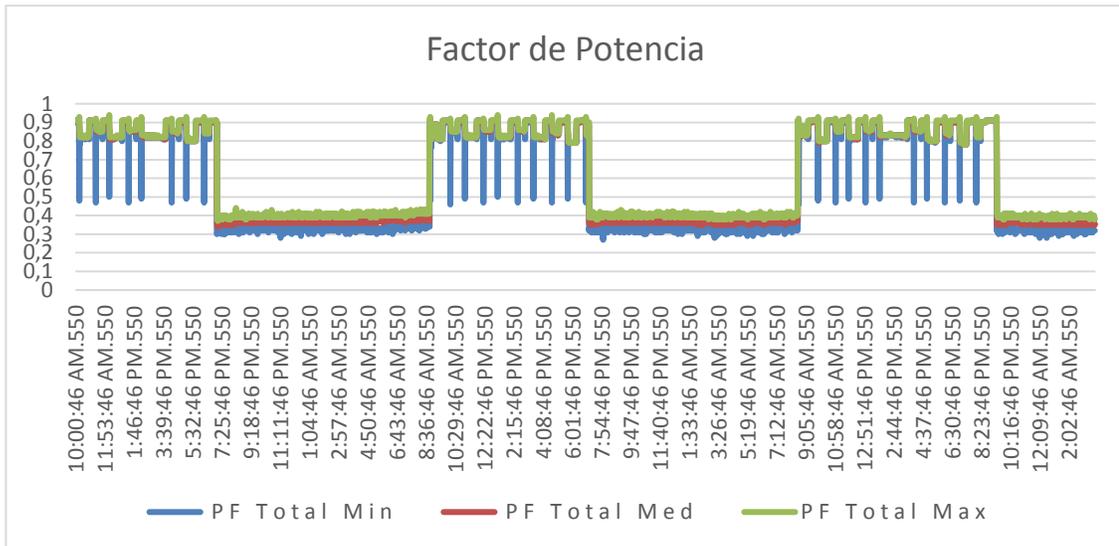
En la gráfica de energía se registra un consumo de 10,528 MWh en un periodo de 165,5 horas de medición.

4.3.17. **Factor de potencia**

En la siguiente gráfica se presenta el comportamiento del factor de potencia del Minex durante el periodo de medición.

Según la norma NTSD establece un valor de 0,85 para usuarios con potencias menores de 11 kW.

Figura 112. Factor de potencia

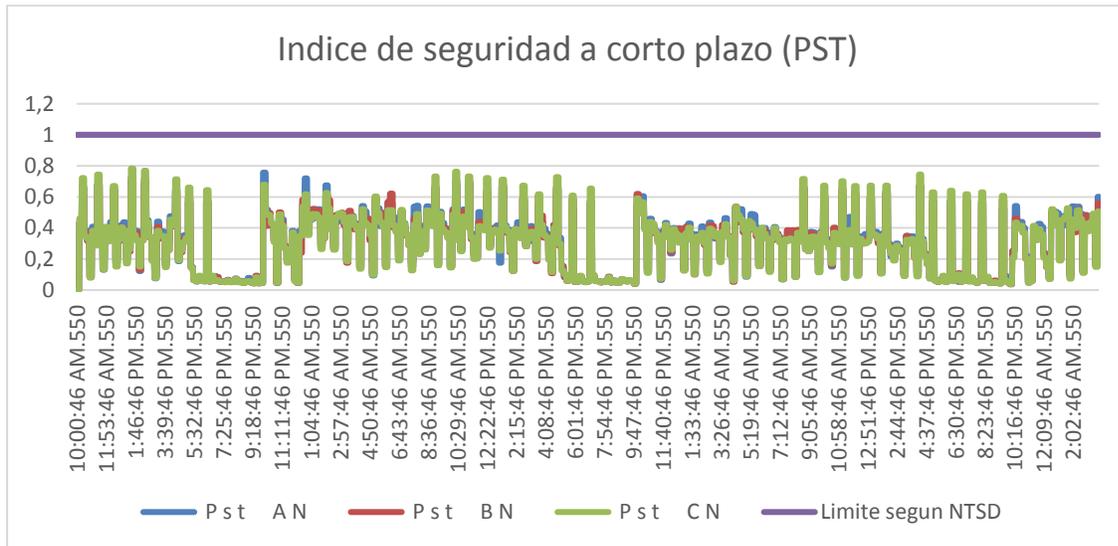


Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

En esta gráfica se observa cómo el factor de potencia sigue a la carga y cuando la carga baja, el factor llega a su valor de 0,97 promedio, y cumple con este valor la normativa NTSD.

Según la normativa de EEGSA se debe mantener un factor de potencia de 0,9 o mayor para evitar penalizaciones por incumplimiento de este valor.

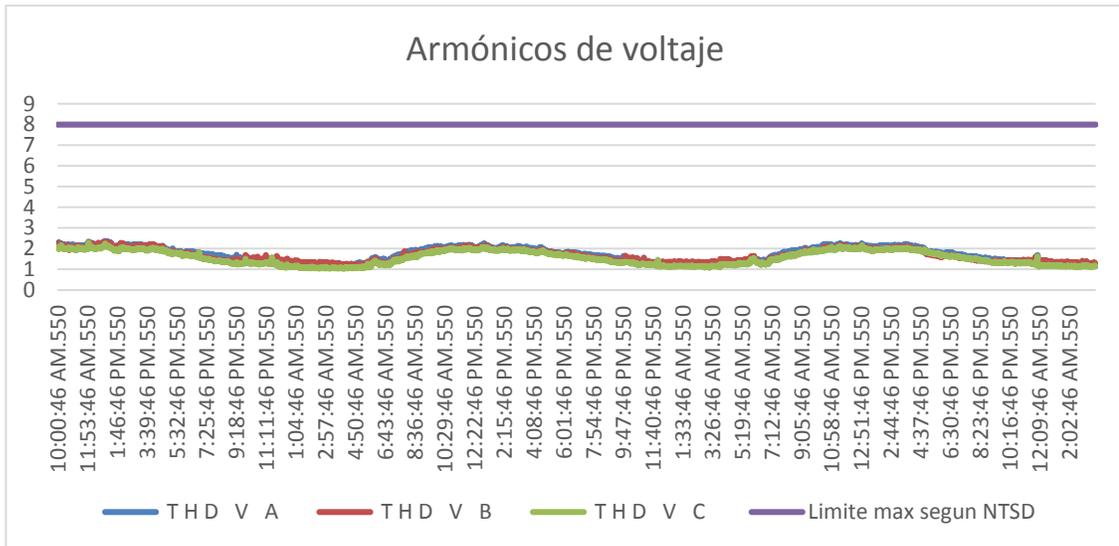
Figura 113. Flicker generado por el usuario



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

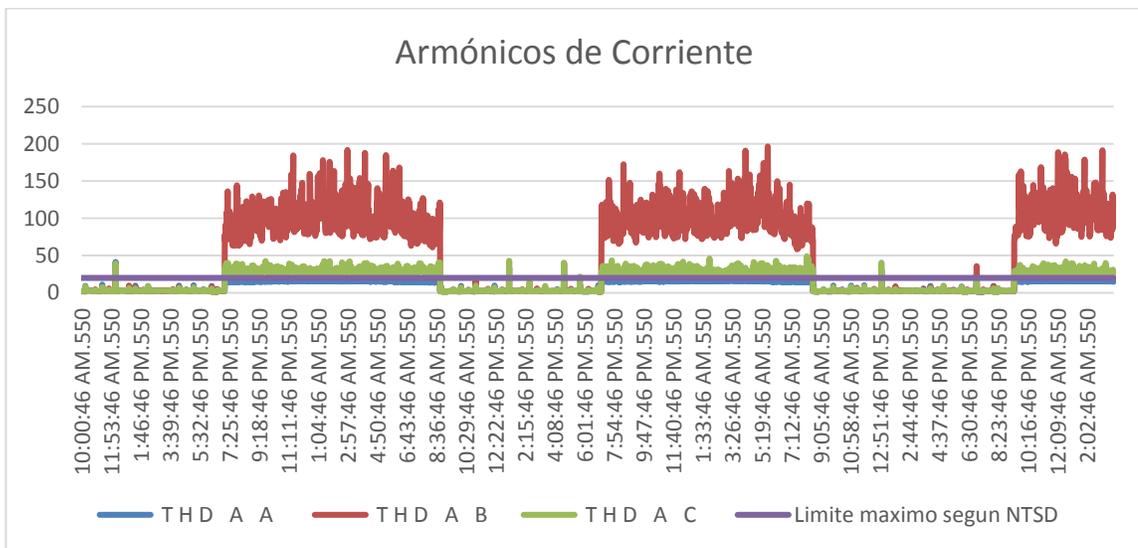
De acuerdo a la gráfica solo se obtuvo por un instante un valor superior a 1, que es el límite máximo establecido por las normas NTSD, por lo que se concluye que la calidad de la energía es de buena calidad.

Figura 114. **Distorsión armónica total de voltaje**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

Figura 115. **Distorsión armónica total de corriente**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Power Log 5,6.

Fase A: 14,89 %

Fase B: 50,27 %

Fase C: 16,02 %

Se realiza una tabla de resumen de todos los parametros electricos que fueron evaluados durante las mediciones realizadas al sistema electrico del edificio del Minex para tener un mejor panorama sobre la condicion de la calidad de energia para este banco de transformadores.

Tabla XXXIII. Resumen de parámetros de calidad de energía banco 2

Evento	Norma Valores	Mediciones Valores	Resultado
Desbalance de voltaje	Norma NTSD baja y media Δ DTD 3 %	1,50 %	Cumple con la norma
Regulación de voltaje	Norma NTSD tensión baja servicio urbano 8 %	4,10 %	Cumple con la norma
Flicker	Norma NTSD tensión (\leq 1 kV) si \leq 20 1,00	0,45	Cumple con la norma
Factor de potencia	Usuarios con potencia de hasta 11 kw 0,85	0,97	Cumple con la norma
Total, armónicos de voltaje	Norma NTSD distorsión armónica DATT, en 8 %	3 %	Cumple con la norma
Total, armónicos de corriente	Norma NTSD distorsión armónica total de corriente DATI, en 20 %	50,27%	No cumple con la norma

Fuente: elaboración propia, con datos de las mediciones realizadas.

Se determina que la calidad de energía en las instalaciones del edificio se encuentra dentro de las normas NTSD. Se establecieron las diferencias entre lo registrado por el medidor y el consumo real según las mediciones de potencia, lo que favorece en este caso al Minex.

4.4. Selección del sistema de puesta a tierra para Minex

Para el diseño de puesta a tierra para el Minex se empezará por conocer la resistividad eléctrica del terreno, para lo cual se realizaron mediciones utilizando el equipo marca Fluke *Earth Ground* 1621.

Figura 116. Ubicación de las picas



Fuente: elaboración propia, jardín lateral del edificio del Minex.

Se tomaron tres mediciones de la resistividad eléctrica del terreno con la regla del 62 %, en la cual la pica más lejana se queda estable y la pica de potencial se mueve a 10 % y girada a 180 grados.

Tabla XXXIV. **Mediciones de la resistividad del terreno**

Medición	A (m)	Re (Ω)
1	6	9,09
2	7	9,15
3	6 (180 °)	8,95

Fuente: elaboración propia, con los valores de medición registrados.

Con las mediciones obtenidas procedemos a realizar el cálculo de la resistividad eléctrica del terreno:

$$\rho = 2 * \pi * A * R$$

$$\rho = 2 * 3,1416 * 6 * 9,09 = 342,68 \Omega - m$$

El terreno donde se realizaron las pruebas esta compuesto de tierra para jardín con compuestos para una fertilización y con minerales que favorecen a obtener un valor de resistencia relativamente bajo comparado con otros terrenos con arcilla y barro donde la resistencia puede llegar a ser infinita.

Con el valor de la resistividad del terreno se procede a calcular cada posible configuración de electrodos de puesta a tierra para obtener un valor de resistencia eléctrica menor a lo sugerido por la norma, la configuración mas utilizada es la de tres varillas dispuestas entre si a una distancia de dos veces su longitud, con el propósito de abarcar la mayor cantidad de terreno.

En muchas ocasiones el diseñador utiliza placas de cobre las cuales tendrá una probabilidad mayor de alcanzar un valor de resistencia bajo, pero con coste mas alto que en algunas ocasiones resulta ser muy elevado para el fin del cual se necesita el sistema de puesta a tierra.

Tabla XXXV. **Fórmulas para el cálculo de la resistencia**

Una varilla	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
Dos varillas espaciadas a una distancia mayor que la longitud de la varilla	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right)$
Malla	$R = 0.443 \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L}$
Alambre horizontalmente enterrado	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} + \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$
Estrella de tres puntos	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^2}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$
Placas	$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\left(\frac{\pi}{A} \right)}$
Tres varillas en los vértices de un triángulo equilátero	$R = \frac{1}{3} \left\{ 2 \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] - 1 + 2Ls \right\}$

Fuente: elaboración propia, IEEE 142-2007.

En el caso que no se alcance un valor de resistencia ideal, se procede a calcular la siguiente configuración agregándole mas electrodos al sistema, hasta conseguir el valor objetivo de resistencia.

La norma también especifica valores multiplicativos en caso no se alcance el valor de resistencia deseado. Podemos agregar varillas hasta alcanzar el

objetivo de un sistema de puesta a tierra eficiente con un bajo valor de resistencia.

Tabla XXXVI. **Factores multiplicativos para agregar varillas**

Cantidad de varillas	Factor multiplicativo
2	1,16
3	1,29
4	1,36
8	1,68
12	1,80
16	1,92
20	2,00
24	2,16

Fuente: elaboración propia, IEEE 142-2007.

Después de obtener la forma adecuada al sistema de puesta a tierra de acuerdo al tamaño del terreno (puede ser en triángulo, cuadrado, entre otros) y con electrodos separados por el doble de su longitud, se procede a obtener el valor de resistencia. Si no es satisfactorio se emplea la tabla de factores multiplicativos de la siguiente forma:

$$R(\Omega) = \frac{\text{Valor Resistencia}}{\text{Cantidad de varillas}} * \text{Factor segun tabla}$$

Si colocamos una sola varilla de acero recubierta de cobre de 5/8 " x 96 ":

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

$$R = \frac{342,68}{2 * 3,1416 * 2,43} \left(\ln \frac{4(2,43)}{0,01587} - 1 \right) = 69,89 \Omega$$

Con una configuración de varillas en forma de triángulo equilátero también conocida como delta:

$$R = \frac{1}{3} \left\{ 2 \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] - 1 + 2Ls \right\}$$

$$R = \frac{1}{3} \left\{ 2 \left[\ln \left(\frac{8(2,43)}{0,01587} \right) - 1 \right] - 1 + 2(2,43) * 3 \right\} = 8,93 \Omega$$

Al agregar dos varillas y utilizando el factor multiplicativo de la tabla:

$$R (\Omega) = \frac{8,93}{2} * 1,16 = 5,18 \Omega$$

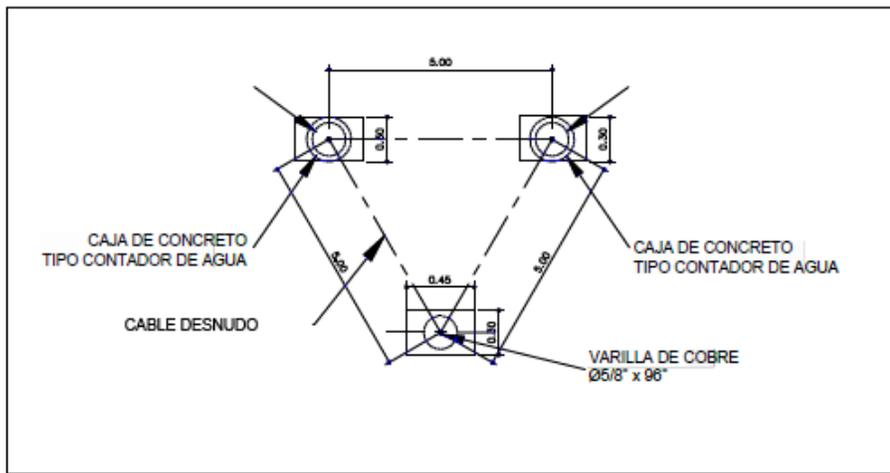
Para seleccionar el arreglo de varillas de cobre a utilizar nos basamos con lo establecido en la norma IEEE 142-2007, donde indica que para una varilla de cobre el valor de resistencia aceptado es de 25 Ω . Si únicamente utilizamos una varilla obtendremos una resistencia de 69,89 Ω y con una configuración de triángulo equilátero, también conocido como delta, obtendremos una resistencia de 8,93 Ω .

De acuerdo a la tabla de factores multiplicativos agregamos dos varillas más a la configuración de la delta que estarán separadas por una distancia de dos veces su longitud. De esta forma mejoramos el valor de resistencia del sistema a 5,18 Ω .

Para la interconexión de las varillas de cobre nos basaremos en el código NEC en la tabla 250.66, indica el calibre del conductor recomendado, que para nuestro caso es un conductor calibre AWG # 2/0 para entrelazar las varillas y se utiliza el método de soldadura exotérmica para las uniones.

El diseño del sistema de puesta a tierra para el Minex estará formado según la siguiente gráfica.

Figura 117. Sistema de puesta a tierra para Minex



Fuente: elaboración propia, empleando Autocad Eléctrico 2018

4.5. Método estadístico para descargas atmosféricas

La norma IEEE 1243 proporciona un método estadístico para el análisis de la probabilidad de la cantidad de rayos y su descarga en un terreno en particular. Posee fórmulas para la determinación de ciertos parámetros que nos ayudarán a conocer mejor las condiciones atmosféricas del terreno donde se ubica la edificación que deseamos proteger.

El primer punto a analizar es la densidad de rayos sobre un terreno, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$N_g = 0,04 * T_c^{1,25}$$

N_g = densidad de rayos

T_c = nivel isoceráunico de la región.

De acuerdo a la tabla XI encontramos que para la ciudad capital donde se encuentra ubicado el Minex, se tiene un valor promedio de 60 descargas eléctricas al año. La densidad de descargas atmosféricas para el Minex nos da como resultado:

$$N_g = 0,04 * 60^{1,25} = 6,68 \text{ rayos}/\text{km}^2/\text{año}$$

Otro parámetro a calcular es la frecuencia de descargas directas de rayo en el edificio o estructura, para lo cual la norma nos provee de la siguiente expresión:

$$N_d = N_g * A_e * C_1 * 10^{-6} / \text{año}$$

N_g = Densidad de rayos (calculada anteriormente)

C_1 = factor de tablas según NFPA

A_e = Área equivalente del edificio

Tabla XXXVII. **Coficiente de nivel de riesgo C_1**

Situación relativa a la estructura	C_1
Estructura situada donde hay otras estructuras o árboles de la misma altura o más altos	0,25
Estructura rodeada de estructuras más bajas	0,5
Estructura aislada	1
Estructura aislada situada sobre una colina o promontorio	2

Fuente: NFPA 780. *Norma para la instalación de protección de sistemas contra rayos*. anexo L, tabla L.4.2.

El área equivalente del edificio se refiere al espacio ocupado por el Minex en metros. Se utiliza la herramienta de Google Maps para estimar su dimensión y proporcionar una posible proyección de cobertura para el terreno.

Para la elaboración de la proyección de cobertura del pararrayos debemos tomar en cuenta cuál es la parte más alta del edificio y considerar que la punta debe estar a 2 metros sobre el punto más alto de la estructura a proteger.

Figura 118. **Proyección de cobertura del pararrayos**



Fuente: Google Maps. Vista Minex. <https://www.google.com/maps/@14.6095219,-90.5142311,407m/data=!3m1!1e3>. Consulta: octubre de 2019.

Por lo que el área la encontramos por medio de la expresión:

$$A_e = \pi(3h)^2 = \pi(3 * 16)^2 = 7238,23 \text{ m}^2$$

$$N_d = 6,68 * 0,25 * 7238,23 * 10^{-6} = 0,0120878$$

Según el método estadístico debemos comparar el valor N_d con la frecuencia aceptable de rayos sobre una estructura, para lo cual utilizamos la siguiente expresión:

$$N_c = \frac{3 * 10^{-3}}{C}$$

C = Producto de los coeficientes C_2 , C_3 , C_4 y C_5 , de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla XXXVIII. **Coefficientes de nivel de riesgo C_2 y C_3**

Estructura	Coeficiente de estructura C_2		
	Techo de metal	Techo no metálico	Techo inflamable
Metal	0.5	1	2
Común	1	1	2.5
Inflamable	2	2.5	3
Coeficiente del contenido de la estructura C_3			
Contenido de la estructura			C_3
Sin valor o no inflamable			0.5
Valor común y no inflamable			1
Gran valor, moderadamente inflamable			2
Valor excepcional, inflamable, computadoras o electrónicos			3
Valor excepcional, objetos irremplazables			4

Fuente: NFPA 780. *Norma para la instalación de protección de sistemas contra rayos*. anexo L, tabla L.5.1.2 (a) y (b).

Tabla XXXIX. **Coeficientes de nivel de riesgo C4 y C5**

Coeficiente de ocupación de la estructura C₄	
Ocupación de la estructura	C₄
No ocupada	0.5
Ocupada normalmente	1
De difícil evacuación o riesgo de pánico	3
Coeficiente de consecuencia sobre el entorno C₅	
Consecuencia sobre el entorno	C₅
Sin necesidad de continuidad en el servicio y sin alguna consecuencia sobre el entorno	1
Necesidad de continuidad en el servicio y sin alguna consecuencia sobre el entorno	5
Consecuencia para el entorno	10

Fuente: NFPA 780. *Norma para la instalación de protección de sistemas contra rayos*. anexo L, tabla L.5.1.2 (c) y (d).

Los valores seleccionados son los siguientes:

$$C_2 = 1$$

$$C_3 = 3$$

$$C_4 = 1$$

$$C_5 = 5$$

$$N_c = \frac{3 * 10^{-3}}{1 * 3 * 1 * 5} = 0,0002$$

Para la conclusión final se utiliza la siguiente condición:

- Si $N_d \leq N_c$, el sistema de protección no es necesario.
- Si $N_d > N_c$, el sistema de protección es necesario.

El método estadístico nos dice que es necesaria la protección, ya que los valores caen dentro de $(N_d = 0,0120878) > (N_c = 0,0002)$.

4.5.1. Coordinación de protección

Para asegurar una óptima protección de las instalaciones eléctricas es necesario crear una coordinación de protecciones en cascada, la cual consiste en la instalación de supresores de transientes con una capacidad mayor en los tableros principales ya que son los que absorben los picos de voltaje que provienen de las líneas de media tensión expuestas a rayos en todo su recorrido.

Para los tableros secundarios se instalan supresores de menor capacidad de disipación teniendo en cuenta que el pico de transiente ya fue amortiguado por el supresor que se encuentra en los tableros principales.

Para los interruptores de las cargas se instalan supresores de menor capacidad en todo caso se protegen las cargas en contra de los picos de voltaje producidos en el sistema eléctrico interno.

- Equipo instalado electrónico muy sensible a sobretensiones.
- Distancia importante mayor a 10 metros entre la protección y el equipo protegido, para limitar las inducciones creadas por la sobretensión incidente.

4.5.2. Parámetros de selección de un supresor

Tanto para la norma IEEE y las IEC existen parámetros de selección de los supresores. En nuestro estudio se utilizan los criterios dados por la norma IEEE C62.41.1-2002.

Tabla XL. Parámetros de selección de un supresor

No.	Criterio	Exposición	Valor
1	<i>Nivel isocerámico:</i> Cantidad promedio de descargas atmosférica en la región de estudio.	Alto	10
		Medio	5
		Bajo	1
2	<i>Ubicación respecto a otras actividades:</i> densidad poblacional o espacio abierto.	Rural	10
		Sub urbano	5
		Urbano	1
3	<i>Ubicación respecto a otras construcciones:</i> La altura del edificio respecto a las edificaciones vecinas.	El más alto	10
		Mediano	5
		El más pequeño	1
4	<i>Tipo de acometida:</i> Ubicación con respecto a la subestación de distribución.	Ultimo usuario	10
		Usuarios múltiples	5
		Acometida independiente	1
5	<i>Historial de disturbios:</i> Historial de eventos dentro de las instalaciones y el equipo instalado.	Frecuentes	10
		Ocasionales	5
		Escasos	1
6	<i>Importancia del equipo a proteger:</i> Equipo que resguarda información como PLC o data centers.	Indispensable	10
		Moderada	5
		Puede detenerse	1
7	<i>Costo económico del equipo si falla:</i> considerar también su disponibilidad en el mercado.	Costosa	10
		Moderada	5
		Económica	1
8	<i>Categoría de instalación:</i> Ubicación física dentro de las instalaciones eléctricas.	Acometida	A
		Distribución	B
		Derivado	C

Fuente: elaboración propia, con datos de la norma IEEE C62.41.1-2002.

La siguiente tabla proporciona los valores para determinar el supresor a utilizar, se realiza una tabla con todos los aspectos del entorno de nuestras instalaciones y se les asigna un valor de acuerdo a los parámetros de la la norma.

Tabla XLI. Selección de supresores según IEEE C62.41.1-2002

Nivel de categorías según IEEE C62.41	Valor de exposición calculado y selección del supresor			
	7 – 25 puntos	26 – 40 puntos	41 – 55 puntos	56 – 70 puntos
Categoría C	120 kA	160 kA	240 kA	480 kA ó 320 kA
Categoría B	80 kA	120 kA	160 kA	240 kA
Categoría A	40 kA	50 kA	80 kA	120 kA

Fuente: elaboración propia, con datos de la norma IEEE C62.41.1-2002.

4.5.3. Diseño de protección en cascada para el Minex

Para el diseño de coordinación de protecciones se analiza cada criterio de selección de la tabla de la norma IEEE C62.41.1.2-2002, con el atlas del nivel isocerámico de Guatemala, la ubicación geofísica del terreno que utiliza el edificio del Minex y los equipos que se encuentran dentro de las instalaciones.

Todos los criterios a considerar según la norma son analizados en una tabla donde se le asigna una puntuación a cada uno de acuerdo a la tabla de selección de supresores y con el resultado se determina la capacidad de supresor a ser instalado, como dispositivo de protección contra transientes.

Tabla XLII. Valor de exposición para el Minex

No.	Criterio	Exposición	Valor
1	Nivel isocerámico	Medio	5
2	Ubicación respecto a otras actividades	Urbano	1
3	Ubicación respecto a otras construcciones	Mediano	5
4	<i>Tipo de acometida</i>	Usuarios múltiples	5
5	<i>Historial de disturbios</i>	Ocasionales	5
6	<i>Importancia del equipo a proteger</i>	Indispensable	10
7	<i>Costo económico del equipo si falla</i>	Costosa	10
<i>Total</i>			41

Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla XXXIX.

Comparando el resultado de la tabla XXXIX con los valores de la tabla XL se concluye que los supresores que se debe utilizar para el Minex son los siguientes:

Tabla XLIII. Supresores para las instalaciones del Minex

Ubicación	Valor de supresor
Alimentación primaria	240 Ka
Ramales de distribución	160 kA
Cargas	80 kA

Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla XL.

4.6. Análisis teórico de las instalaciones eléctricas

Para el diseño de las instalaciones eléctricas se debe evaluar la demanda máxima de potencia necesaria y suficiente para mantener el sistema funcionando.

Un diseño que incluya únicamente los valores nominales característicos de las cargas y una sumatoria de las mismas sería extremadamente caro, ineficiente e inseguro desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica. Es por ello que se evalúan varios factores teniendo en cuenta la diversidad. Esta se refiere a una operación no simultánea de todos los dispositivos de un grupo determinado y la utilización del porcentaje de potencia al que está operando. Son pocos los equipos que funcionan al 100 % de su potencia. Esto se realiza para todas las cargas existentes y a futuro.

4.7. Potencia instalada

Todos los equipos eléctricos proveen una placa de características eléctricas con valores nominales o de capacidad máxima de operación, la sumatoria de estos valores de potencia se le llama potencia total instalada en vatios (*Watts*).

4.8. Potencia aparente instalada

Es la sumatoria de las potencias aparente que se encuentran en la placa de características de los equipos eléctricos su unidad de medida son los voltio amperes (VA).

4.9. Demanda máxima estimada (DME)

Con el concepto de que las cargas no operan a su potencia nominal ni que funcionan al mismo tiempo, se especifican dos factores que permiten determinar la demanda máxima estimada necesaria para el dimensionamiento de los conductores, protecciones, tableros y transformador; estos son los factores de utilización y simultaneidad.

4.10. Factor de utilización (k_u)

El consumo de potencia de las cargas es inferior que la indicada como potencia nominal. A esto se le llama factor de utilización y justifica la reducción de la potencia total instalada a una potencia de diseño o potencia máxima estimada.

Este factor se aplica a cada carga individual. Tiene valores estandarizados como los motores que utilizan un factor de 0,75, para las luces incandescentes su factor siempre será 1; para los circuitos de tomas de corriente dependerá de las aplicaciones a las que ofrecen suministro los tomacorrientes en estudio.

4.11. Factor de simultaneidad (k_s)

Este factor se refiere a que es común que las cargas no estén operando de forma simultánea. Siempre hay un grado de variabilidad para lo cual se realiza una estimación mediante el factor de simultaneidad que se aplica a cada grupo de cargas. Es responsabilidad del ingeniero electricista determinar estos factores con un conocimiento más detallado de la instalación y de las condiciones de aplicación de cada circuito. Este motivo hace que no se proporcionen valores precisos para utilizarlos de forma general.

4.12. Dimensionamiento de conductores

Los conductores que se utilizan en las instalaciones eléctricas son cables de cobre trenzado revestido del tipo THHN para cableado en baja tensión y URD de 15 kV para la media tensión. El revestimiento del cable THHN consta de una chaqueta de nylon con propiedades para ser instalado en los siguientes ambientes:

- Lugares húmedos o secos
- Posee gran resistencia a la abrasión, al aceite y a los agentes químicos
- Antiflama, resistentes a la propagación de incendios

Para conocer la sección de un cable de baja tensión se procede a comprobar la capacidad de corriente que posee y la elevación de temperatura que soporta. Además, que la sección de cable seleccionado posea una caída de tensión dentro de los parámetros establecidos, con el objetivo de no sobredimensionar el cable y evitar que resulte en unas instalaciones muy costosas económicamente.

El dimensionamiento del cable se realiza utilizando el método por corriente y por caída de tensión, se verifican los resultados y se determina cual es el método que proporciona un equilibrio entre seguridad y economía para las instalaciones eléctricas.

4.12.1. Método por corriente

Como su nombre lo indica se calcula la corriente nominal que circula por el circuito y se estiman factores como la temperatura ambiente del lugar de la instalación, su método de protección contra esfuerzos mecánicos entre otros.

Cuando una corriente más elevada circula por un conductor más pequeño, se tendrá una elevación de temperatura, a esta elevación de temperatura se le conoce como efecto Joule, este fenómeno se produce pérdidas eléctricas en forma de calor elevando de esta manera el riesgo de incendio del conductor.

Cada cable del tipo THHN tiene una capacidad de circulación de corriente dada en la tabla 310-16 del Código Eléctrico Nacional de los Estados Unidos (NEC).

Para realizar los cálculos se debe tener en cuenta la tipología de la carga, su potencia activa nominal y su voltaje de operación. Con estos datos se ingresan a la siguiente expresión para cargas monofásicas y trifásicas según sea el caso.

Sistemas monofásicos

$$I = \frac{S}{V} \text{ Amperios}$$

Y para sistemas trifásicos:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} * V * \cos \theta} \text{ Amperios}$$

S = Potencia aparente (S)

V = Voltaje nominal de operación en volts

Cos θ = 1 para cargas resistivas, 0,8 para cargas inductivas

4.12.2. Método por caída de tensión

Este método es mayormente utilizado cuando la carga está alimentada a una distancia considerable de la fuente. Debido a la resistencia que presenta el

cable puede existir una caída de tensión desde el punto de origen del voltaje hasta el punto de la carga. Según el Código Eléctrico Nacional de los Estados Unidos, los valores máximos de caída de tensión admisibles son de 2 % en los alimentadores y 3 % para la distribución de la corriente hasta la carga.

Este método introduce dos parámetros adicionales:

- La distancia que separa la fuente de la carga
- La resistividad del material a utilizar para su conducción

De igual forma se encuentra para los dos esquemas, trifásico y monofásico de la siguiente forma:

$$S = \frac{2 * L * I * \cos \theta}{\Delta V * \gamma * V} \text{ mm}^2$$

Y para sistemas trifásicos:

$$S = \frac{\sqrt{3} * L * I * \cos \theta}{\Delta V * \gamma * V} \text{ mm}^2$$

S = Sección del conductor en mm²

L = Distancia entre fuente y la carga

γ = Conductividad del material del cable, 58 Cu 20 °C

I = corriente en amperios

ΔV = Caída de tensión: 3 % Carga, 2 % alimentador.

4.12.3. Selección de conductores

Para seleccionar los conductores de alimentación y los que llegan a los tableros se realizan los cálculos por los dos métodos descritos anteriormente para cumplir con el objetivo de las instalaciones eléctricas, confiabilidad y seguridad, y que sean económicas al no sobredimensionar el cableado.

Tabla XLIV. Selección de conductores tablero Q1

TABLERO Q1								
Circuito	Cantidad	Potencia Aparente (KVA)	Factor de utilización	Demanda Max	Circuitos ramales		Factor de similitud	Potencia Aparente (KVA)
					I_n	$I_{diseño}$		
ILUMINACIÓN	8	8	1	8	6,67	8,33	1	8
TOMAS 120V	13	2,34	1	2,34	1,95	2,44	0,6	1,4
A/C	2	5	1	5	4,17	5,21	1	5
Totales				15,34	12,7	15,97		14,4

Fuente: elaboración propia.

Con los valores de la corriente de diseño se procede a encontrar el calibre de conductor. Para cada circuito ramal en la tabla del código NEC 310-16 se seleccionan los siguientes conductores:

Tabla XLV. Conductores por método de la corriente

Circuito	Fases	Tierra	Interruptor
Iluminación	2x14 AWG	1x14 AWG	15 A
Tomas 120 V	2x14 AWG	1x14 AWG	15 A
A/C	2x14 AWG	2x14 AWG	15 A

Fuente: elaboración propia.

Se realiza el cálculo por el método de caída de tensión con una caída del 3 % a una distancia de 25 metros de la carga. Para el circuito de iluminación obtenemos el siguiente resultado:

$$S = \frac{2*20*8,33}{0,03*120*56} = 1,65 \text{ mm}^2$$

Según la tabla 310-16 del código NEC, el conductor 16 AWG tiene una sección de 1,31 mm² y el conductor 14 AWG tiene una sección de 2,08 mm², por lo que el conductor seleccionado será el de THHN 14 AWG, según el método de la corriente.

Con los valores de la potencia aparente total se procede a calcular el conductor para el alimentador y las barras del centro de carga.

Se estimó una potencia aparente máxima de 14,4 kVA para el tablero Q1. Con este valor procedemos a calcular la corriente de la siguiente forma:

$$I = \frac{14,4}{\sqrt{3}*0,208*0,8} = 49,96 \text{ amperios}$$

De acuerdo a la tabla 310-16 del código NEC se utiliza un conductor THHN #2 AWG para las fases y THHN #2 AWG color verde para la tierra.

La carga tiene un total de 10 circuitos, estimando un crecimiento del 25 % se selecciona un tablero trifásico con barras de 100 A, de 18 polos y con interruptor termo magnético de 100 A.

Tabla XLVI. **Cálculo de conductor alimentador del tablero principal**

TABLERO	Capacidad (kVA)	Factor de simultaneidad	Potencia Aparente S kVA
Q1	14,4	0,9	12,96
Q2	16,25	0,9	14,62
Q3	31,14	0,9	28,02
Q4	31,14	0,9	28,02
Q5	20,76	0,9	18,68
Q6	20,76	0,9	18,68
Q7	33,7	0,9	30,33
Q10	25,95	0,9	23,35
Q12	25,95	0,9	23,35
Q13	25,95	0,9	23,35
Q14	38,5	0,9	34,65
Q15	25,95	0,9	23,35
Q16	20,76	0,9	18,68
Total			298,08
Corriente total			1 034,27

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo del conductor del alimentador se utiliza el factor de simultaneidad como se indica la tabla anterior, se encuentra la corriente total estimada, con este valor se compara con la tabla del código NEC 310-16 para determinar el calibre del conductor a utilizar.

Para este alimentador con una corriente de 1 034,27 A se utilizan un conductor THHN calibre #350 MCM un total de 4 líneas por cada fase.

De acuerdo al código NEC, el artículo 220.61, especifica que es prohibida la reducción del neutro a sistemas tetrafilares especialmente conectados en estrella, por lo cual se utiliza un conductor neutro al 100 %. Los cables seleccionados para el neutro son 4 líneas THHN #350 MCM.

Para el conductor de tierra física, según la tabla 250.12 del código NEC, se selecciona 4 líneas de THHN #4/0.

La carga total instalada demanda 16 espacios de interruptores trifásicos con un total de 48 polos, con un crecimiento estimado del 25 %. El total de números de polos del tablero principal es de 60, no existe un tablero comercial con ese número de polos, por lo que se procede a seleccionar dos tableros de 42 polos cada uno con barras de 600 A del tipo trifásico y cada uno con un interruptor principal de 1 200 A.

La capacidad del transformador a utilizar es de 300 kVA de acuerdo a la tabla anterior, con una conexión 13,2 – 0,208/0,12 kV protegido por el interruptor de 1 200 A del lado de baja y por fusibles de 16 A del lado de alta en los cortacircuitos.

Tabla XLVII. Cálculo de alimentadores por método de corriente

TABLERO	Capacidad (kVA)	Conexión	Voltaje (V)	cos θ	Corriente (A)	Conductor Fase	Conductor Tierra	Interruptor principal
Q1	14,40	Trifásica	208	0,8	49,96	THHN #2	THHN #8	100
Q2	16,25	Trifásica	208	0,8	56,38	THHN #2	THHN #8	100
Q3	31,14	Trifásica	208	0,8	108,04	THHN#1/0	THHN #6	125
Q4	31,14	Trifásica	208	0,8	108,04	THHN #1/0	THHN #6	125
Q5	20,76	Trifásica	208	0,8	72,03	THHN #2	THHN #8	100
Q6	20,76	Trifásica	208	0,8	72,03	THHN #2	THHN #8	100
Q7	33,70	Trifásica	208	0,8	116,93	THHN #1/0	THHN #6	125
Q10	25,95	Trifásica	208	0,8	90,04	THHN #2	THHN #8	100
Q12	25,95	Trifásica	208	0,8	90,04	THHN #2	THHN #8	100
Q13	25,95	Trifásica	208	0,8	90,04	THHN #2	THHN #8	100
Q14	38,50	Trifásica	208	0,8	133,58	THHN #1/0	THHN #6	150
Q15	25,95	Trifásica	208	0,8	90,04	THHN #2	THHN #8	100
Q16	20,76	Trifásica	208	0,8	72,03	THHN #2	THHN #8	100

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Cálculo de alimentadores por método de caída de tensión**

TABLERO	Distancia (m)	Conexión	Voltaje	cos θ	Caída de Tensión	Sección mm ²	Conductor Fase
Q1	35	Trifásica	208	0,8	3	6,93	THHN #8
Q2	20	Trifásica	208	0,8	3	4,47	THHN #10
Q3	39	Trifásica	208	0,8	3	16,71	THHN #4
Q4	44	Trifásica	208	0,8	3	18,85	THHN #4
Q5	55	Trifásica	208	0,8	3	15,71	THHN #4
Q6	35	Trifásica	208	0,8	3	10,00	THHN #6
Q7	62	Trifásica	208	0,8	3	28,75	THHN #2
Q10	52	Trifásica	208	0,8	3	18,57	THHN #4
Q12	43	Trifásica	208	0,8	3	15,35	THHN #4
Q13	24	Trifásica	208	0,8	3	8,57	THHN #6
Q14	17	Trifásica	208	0,8	3	9,00	THHN #6
Q15	60	Trifásica	208	0,8	3	21,42	THHN #2
Q16	8	Trifásica	208	0,8	3	2,28	THHN #12

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Conductores seleccionados para alimentadores**

TABLERO	Conductor Fase THHN	Conductor Neutro THHN	Conductor Tierra THHN
PRINCIPAL	4x350 MCM	4 x 350 MCM	4 x 1/0
Q1	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q2	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q3	1 x #1/0	1 x #1/0	1 x #6
Q4	1 x #1/0	1 x #1/0	1 x #6
Q5	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q6	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q7	1 x #1/0	1 x #1/0	1 x #6
Q10	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q12	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q13	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q14	1 x #1/0	1 x #1/0	1 x #6
Q15	1 x #2	1 x #2	1 x #8
Q16	1 x #2	1 x #2	1 x #8

Fuente: elaboración propia.

4.13. Selección de tableros

En la actualidad existen muchos tipos de tableros eléctricos, los cuales pueden diferir en tamaño entre marcas. Para seleccionar el tablero utilizaremos valores estándar que pueden encontrarse en la mayoría de fabricantes; lo importante es mantenerse lo más cerca de los valores de diseño. Uno de los factores que debemos conocer para el dimensionamiento es la cantidad de circuitos que deseamos alojar y proveer de un factor de 50 % de espacios libres. El otro es la capacidad en amperios de las barras, la cual será el producto de la corriente total calculada más un 25 %, topología de conexión y su respectiva conexión y voltaje.

Tabla L. **Tableros para el edificio**

Nombre del Tablero	Voltaje (V)	Topología	Corriente (A)	Numero de Circuito	Tablero a utilizar
Principal	208/120	Trifásico	600	48	2 tableros de 42 polos
Q1	208/120	Trifásico	49,96	10	100 A/18 circ/3Fases
Q2	208/120	Trifásico	56,38	18	100 A/24 circ/3Fases
Q3	208/120	Trifásico	108,04	54	125 A/54 circ/3Fases
Q4	208/120	Trifásico	108,04	32,5	125 A/42 circ/3Fases
Q5	208/120	Trifásico	72,03	17	100 A/24 circ/3Fases
Q6	208/120	Trifásico	72,03	33	100 A/42 circ/3Fases
Q7	208/120	Trifásico	116,93	19	125 A/24 circ/3Fases
Q12	208/120	Trifásico	90,04	31,5	100 A/42 circ/3Fases
Q13	208/120	Trifásico	90,04	34,5	100 A/42 circ/3Fases
Q14	208/120	Trifásico	133,58	24	150 A/24 circ/3Fases
Q15	208/120	Trifásico	90,04	31,5	100 A/42 circ/3Fases
Q16	208/120	Trifásico	72,03	18	100 A/24 circ/3Fases

Fuente: elaboración propia.

4.14. Selección de interruptores

Para la selección de los interruptores nos apoyamos con lo que establece el Código Eléctrico Nacional de los Estados Unidos (NEC), 215.3 donde indica que los alimentadores deben estar protegidos con dispositivos contra sobre corriente, también indica el principio de carga continua que se refiere a cuando una carga opera por mas de 4 horas de forma constante, con lo cual establece qu el alimentador debe poseer un dispositivo de protección no menor de la capacidad de la carga continua mas el 125 %.

Los interruptores deben poseer certificaciones de fabricación y ser sometidos a pruebas periódicamente para garantizar su funcionamiento.

Tabla LI. **Selección de interruptores**

TABLERO Q1					208-120 V
Circuito	Interruptor		Interruptor		Circuito
	Amp	Fases	Amp	Fases	
ILUMINACIÓN	15	1	15	1	ILUMINACIÓN
ILUMINACIÓN	15	1	15	1	ILUMINACIÓN
TOMAS 120 V	20	1	20	1	TOMAS 120 V
TOMAS 120 V	20	1			PENDIENTE
TOMAS 120 V	20	1	20	1	TOMAS 120 V
TOMAS 120 V	20	1	20	1	TOMAS 120 V
TOMAS 120 V	20	1	20	1	TOMAS 120 V
TOMAS 120 V	20	1	100	3	TAB MULTI
PENDIENTE			20	1	TOMAS 120 V
TAB. PROTOCOLO	100	3	20	1	TOMAS 120 V
PENDIENTE					PENDIENTE
Todos los conductores THHN de cobre					

Fuente: elaboración propia.

5. EFICIENCIA ENERGÉTICA

La energía es un recurso que puede ser gestionado de manera que su uso eficiente reduzca costos económicos y contaminación al medio ambiente, entre otros beneficios.

Eficiencia energética es hacer buen uso de la energía mediante la optimización y actualización de los equipos y adoptando todas aquellas acciones que apuntan a obtener un ahorro energético. Esto significa que podemos estar realizando la misma tarea con menos recursos, como obtener el mismo nivel de iluminación con una lámpara que consume menos que la que tenemos actualmente.

El uso eficiente de la energía contribuye a proteger los recursos naturales y disminuir el impacto ambiental; en resumen, la eficiencia energética no es únicamente el cambio del equipo sino también el cambio de hábitos para no utilizar energía innecesaria.

El uso significativo de la energía representa un consumo de energía sustancial y que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético en cualquier lugar ya sean edificios, viviendas, sistemas procesos o equipos.

A partir del análisis sobre el uso y el consumo de la energía en el Minex es preciso determinar las instalaciones, equipos y personal que afectan significativamente al uso y al consumo de la energía.

5.1. Indicadores de desempeño energético

También conocidos como IDEn, son valores cuantitativos que se utilizan para medir el desempeño energético de una institución y proporcionar información para tomar las decisiones acertadas.

Los IDEn giran en torno a la actividad del edificio, por lo que se define como una institución con servicios al público y a funcionarios que visitan las instalaciones del Minex. Las opciones más recomendadas para indicadores son los siguientes:

- Consumo energético/superficie del edificio
- Consumo energético/número de empleados
- Consumo energético/horas trabajadas
- Consumo energético/número de visitantes

Resulta muy inconveniente determinar un número de personas que son atendidas en el Minex, así como las personas que lo visitan (tanto funcionarios como personal subcontratado), por lo cual se descarta el consumo energético/número de visitas.

5.1.1. Compromiso para la implementación de un SGEN

Para la implementación de un SGEN se debe tener compromiso de altos mandos del Minex para la toma de decisiones acerca de los cambios propuestos y la asignación de recursos tanto económicos como humanos, para la implementación de las acciones recomendadas.

En el Minex esta responsabilidad queda en manos de la Dirección General, que es el departamento encargado del mantenimiento y mejoras de infraestructura del edificio.

5.2. Evaluación del desempeño energético del Minex

Para evaluar el sistema de energía se debe tomar en cuenta la información del manejo de los recursos energéticos del Minex, para lo cual se hace uso de históricos de facturación y de las mediciones actuales de los parámetros eléctricos, así como del conocimiento de los hábitos de consumo entre las personas que laboran en el Minex.

5.3. Indicadores energéticos

Los indicadores energéticos se utilizan para analizar la interacción entre la actividad económica de una organización, hábitos humanos, el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Estos indicadores permiten identificar cambios para realizar ahorros de energía, así como información detallada del consumo actual y un consumo tendencial que puede ser utilizada para proyectar una demanda futura.

Para el desarrollo de los indicadores energéticos utilizaremos los datos en las tablas anteriores. Agregaremos un dato que es el valor estimado de área construida del edificio donde hay actividad humana con los recursos energéticos, para lo cual se ha estimado un valor de 8 788,73 m².

5.3.1. Índice de la utilización de la energía

El índice de utilización de la energía (EUI, *Energy Use Intensity*) se refiere a lo eficiente que es la edificación en el consumo de su energía para hacerlo más cómodo a las actividades humanas, tales como la climatización, la refrigeración, la calefacción y la iluminación, entre otros equipos eléctricos que están instalados en el edificio y contribuyen a que sea un mejor lugar de trabajo. El índice de utilización no es más que la relación del consumo de energía con el espacio donde se utiliza.

$$EUI = \frac{\text{Energía consumida kWh}}{\text{Área m}^2}$$

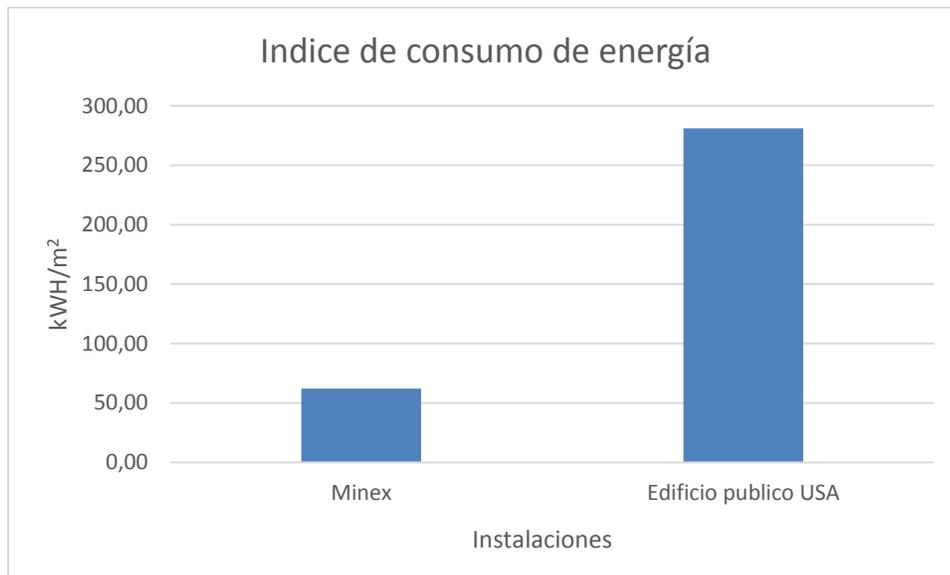
Según el Portfolio Manager de Energy Star, un edificio de servicio público en los Estados Unidos utiliza un EUI de 89,3 kBTU/ft² o 281 kWh/m², por lo que para el año 2018 se encontró que el Minex tuvo un consumo de 544,632 kwh y un estimado de 8 788,73 m², por lo que:

Tabla LII. Índice de uso de la energía del Minex

Año	Energía anual	EUI
2018	544,632	61,97

Fuente: elaboración propia.

Figura 119. **Comparación del uso de energía en un edificio público en USA**



Fuente: elaboración propia, con datos de portfolio manager de Energy Star

El índice de uso de energía puede variar significativamente entre el tipo de edificio y el giro de negocio o actividades que dentro de él se realizan. La comparación se llevó a cabo en base a un edificio con extensiones y construcción similares a la del Minex, pero puede depender en gran parte de la distribución de la distribución interna en oficinas. La cantidad de iluminación, equipos electrónicos como computadoras y equipos de calefacción son factores que pueden contribuir a aumentar o reducir el índice de consumo de energía.

5.3.2. Índice de costo de energía

El índice de costo de energía (ECI, *Energy cost index*) se refiere al costo que se debe pagar por mantener un edificio con climatización, con bombeo de agua propio, con todos los equipos eléctricos funcionando a nuestro servicio. Es la relación del precio de energía sin IVA entre el área del edificio.

$$ECI = \frac{\text{Costo energía Qkwh}}{\text{Area m}^2}$$

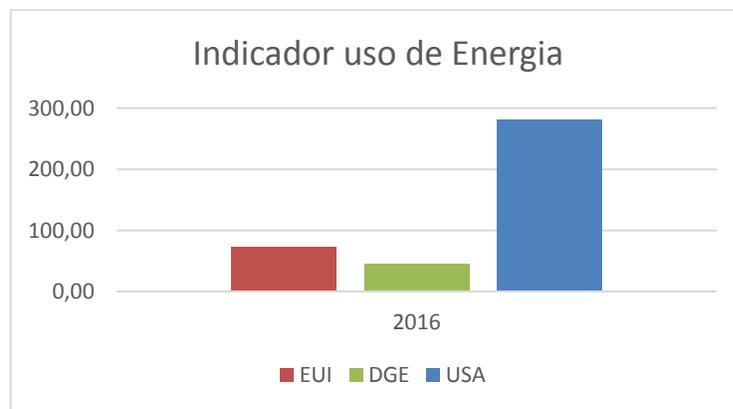
Tabla LIII. **Indicadores para el minex**

Año	Energía anual	Costo Energía	ECI Q kWh/m ²
2016	644 217	Q545 894,89	Q 62,11
2017	586 864	Q497 295,64	Q 56,58
2018	544 632	Q461 509,17	Q 52,51
2019	210 350	Q178 245,96	Q 20,28

Fuente: elaboración propia, con datos de tabla XX

Se presenta una comparación entre un edificio publico con valores establecidos por la *Energy Star* de los Estados Unidos, el edificio de Dirección General de Energía y Minas de Guatemala y el Minex.

Figura 120. **Benchmarking para el Minex**



Fuente: Portfoliomanager. *Reportes de Auditoria en DGE.*

<https://portfoliomanager.energystar.gov/pdf/reference/US%20National%20Median%20Table.pdf>,

reporte de Auditoria en DGE, USAID. Consulta: enero de 2020.

5.4. Uso significativo de la energía

En el capítulo 1 se especifica los datos generales de la institución, así como sus actividades principales entre las que figuran la atención al cliente y la recepción de funcionarios extranjeros y nacionales. Como entidad que representa a Guatemala ante el mundo recibe documentación de guatemaltecos de todas partes y que a su vez es procesada y finalmente archivada.

Por esta razón y a partir del análisis sobre el uso y el consumo de energía del Minex, se determinó que las instalaciones, equipos y personal que son significativos en el uso de la energía son los siguientes:

- Sistema de unidades de potencia ininterrumpida (UPS)
- Equipo de computación, impresoras y monitores
- Equipo de calefacción y refrigeración de alimentos
- Climatización del edificio
- Iluminación interior y exterior del edificio

Las visitas oficiales no tienen mayor cambio entre las actividades del Minex por lo cual todo el consumo energético se da por uso continuo de los equipos por parte del personal que labora en el edificio.

5.5. Hábitos de consumo

Se aplicó una encuesta a todos los empleados que laboran en el Minex por medio de la herramienta Google Docs, con el objetivo de conocer más sobre los hábitos de consumo y de la utilización de los equipos eléctricos y electrónicos en su horario de trabajo.

Tabla LIV. **Resultados de la encuesta**

Encuesta Hábitos de Consumo					
No	Pregunta	Respuesta			Opciones
		SI (1)	NO (2)	N/A (3)	
1	¿Cuál es su horario de Trabajo?	1	81	4	1) 7:00 - 4:00 pm 2) 8:00 - 5:00 pm 3) 7:00 - 5:00 pm
2	¿Si sales de la oficina, dejas la luz encendida?	32	54		
3	¿Es tu Computadora de Escritorio o Laptop y la utilizas con ahorro de Energía?	5	5	39	Laptop y Si utilizo Laptop y No utilizo Escritorio y Si utilizo Escritorio y No utilizo
4	¿Cuántas horas en tu día de trabajo utilizas el Aire Acondicionado?	73	9	4	1) 1-4 2) 4-8 3) más de 8
5	¿Mantienes las puertas Cerradas cuando está el A/C funcionando?	57	29		
6	¿Sabes si los equipos de la oficina como impresora, fotocopidora tienen la configuración de Ahorro de Energía Activada?	34	52		N/A: no tienen
7	¿Si conoces formas de ahorrar energía o recursos como papel, tinta lo pones en práctica?	79	6		
8	¿Conoces los materiales que son reciclables y los reciclas?	62	18	4	1) Si y reciclo 2) Si, pero No reciclo 3) No
9	¿Tú y tus compañeros usan buenos hábitos para ahorro de energía como cerrar ventanas cuando el A/C funciona?	50	32		
10	¿Consideras positivo que el ministerio utilice Energía Renovable?	85	1		
11	¿Cambiarías tus hábitos para reducir el consumo de Energía, aunque te haga más difícil tu día en la oficina?	76	9		
12	¿Sabías que, para generar Electricidad por medio de Combustibles Fósiles, estos se convierten en toneladas de CO2 que se vierten a la atmosfera?	47	39		

Fuente: elaboración propia, empleando herramienta de Google Docs.

En base en los resultados de la encuesta concluimos lo siguiente:

- Están dispuestos a cambiar sus hábitos de consumo para ahorrar energía.
- Consideran positivo el uso de fuentes de generación de energía más limpias y renovables.
- Treinta y nueve de los encuestados se enteraron que para generar electricidad se utilizan combustibles fósiles que producen dióxido de carbono, que es vertido a la atmósfera y produce gases de efecto de invernadero.

La identificación y priorización de las oportunidades de mejora en el desempeño energético del Minex (bajo el concepto de realizar cambios que no tengan una inversión muy elevada y que van no solo limitadas a aspectos técnicos en cuestión de equipamiento, sino también en temas estructurales del edificio y una revisión de la potencia contratada), se detallan unas propuestas de ahorro energético que, con el apoyo y el involucramiento de altas autoridades del Minex, pueden llegar a hacer cambios que se reflejen en el consumo energético.

5.6. Propuesta de eficiencia energética con base en la encuesta

Para esta sección utilizaremos las respuestas obtenidas en la encuesta que se realizó a los empleados del Minex, en las cuales se deseaba conocer cuál era su postura ante los cambios por realizar en su día laboral para conseguir una disminución en el consumo eléctrico. La mayoría de personas estuvo de acuerdo con dichos cambios. También se les preguntó acerca de hábitos de reciclaje y formas de ahorrar en la climatización del edificio. Con base en estas respuestas se han elaborado las siguientes prácticas y hábitos de consumo.

El aire acondicionado aporta el 22 % del consumo energético entre aires para cada oficina y el aire central utilizado por el chiller, por lo cual describimos algunos hábitos y mejoras en los equipos de climatización:

- Utilizar sistemas automatizados de control de la temperatura como termostatos y dejarlos programados para el invierno, de 21 °C-23 °C y para el verano, de 24 °C-25 °C.
- Reemplazo de equipos de aire acondicionado con baja eficiencia energética.
- Mantener la puerta cerrada siempre que el aire acondicionado esté funcionando.

El siguiente rubro que aporta buen porcentaje al consumo eléctrico es la iluminación de las oficinas, por lo cual se proponen hábitos para el buen manejo de la electricidad y para promover conciencia en el uso de la misma.

- Apagar la luz cuando no esté nadie en la oficina. Esto es algo difícil de realizar, ya que las oficinas por lo general son compartidas.
- El edificio tiene buena cantidad de luz natural, por lo cual se sugiere remover cualquier objeto que se interponga entre la luz y el lugar de trabajo y no forzar a utilizar la luz artificial.
- Con el tiempo, el difusor de la luminaria baja su eficiencia debido a la acumulación de polvo, por lo que el nivel de iluminación es más bajo. Se recomienda mantener limpias las lámparas de las oficinas.

Existen aparatos electrodomésticos que se utilizan diariamente y no se tiene la percepción de que utilicen mucha energía, como las cafeteras eléctricas, los hornos de microondas, las estufas eléctricas y los refrigeradores, para lo cual proponemos las siguientes prácticas y hábitos de consumo.

Estos equipos utilizan sistemas de conversión de energía como resistencia y motores que hacen el consumo bastante elevado con el simple uso de calentar una taza de café, mantener la cafetera con poco líquido por muchas horas y abrir el refrigerador muy seguido.

- Utilizar equipos de alta eficiencia, como los electrodomésticos, con el sello de Energy Star.
- Evitar mantener conectada la cafetera por mucho tiempo.
- Limitar el uso del microondas.
- Abrir la refrigeradora únicamente cuando sea necesario.
- Revisar los empaques de la refrigeradora.
- La mayor parte de computadoras del edificio son tipo escritorio, por lo cual se recomienda utilizar el salvapantallas con un color oscuro.
- Mantener equipos de impresión en modo ahorro. Si no se van a utilizar por buen tiempo, dejarlo desconectado.
- Llevar una toalla personal para el secado de manos y no utilizar el aparato que se encuentra instalado en la pared del baño.

Como medida general, se propone que se realicen campañas de información sobre el ahorro energético y charlas informativas sobre la generación de energía, debido a que buena cantidad de personas encuestadas no sabían que, al generar electricidad, se vierten toneladas de CO₂ a la atmosfera.

- Programas de reciclaje y separación de los desechos y contratar o donar todos los materiales reciclables, para que no terminen en el basurero municipal sin ninguna forma de reutilización. Establecer un programa de mantenimiento que incluya la limpieza y reposición de lámparas dañadas. Actualmente no existen planes de mantenimiento enfocados al sistema de iluminación.

La lista anterior presenta una propuesta de cambios que no requieren mayor inversión, pero no es suficiente. Es por ello que en el siguiente capítulo se hace una propuesta de cambio de tecnología y uso de equipos más eficientes, así como una propuesta de un sistema fotovoltaico como otro tipo de fuente de energía, adicional a la suministrada por la comercializadora.

6. PROPUESTAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

De acuerdo a las mediciones realizadas en el estudio de calidad de energía al inventario de equipos que se encuentran instalados en el Minex, y con el apoyo de las gráficas comparativas de consumo, se logró determinar qué aspectos (como la iluminación, que utiliza casi una cuarta parte del consumo total de la energía) pueden ser reducidos mediante la migración a nuevas tecnologías, con grandes beneficios y una mejor eficiencia energética. Es así como pasamos a una propuesta sobre el reemplazo de iluminación fluorescente actual por iluminación led.

6.1. Cambio de iluminación actual por iluminación led

También conocido como diodo emisor de luz, el led es un semiconductor que reacciona ante la aplicación de una corriente eléctrica y emite luz de acuerdo al material de construcción.

Esta tecnología de iluminación tiene muchos beneficios frente a sus antecesores, la iluminación fluorescente, compact fluorescente (CFL) y las incandescentes. También se encuentran las más antiguas que contienen mercurio, unas lámparas de luz naranja que toman algún tiempo en brindar el 100 % de su luminosidad, los balastos en las lámparas. A diferencia de ellos, la lámpara o bombillo led puede brindar toda su iluminación casi instantáneamente.

La iluminación led ofrece la ventaja de tener direccionalidad, se puede entregar más luminosidad a un área donde deseamos enfocar, a diferencia de

las lámparas fluorescentes que emiten su luz sin ningún control a todas las áreas donde se encuentran instaladas, por lo que pierden eficiencia.

Cuando hay cámaras instaladas en parqueos o en los ingresos de edificios, la iluminación led aumenta la información visual captada por las cámaras de seguridad.

Una ventaja más es su tiempo de vida, algunas marcas ofrecen hasta 50 000 horas comparadas con 10 000 horas que ofrece una lámpara fluorescente o cfl, lo cual hace que la iluminación led sea una tecnología apropiada para el Minex.

6.2. Características de la iluminación del Minex

En la mayor parte del edificio se encuentran instaladas lámparas fluorescentes de 4 tubos T8 por luminaria de 48 " de longitud, con un consumo por tubo de 32 watts.

En otras áreas se encontraron lámparas tipo U que utilizan un tubo fluorescente del tamaño de 24 "x 24 " con el difusor con poca visibilidad debido al problema que tienen estos difusores de tornarse en un color amarillo lo cual evita que la luz sea transmitida hasta el lugar de trabajo, convirtiéndose en pérdidas de luz y de energía consumida.

En el parqueo se encontraron reflectores del tipo led con base decorativa y estratégicamente colocadas para disminuir las sombras que aparecen debido a falta de alcance de la iluminación instalada.

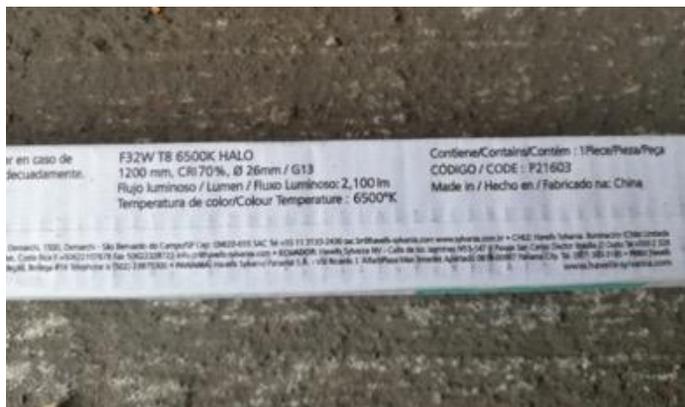
Tabla LV. **Inventario de lámparas en el Minex**

UBICACIÓN	Liston 2 100 lm 32watts	Liston 1 000 lm 18watts	CFL 2 100 lm 32Watts
ARCHIVO	368	41	0
DIRECCION GENERAL	332	2	4
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	228	58	15
EDIFICIO DE TRANSPORTES	80	17	29
EXTERIOR	152	14	54
INFORMATICA	276	0	13
JURIDICOS	372	38	10
PASILLO FINANCIERA	200	62	0
PROTOCOLO	264	26	9
SALA DE PRENSA	168	24	7
SALAS	460	136	0
SALON DE BIBLIOTECA	0	131	2
VICE-DESPACHO 1 & 2	60	7	0
Total	2 960	556	143

Fuente: elaboración propia, con datos recopilados en visitas al edificio.

En la tabla anterior se encuentran todas las luminarias instaladas. Las lámparas tipo listón se encuentran de dos tamaños, el de 24 "x 48 ", que tiene 4 tubos de 2 100 lumenes y un consumo de energía de 32 watts por tubo. Las lámparas de 24 "x 24 " tiene 4 tubos de 17 watts por tubo.

Figura 121. Tubo T8 en lámpara de 24 "x48 "



Fuente: elaboración propia, departamento de mantenimiento del Minex.

Se procede a realizar el total de energía utilizada para la iluminación de los departamentos que conforman el Minex.

Figura 122. Energía utilizada por la iluminación fluorescente

UBICACION	Liston 2x4 32 Watts	Liston 2x2 18 Watts
ARCHIVO	11 776	738
DIRECCION GENERAL	10 624	36
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	7 296	1 044
EDIFICIO DE TRANSPORTES	2 560	306
EXTERIOR	4 864	252
INFORMATICA	8 832	0
JURIDICOS	11 904	684
PASILLO FINANCIERA	6 400	1 116
PROTOCOLO	8 448	468
SALA DE PRENSA	5 376	432
SALAS	14 720	2 448
SALON DE BIBLIOTECA	0	2 358
VICE-DESPACHO 1 & 2	1 920	126
Total	94 720	10 008

Fuente: elaboración propia, con datos recopilados en visitas al edificio.

6.2.1. Luminaria tipo led propuesta para el Minex

Para la propuesta sobre el cambio de luminarias se acordó con el personal encargado del mantenimiento de utilizar la misma estructura y cableado, únicamente cambiarían el tubo fluorescente por tubo led.

El tubo T8 marca Philips tiene un voltaje de operación 120-277 V, con una medida de 1 200 mm (48 "), un consumo de energía de 20 watts y una eficiencia de 2 100 lm y una frecuencia de operación de 50/60 hz.

El tubo T8 marca Philips tiene un voltaje de operación 120-277V con una medida de 600 mm (24 "), con un consumo de energía de 10 watts y una eficiencia de 1 050 lm y una frecuencia de operación de 50/60 hz.

Tabla LVI. **Energía utilizada por el tubo led T8**

UBICACION	T8 24"x48" 20 Watts	T8 24"x24" 10 Watts
ARCHIVO	7 360	410
DIRECCION GENERAL	6 640	20
EDIFICIO ATENCION AL MIGRANTE	4 560	580
EDIFICIO DE TRANSPORTES	1 600	170
EXTERIOR	3 040	140
INFORMATICA	5 520	0
JURIDICOS	7 440	380
PASILLO FINANCIERA	4 000	620
PROTOCOLO	5 280	260
SALA DE PRENSA	3 360	240
SALAS	9 200	1 360
SALON DE BIBLIOTECA	0	1 310
VICE-DESPACHO 1 & 2	1 200	70
Total	59 200	5 560

Fuente: elaboración propia, con datos recopilados en visitas al edificio.

Figura 123. **Ahorro en energía entre el tubo fluorescente y el tubo led**

Tipo de Tubo	Watts x Tubo	Cantidad	Tubo 48"	Watts x tubo	cantidad	Tubo 24"	Total kwh	kwh annual	Costo kwh
Tubo Fluorescente T8	32	2960	94720	18	556	10008	104728	217834.24	Q 184,587.94
Tubo Led T8	20	2960	59200	10	556	5560	64760	134700.8	Q 114,142.49
Energía Ahorro x hora									Q 70,445.45

Fuente: elaboración propia, con datos de tabla LV.

Se observa que, al año, en un periodo de trabajo de 8 horas el Minex tendría un ahorro de Q 70 445,45 por el cambio de tubo fluorescente a tubo led. Esto representa un ahorro del 62 % del costo anual del pago de energía eléctrica por iluminación.

Tabla LVII. **Retorno de Inversión**

Tipo de Tubo	Precio	Cantidad	Total
Tubo Led T8 20W	Q 67,00	2 960	Q 198 320,00
Tubo Led T8 10W	Q 43,50	556	Q 24 186,00
Total, inversión			Q 222 506,00
Retorno de inversión años			3,16

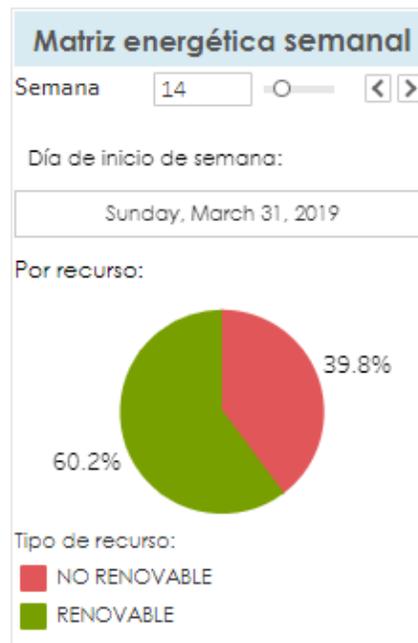
Fuente: elaboración propia.

El proyecto contempla la misma cantidad de luminarias en las mismas ubicaciones un proyecto tipo “quita/poner” como se conoce en el medio. Con esto no existirán cambios de cableado, ni reubicación de luminarias, lo que se traduce en un ahorro en coste de mano de obra.

6.3. Propuesta de un sistema de generación renovable fotovoltaico

Según el portal de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica en Guatemala, la generación de energía por medio de fuentes renovables para la semana del 31 de marzo de 2019 tiene un 60,2 % y las fuentes no renovables, un 39,8 %.

Figura 124. **Matriz energética de fuentes de generación de energía en Guatemala**



Fuente: CNEE. *Matriz Energética Semanal*. http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=2436.

Consulta: enero de 2020.

Con este dato se demuestra que la generación de energía por medio de fuentes renovables está tomando bastante campo en Guatemala, lo que se aprovecha para realizar una propuesta sobre fuentes renovables para el Minex y, con ello, contribuir con el objetivo de este documento: una eficiencia energética con reducción de costo económico y contaminación al medio ambiente.

6.4. Sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía de la luz solar para convertirla en energía eléctrica. Este sistema está basado en la capacidad que tienen las celdas fotovoltaicas o paneles solares de transformar la energía solar en una energía eléctrica directa (DC). Utiliza otro dispositivo llamado inversor, que es el encargado de convertirla de corriente directa a energía alterna (AC) para ser utilizada posteriormente en la industria o en residencias.

La generación de la energía eléctrica dependerá de varios factores. El principal es la cantidad de horas de incidencia de luz solar sobre la celda fotovoltaica. Otro factor es la cantidad de paneles instalados, su orientación, el ángulo de inclinación y su potencia nominal.

Los materiales de construcción de las celdas solares son el silicio cristalino y el arseniuro de galio; estos últimos son los más utilizados para el uso fotovoltaico. Mientras que el silicio cristalino es utilizado para la microelectrónica, el silicio policristalino es menos eficiente para la conversión de energía, pero tiene la ventaja de que es más económico. Entre los de silicio cristalino encontramos tres categorías: el silicio monocristalino que se identifica porque es de un color azul oscuro; las celdas de silicio policristalino (también conocido como multicristalino) están construidas por un conjunto de cristales de silicio y se identifican por tener un color azul más intenso. La última categoría son las celdas de silicio amorfo, menos eficientes que las de silicio cristalino pero más económicas y los encontramos en pequeños objetos como calculadoras y relojes. Se identifican por su color café cobrizo.

6.4.1. Elementos que conforman un sistema de generación fotovoltaico

Dependiendo de su interacción con la red eléctrica los sistemas fotovoltaicos están clasificados en:

- Conexión *off grid* o conexión fuera de la red
- Conexión *on grid* o directamente conectados a la red
- Conexión isla para aplicaciones de bombeo o residencias alejadas

Los sistemas fotovoltaicos están conformados por los siguientes elementos:

- Celdas solares o paneles fotovoltaicos
- Estructura que sostiene las celdas
- Inversor de corriente directa a corriente directa
- Baterías
- Cables de interconexión
- Un contador bidireccional en caso de una conexión *on grid*

En algunas instalaciones, las estructuras que sostienen las celdas son fabricadas del tipo motorizado para cambiar el ángulo de inclinación con respecto al sol, dependiendo del horario para maximizar la cantidad de energía incidente en las celdas solares.

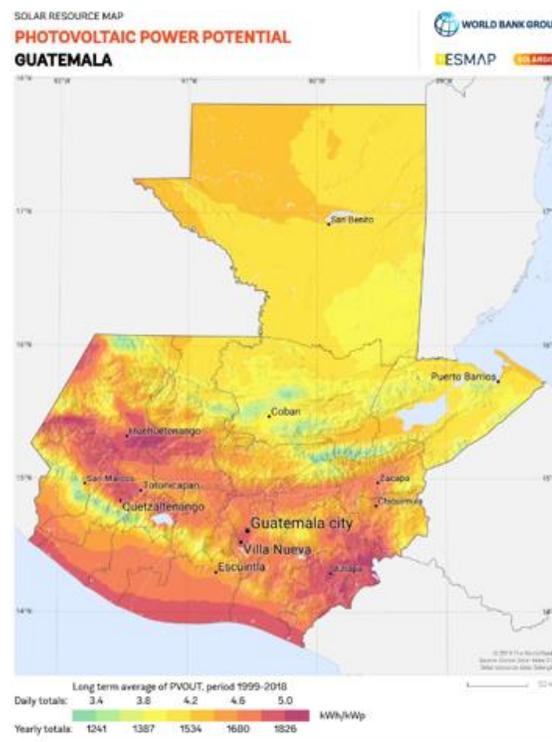
6.5. Radiación de la luz solar en Guatemala

Para conocer la radiación de la luz solar, específicamente en Guatemala se utiliza el término irradiación global horizontal (*Global horizontal irradiance*, GHI). La radiación que llega a la superficie de la tierra puede ser representada de varias

formas. El GHI es la cantidad total de ondas cortas de radiación recibidas desde arriba por una superficie horizontal al suelo. Este valor es de mucho interés para la instalación de sistemas fotovoltaicos e incluye dos valores adicionales, como la irradiación directa normal (*Direct Normal Irradiance*, DNI) y la irradiación horizontal difusa (*Diffuse Horizontal Irradiance*, DIF).

El DNI no es más que la radiación solar que viene en línea directa desde el sol en su posición en el cielo. El DFI es toda la radiación que no llega en un camino directo desde el sol, pero llega por otros medios como moléculas y partículas en la atmósfera y vienen desde todas direcciones.

Figura 125. **Radiación solar en energía por día para Guatemala**



Fuente: Solargis. *Potencial Fotovoltaico Guatemala*. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/guatemala>. Consulta: octubre de 2019.

Según el mapa, la zona central y la parte de la costa sur son las que obtienen mayores rayos solares. La parte de Zacapa y los departamentos del sur son los que obtiene un promedio de casi 6 kwh/m² al día.

6.6. Propuesta fotovoltaica para el Minex

En la propuesta del sistema fotovoltaico se busca la mejor ubicación y el mejor ángulo para obtener el mayor aprovechamiento de la luz solar en la instalación de los paneles solares, con base en que la salida del Sol es por el Este y la puesta, por al Oeste.

De acuerdo al mapa solar mundial y conociendo las coordenadas de la posición global del edificio del Minex (14,6095 ° N, 90,5138 ° W), logramos determinar los valores de la radiación global horizontal.

Figura 126. Irradiación global horizontal (GHI) para el Minex



Fuente: Globalsolaratlas . Irradiación global. <https://globalsolaratlas.info/map?c=14.6095,-90.5138,11&s=14.6095,-90.5138&m=site>. Consulta: octubre de 2019.

Figura 127. **Valores de irradiación para el Minex**

GUATEMALA 14°36'34", -90°30'50" Ministerio De Relaciones Exteriores de Guatemala, Guatemala, Guatemala, Guatemala Time Zone: UTC-06, America/Guatemala [CST]			
Specific photovoltaic power output	PVOUT specific	4.814	kWh/kWp per day
Direct normal irradiation	DNI	5.509	kWh/m2 per day
Global horizontal irradiation	GHI	5.812	kWh/m2 per day
Diffuse horizontal irradiation	DIF	2.068	kWh/m2 per day
Global tilted irradiation at optimum angle	GTI opta	6.048	kWh/m2 per day
Optimum tilt of PV modules	OPTA	18/180	°C
Air temperature	TEMP	18.9	°
Terrain elevation	ELE	1504	m

Fuente: Globalsolaratlas. *Irradiación para el Minex.*

<https://globalsolaratlas.info/map?c=14.6095,-90.5138,11&s=14.6095,-90.5138&m=site>.

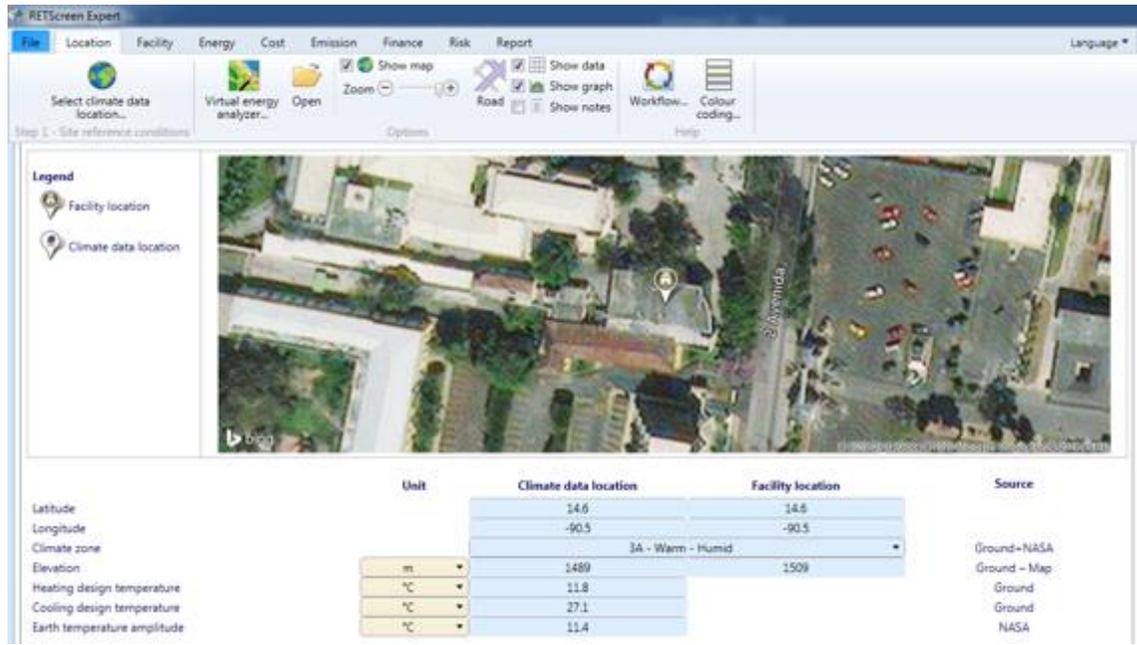
Consulta: octubre de 2019.

6.7. Ubicación del proyecto fotovoltaico

Para la factibilidad del proyecto de un sistema fotovoltaico compuesto de paneles solares se utiliza el programa *RETScreen Expert* desarrollado por la *Natural Resources* de Canadá para el uso de energías limpias. Se usa para ayudar a los profesionales a tomar la decisión en invertir en el uso de fuentes limpias y eficiencia energética.

Se procede a ingresar los datos al programa, como la ubicación del edificio y los elementos que influyen en el consumo energético, como la climatización y la iluminación.

Figura 128. **Ubicación global del Edificio de Atención al Migrante**



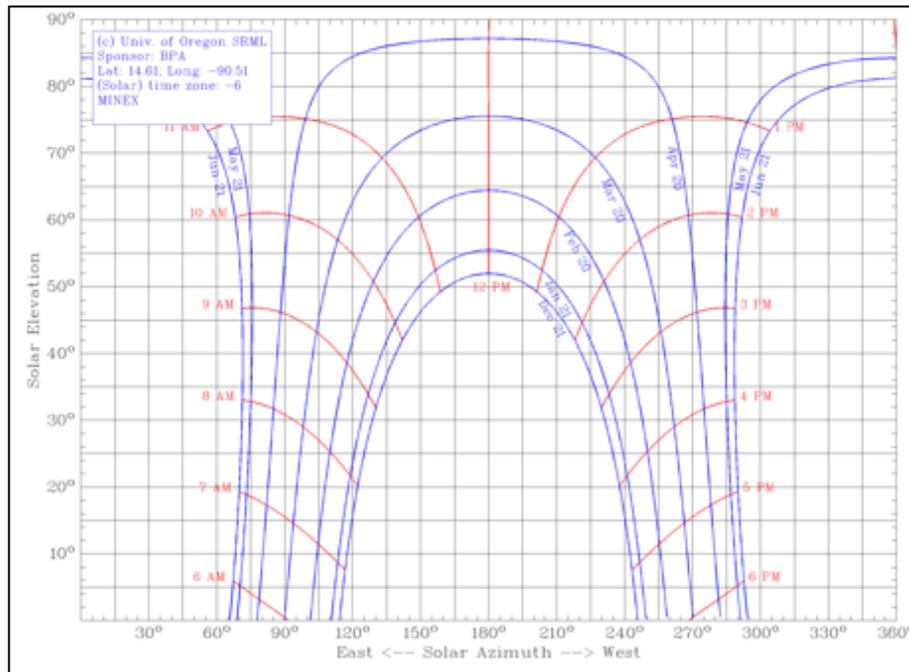
Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

La terraza del Edificio de Atención al Migrante consta de un área de 495 m² que serán utilizados para la instalación de las celdas solares.

El programa devuelve información de la irradiación solar, velocidad del viento, elevación, temperatura del aire, entre otros datos específicos para las coordenadas indicadas. Estos datos son proporcionados por la Aeronáutica Nacional y Administración espacial NASA (*National Astronautic and Space Association*).

Haciendo uso de un programa de la Universidad de Oregón y colocando los valores de latitud 14,61 y longitud -90,51 de la posición del Edificio de Atención al Migrante en la tierra y una zona horaria UTC -6 se obtiene la cantidad en horas de luz solar.

Figura 129. **Horas de luz solar en el Minex**



Fuente: Solardat.Uoregon. *Luz Solar Minex*.

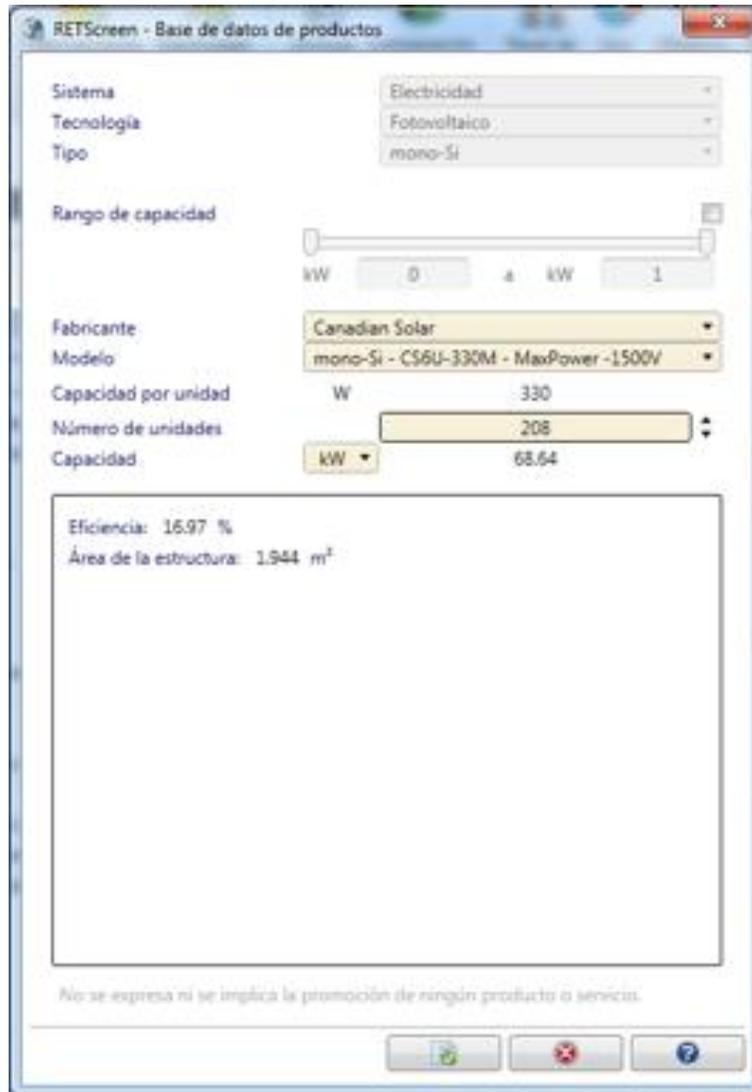
<http://solardat.uoregon.edu/download/temp/18363226.pdf>. Consulta: octubre de 2019.

En la figura anterior se observa que para el Edificio de Atención al Migrante, cuando el sol está con un ángulo de 30 grados, para el verano habrá aproximadamente 8 horas al día de irradiación solar, mientras que para el invierno únicamente 5 horas al día.

6.8. **Diseño del sistema de generación fotovoltaico**

Para el diseño se utilizaron los siguientes equipos que se encuentran en el mercado. Cuentan con una garantía del fabricante de 25 años y pueden operar a frecuencias de 50 y 60 Hz.

Figura 130. Características del panel solar



Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

Figura 131. **Panel solar de 330W**



Fuente: Canadiansolar. *Panel solar*. www.canadiansolar.com. Consulta: octubre de 2019.

Los paneles solares tienen un tamaño de 1 956 x 992 x 40 mm o su equivalente de 1,95 x 0,992 x 0,04 metros, con un área de 1,93 m², lo que significa que hay un área de 495 m² donde se pueden instalar 256 paneles solares.

En el programa se puede seleccionar entre una gran variedad de fabricantes de paneles solares e incluye el costo estimado de los mismos. Considera otros factores como la mano de obra de instalación y el coste de mantenimiento y operación de los paneles.

Con esta información se determina el costo del proyecto que equivale a la instalación de 208 paneles solares, para un total de 68,64 kW instalados a un ángulo de 15 ° con una eficiencia del 16,97 %. El modo de rastreo de la luz solar es fijo y utiliza un inversor con una eficiencia del 95 %.

Figura 132. Costo del inversor y paneles solares

Fotovoltaico - Nivel 2

Evaluación de recursos

Modo de rastreo solar: Fijado

Inclinación: 15

Azimut: 0

Mostrar datos

Fotovoltaico

Tipo: mono-Si

Capacidad de generación eléctrica: kW 68.64

Fabricante: Canadian Solar

Modelo: mono-Si - CS6U-330M - MaxPower -1500V

Número de unidades: 208

Eficiencia: % 16.97%

Temperatura normal de operación de las celdas: °C 45

Coefficiente de temperatura: % / °C 0.4%

Área del colector solar: m² 404

Pérdidas varias: % 15%

Inversor

Eficiencia: % 95%

Capacidad: kW 53

Pérdidas varias: % 1%

Resumen

Factor de planta: % 17.1%

Costos iniciales: \$/kW 2,100

Costo de O y M (ahorros): \$/kW-año 25

Energía ahorrada: kWh 102,756

Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

De la figura anterior podemos encontrar el valor estimado de energía ahorrada. Estos valores son anuales, por lo que el programa determina que con la instalación del sistema fotovoltaico se tendrá un ahorro de 102 756 kWh anuales.

Este dato de energía ahorrada es el que utilizaremos para encontrar el tiempo de retorno del sistema completo, tomándolo como único proyecto a realizarse. Como se mencionó, el valor de kWh para el Minex es de 0,847378, por lo cual encontramos el siguiente tiempo de retorno de la inversión.

Tabla LVIII. **Retorno de inversión sistema fotovoltaico**

Energía Ahorrada	Costo	Costo Total
102 756 kWh anual	0,847378	Q 87 073,17
Costo del proyecto	\$ 102 756,00	Q 791 221,20
Retorno de Inversión años		9,09

Fuente: elaboración propia, datos de programa *RETScreen Expert*.

Con 208 paneles de 300 W tendremos un ahorro de 102 756 kWh anual a un precio de 0,847378. Habrá un ahorro anual de Q 87 073,17 de energía sin IVA para obtener un retorno de inversión de 9,09 años.

De acuerdo al programa *RETScreen Expert*, se utiliza un modelo de benchmarking con datos de edificios con actividades similares a las del edificio del Minex.

6.9. Energía ahorrada por cambio de iluminación a led según RETScreen

Entre las medidas de eficiencia energética se encuentra el cambio de iluminación de los tubos T8 fluorescentes por tubos T8 Led, con una potencia de 18 W que sustituyen los de 32 W. El objetivo es encontrar su factibilidad y su retorno de inversión según *RETScreen Expert*.

Figura 133. Energía ahorrada por cambio de iluminación a led

	Caso base	Caso propuesto	Energía ahorrada
Nivel de iluminación - calculadora			
Tipo de espacio	Oficina		
Nivel de iluminación - sugerido	300 - 500		
Nivel de iluminación	190	250	
Tipo de lámpara y luminaria	Fluorescente T8 - balasto electrónico	Diodo de emisión de luz (LED)	
Eficiencia	85.5 lm/W	100	
Carga eléctrica por lámpara	32 W	18	
Número de lámparas por luminaria	4	4	
Pérdidas varias	2 W	0	
Carga eléctrica por luminaria	130 W	72	
Número de luminarias - sugerido		1,219	
Número de luminarias	600	600	
Número de lámparas - total	2,400	2,400	
Nivel de iluminación - varianza		-50.8%	
Horas de operación	2,346,428 h/año	2,137,857 h/año	
Método de estimación de costos	Nivel 2		
Número de lámparas - costos iniciales	0	1,200	
Costos iniciales - lámpara	\$ 8	\$ 25	
Costos iniciales incrementales - otro		\$ 1,200	
Costos iniciales incrementales - total		\$ 31,200	
Vida útil de lámpara	20,000 h	50,000 h	
Frecuencia de reemplazo de las lámparas	8.5 años	23.4 años	
Ahorros incrementales O y M		-313	
Número de unidades	740	740	
Demanda de electricidad	135,435,857 kWh	68,343,017 kWh	67,092,840 kWh 49.5%

Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

De la gráfica anterior utilizamos el valor de energía ahorrada para encontrar su retorno de inversión.

Tabla LIX. Retorno de inversión proyecto de iluminación

Energía Ahorrada	Costo	Costo Total
67092.84kWh anual	0,847378	Q 56 853,00
Costo del proyecto	\$ 31 200,00	Q 240 240,00
Retorno de Inversión años		4.23

Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

6.10. Emisiones de gases de efecto de invernadero

La generación de electricidad por medio de fuentes primarias de energía como el carbón, traen consigo la producción de gases como el CO₂ (dióxido de carbono).

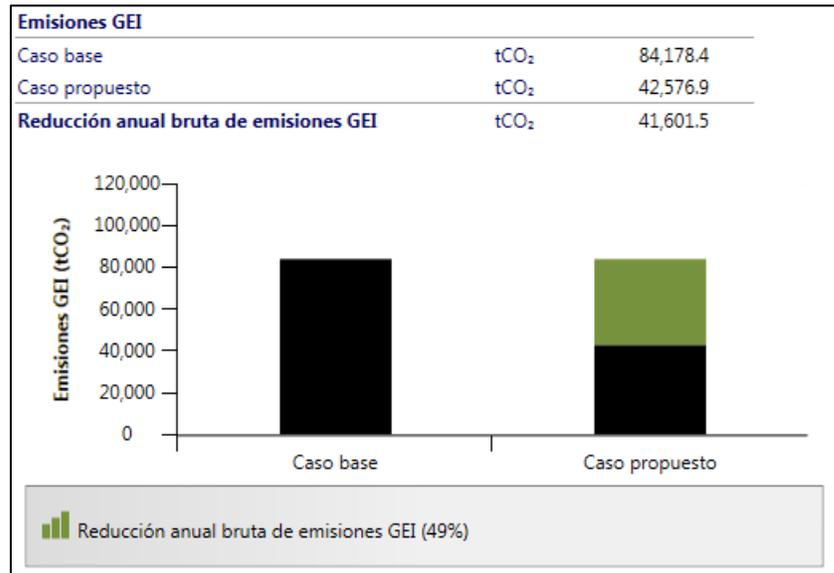
El dióxido de carbono combinado con otros gases como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) son los principales gases que retienen el calentamiento de la atmósfera y producen el efecto de invernadero y como consecuencia las temperaturas se elevan y se agudiza la probabilidad que existan más fenómenos meteorológicos, a esto se le llama cambio climático.

Como estrategia para hacer una concientización en la población guatemalteca se han realizado una serie de estudios de calidad de energía y eficiencia energética en las entidades públicas para reducir la producción de estos gases de invernadero con la reducción del consumo de electricidad por medio de cambios de hábitos de consumo y migración a tecnologías más eficientes.

Debido a la demanda de electricidad se ha hecho necesario la construcción de nuevas subestaciones eléctricas, centrales generadoras de electricidad y la instalación de nuevos tramos de cableado para el transporte de la energía, teniendo como consecuencia la tala de árboles y la contaminación visual que proporcionan estas nuevas estructuras en nuestro entorno.

Se realiza una comparación de un edificio público con una cantidad establecida de gases de invernadero y con hábitos de consumo similares a los que se detectaron en el edificio del Minex, con estos datos se realiza la siguiente gráfica:

Figura 134. **Comparación de emisión de gases de efecto de invernadero (GEI) entre dos edificios públicos**

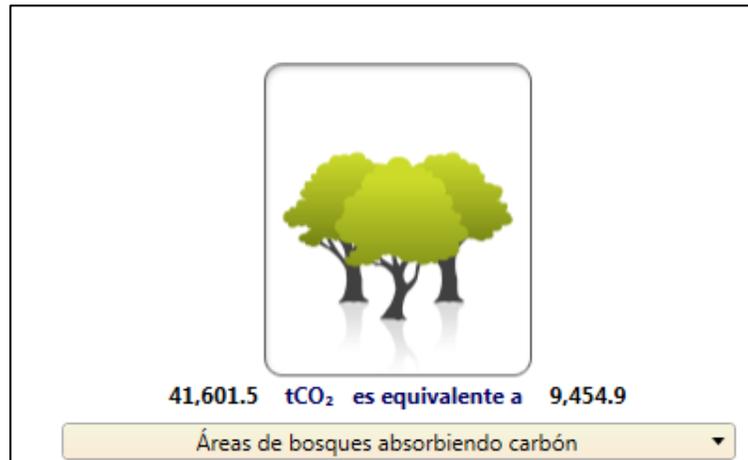


Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

El caso base corresponde a un edificio público en los Estados Unidos, y el caso propuesto corresponde al edificio del Minex, se observa que la generación del Minex es mucho menor que el caso base y que con el sistema fotovoltaico puede llegar haber una reducción considerable de los gases de invernadero.

Para hacer una analogía más tangible acerca de la reducción de gases de efecto invernadero, se utilizará el mismo programa para comparar cuántos árboles son necesarios para reducir la producción de estos gases.

Figura 135. **Reducción de gases de efecto de invernadero mediante la reforestación de árboles**



Fuente: elaboración propia, empleando programa *RETScreen Expert*.

De acuerdo al programa *RETScreen Expert*, 41 601,5 toneladas de dióxido de carbono son producidos por la generación de electricidad para satisfacer la demanda de energía, esto es equivalente a que se plantaran 9 454,9 acres de bosques que absorberán esa cantidad de monóxido de carbono.

7. PROYECCIÓN DE CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Para la proyección del consumo de los próximos meses se toma como base los datos registrados por el instrumento Fluke 435 mediante las mediciones realizadas en días laborales y en fines de semana. La proyección se extiende hasta el año 2027, en cumplimiento con la política energética 2013-2027.

7.1. Cambio de iluminación actual por iluminación led

Consiste en el reemplazo de la iluminación actual por iluminación con tecnología tipo led. Este proyecto tiene las siguientes características:

Inversión inicial: Q 233 579,40

Ahorro mensual: Q 2 040,08

Retorno de inversión: 9,54 años

Vida útil del proyecto: 10 años

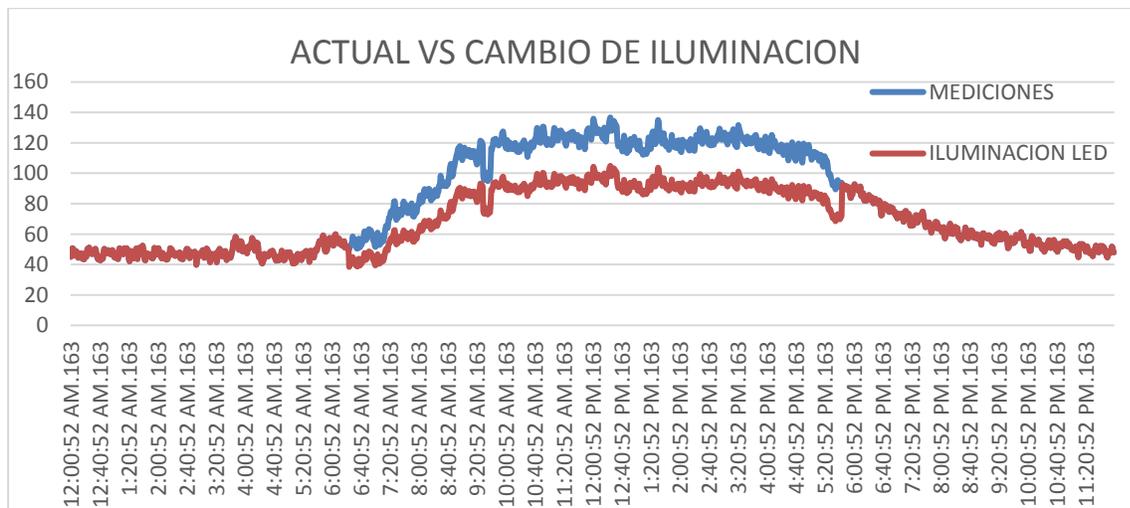
Según las gráficas de consumo diario en periodo laboral y no laboral se estima la cantidad de energía consumida para cada mes y se proyecta hasta el año 2027.

Tabla LX. **Proyección de consumo de energía con iluminación led**

DIAS AL AÑO			ILUMINACIÓN LED		
Mes	Día laboral	Día No laboral	Día Laboral	Día No laboral	Total, kwh
Enero	22	9	36 264,10	7 710,58	43 975
Febrero	20	8	32 967,37	6 853,85	39 821
Marzo	21	10	34 615,73	8 567,31	43 183
Abril	19	12	31 319,00	10 280,77	41 600
Mayo	22	9	36 264,10	7 710,58	43 975
Junio	21	9	34 615,73	7 710,58	42 326
Julio	22	9	36 264,10	7 710,58	43 975
Agosto	23	8	37 912,47	6 853,85	44 766
Septiembre	19	11	31 319,00	9 424,04	40 743
Octubre	23	8	37 912,47	6 853,85	44 766
Noviembre	21	9	34 615,73	7 710,58	42 326
Diciembre	20	11	32 967,37	9 424,04	42 391

Fuente: elaboración propia, con datos de la tabla XX.

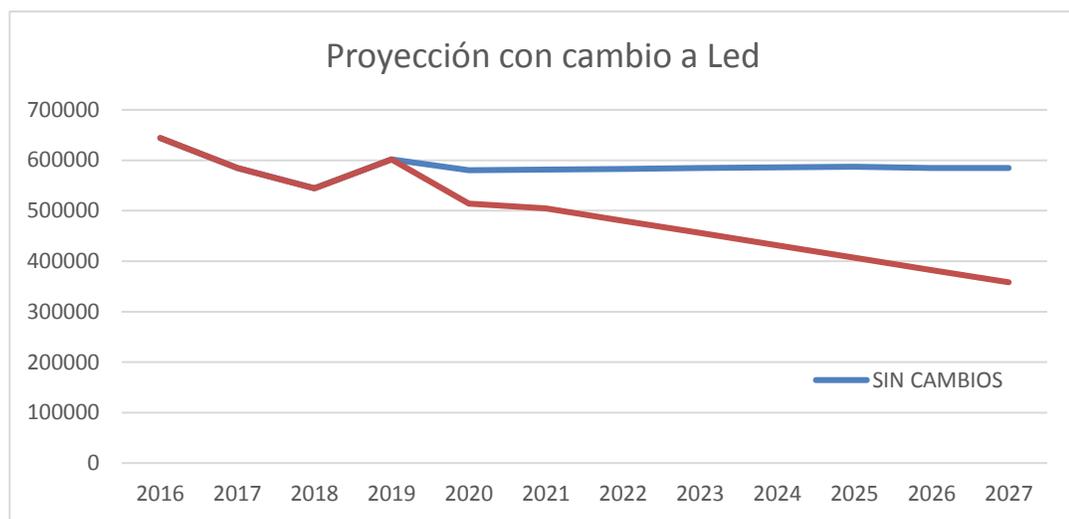
Figura 136. **Potencia día laboral con iluminación actual y con cambio a led**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel con datos del programa *Power Log 5,6*.

En esta gráfica se observa el ahorro diario que se puede obtener cambiando la tecnología actual por iluminación led.

Figura 137. **Comparación de consumo entre la medición y el cambio de iluminación led proyectado hasta 2027**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla LX.

En la gráfica, la línea de color rojo representa el consumo en kWh proyectado para el año 2020 si se realizara el cambio en la iluminación.

7.1.1. Sistema fotovoltaico

Consiste en la instalación de paneles solares en la terraza del edificio de Atención al Migrante. Este proyecto tiene las siguientes características:

- Inversión Inicial: Q 791 221,20
- Ahorro anual: Q 87 073,17
- Retorno de inversión: 9,09 años

- Vida útil del proyecto: 25 años

El objetivo de la instalacion de los paneles solares es de utilizar esta energia durante el horario laboral, estos paneles unicamente representan una parte de la demanda diaria del edificio, continuando con la dependencia de la utilizacion de energia electrica por parte de la distribuidora pero en menor cantidad, produciendo de esta forma un ahorra economico y de gases de efecto de invernadero debido a la generacion de la electricidad.

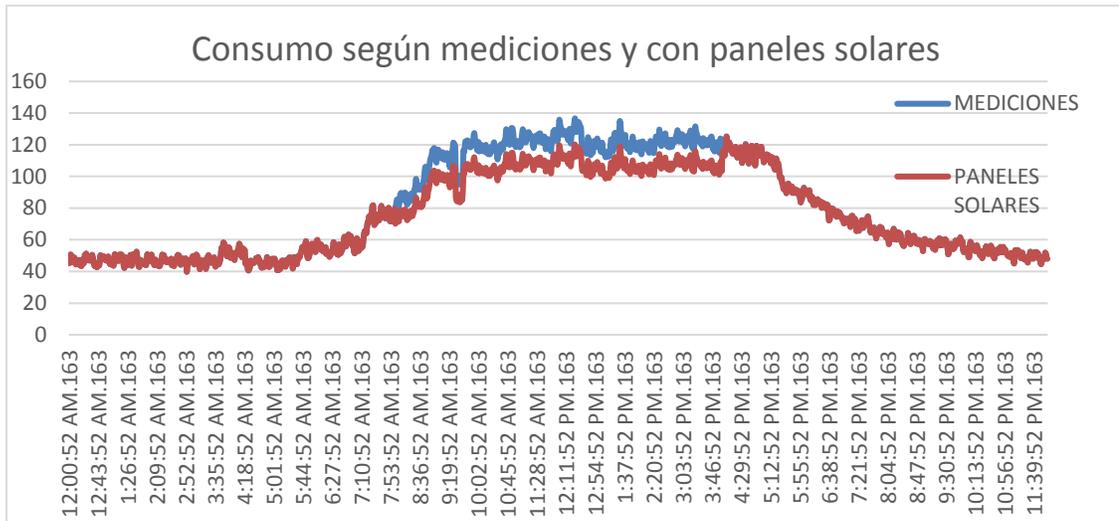
Según las gráficas de consumo diario en periodo laboral y no laboral se estima la cantidad de energía consumida para cada mes y se proyecta hasta el año 2027.

Tabla LXI. **Proyección de consumo de energía con sistema fotovoltaico**

Mes	DIAS AL AÑO		Paneles Solares		
	Día laboral	Día No laboral	Día Laboral	Día No laboral	Total, kwh
Noviembre	21	9	38 279,07	8 204,25	46 483
Diciembre	20	11	36456,26	10 027,41	46 484
Enero	22	9	40 101,89	8 204,25	48 306
Febrero	20	8	36 456,26	7 292,66	43 749
Marzo	21	10	38 279,07	9 115,83	47 395
Abril	19	12	34 633,45	10 939,00	45 572
Mayo	22	9	40 654,51	8 283,00	48 938
Junio	21	9	38 806,58	8 283,00	47 090
Julio	22	9	40 654,51	8 283,00	48 938
Agosto	23	8	42 502,44	7 362,66	49 865
Septiembre	19	11	35 110,71	10 123,66	45 234
Octubre	23	8	42 502,44	7 362,66	49 865

Fuente: elaboración propia.

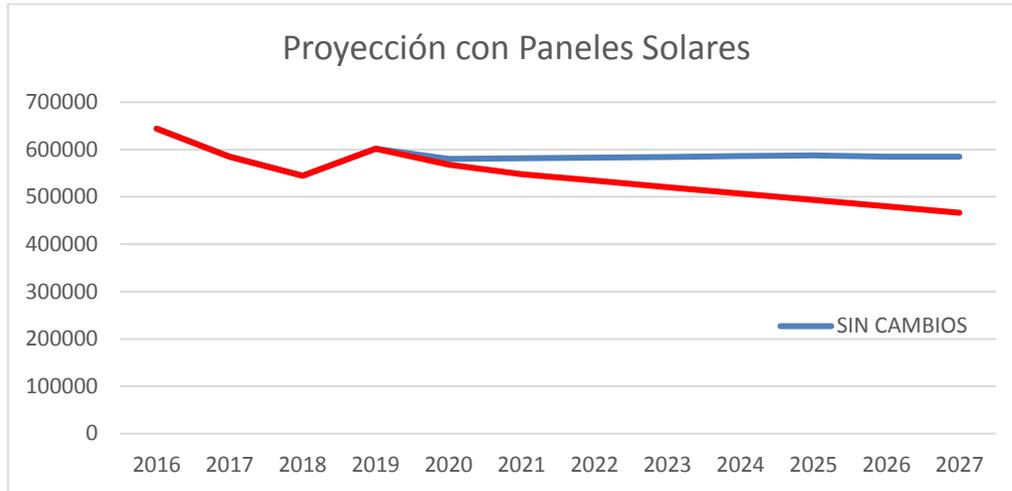
Figura 138. **Potencia día laboral según mediciones y con paneles solares**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel con datos del programa *Power Log 5,6*.

En esta gráfica se observa el ahorro diario que se puede obtener al instalar un sistema fotovoltaico en el Minex. Este mismo comportamiento se proyecta hasta el año 2027.

Figura 139. **Comparación de consumo entre la medición y el sistema fotovoltaico instalado proyectado hasta 2027**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla LXI.

7.1.2. Buenas prácticas y hábitos de ahorro

Para esta sección utilizaremos las respuestas obtenidas en la encuesta que se realizó a los empleados del Minex, en las cuales se deseaba conocer cuál era su postura ante los cambios por realizar en su día laboral para conseguir una disminución en el consumo eléctrico. La mayoría estuvo de acuerdo con dichos cambios. También se les preguntó acerca de hábitos de reciclaje y formas de ahorrar en la climatización del edificio. Con base en estas respuestas se han elaborado las siguientes prácticas y hábitos de consumo.

El aire acondicionado aporta el 22 % del consumo energético entre aires para cada oficina y el aire central utilizado por el chiller, por lo cual describimos algunos hábitos y mejoras en los equipos de climatización:

- Utilizar sistemas automatizados de control de la temperatura como termostatos y dejarlos programados para el invierno de 21 °C-23 °C y para el verano, 24 °C-25 °C.
- Reemplazo de equipos de aire acondicionado con baja eficiencia energética.
- Mantener la puerta cerrada siempre que el aire acondicionado esté funcionando.

El siguiente rubro que aporta buen porcentaje al consumo eléctrico es la iluminación de las oficinas, para la iluminación se elaboraron las siguientes prácticas y hábitos de ahorro de energía.

- Apagar la luz cuando no esté nadie en la oficina. Esto es algo difícil de realizar, ya que las oficinas por lo general son compartidas.
- El edificio tiene buena cantidad de luz natural, por lo cual se sugiere remover cualquier objeto que se interponga entre la luz y el lugar de trabajo y no forzar a utilizar la luz artificial.
- Con el tiempo el difusor de la luminaria baja su eficiencia debido a la acumulación de polvo, lo cual hace el nivel de iluminación más bajo. Se recomienda mantener limpias las lámparas de las oficinas.
- Migración de la tecnología actual a tecnología led más eficiente.

Existen aparatos electrodomésticos que se utilizan diariamente y no se percibe que utilicen mucha energía, como las cafeteras eléctricas, los hornos de

microondas, las estufas eléctricas y los refrigeradores, para lo cual proponemos las siguientes prácticas y hábitos de consumo.

Estos equipos utilizan sistemas de conversión de energía como resistencia y motores que hacen el consumo bastante elevado con el simple uso de calentar una taza de café, mantener la cafetera con poco líquido por muchas horas y abrir el refrigerador muy seguido.

- Utilizar equipos de alta eficiencia los electrodomésticos y con el sello de Energy Star.
- Evitar mantener conectada la cafetera por mucho tiempo.
- Limitar el uso del microondas.
- Abrir la refrigeradora únicamente cuando sea necesario.
- La mayor parte de computadoras del edificio son tipo escritorio, por lo cual se recomienda utilizar el salvapantallas con un color oscuro.
- Mantener equipos de impresión en modo ahorro o, si no se van a utilizar por buen tiempo, dejarlos desconectados.
- Llevar una toalla personal para el secado de manos y no utilizar el aparato que se encuentra instalado en la pared del baño.

Como medida general se propone que se realicen campañas de información sobre el ahorro energético y charlas informativas sobre la generación de energía,

debido a que buena cantidad de personas encuestadas no sabían que al generar electricidad se vierten toneladas de CO2 a la atmósfera.

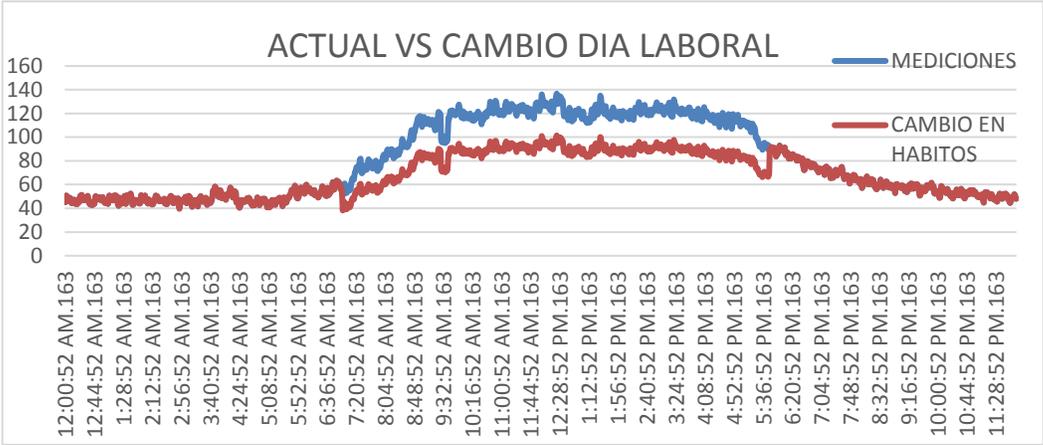
Organizar además programas de reciclaje y separación de los desechos y contratar servicio de recolección o donar todos los materiales reciclables y que no terminen en el basurero municipal sin ninguna forma de reutilización.

Tabla LXII. Proyección de consumo de energía con buenas prácticas y hábitos de ahorro

Mes	DIAS AL AÑO		BUENAS PRACTICAS		
	Día laboral	Día No laboral	Día Laboral	Día No laboral	Total
Enero	22	9	35 753,81	8 241,90	43 996
Febrero	20	8	32 503,46	7 326,14	39 830
Marzo	21	10	34 128,64	9 157,67	43 286
Abril	19	12	30 878,29	10 989,20	41 867
Mayo	22	9	35 753,81	8 241,90	43 996
Junio	21	9	34 128,64	8 241,90	42 371
Julio	22	9	35 753,81	8 241,90	43 996
Agosto	23	8	37 378,98	7 326,14	44 705
Septiembre	19	11	30 878,29	10 073,44	40 952
Octubre	23	8	37 378,98	7 326,14	44 705
Noviembre	21	9	34 128,64	8 241,90	42 371
Diciembre	20	11	32 503,46	10 073,44	42 577

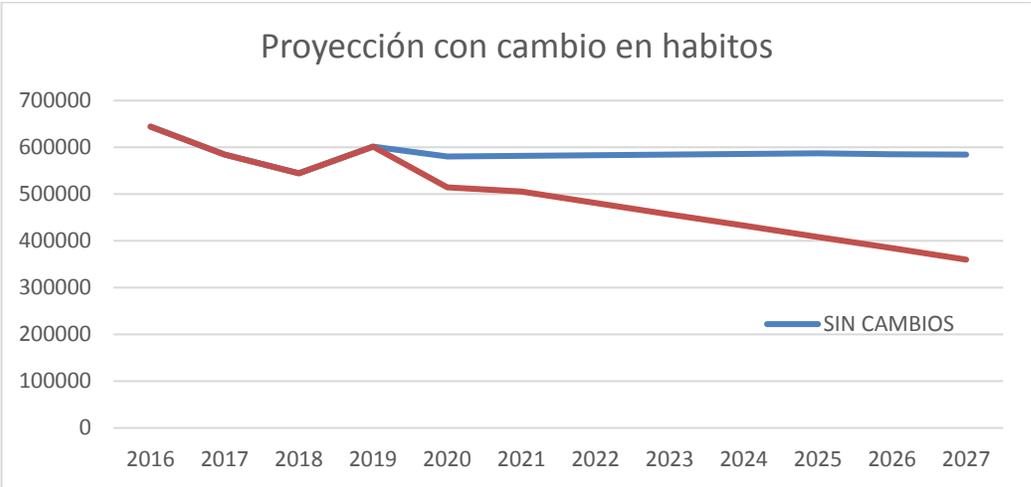
Fuente: elaboración propia.

Figura 140. **Potencia día laboral según mediciones y realizando cambios de buenas prácticas y hábitos de ahorro**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel con datos del programa Power Log 5,6.

Figura 141. **Comparación de consumo entre la medición y el cambio de buenas practicas y hábitos de ahorro proyectado hasta 2027**



Fuente: elaboración propia, empleando datos de la tabla LX.

7.2. Emisiones de gases de efecto de invernadero

En la página del Ministerio de Energía y Minas se encuentra el factor de conversión de kwh a CO₂. Al momento de la investigación el valor se encuentra en 0,4877 y es el que se utiliza para encontrar el valor de dióxido de carbono que se emplea para generar la electricidad que se provee al Minex.

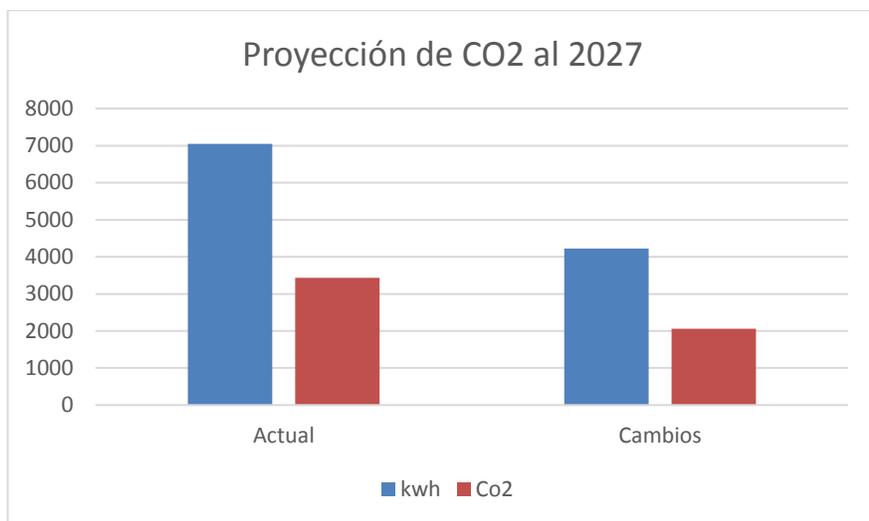
Tabla LXIII. **Comparación entre proyecciones de gases de efecto de invernadero actuales y la aplicación de las medidas de ahorro energético**

Emisiones de Co2 a 2027		
kwh-Co2 =0,4877	Actual	Cambios
Kwh	7 047,56023	4 224,46877
Co2	3 437,09512	2 060,27342

Fuente: elaboración propia.

Se estima un consumo de 7,047 MWh al término del periodo que comprende la Política Energética 2013-2027, con una cantidad de 3 437,09 toneladas de CO₂ producidas al generar dicha electricidad. Con los cambios propuestos se reduce el consumo a 4,224 MWh y 2 060,27 toneladas de CO₂, lo cual representa un ahorro del 40,05 %.

Figura 142. **Comparación entre proyecciones de gases de efecto de invernadero actuales y la aplicación de las medidas de ahorro energético**



Fuente: elaboración propia, con datos de tabla LXI.

En la gráfica se observa el comportamiento de la energía y de la producción de CO2 debido a la generación de electricidad para mantener los servicios funcionando si no se realiza ningún tipo de acción en cuanto a los cambios en cuestiones eléctricas que se presentaron en este trabajo. También se presenta en la misma gráfica la reducción del consumo de energía eléctrica y, por consiguiente, la reducción de toneladas de dióxido de carbono al medio ambiente.

Esto es únicamente para uno de todos los edificios públicos. Si todas las entidades públicas iniciaran un plan de acción sí puede ser posible reducir el consumo de energía en un 25 % en todas las entidades gubernamentales, según la meta propuesta en la Política Energética 2013-2027.

CONCLUSIONES

1. Los sistemas de gestión fueron desarrollados por medio de la metodología ISO 50001:2011, el cual sirve como herramienta a las organizaciones para comprender el uso, consumo y manejo de la energía con el fin de mejorar su desempeño energético.
2. Mediante pasos normalizados se llevó a cabo una revisión energética de los equipos eléctricos. Con base en el análisis de los datos obtenidos se identificaron oportunidades de mejora y actualización de los componentes que representan mayor consumo eléctrico.
3. Como parte de posibles causas que pueden llevar a un desperdicio de energía se estudió la calidad de energía para obtener los parámetros eléctricos de voltaje, corriente, potencia, flickr, energía, armónicos de voltaje y corriente para compararlos con la norma nacional NTSD. El resultado fue satisfactorio, por lo cual la calidad de energía no influye en el consumo de energía eléctrica.
4. El cuarto eje de la Política Energética 2013-2027 tiene como objetivo que al menos el 30 % de las entidades públicas logren un ahorro de energía de hasta el 25 %. En el caso del Minex se logró un ahorro de hasta el 40 % al final del periodo de la Política Energética en 2027.

RECOMENDACIONES

1. Formular una política energética para complementar el sistema de la gestión de la energía con compromisos desde altos mandos, ya que requiere un cambio mental y cultural en los colaboradores de la organización.
2. Desarrollar un plan de acción que inicia con un cronograma de actividades para la realización de los cambios propuestos que mejor se ajusten al Minex. Incluir nuevas propuestas para alcanzar un mejor desempeño energético.
3. Instalar equipos de medición de calidad de energía en los puntos donde se identificó mayor consumo de energía, para obtener datos más precisos y dar seguimiento a los indicadores energéticos, para que contribuyan a elaborar reportes que mejoren la toma de decisiones de los cambios efectuados.
4. Realizar un estudio de calidad de energía, enfocado a la corrección del factor de potencia, debido a que se realizaron cambios en la potencia activa.
5. Realizar auditorías internas del sistema de gestión de la energía donde se presenten los resultados obtenidos para identificar oportunidades de mejora continua.

BIBLIOGRAFIA

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. *Applying Low Voltage Circuit Breakers used in industrial and Commercial Power Systems IEEE Std 1015-2006*. Estados Unidos: 2006. 210 p.
2. _____. *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems IEEE Std 242-2001*. Estados Unidos: 2001. 750 p.
3. _____. *Powering and Grounding Electronic Equipment IEEE Std 1100-2005*. Estados Unidos: 2005. 313 p.
4. Ministerio de Energía y Minas. *Política Energética 2013-2027*. Guatemala: 2013. 52 p.
5. Ministerio de Trabajo y Previsión Social. *Acuerdo Gubernativo 229-2014 y sus reformas*. Guatemala: 2014. 132 p.
6. National Fire Protection Administration. *Código NEC*. Estados Unidos: 2014. 1470 p.
7. Organización Internacional de la Normalización. *Sistemas de Gestión de la Energía ISO 50001*. Suiza: 2018. 22 p.

8. PAUL, Gil. *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. 2a ed. Estados Unidos: CRC Press, 2009. 935 p.
9. ANSI/NETA ATS-2011. *Standard For acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*. Estados Unidos: 2011. 259 p.
10. GRAINGER, Jon J.; WILLIAM, Stevenson Jr. *Análisis de Sistemas Eléctricos de potencia*. 2a. ed. Mexico: McGraw-Hill, 1979. 207 p.
11. SANCHEZ CORTES, Miguel Angel. *Libro de calidad de la Energía Eléctrica*. México: 2009. 492 p.
12. TELLEZ RAMIREZ, Eugenio. *Programa de Distorsión Armónica*. México: 2005. 31 p.