

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN TÉRMICA DE DIFERENTES SUBESTACIONES ELÉCTRICAS
DE TRACCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE
URBANO SUBTERRÁNEO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Álvarez C. Luis F.

Fernández G. Natalia M.

Para optar al Título de

Ingeniero Mecánico

CARACAS 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN TÉRMICA DE DIFERENTES SUBESTACIONES ELÉCTRICAS
DE TRACCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE
URBANO SUBTERRÁNEO**

Tutor Académico: **Prof. Jolymar Soto**

Tutor Industrial: **Msc. Ing. Uxmal Amézquita**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Bachilleres:

Álvarez C. Luis F.
Fernández G. Natalia M.

Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

CARACAS 2008

Caracas, 12 de febrero de 2.008

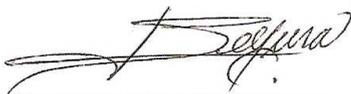
ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

LUIS ALVAREZ y NATALIA FERNANDEZ

Titulado: "EVALUACION TERMICA DE DIFERENTES SUBESTACIONES ELECTRICAS DE TRACCION DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO SUBTERRANEO"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

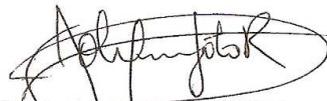


Prof. Julio Segura
Jurado





Prof. Miguel Padilla
Jurado



Profa. Jolymar Soto
Tutor

"Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante"

Caracas, 12 de febrero de 2.008

Ciudadana
Profa. Norma Guzmán
Jefe de División de Control de Estudios
Presente.

Quienes suscriben profesores del Jurado Examinador, designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted, con la finalidad de informarle la decisión de otorgar a los alumnos:

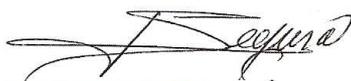
LUIS ALVAREZ y NATALIA FERNANDEZ
C.I. 15.532.177 C.I. 15.991.881

“MENCION HONORIFICA”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado Titulado:

“EVALUACION TERMICA DE DIFERENTES SUBESTACIONES ELECTRICAS DE TRACCION DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO SUBTERRANEO”

Sin otro particular a que hacer referencia, quedamos de usted,



Prof. Julio Segura
Jurado




Profa. Jolymar Soto
Tutor



Prof. Miguel Padilla
Jurado

“Hacia el 50º Aniversario del 21 de noviembre de 1957, Día del Estudiante”

RESUMEN

Alvarez C. Luis F., y Fernández G. Natalia M.

EVALUACIÓN TÉRMICA DE DIFERENTES SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE TRACCIÓN DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE URBANO SUBTERRÁNEO

Tutor Académico: Prof. Jolymar Soto. Tutor Industrial: Msc. Ing. Uxmal Amézquita. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2007. 227 págs.

Carga Térmica, Subestación Eléctrica Tracción, Ventilación, Termografía.

En el presente trabajo se evaluó la carga térmica en diferentes subestaciones eléctricas de tracción representativas de un sistema de trenes principalmente subterráneo (Metro de Caracas C.A.), que poseen un ambiente térmicamente regulado. En estos ambientes se encuentran equipos de vital importancia para el funcionamiento de sus líneas, los cuales presentan fallas de manera frecuente por no tener las condiciones óptimas de trabajo que de no ser corregidas podrían llegar a provocar un colapso del sistema.

Se realizó un trabajo de campo conformado por dos etapas fundamentales, la primera fue la evaluación de algunas variables ambientales en las subestaciones eléctricas de tracción como: la temperatura de bulbo seco, la humedad relativa y la velocidad del aire y la segunda la estimación de la temperatura superficial de los equipos a través de termogramas.

La interrelación de las variables ambientales antes mencionadas y la temperatura superficial de los equipos permitió realizar una estimación de la carga térmica presente en las subestaciones eléctricas de tracción por medio de un método basado en el análisis térmico, puesto que los métodos tradicionales propuestos por la American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) no pudieron ser aplicados, por la ausencia de datos fundamentales para los mismos.

Con los valores de carga térmica obtenidos en cada subestación, se estimó la tasa de flujo volumétrico de aire necesaria para remover dicha carga y se comparó la capacidad de los ventiladores instalados con los valores requeridos en cada ambiente para así comprobar la efectividad de los sistemas de ventilación instalados; llegando a la conclusión de que en todas las subestaciones seleccionadas para el estudio la carga térmica presente excede los valores adecuados y haciéndose necesario el redimensionamiento de dichos sistemas de ventilación.

A mis padres, por todo su apoyo y por guiarme hasta aquí.

A mi sis, por ser mi padre, mi madre y mi mejor amiga.

A mis hermanos y ángeles de la guarda,
Cesar Viana y Maurin Fernández. Los amare por siempre.

A Luís, porque sin ti nada de esto sería posible.

Gracias de todo corazón.

A mis amigas, Harú y Mariana.

Natalia.

A Dios, por haberme permitido llegar hasta aquí
y vivir este momento.

A mi mamá, por ser siempre mi fuente de inspiración
para ser mejor cada día.

A mi papá, por seguir compartiendo memorias y momentos
conmigo, a pesar de estar solo en alma.

A Natalia, por enseñarme de que soy capaz y ser la única
que verdaderamente sabe lo que costo realizar este trabajo.

A mis amigos, León, Freddy, Mariana y Harú,
por compartir mis alegrías y tristezas.

A mis primos los peleles, por alegrar todos mis días.

Luis.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar un profundo agradecimiento, a quienes de una u otra forma nos permitieron el desarrollo de este trabajo; en especial:

- A la Ilustre Universidad Central de Venezuela, por los conocimientos impartidos y todos los momentos especiales que en ella vivimos.
- A Metro de Caracas C.A por brindar sus instalaciones y personal.
- Al Msc. Ing. Uxmal Amézquita por su apoyo y amistad incondicional, por todo el conocimiento brindado, su constancia y esfuerzo. El mayor de nuestros agradecimientos.
- A la Ing. Jolymar Soto por darnos la oportunidad de llevar a cabo nuestro Trabajo Especial de Grado y compartir su experiencia.
- Al Técnico Luís Romero del Departamento de Electrificación y Tracción de Metro de Caracas C.A por su conocimiento, apoyo, esfuerzo y dedicación.
- Al Técnico Harbey de la Espriella del Departamento de Electrificación y Tracción de Metro de Caracas C.A, por su amistad y colaboración.
- Al Técnico Matías Gamboa del Departamento de Electrificación y Tracción de Metro de Caracas C.A, por su contribución en las mediciones realizadas.
- Al Ing. Carlos Castillo de la División de Equipamiento de Metro de Caracas C.A, por la información técnica suministrada en el área de ventilación.
- A los Ing. Hendryk Albornoz y Denisse Santaromita por su valioso asesoramiento en la realización del tomo y su apoyo emocional.
- Al Ing. Miguel Padilla, por su colaboración en el área técnica de refrigeración y ventilación.
- A los Ing. Freddy Cárdenas, Harú Cordero y Mariana Ovalles, por su amistad, colaboración y orientación en la realización del tomo.
- A la Lic. en Educación Isabel Cabrera, por su apoyo y asesoría en la realización del tomo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
--------------------	---

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1.- SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE TRACCIÓN.	3
1.1.1.- Definición, Funcionamiento e Importancia	3
1.2.- EQUIPOS PRESENTES EN LAS SUBESTACIONES TRANSFO- RECTIFICADORAS	5
1.3.- DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.	7
1.3.1.- Tomas de 30 kV	7
<i>1.3.1.1.- Descripción y Función</i>	7
1.3.2.- Disyuntores 30 kVca	7
<i>1.3.2.1.- Descripción y Función</i>	7
<i>1.3.2.2.- Especificaciones</i>	8
1.3.3.- Tablero 30 kVca	9
<i>1.3.3.1.- Descripción y Función</i>	9
1.3.4.- Transformador (30 kVca → 630 Vca).	10
<i>1.3.4.1.- Descripción y Función</i>	10
<i>1.3.4.2.- Especificaciones</i>	11
1.3.5.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc)	12
<i>1.3.5.1.- Descripción y Función</i>	12
<i>1.3.5.2.- Especificaciones</i>	13
1.3.6.- Disyuntores 750 Vcc	14
<i>1.3.6.1.- Descripción y Función</i>	14
<i>1.3.6.2.- Especificaciones</i>	14
1.3.7.- Tablero de 750 Vcc	16
<i>1.3.7.1.- Descripción y Función</i>	16

1.3.8.- Tablero de Control y Mando	16
<i>1.3.8.1.- Descripción y Función</i>	16
1.3.9.- Contacto Negativo a Tierra	17
<i>1.3.9.1.- Descripción y Función</i>	17
1.3.10.- Caja de Retorno Negativa	17
<i>1.3.10.1.- Descripción y Función</i>	17
1.3.11.- Tablero Cargador de Baterías	18
<i>1.3.11.1.- Descripción y Función</i>	18
1.3.12.- Transformador de Auxiliares	18
<i>1.3.12.1.- Descripción y Función</i>	18
1.3.13.- Celdas de Distribución de Auxiliares	18
<i>1.3.13.1.- Descripción y Función</i>	18
1.3.14.- Equipos Auxiliares (Cajetines de Comunicaciones y Auxiliares del Contacto Negativo a Tierra)	19
<i>1.3.14.1.- Descripción y Función</i>	19
<i>1.3.14.2.- Descripción y Función</i>	20
1.4.- UBICACIÓN DE LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS	20
1.4.1.- Línea 1	20
1.4.2.- Línea 2	21
1.4.3.- Línea 3	21
1.4.4.- Línea 4	22
1.5.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE UNA S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS	23
1.5.1.- Descripción general del sistema de Ventilación Natural	23
1.5.2.- Descripción general del sistema de Ventilación Mecánica	23
1.6.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.7.- IMPORTANCIA	25
1.8.- JUSTIFICACIÓN	26
1.9.- OBJETIVOS	26
1.9.1.- Objeto	26
1.9.2.- Objetivo General	26

1.9.3.- Objetivos Específicos	27
1.10.-ALCANCES	27

CAPÍTULO II
CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS BÁSICOS

2.1.- CONCEPTOS BÁSICOS	29
2.1.1.- Temperatura de Bulbo Seco (T_{bs})	29
2.1.2.- Temperatura de Bulbo Húmedo (T_{bh})	29
2.1.3.- Temperatura de Punto de Rocío (T_{pr})	29
2.1.4.- Humedad Absoluta o Específica (ω)	29
2.1.5.- Humedad Relativa (ϕ)	30
2.1.6.- Entalpía (h)	30
2.1.7.- Volumen Específico (v)	30
2.1.8.- Aire Atmosférico	30
2.1.9.- Carga Térmica	31
2.1.10.- Calor Latente	31
2.1.11.- Calor Sensible	31
2.1.12.- Calor Total	31
2.2.- PSICROMETRÍA	32
2.2.1.- Carta Psicrométrica	32
2.3.- PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE	33
2.3.1.- Proceso de Calentamiento o de Enfriamiento Simple	34
2.4.- MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA TRADICIONALES SEGÚN LA SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIERÍA PARA AIRE ACONDICIONADO, CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN (ASHRAE)	35
2.4.1.- Método de Función de Transferencia, “Transfer Function Method”	36
2.4.2.- Método de Cálculo de Cargas por Temperatura Diferencial y Factores de Carga de Enfriamiento, “Difference Temperature Cooling Load / Cooling Load Factor / Solar Cooling Load”	41

2.4.3.- Método de Temperatura Diferencial Total Equivalente y Tiempo Promedio, “Total Equivalent Temperature Differential”	45
2.4.4.- Nuevas metodologías propuestas.....	49
2.4.4.1.- Balance de Calor “Heat Balance”	50
2.4.4.2.- Serie de Tiempo Radiante “Radiant Time Series”	52
2.5.- CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS POR TRANSFERENCIA DE CALOR	53
2.5.1.- Transferencia de Calor por Convección.....	54
2.5.2.- Transferencia de Calor por Radiación	60
2.6.- TERMOGRAFÍA	67
2.7.- CONFORT Y ESTRÉS TÉRMICO	70
2.7.1.- Confort Térmico	70
2.7.2.- Zonas de Confort	72
2.7.3.- Estrés Térmico	73
2.8.- VENTILACIÓN.....	74

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

3.1.- DEFINICIÓN DE LAS SUBESTACIONES EN ESTUDIO	77
3.2.- DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS PRESENTES EN LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.....	79
3.3.- SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.....	80
3.4.- METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES DE LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS ESCOGIDAS	82
3.4.1.- Metodología de Medición de Variables Ambientales y Temperaturas Superficiales de los Equipos en las S/E Transfo-rectificadoras.....	83
3.4.2.- Construcción de los Esquemas de Comportamiento de la Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire en las S/E Transfo-rectificadoras.....	86

3.4.3.- Inspección de los Sistemas de Ventilación e Iluminación	89
3.5.- METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA Y DE LA TASA DE FLUJO VOLUMÉTRICO REQUERIDA PARA DISIPARLA EN LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.....	90
3.5.1.- Determinación de la temperatura de diseño recomendada	90
<i>3.5.1.1.- Determinación de la temperatura de diseño recomendada para la estimación de la carga térmica.....</i>	<i>91</i>
<i>3.5.1.2.- Determinación de la temperatura de diseño recomendada para la estimación de la tasa de flujo volumétrico de aire requerido para disipar la carga térmica</i>	<i>92</i>
3.5.2.- Estimación del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección (h_c).....	93
<i>3.5.2.1.- Convección Natural.....</i>	<i>93</i>
<i>3.5.2.2.- Convección Forzada.....</i>	<i>94</i>
3.5.3.- Estimación de la Temperatura Superficial de los Equipos.....	95
3.5.4.- Cálculo de la Tasa de Flujo de Calor Disipada por los Equipos Presentes en las S/E Transfo-rectificadoras	95
3.5.5.- Cálculo de la Tasa de Flujo de Volumétrico Requerida para Disipar la Carga Térmica en las S/E Transfo-rectificadoras	98
3.6.- PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES.....	99
3.7.- EVALUACION DE ZONAS DE CONFORT Y ESTRÉS TÉRMICO	100

CAPÍTULO IV

PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1.- RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROYECTO	105
4.1.1.- Subestación Transfo-rectificadora Petare.....	107
4.1.2.- Subestación Transfo-rectificadora Chacao	125
4.1.3.- Subestación Transfo-rectificadora La California.....	129
4.1.4.- Subestación Transfo-rectificadora Parque Carabobo.	133
4.1.5.- Subestación Transfo-rectificadora Plaza Venezuela	137
4.1.6.- Subestación Transfo-rectificadora Propatria	141

4.1.7.- Subestación Transfo-rectificadora La Paz	145
4.1.8.- Subestación Transfo-rectificadora Maternidad	149
4.1.9.- Subestación Transfo-rectificadora El Valle	153
4.1.10.- Subestación Transfo-rectificadora Los Símbolos	157
4.1.11.- Subestación Transfo-rectificadora Nuevo Circo	161
4.1.12.- Subestación Transfo-rectificadora Zona Rental.....	165
4.1.13.- Tablas de condiciones estándar y operación de ventiladores propuestos y los existentes disponibles	169
4.1.14.- Tabla de modelos de ventiladores propuestos y los existentes disponibles.....	171

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.- ANÁLISIS GENERALES.....	172
5.1.1.- De los Croquis de las S/E Transfo-rectificadoras	172
5.1.2.- De los Esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire	173
5.1.3.- De los Termogramas.....	174
5.1.4.- Del Confort y La Sensación Térmica	175
5.1.5.- De la Ventilación Instalada en las S/E Transfo-rectificadoras.....	175
5.2.- DE LAS SUBESTACIONES ESTUDIADAS.....	176
5.2.1.- S/E Transfo-rectificadora Petare	177
5.2.2.- S/E Transfo-rectificadora Chacao	179
5.2.4.- S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.....	183
5.2.5.- S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela	185
5.2.6.- S/E Transfo-rectificadora Propatria.....	187
5.2.7.- S/E Transfo-rectificadora La Paz	189
5.2.8.- S/E Transfo-rectificadora Maternidad	192
5.2.9.- S/E Transfo-rectificadora El Valle.....	194
5.2.10.- S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos.....	196
5.2.11.- S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo	199
5.2.12.- S/E Transfo-rectificadora Zona Rental	202

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES.....	205
6.1.1.- De la Metodología de Medición	205
6.1.2.- De la Metodología de Cálculo	206
6.1.3.- De los Esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire.....	206
6.1.4.- De las Termografías.....	207
6.1.5.- De la Ventilación	207
6.1.6.- Del Confort y La Sensación Térmica	209
6.2.- DE LAS SUBESTACIONES EVALUADAS	209
6.2.1.- S/E Transfo-rectificadora Petare	209
6.2.2.- S/E Transfo-rectificadora Chacao	210
6.2.3.- S/E Transfo-rectificadora La California	210
6.2.4.- S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.....	211
6.2.5.- S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela	211
6.2.6.- S/E Transfo-rectificadora Propatria.....	212
6.2.7.- S/E Transfo-rectificadora La Paz	213
6.2.8.- S/E Transfo-rectificadora Maternidad	213
6.2.9.- S/E Transfo-rectificadora El Valle.....	214
6.2.10.- S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos.....	215
6.2.11.- S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo	216
6.2.12.- S/E Transfo-rectificadora Zona Rental	217
RECOMENDACIONES.....	218
GENERALES	218
DE LAS SUBESTACIONES ESTUDIADAS.....	219
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	222

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

<i>Tabla 1.1.- Disyuntores de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.</i>	8
<i>Tabla 1.2.- Descripción de los tableros de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.</i>	9
<i>Tabla 1.3.- Especificaciones de los transformadores (30 kVca → 630 Vca) pertenecientes a Metro de Caracas C.A.</i>	11
<i>Tabla 1.4.- Métodos de rectificación de ondas.....</i>	12
<i>Tabla 1.5.- Especificaciones de los rectificadores (630 Vca → 750 Vcc) pertenecientes a Metro de Caracas C.A.</i>	13
<i>Tabla 1.6.- Especificaciones de los disyuntores de 750 Vcc pertenecientes a Metro de Caracas C.A. (Línea 1 / Línea 2).</i>	14
<i>Tabla 1.7.- Especificaciones de los disyuntores de 750 Vcc pertenecientes a Metro de Caracas C.A. (Línea 3 / Línea 4).....</i>	15
<i>Tabla 1.8.- Funciones de los tableros de control y mando pertenecientes a Metro de Caracas C.A.</i>	16
<i>Tabla 1.9.- Especificaciones de las celdas de distribución de auxiliares (J1, J2 y J3) ...</i>	19

CAPÍTULO II

<i>Tabla 2.1.- Carga térmica por techos y paredes soleadas.</i>	37
<i>Tabla 2.2.- Carga térmica por vidrios, particiones, cielo raso, pisos y ocupantes.</i>	38
<i>Tabla 2.3.- Carga térmica por iluminación, equipos eléctricos a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.....</i>	39
<i>Tabla 2.4.- Cargas térmicas por enfriamiento.</i>	40
<i>Tabla 2.5.- Carga térmica total.</i>	41

Tabla 2.6.- Carga térmica a través de techos y paredes.	42
Tabla 2.7.- Carga térmica a través de vidrios, paredes internas, plafones y pisos.	43
Tabla 2.8.- Carga térmica por ocupantes, iluminación y equipos eléctricos.	44
Tabla 2.9.- Carga térmica por equipos eléctricos a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.	45
Tabla 2.10.- Carga térmica por techos, paredes, vidrios, particiones, pisos y cielo raso.	47
Tabla 2.11.- Carga térmica por personas, iluminación, equipos asistidos por motores eléctricos, a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.	48
Tabla 2.12.- Carga térmica por enfriamiento.	49
Tabla 2.13.- Expresión de la ley de enfriamiento de Newton.	55
Tabla 2.14.- Grupos adimensionales.	56
Tabla 2.15.- Correlaciones para convección natural en placa plana vertical.	58
Tabla 2.16.- Correlaciones para convección natural en placa plana horizontal.	59
Tabla 2.17.- Dependencia de varias constantes en función del número de Prandtl.	59
Tabla 2.18.- Correlación para convección forzada por flujo externo.	60
Tabla 2.19.- Potencia emisiva total de un cuerpo negro.	61
Tabla 2.20.- Potencia emisiva total de un cuerpo real.	62
Tabla 2.21.- Energía total absorbida por un cuerpo real.	62
Tabla 2.22.- Energía total transmitida por una superficie gris.	63
Tabla 2.23.- Energía total reflejada por una superficie gris.	63
Tabla 2.24.- Consideraciones de un cuerpo gris.	63
Tabla 2.25.- Tasa de flujo de calor intercambiada entre dos superficies.	64
Tabla 2.26.- Factores de forma entre dos superficies emisores difusos y reflectores de radiación uniforme.	66
Tabla 2.27.- Relaciones de factor de vista.	66
Tabla 2.28.- Leyes que definen el comportamiento radiante.	68
Tabla 2.29.- Ecuación para el cálculo de la ventilación natural.	76
Tabla 2.30.- Ecuación para el cálculo de la ventilación mecánica.	76

CAPÍTULO III

<i>Tabla 3.1.- Sistema de selección de las S/E Transfo-rectificadoras presentes en Metro de Caracas C.A.....</i>	78
<i>Tabla 3.2.- Matriz de selección de cálculo de cargas térmicas para las S/E transfo-rectificadoras</i>	81
<i>Tabla 3.3.- Modelo de planilla usada en la de recolección de datos de las subestaciones.....</i>	85
<i>Tabla 3.4.- Rangos de temperaturas y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras</i>	87
<i>Tabla 3.5.- Rangos de humedad relativa y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras</i>	88
<i>Tabla 3.6.- Rangos de velocidades de aire y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras</i>	88
<i>Tabla 3.7.- Tabla de sensación térmica por el efecto combinado de la temperatura y la humedad.....</i>	103
<i>Tabla 3.8.- Modelo para la estimación de los síndromes provocados por calor en el personal de una subestación</i>	104

CAPÍTULO IV

<i>Tabla 4.1.- Mediciones obtenidas en la subestación Petare.</i>	110
<i>Tabla 4.2.- Análisis termográfico de la parte superior del radiador perteneciente al Transformador 2.</i>	114
<i>Tabla 4.3.- Análisis termográfico de la parte superior de la cuba perteneciente al Transformador 1.</i>	115
<i>Tabla 4.4.- Análisis termográfico de los balastros superiores pertenecientes al rectificador 2.....</i>	116
<i>Tabla 4.5.- Carta de sensación térmica en función de la temperatura y la humedad relativa. .</i>	121

Tabla 4.6.- Leyenda de la carta de sensación térmica en función de la temperatura y la humedad relativa.	122
Tabla 4.7.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	122
Tabla 4.8.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	123
Tabla 4.9.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	123
Tabla 4.10.- Identificación de los anexos por subestación.	124
Tabla 4.11.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	127
Tabla 4.12.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	127
Tabla 4.13.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	128
Tabla 4.14.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	131
Tabla 4.15.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	131
Tabla 4.16.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	132
Tabla 4.17.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	135
Tabla 4.18.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	135
Tabla 4.19.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	136
Tabla 4.20.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	139
Tabla 4.21.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	139
Tabla 4.22.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	140
Tabla 4.23.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	143
Tabla 4.24.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	143
Tabla 4.25.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	144
Tabla 4.26.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	147
Tabla 4.27.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	147
Tabla 4.28.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	148
Tabla 4.29.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	151
Tabla 4.30.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	151
Tabla 4.31.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	152
Tabla 4.32.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	155
Tabla 4.33.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	155
Tabla 4.34.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	156
Tabla 4.35.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	159

Tabla 4.36.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	159
Tabla 4.37.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	160
Tabla 4.38.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	163
Tabla 4.39.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	163
Tabla 4.40.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	164
Tabla 4.41.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.....	167
Tabla 4.42.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.	167
Tabla 4.43.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.....	168
Tabla 4.44.- Condiciones de operación, equipos propuestos y existentes en el sistema de unidades internacional.....	169
Tabla 4.45.- Condiciones de operación, equipos propuestos y existentes en el sistema de unidades inglés.....	170
Tabla 4.46.- Modelos de ventiladores propuestos y existentes en las S/E transformadoras	171

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

<i>Fig.1.1.- Esquema de la red de distribución de energía eléctrica para tracción.....</i>	<i>4</i>
<i>Fig.1.2.- Esquema subestación eléctrica de tracción del Metro de Caracas C.A.....</i>	<i>6</i>
<i>Fig.1.3.- Tomas modulares de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.....</i>	<i>7</i>
<i>Fig.1.4.- Disyuntor de 30 kVca Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>8</i>
<i>Fig.1.5.- Disyuntor de 30 kVca Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>8</i>
<i>Fig.1.6.- Tablero disyuntor de 30 kVca perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>9</i>
<i>Fig.1.7.- Transformador sumergido en aceite (30 kVca → 630 Vca) Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig.1.8.- Transformador seco (30 kVca → 630 Vca) Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>12</i>
<i>Fig.1.9.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc) Líneas 1 y2 perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>13</i>
<i>Fig.1.10.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc) Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>14</i>
<i>Fig.1.11.- Disyuntor de 750 Vcc Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A....</i>	<i>15</i>
<i>Fig.1.12.- Disyuntor de 750 Vcc Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A ..</i>	<i>15</i>
<i>Fig.1.13.- Tablero disyuntor de 750 Vcc perteneciente a Metro de Caracas C.A</i>	<i>16</i>
<i>Fig.1.14.- Tablero de control y mando perteneciente a Metro de Caracas C.A.....</i>	<i>17</i>
<i>Fig.1.15.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 1.....</i>	<i>20</i>
<i>Fig.1.16.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 2.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig.1.17.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en.....</i>	<i>22</i>

Fig.1.18.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 4.....	22
---	----

CAPÍTULO II

Fig.2.1.- Esquema explicativo de la carta psicrométrica.....	33
Fig.2.2.- Representación esquemática del proceso de calentamiento simple.	34
Fig.2.3.- Proceso de enfriamiento simple mostrado en una carta psicrométrica.	35
Fig.2.4.- Esquema de métodos de cálculo de carga térmica según ASHRAE.....	35
Fig.2.5.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método TFM de AHSRAE.	36
Fig.2.6.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método CLTD/CLF/SCL de AHSRAE.	42
Fig.2.7.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método TETD/TA de AHSRAE.....	46
Fig.2.8.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método Heat Balance de AHSRAE. ...	51
Fig.2.9.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método RTS de AHSRAE.	53
Fig.2.10.- Mecanismos de transferencia de calor.	54
Fig.2.11.- Transferencia de calor por convección.	54
Fig.2.12.- Tipos de transferencia de calor por convección.....	55
Fig.2.13.- Transferencia de calor por radiación entre una superficie y el ambiente.	61
Fig.2.14.- Transferencia de calor por radiación, entre dos superficies.....	64
Fig.2.15.- Factor de forma asociado con el intercambio de radiación entre elementos superficiales de reas dA_i y dA_j	65
Fig.2.16.- Clasificación básica de los tipos de ventilación.	74
Fig.2.17.- Esquema de ventilación natural.	74
Fig.2.18.- Esquema de ventilación mecánica.	75

CAPÍTULO III

Fig.3.1.- Esquema general de distribución de equipos en las S/E transfo-rectificadoras.	79
Fig.3.2.- Modelo explicativo de los puntos de control y su nomenclatura.....	84
Fig.3.3.- Método de aproximación utilizado para la realización de los esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad.....	86
Fig.3.4.- Ejemplo de esquema para observación de las variables medidas en las S/E transfo-rectificadoras.	89

Fig.3.5.- Esquema de metodología de cálculo de cargas térmicas y de la tasa de flujo volumétrico.	90
Fig.3.6.- Distribución de la temperatura de bulbo seco para los meses estudiados de la ciudad de Caracas.	91
Fig.3.7.- Distribución por frecuencias de la temperatura de bulbo seco para los meses de Junio-Julio en de la ciudad de Caracas.	92
Fig.3.8.- Modelo de un termograma en el software IRwin OLE 1.1.	95
Fig.3.9.- Modelo de evaluación de confort para una subestación en la carta de confort térmico de ASHRAE.	102

CAPÍTULO IV

Fig.4.1.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Petare. .	108
Fig.4.2.- Ubicación de los puntos de medición equipos en la S/E Transfo-rectificadora Petare.	109
Fig.4.3.- Esquema de temperaturas de bulbo seco medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.	111
Fig.4.4.- Esquema de humedades relativas medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.	112
Fig.4.5.- Esquema de velocidades medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.	113
Fig.4.6.- Ubicación del ambiente en la carta de zona de confort ASHRAE para la subestación Petare.	120
Fig.4.7.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Chacao.	126
Fig.4.8.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora La California.	130
Fig.4.9.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.	134
Fig.4.10.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela.	138
Fig.4.11.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Propatria.	142
Fig.4.12.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora La Paz.	146

Fig.4.13.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Maternidad.....	150
Fig.4.14.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora El Valle.....	154
Fig.4.15.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos.....	158
Fig. 4.16.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo...	162
Fig.4.17.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Zona Rental	166

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A:	Amperios.
A:	Área del elemento de estudio.
ASHRAE:	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Acondicionamiento de Aire. (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers).
BTU:	Unidad térmica inglesa (British thermal unit).
b :	Constante de desplazamiento de Wien.
b_n :	Coefficientes de la función de transferencia por conducción.
ca	Corriente alterna.
cc	Corriente continua.
c_n :	Coefficientes de la función de transferencia por conducción.
\overline{C}_i :	Constante experimental en función del número de Prandtl.
C_t^H :	Constante experimental en función del número de Prandtl.
C_t^V :	Constante experimental en función del número de Prandtl.
CT_l :	Carga térmica latente registrada en el interior del recinto. [Kcal/h].
CT_s :	Carga Térmica sensible estimada en el interior del recinto.[Kcal/h].
CT_t :	Carga térmica total registrada en el interior del recinto. [Kcal/h].
CLTD:	Diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento.
CLTD / CLF / SCL:	Método de cálculo de cargas por temperatura diferencial y factores de carga de enfriamiento.
d_n :	Coefficientes de la función de transferencia por conducción.
DT:	Diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del recinto.
e :	Elemento bajo análisis.

E_F	Factor de eficiencia.
Ej	Ejemplo.
etc:	Etcétera.
F_L	Factor de carga.
\overline{F}_l	Factor experimental en función del número de Prandtl.
F_R	Factores de radiación.
F_{sa}	Factor de permisibilidad.
F_U	Factores de uso.
F_{ul}	Factor de uso de la iluminación.
FV	Factor de vista.
g	Fuerza de gravedad.
G_{abs}	Irradiación absorbida por un cuerpo Gris.
G_{reflec}	Irradiación reflejada por un cuerpo Gris.
G_{r_s}	Número de Grashof.
G_{trans}	Irradiación transmitida por un cuerpo Gris.
h	Entalpía.
h_a	Hora para la cual se calcula la carga de enfriamiento.
HB:	Balance de Calor (Heat Balance).
h_c	Coefficiente convectivo.
HG_l	Calor latente absorbido por personas.
HG_s	Calor sensible absorbido por personas.
H_i	Entalpía del aire de entrada.
H_o	Entalpía del aire de salida.
HR:	Humedad relativa.
Hz:	Hertz.
I_{DT}	Flujo de calor solar absorbido diariamente.

I_t :	Carga solar total incidente.
ΔT :	Incremento de Temperatura.
k :	Conductividad térmica del fluido.
Kg:	Kilogramos.
kVca:	Kilovoltios en corriente alterna.
L :	Longitud de la superficie.
Lb:	Libras.
LOPCYMAT:	Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo.
M:	Metros.
n :	Número de horas/elementos significativas para el cálculo.
N/A:	No aplica.
nd:	No disponible.
Nu_s :	Número de Nusselt promedio para una superficie de longitud característica.
P :	Potencia, especificada en planos o manuales.
Pr :	Número de Prandtl.
Q :	Tasa flujo de aire de ventilación.
Q :	Tasa de flujo volumétrico.
q :	Tasa de flujo de calor.
q_{arf} :	Promedio de las fracciones radiantes por hora para n elementos
q_c :	Tasa de flujo de calor sensible absorbido por hora solo para elementos convectivos.
q_{cf} :	Fracción de calor por convección por hora para n elementos.
$q_{c,j}$:	Tasa de flujo de calor convectiva de cada uno de los elementos presentes en el cuarto por unidad de tiempo.
$q_{c,n}$:	Tasa de flujo de calor sensible absorbido para cada uno de los elementos presentes en el cuarto por unidad de tiempo.

$q_{e,\theta}$:	Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo absorbido a través de paredes y techos.
q_p :	Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo.
q_{Gris} :	Potencia emisiva de un cuerpo Gris.
q_{il} :	Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo absorbida por iluminación.
q_{input} :	Energía de entrada.
$Q_{latente}$:	Tasa de flujo de calor latente.
q_n :	Aporte térmico por cada factor.
q_{Negro} :	Potencia emisiva de un cuerpo negro.
q_p :	Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo absorbida por equipos.
q_{rad} :	Calor transferido entre dos cuerpos.
Q_{rf} :	Carga de enfriamiento sensible para elementos que tengan componentes convectivos y de radiación.
$Q_{sensible}$:	Tasa de flujo de calor sensible.
Q_{sc} :	Carga de enfriamiento sensible para elementos que tengan solo componentes convectivos.
$q_{s,n}$:	Tasa de flujo de calor sensible absorbida por hora para n elementos.
Q_{TOTAL} :	Carga térmica presente en el recinto.
q_{θ} :	Tasa de flujo de calor disipada por cada uno de los elementos que tienen componente radiante por unidad de tiempo.
rf_n :	Fracción de radiación de calor sensible para n elementos.
Ra :	Número de Rayleigh.
Re :	Número de Reynolds.
Re_s :	Número de Reynolds promedio para una superficie de longitud característica.
RTS:	Serie de tiempo radiante.

SC :	Coeficiente de sombra.
S/E:	Subestación.
SCL :	Factor de carga de enfriamiento solar.
T :	Temperatura absoluta del objeto.
T_b :	Temperatura de espacios adyacentes.
T_{bh} :	Temperatura de bulbo húmedo.
T_{bs} :	Temperatura de bulbo seco.
T_e :	Temperatura del aire ambiente promedio en 24 horas.
T_{ea} :	Temperatura promedio del aire ambiente.
$TETD$:	Diferencia de temperatura total equivalente.
$T_{e\delta}$:	Temperatura ambiente para un factor de tiempo de retraso.
$T_{e,\theta-n\delta}$:	Temperatura del aire ambiente al tiempo.
TFM:	Método de Función de Transferencia.
T_i :	Temperatura de diseño por condiciones de espacio.
T_o :	Temperatura de bulbo seco.
T_{oa} :	Temperatura de bulbo seco promedio en 24 horas.
TON:	Toneladas.
T_{pr} :	Temperatura de punto de rocío.
T_{rc} :	Temperatura del interior del cuarto.
T_w :	Temperatura de la superficie.
T_∞ :	Temperatura del fluido lejos de la superficie.
U :	Coeficiente global de transferencia de calor.
u_∞ :	Velocidad del fluido lejos de la superficie sólida.
v :	Volumen específico.
Vca:	Voltios en corriente alterna.
Vcc:	Voltios en corriente continúa.
v_n :	Coeficientes de función de transferencia para cuartos.

ω :	Humedad absoluta o específica.
W :	Vatios de entrada o salida.
ω_i :	Humedad específica del aire de entrada.
W_n :	Coefficientes de función de transferencia para cuartos.
ω_e :	Humedad específica del aire de salida.
α :	Absortividad.
β :	Coefficiente de expansión volumétrica.
δ :	Intervalo de tiempo, normalmente 1 hora.
ε :	Emisividad.
θ :	Hora para la cual se realiza el cálculo.
λ :	Factor de decremento.
λ_{max} :	Longitud de onda de radiación máxima.
μ :	Micrómetros.
ν :	Viscosidad cinemática.
ρ :	Reflectividad.
ρ :	Densidad del aire.
σ :	Constante de Stefan Boltzmann.
τ :	Transmisividad.
ϕ :	Humedad Relativa.
α/h_o :	Factor para superficies de color.
$\varepsilon\Delta R/h_o$:	Factor de onda por radiación.
ΔH :	Diferencia entre la humedad absoluta del exterior y el máximo tolerable en el interior del recinto. [kg de vapor/kg de aire seco].

INTRODUCCIÓN

La sumatoria de la energía de carácter térmico disipada a un ambiente por cada uno de los elementos presentes en el mismo es conocida como carga térmica, dependiendo de su magnitud puede tener efectos adversos en el organismo del ser humano, en el desempeño de sus labores diarias y en el funcionamiento de los equipos y máquinas de un determinado ambiente.

Con el fin de mejorar su calidad de vida y modificar las condiciones climáticas de los ambientes en donde realiza sus actividades cotidianas, el ser humano se ha valido de diferentes recursos como lo son el aprovechamiento de la ventilación natural, la ventilación mecánica y el acondicionamiento de aire.

El Metro de Caracas C.A. se ha consolidado en los últimos años como el medio de transporte público más utilizado por los ciudadanos de la capital, con una red aproximada de 50 trenes que atiende 4 líneas con un total de 39 estaciones, este servicio es responsable de que aproximadamente 1.700.000 personas lleguen a su destino a tiempo diariamente. Un medio con tantos usuarios y tan poca holgura debe contar con un sistema de mantenimiento de equipos preciso que genere el mínimo de interrupciones al servicio. Por lo que se hace necesaria la adecuada utilización de equipos y la optimización de un ambiente de trabajo que permita a los operadores ejercer plenamente sus funciones y que evite sobrecargas a los equipos.

En el presente Trabajo Especial de Grado, se estimará la carga térmica de un grupo seleccionado de Subestaciones Eléctricas de Tracción pertenecientes a Metro de Caracas C.A. con el fin de comprobar la efectividad de los sistemas de ventilación allí dispuestos.

Este trabajo se encuentra compuesto por cinco capítulos bien definidos y explicados a continuación:

En el Capítulo I, se dará una descripción de los equipos y sistemas que conforman una Subestación Eléctrica de Tracción del Metro de Caracas C.A. Adicionalmente se justificará la realización del problema en estudio y se expondrán su importancia, objetivos y delimitaciones.

En el Capítulo II se proporcionarán los conceptos y fundamentos teóricos necesarios para la realización del proyecto.

En el Capítulo III se explicarán los pasos a seguir para cumplir con los objetivos de la investigación haciendo referencia a las condiciones de selección de las subestaciones del Sistema Metro, la disposición de los equipos dentro de las S/E transformadoras y las diversas técnicas de medición y cálculo utilizadas.

En el Capítulo IV se presentará por subestación una recopilación de los datos medidos, los resultados de los cálculos realizados para estimar la carga térmica y el caudal requerido para disiparla en las subestaciones eléctricas de tracción de la compañía Metro de Caracas C.A.

En el Capítulo V se analizarán por subestación los resultados antes obtenidos, para posteriormente poder concluir sobre los mismos y proporcionar las recomendaciones pertinentes a cada caso.

CAPÍTULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se dará una descripción de los equipos y sistemas que conforman una Subestación Eléctrica de Tracción del Metro de Caracas C.A. Adicionalmente se justificará la realización del problema en estudio y se expondrán su importancia, objetivos y delimitaciones.

1.1.- SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE TRACCIÓN.

1.1.1.- Definición, Funcionamiento e Importancia.

Las Subestaciones Eléctricas de Tracción (S/E transfo-rectificadoras) son ambientes donde están ubicados los equipos destinados a recibir, transformar, rectificar y distribuir la energía eléctrica proveniente de la Electricidad de Caracas C.A. a amplitudes y frecuencias compatibles con los equipos de arranque y movimiento presentes en los trenes que operan en el sistema Metro de Caracas.

Están constituidas principalmente por dos grupos transfo-rectificadores compuestos cada uno por un transformador y un rectificador de potencia, encargados de recibir la energía en grandes acometidas desde las subestaciones primarias; ambos diseñados para funcionar como unidad convertidora de corriente alterna (ca) a corriente continua (cc).

El sistema de electrificación del Metro de Caracas C.A. es alimentado por medio de subestaciones de distribución en 69 kVca pertenecientes a la Electricidad de Caracas C.A., y es transmitida a las subestaciones de transformación primaria en las cuales se disminuye la tensión a través de un transformador a 30 kVca, surtiendo a las Subestaciones Eléctricas de Tracción que por medio de un conjunto transformador-rectificador convierte la misma energía a 630 Vca y la rectifica a 750 Vcc, luego se distribuye la tensión a los distintos tramos y vías del tercer riel, los cuales actúan como fuente de energía para alimentar a los equipos presentes en el tren.

La importancia de las S/E transfo-rectificadoras radica en que su buen funcionamiento mantiene operativo el Sistema Metro, debido a que éstas son las encargadas de alimentar con tensión al tercer riel. De presentarse fallas en ellas o en algunos de sus componentes, los trenes no serían correctamente alimentados y por lo tanto se vería afectado el servicio por fallas como deterioro de equipos y hasta paradas parciales o totales del sistema.

A continuación se muestra un diagrama explicativo del sistema antes descrito.

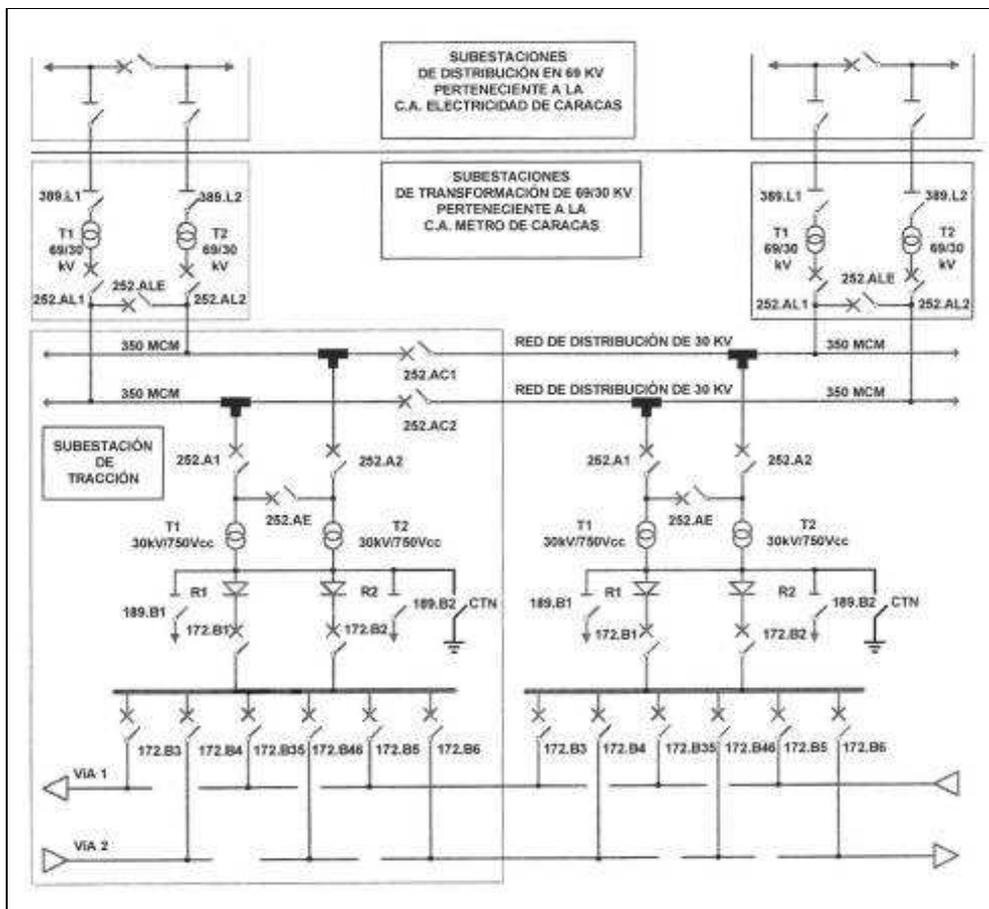


Fig. 1. 1.- Esquema de la red de distribución de energía eléctrica para tracción del Metro de Caracas C.A.

 Transformador /
  Disyuntor /
  Rectificador.

1.2.- EQUIPOS PRESENTES EN LAS SUBESTACIONES TRANSFO-RECTIFICADORAS.

A continuación se presenta una lista con los equipos que comúnmente conforman las S/E transfo-rectificadoras, posteriormente se mostrará un esquema simplificado de la disposición de los mismos:

- Tomas 30 kVca.
- Disyuntores de 30 kVca.
- Tablero de 30 kVca.
- Transformadores (30 kVca → 630 Vca).
- Rectificadores de potencia (630 Vca → 750 Vcc).
- Disyuntores de 750 Vcc.
- Tablero de 750 Vcc.
- Tablero de control y mando (celdas).
- Contacto negativo a tierra (CTN).
- Caja de retorno negativa.
- Tablero cargador de baterías (J5 y J6).
- Transformador de auxiliares (TX).
- Celdas de distribución auxiliar.
- Equipos auxiliares (cajetines de comunicaciones y auxiliares de CTN).

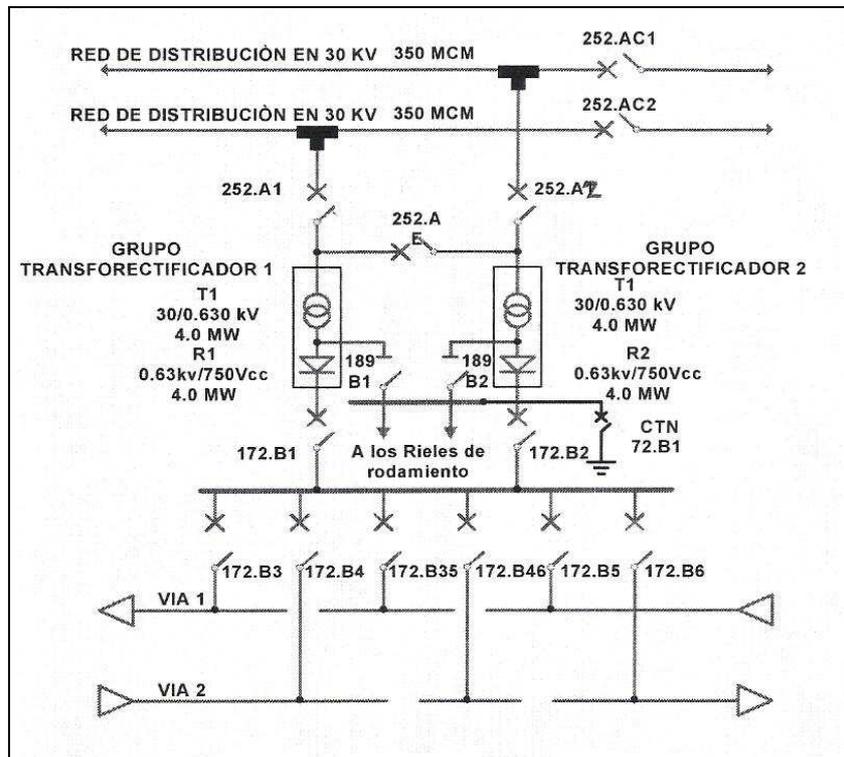


Fig. 1. 2.- Esquema subestación eléctrica de tracción del Metro de Caracas C.A.

En el esquema anterior se muestran los componentes principales de las S/E transfo-rectificadoras listados en el apartado 1.2, dispuestos de acuerdo a su orden de funcionamiento e identificados respectivamente. Los elementos identificados con los números 252.A1, 252.A2 y 252.AE son los llamados disyuntores de 30 kVcc, los identificados con las siglas T1,R1 y T2,R2 son los grupos transfo-rectificadores compuestos por un transformador y un rectificador cada uno, el sistema 72.B1 comprende el CTN y por ultimo los equipos 189.B1 y 189.B2 a las cajas de retorno negativo.

1.3.- DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.

En este apartado se definirán y describirán los equipos enlistados en el apartado 1.2, haciendo referencia a la línea en la cual se encuentran, Líneas 1, 2, 3 y 4 (extensión de la línea 2).

1.3.1.- Tomas de 30 kV.

1.3.1.1.- Descripción y Función.

Las tomas de 30 kVca conforman la última etapa de la red de distribución de 30 kVca, encargada de conducir la corriente hasta los tableros de 30 kVca en las S/E transfo-rectificadoras. La red de distribución de 30 kVca recorre todo lo largo de la línea del sistema. Su función es conectar las S/E transfo-rectificadoras a la red de distribución de 30 kVca.



Fig. 1. 3.- Tomas modulares de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

1.3.2.- Disyuntores 30 kVca.

1.3.2.1.- Descripción y Función.

Los disyuntores son equipos empleados para interrumpir y reestablecer la corriente de un circuito cuando sea necesario. Se encargan de proteger a los equipos que se encuentran dispuestos después de ellos en el circuito, en el caso de los disyuntores de 30 kVca, su función es proteger al grupo Transfo-Rectificador.

1.3.2.2.- Especificaciones.

Tabla 1. 1.- Disyuntores de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

DISYUNTORES 30 kVca	Línea 1 / Línea 2	Línea 3 / Línea 4
Marca	Alstom	Alstom
Modelo	Orthofluor FRUR 73	Orthofluor FP 3612A
Intensidad nominal	1.200 A	400 A
Tensión nominal	30 kV	35 kV
Medio de extinción del arco	Gas SF6	Gas SF6
Accionamiento	Mecánico	Mecánico



Fig. 1. 4.- Disyuntor de 30 kVca Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A.



Fig. 1. 5.- Disyuntor de 30 kVca Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.3.- Tablero 30 kVca.

1.3.3.1.- Descripción y Función.

La alimentación de las S/E transfo-rectificadoras se hace a través de los tableros de 30 kVca, los cuales están conectados por medio de la tomas de 30 kVca a las S/E principales de 69/30 kVca. Su función es proteger, alimentar y aislar los grupos transfo-rectificadoras. Todas las subestaciones tienen la siguiente constitución, un total de 5 celdas:

Tabla 1. 2.- Descripción de los tableros de 30 kVca pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

Celda	Descripción	Función
TP	Celdas (6) transformadores de potencial (TP).	Transformar la tensión de 30 kVca a 120 Vca para alimentar los relés de las protecciones.
A2	Celda del disyuntor principal del alimentador 1 (A1) de 30 kVca.	En ella se encuentra un disyuntor (breaker) el cual protege al transformador de potencia T1 de 30 kVca/630 Vca.
A3	Celda del disyuntor principal del alimentador 2 (A2) de 30 kVca.	En ella se encuentra un disyuntor el cual protege al transformador de potencia T2 de 30 kVca/630 Vca.
AE	Celda del disyuntor de enlace (AE) de 30 kVca.	En ella se encuentra el disyuntor que conecta el grupo 1 con el grupo 2
Barras	Celda de Barras	En ella se encuentran las barras de 30 kVca



Fig. 1. 6.- Tablero disyuntor de 30 kVca perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.4.-Transformador (30 kVca → 630 Vca).

1.3.4.1.- Descripción y Función.

Son dispositivos utilizados para la transformación de la electricidad a diferentes niveles. Constan de una bobina de cable situada junto a una o varias bobinas más, todas conectadas a un circuito magnético común, se utilizan para unir dos o más circuitos de corriente alterna, aprovechando el efecto de inducción entre las bobinas y el número de vueltas de cada una. La bobina conectada a la fuente de energía se llama bobina primaria. Las demás bobinas reciben el nombre de bobinas secundarias. Un transformador cuyo voltaje secundario sea superior al primario se llama transformador elevador. Si el voltaje secundario es inferior al primario este dispositivo recibe el nombre de transformador reductor.

Los transformadores pueden dividirse en dos grupos según su medio de aislamiento:

- Máquinas con aislamiento seco
- Máquinas con aislamiento en aceite

Los transformadores secos tienen la parte activa en contacto directo con un medio aislante gaseoso (generalmente aire) o con un medio aislante sólido (resinas, materias plásticas, etc.) la potencia y tensión de las máquinas de este tipo es todavía limitada. Los transformadores en aceite tienen en cambio las partes activas inmersas en aceite mineral y para estas máquinas no existen prácticamente límites en la potencia y las tensiones.

Entre las funciones del transformador de la red del sistema en estudio tenemos:

- Adaptar la tensión de alimentación suministrada por la red de 30 kVca a 630 Vca, siendo esto lo requerido en la entrada de la unidad rectificadora.
- Servir de amortiguador de las corrientes de corto circuito del lado de corriente continua.
- Realizar una separación galvánica de la red de 30 kVca, respecto a la 750 Vcc.
- Hacer posible un ajuste de tensión en corriente continua a través de un conmutador de tomas en vacío.

- Proveer con respecto a la tensión de la red de 30 kVca, un desfasaje entre los arrollados secundarios que permita la utilización de un rectificador con un alto índice de pulsaciones y por ende una menor tasa de ondulaciones en la tensión rectificada.

1.3.4.2.- Especificaciones.

Tabla 1. 3.- Especificaciones de los transformadores (30 kVca → 630 Vca) pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

TRANSFORMADOR	Línea 1 / Línea 2	Línea 3 / Línea 4
Marca	Jeumant-Schneider	Le Petit Quevilly France
Potencia nominal	2 x 2.380 kW	2.800 kW
Intensidad nominal primario	88,5 A	53,9 A
Tensión nominal primario	30 kVca	30 kVca
Intensidad nominal secundario	4.080 A	2.566 A
Tensión nominal secundario	630 Vca	630 Vca
Frecuencia	60 Hz	60 Hz
Medio de refrigeración	Aceite mineral	Aire natural
Conexión	Delta/Delta, Estrella/Delta	Delta/Estrella, Delta/Delta
Masa total	15.000 Kg	1.100 Kg



Fig. 1. 7.- Transformador sumergido en aceite (30 kVca → 630 Vca) Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A.



Fig. 1. 8.- Transformador seco (30 kVca → 630 Vca) Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.5.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc).

1.3.5.1.- Descripción y Función.

Consiste en un circuito capaz de convertir la corriente alterna en corriente continua. También recibe esa denominación el diodo, que es el componente electrónico base de estos equipos. La rectificación de la corriente eléctrica puede hacerse de dos maneras:

Tabla 1. 4.- Métodos de rectificación de ondas.

Nombre	Principio de Funcionamiento	Descripción
Rectificador de media onda	Elimina la parte negativa de la señal de entrada empleando un único diodo	
Rectificador de onda completa	Convierte la parte negativa de la señal en positiva empleando un puente de diodos	

Los rectificadores se encargan de variar la corriente que proviene de los transformadores 630 Vca a la corriente que alimenta el tablero de 750 Vcc. Estos equipos están diseñados para resistir en operación voltajes de hasta 950 Vcc, que pueden originarse por regeneración de tensión de los trenes.

1.3.5.2.- Especificaciones.

Tabla 1. 5.- Especificaciones de los rectificadores (630 Vca → 750 Vcc) pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

RECTIFICADOR	Línea 1 / Línea 2	Línea 3 / Línea 4
Marca	CGEE-ALSTHOM	Alstom
Potencia	4.000 kW.	2.500 kW.
Cantidad de fases de entrada	3 x 2	3
Intensidad nominal de entrada	4.080 A	2.550 A
Tensión nominal de entrada	630 Vca	630 Vca
Intensidad nominal de salida	5.000 A	3.125 A
Tensión nominal de salida	800 Vcc	800 Vcc
Medio de refrigeración	Aire natural	Aire natural
Tipo de diodo	AS28Z2 CGEE-ALSTHOM	DS 2106 SY28 1026 Marconi
Tipo de acoplamiento	Graets dodecafásico paralelo	Hexafásica N°8
Masa total	4.200 kg.	2.300 kg.



Fig. 1. 9.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc) Líneas 1 y2 perteneciente a Metro de Caracas C.A.



Fig. 1. 10.- Rectificador de potencia (630 Vca → 750 Vcc) Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.6.- Disyuntores 750 Vcc.

1.3.6.1.- Descripción y Función.

Su función consiste en proteger a los equipos que se encuentran dispuestos después de ellos en el circuito interrumpiendo y reestableciendo la corriente cuando sea necesario. Se dividen en dos categorías según su función específica:

- Disyuntores Principales: Protegen al tablero 750 Vcc de distribución y el grupo transfo-rectificador.
- Disyuntores de Vía: Protegen al tercer riel.

1.3.6.2.- Especificaciones.

Tabla 1. 6.- Especificaciones de los disyuntores de 750 Vcc pertenecientes a Metro de Caracas C.A. (Línea 1 / Línea 2).

DISYUNTORES 750 Vcc Línea 1 / Línea 2	Alimentadores y de Enlace	Interruptores Principales
Marca	ALSTHOM	ALSTHOM
Modelo	HSN/P	HSN/P
Tipo	Monopolar	Monopolar
Intensidad nominal	4, 6, 7 y 8 kA	4, 6, 7 y 8 kA
Tensión nominal	1.800 V	3.000 V
Extinción del arco	Soplado magnético	Extinción magnética
Accionamiento	Mecánico	Mecánico



Fig. 1. 11.- Disyuntor de 750 Vcc Líneas 1 y 2 perteneciente a Metro de Caracas C.A.

Tabla 1. 7.- Especificaciones de los disyuntores de 750 Vcc pertenecientes a Metro de Caracas C.A.
(Línea 3 / Línea 4)

DISYUNTORES 750 Vcc	Línea 3	Línea 4
Marca	GEC – Alstom	Alstom
Modelo	HSNP	ARC – 850
Tipo	Monopolar	Monopolar
Intensidad nominal	3.500 A	5.000 A
Tensión nominal	850 V	850 V
Tensión máxima	960 V	960 V
Medio de extinción del arco	Soplado magnético	Extinción magnética
Accionamiento	Mecánica	Mecánica



Fig. 1. 12.- Disyuntor de 750 Vcc Líneas 3 y 4 perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.7.- Tablero de 750 Vcc.

1.3.7.1.- Descripción y Función.

Consiste en un armario constituido por celdas encargadas de controlar la apertura y el cierre de los disyuntores de 750 Vcc que alimentan al tercer riel.



Fig. 1. 13.- Tablero disyuntor de 750 Vcc perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.8.- Tablero de Control y Mando.

1.3.8.1.- Descripción y Función.

Tabla 1. 8.- Funciones de los tableros de control y mando pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

Celda	Función
N1	Protección, control y mando del equipo 30 kVca (252.A1).
N2	Protección, control y mando del equipo 30 kVca (252.AE) y servicios generales.
N3	Protección, control y mando del equipo 30 kVca (252.A2).
N4	Protección, control y mando del Transformador, Rectificador y Disyuntor del grupo # 1.
N5	Protección, control y mando del Transformador, Rectificador y Disyuntor del grupo # 2.
N6	Servomecanismo, control y mando de los disyuntores de la vía # 1.
N7	Servomecanismo, control y mando de los disyuntores de la vía # 2.
N8	Interfase del sistema de transmisión de datos STD y mandos locales



Fig. 1. 14.- Tablero de control y mando perteneciente a Metro de Caracas C.A.

1.3.9.- Contacto Negativo a Tierra.

1.3.9.1.- Descripción y Función.

El contacto negativo a tierra (CTN) es un equipo que detecta y despeja fallas producto del sistema de distribución en corriente continua a 750 V. Este mecanismo vigila la elevación potencial del circuito de retorno negativo, y cuando éste alcance un valor peligroso para los equipos un contactor realiza una conexión directa entre los circuitos de retorno negativo y la barra de tierra de la S/E transfo-rectificadoras. Esta función también puede ser realizada por los disyuntores de 750 Vcc, sin embargo debido a la impedancia del lazo, la corriente circulante es inferior a la máxima corriente de carga, el CTN es capaz de censar y corregir esto en un tiempo más corto que dichos equipos.

1.3.10.- Caja de Retorno Negativa.

1.3.10.1.- Descripción y Función.

Toda la energía transmitida al tren se utiliza para alimentar motores, luces y otros accesorios, sin embargo por motivos de seguridad tiene que existir un circuito completo, en el que parte de esta energía y la generada por la frenada del tren vuelvan de nuevo a la fuente de alimentación, en este caso las S/E transfo-rectificadoras.

El circuito de la energía, va desde la fuente de la energía (S/E transfo-rectificadoras) hacia al artículo que consume (el tren) y nuevamente de vuelta a la fuente (S/E transfo-rectificadoras) mediante el uso un conductor, que en este caso serian los

mismos rieles de rodamiento de acero sobre los que se mueve el tren y los cables de conexión entre estos y la S/E transfo-rectificadoras de alimentación.

Para que esta técnica sea confiable y segura deben tomarse precauciones para prevenir que el voltaje alcance valores muy elevados con respecto al cero de la tierra.

1.3.11.- Tablero Cargador de Baterías.

1.3.11.1.- Descripción y Función.

Formados por un lado continuo para la alimentación de circuitos como el puente rectificador y la batería de acumuladores y un lado alterno para el ondulator y para la fuente alternativa de alimentación. Su función es alimentar con corriente continua a todos los equipos presentes en las S/E transfo-rectificadoras.

Este equipo es constituido por 2 armarios llamados J5 y J6, los cuales contienen:

- J5: Cargador de Baterías + Ondulador.
- J6: Baterías 125 Vcc.

1.3.12.- Transformador de Auxiliares.

1.3.12.1.- Descripción y Función.

Estos equipos se encargan de recibir la corriente a niveles de tensión de 30 kVca proveniente de las Subestaciones Principales y transformarla a niveles de tensión más bajos 480 Vcc, para luego suministrarla a las Celdas de Distribución de Auxiliares (J1, J2, J3). Su función es transformar energía eléctrica de alta a baja tensión.

1.3.13.- Celdas de Distribución de Auxiliares.

1.3.13.1.- Descripción y Función.

La función de estos equipos consiste en recibir y distribuir baja tensión para alimentar equipos auxiliares como luminarias, sensores y relés, sin embargo, las S/E transfo-rectificadores de las distintas líneas no poseen siempre los mismos equipos, en este caso las líneas 1, 2 y 4 poseen un tipo de equipos denominados Celdas (J1, J2, J3) mientras

que la línea 3, realiza esta función a través de dos armarios distintos, un sistema de distribución de emergencia, y un tablero auxiliar.

- Líneas 1, 2 y 4

Compuestos por 3 celdas identificadas como J1, J2 y J3

Tabla 1. 9.- Especificaciones de las celdas de distribución de auxiliares (J1, J2 y J3) pertenecientes a Metro de Caracas C.A.

Celdas	Función
J1	Recibe la alimentación de la barra de transferencia y distribuye la energía a los auxiliares alimentados con una tensión 480-277 Vca.
J2	Distribuye la energía eléctrica con una tensión 208-120 Vca, para las estaciones de patio, Propatria, Agua Salud, Capitolio y Santa Rosa. Y para las otras subestaciones distribuye la tensión de 120 Vca y de 48 Vca.
J3	Distribuye la energía eléctrica con una tensión de 125 Vcc.

- Línea 3
 - Sistema de Emergencia Distribución 120 Vca – 48 Vca – 120 Vcc.
 - Tablero auxiliar de S/E transfo-rectificadora.

1.3.14.- Equipos Auxiliares (Cajetines de Comunicaciones y Auxiliares del Contacto Negativo a Tierra).

- **Cajetines de Comunicaciones:**

1.3.14.1.- Descripción y Función.

Estos equipos son los encargados de mantener la comunicación entre las S/E transfo-rectificadoras y el Cuarto de Control de Operaciones (CCO) en actividades que pueden ir desde un reporte de inspección hasta la detección de una falla en el sistema.

- **Auxiliares CTN:**

1.3.14.2.- Descripción y Función.

Su función en el sistema es controlar las acciones del CTN poniéndolo en marcha o deteniéndolo mediante señales electrónicas.

1.4.- UBICACIÓN DE LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.

En este apartado se muestra la disposición de las S/E transfo-rectificadoras que forman parte del sistema de electrificación para tracción de Metro de Caracas C.A.

1.4.1.- Línea 1.

La línea 1 está compuesta por las siguientes S/E transfo-rectificadoras: Propatria, Plaza Sucre, Agua Salud, Capitolio, Parque Carabobo, Santa Rosa, Plaza Venezuela, Chacaito, Chacao, Parque del Este, Los Cortijos, La California, Petare y Palo Verde. A continuación se muestra un esquema con su disposición.

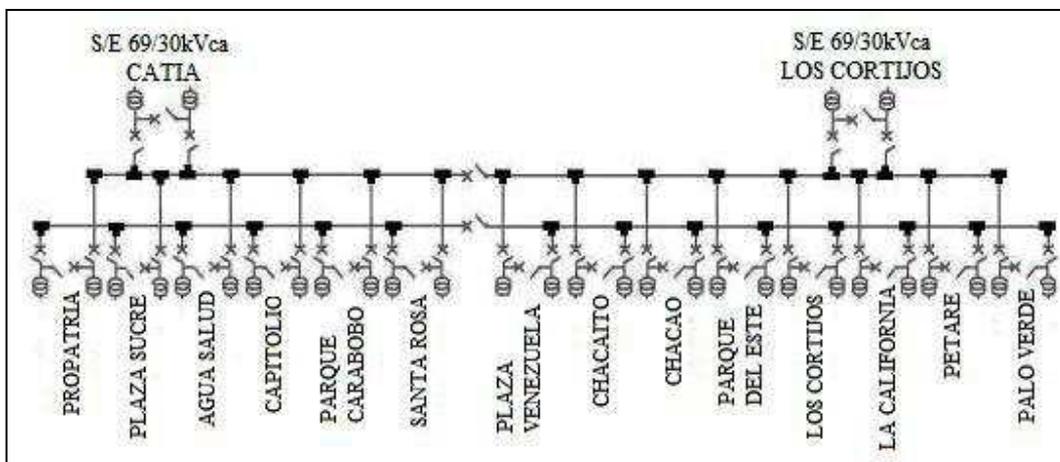


Fig. 1. 15.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 1.

1.4.2.- Línea 2.

Conformada por las S/E transfo-rectificadoras: Las Adjuntas, Caricua, Y, Mamera, Antimano, La Yaguara, La Paz, Maternidad y Capuchinos. A continuación se muestra un esquema con su disposición.

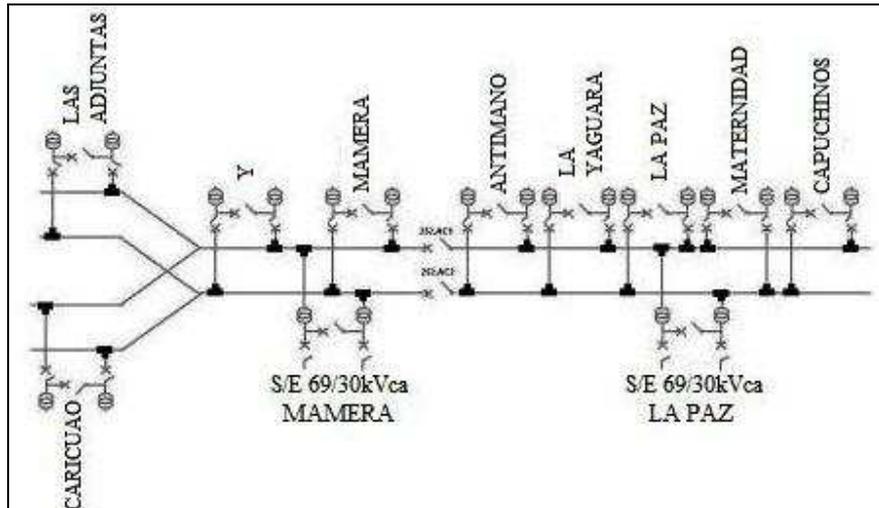


Fig. 1. 16.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 2.

1.4.3.- Línea 3.

La línea 3 está constituida por las S/E transfo-rectificadoras: Plaza Venezuela II, Los Símbolos, El valle y La Rinconada. A continuación se muestra un esquema con su disposición.

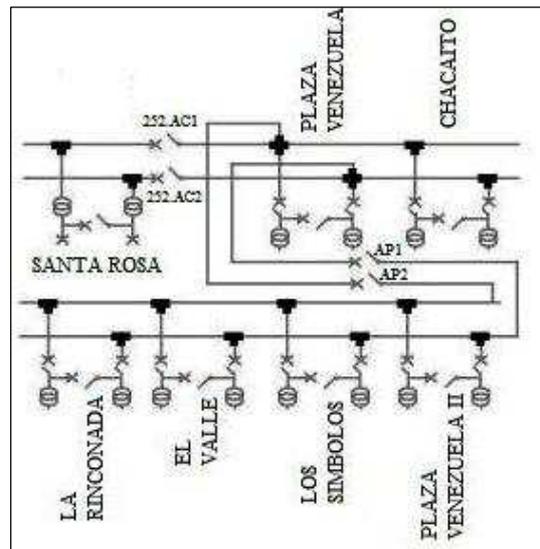


Fig. 1. 17.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 3.

1.4.4.- Línea 4.

Constituida por las S/E transfo-rectificadoras: Nuevo Circo, Los Caobos y Zona Rental. A continuación se muestra un esquema con su disposición.

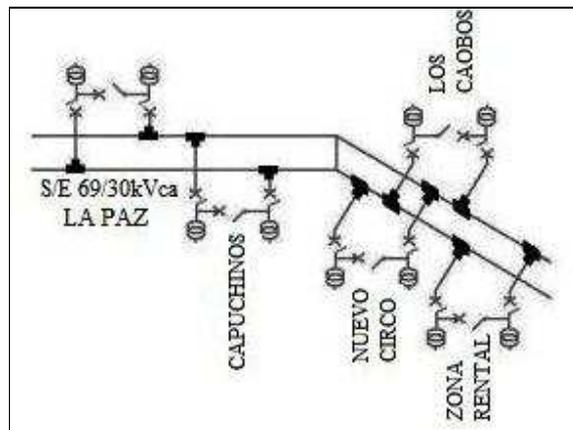


Fig. 1. 18.- Esquema eléctrico de las S/E transfo-rectificadoras en Metro de Caracas C.A. de la Línea 4.

1.5.- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE UNA S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.

Los sistemas de ventilación instalados en las S/E transfo-rectificadoras pueden ser naturales o mecánicos dependiendo de las condiciones del ambiente y de si éstas son subterráneas o superficiales. Por su parte los sistemas mecánicos pueden funcionar suministrando o extrayendo el aire del recinto.

1.5.1.- Descripción general del sistema de Ventilación Natural.

Están compuestos por un grupo de rejillas y chimeneas que garantizan la entrada y salida del aire a la S/E transfo-rectificadoras.

1.5.2.- Descripción general del sistema de Ventilación Mecánica.

En los casos en los que se utilice un sistema de extracción, se cuenta con seis (6) o cuatro (4) (dependiendo del área total de la S/E transfo-rectificadoras) hongos de extracción activados por sensores de temperatura estratégicamente ubicados en el lugar de trabajo. En las subestaciones en las que se suministre el aire de forma mecánica el sistema está constituido por dos (2) ventiladores centrífugos del tipo de aletas aerodinámicas, de doble ancho, doble entrada o ventiladores axiales, cada uno con la capacidad nominal de remover el caudal total requerido, sin embargo trabajan regularmente a valores menores de su carga nominal para así garantizar el funcionamiento adecuado del sistema en caso de fallas o mantenimientos.

Sin importar si el sistema suministra o extrae el aire, ambos están diseñados de forma tal, que la temperatura interior no supere los 40°C (104°F). El caudal de estos ventiladores fue calculado por la compañía Metro de Caracas C.A en función a la carga térmica disipada por los equipos, que a su vez fue estimada siguiendo el procedimiento de cálculo definido por instituciones, tales como American Society off Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) o equivalentes. El aire que entra a las S/E transfo-rectificadoras, siempre debe ser previamente filtrado y en tal sentido, se proveerán tomas de aire exterior.

1.6.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Dentro del conjunto de equipos e instalaciones que conforman la red de transporte subterráneo Metro de Caracas C.A se encuentran las S/E transfo-rectificadoras; cuyos elementos y componentes (Transformadores y Rectificadores, entre otros.), han presentado cierta cantidad de fallas de origen térmico debido a las altas temperaturas de los ambientes donde se encuentran, dichas temperaturas se sitúan entre 30 °C y 45°C en la mayoría de los casos; siendo estas temperaturas perjudiciales tanto para el confort humano como para el buen funcionamiento de las máquinas que allí se encuentran.

Las altas temperaturas en las S/E transfo-rectificadoras pueden afectar el confort de los trabajadores que en ellas laboran pudiendo originar enfermedades laborales producidas por el estrés térmico, incumpliendo así con la normativa impuesta por la Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo (LOPCYMAT). Esto trae como consecuencia la realización ineficiente de labores como inspecciones y mantenimientos. Un trabajador podría emplear de 4 a 8 horas en una rutina de trabajo resultando estos tiempos considerablemente mayores a los recomendados para dichas actividades en un ambiente comfortable.

A la par de esto, los equipos eléctricos que allí se encuentran tienden a descalibrarse y su vida útil se ve reducida considerablemente, ya que las temperaturas óptimas de funcionamiento se encuentran entre los 28°C y 35°C (Valores suministrados por los técnicos de Metro de Caracas C.A.), trayendo como consecuencia el incremento no programado de mantenimientos preventivos y correctivos y, lo más importante, un aumento en la posibilidad de generarse interrupciones de servicio en el Sistema Metro.

El incremento de la temperatura en las S/E transfo-rectificadoras se atribuye a varias causas; entre las cuales se pueden mencionar:

- El incremento de la tasa de flujo de calor disipado por los equipos eléctricos debido al efecto de envejecimiento.
- El deficiente funcionamiento del sistema de ventilación asignado para estas áreas ya sea por degradación natural, capacidad insuficiente del sistema o mal montaje y balanceo.

- La escasa circulación de aire fresco dentro de las Subestaciones Eléctricas de Tracción.

Ante esta problemática, el Departamento de Electrificación y Tracción de la Gerencia de Electromecánica solicitó al Área Técnica de Ingeniería de la misma Gerencia, un estudio con miras a una solución; para lo cual se propone realizar una serie de evaluaciones térmicas en distintas S/E transfo-rectificadoras, las cuales fueron seleccionadas previamente por la compañía por considerarse críticas. Se espera que esta evaluación determine las deficiencias de dichas subestaciones para tomar las medidas más adecuadas y reestablecer las condiciones térmicas deseadas dentro de estos ambientes. Cabe destacar que la Gerencia de Seguridad Industrial generó a finales de Diciembre del 2006 un informe de advertencia sobre las condiciones de trabajo en la S/E transfo-rectificadora de Chacao.

1.7.- IMPORTANCIA.

Este trabajo constituye un aporte al sistema Metro de Caracas, puesto que tiene como objetivo proponer una solución eficiente para disminuir la altas temperaturas que generan condiciones de disconfort para los trabajadores y la alta tasa de fallas presente en los equipos electrónicos del Sistema Metro de Caracas, ubicados en las S/E transfo-rectificadoras, y por ende, retrasos en el servicio o en el peor de los casos una paralización del Sistema Metro.

Por otra parte, esta investigación busca avalar inspecciones previas realizadas por la gerencia de Seguridad Industrial con respecto al disconfort presente en las S/E transfo-rectificadoras. Asimismo a nivel científico este trabajo utilizará métodos de cálculo internacionalmente reconocidos y nuevas técnicas de recolección de datos altamente efectivas como lo son los mapas térmicos, de humedad relativa y velocidad del aire, usados para estudiar el comportamiento de los mismos y de los equipos en distintas estaciones del Sistema Metro.

El cumplimiento de las recomendaciones aportadas por esta investigación resultarán en una posible inversión para la compañía; sin embargo dicha inversión será

definitivamente más rentable que realizar constantes jornadas de mantenimiento preventivo y correctivo a los equipos presentes en las S/E transfo-rectificadoras.

1.8.- JUSTIFICACIÓN.

A raíz de las consecuencias que generan las altas temperaturas de las S/E transfo-rectificadoras, el Metro de Caracas C.A. a través del Departamento de Electrificación y Tracción de la Gerencia de Electromecánica, solicita al Área Técnica de Ingeniería posibles soluciones que permitan controlar dicha situación, para así asegurar un mejor funcionamiento del sistema, proporcionando a los trabajadores un ambiente de trabajo adecuado y seguro, manteniendo la vida útil de los equipos y prestando un servicio eficiente.

Para esto se realizará una evaluación térmica de las S/E transfo-rectificadoras seleccionadas por la compañía de acuerdo a ciertos factores estructurales y a la reincidencia de fallas, asegurándose de estudiar una cantidad y variedad representativa de la cantidad total para posteriormente proponer el rediseño de los sistemas de ventilación de las S/E transfo-rectificadoras que así lo ameriten.

1.9.- OBJETIVOS.

1.9.1.- Objeto:

Este trabajo especial de grado es de tipo experimental. Se realizará una aplicación de tecnologías y conocimientos para el cálculo de cargas térmicas en las S/E transfo-rectificadoras.

1.9.2.- Objetivo General:

Realizar un estudio de campo que permita la evaluación térmica de diferentes subestaciones eléctricas de tracción (S/E transfo-rectificadoras) del Metro de Caracas.

1.9.3.- Objetivos Específicos:

1. Definir los sistemas y equipos que conforman una subestación eléctrica de tracción de un sistema de trenes urbano subterráneo tipo metro.
2. Definir y analizar las diferentes metodologías para estimar el cálculo de cargas térmicas.
3. Seleccionar las subestaciones eléctricas de tracción en las cuales se realizará el estudio, sobre la base de los criterios: ubicación, funciones, principios de operación, componentes e importancia de las mismas.
4. Inspeccionar el ambiente térmico de las subestaciones eléctricas de tracción escogidas para el estudio, especificando los puntos e intervalos de medición dentro de dichos ambientes.
5. Realizar la medición de las variables a fin de recolectar los datos requeridos para el estudio.
6. Calcular las cargas térmicas de las subestaciones eléctricas de tracción en estudio.
7. Proponer el rediseño del sistema de climatización en las subestaciones eléctricas de tracción que así lo requieran.
8. Redactar el informe final incluyendo conclusiones y recomendaciones.

1.10.- ALCANCES.

Los alcances propuestos son:

- Revisar los reportes de fallas (por causas térmicas) de los equipos ubicados en las S/E transfo-rectificadoras.
- Revisar las especificaciones técnicas de los sistemas de climatización de un S/E transfo-rectificadoras.
- Visitar a las S/E transfo-rectificadoras seleccionadas por la compañía para la realización del estudio.
- Estudiar las metodologías clásicas (ASHRAE) de cargas térmicas de ambientes.
- Estudiar otras metodologías para el cálculo de cargas térmicas de ambientes.

- Establecer la ubicación, funciones, principios de operación, componentes, puntos de operación e importancia de las S/E transfo-rectificadoras.
- Realizar los croquis o esquemas de los ambientes de las subestaciones a estudiar.
- Establecer las variables (Temperatura de Bulbo Seco, % de Humedad, Temperatura, etc.) la metodología de cálculo seleccionada según la subestación.
- Desarrollo de los mapas térmicos y tablas de cálculo de la subestación eléctrica.
- Estimar la carga térmica existente en cada subestación en estudio.
- Comparar la carga térmica calculada con los requerimientos de equipos y las disposiciones de Higiene y Seguridad Industrial vigentes.
- Analizar la carga térmica existente en cada subestación en estudio.
- Rediseñar el sistema de climatización de las estaciones que lo ameriten.
- Realizar planos y especificaciones de los equipos de climatización propuestos para la mejora térmica de la subestación.
- Realizar el informe de Trabajo Especial de Grado en su totalidad incluyendo las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO II

CONCEPTOS Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los conceptos y fundamentos teóricos necesarios para la realización de este proyecto.

2.1.- CONCEPTOS BÁSICOS.

2.1.1.- Temperatura de Bulbo Seco (T_{bs}).

La temperatura de bulbo seco es simplemente la temperatura del aire atmosférico. Para su medición se utiliza un termómetro ordinario (de bulbo), aunque también podría ser medida con otros equipos como termocuplas, RTD's, etc.

2.1.2.- Temperatura de Bulbo Húmedo (T_{bh}).

Es aquella que se mide empleando un termómetro cuyo bulbo está cubierto con una mecha de algodón saturada con agua. Existen también otros equipos que permiten realizar dicha medición, como es el caso de los psicrómetros, los higrómetros, etc.

2.1.3.- Temperatura de Punto de Rocío (T_{pr}).

Es la temperatura a la que empieza a condensar el vapor de agua contenido en el aire, más específicamente, se define como la temperatura a la que se inicia la condensación si el aire se enfría a presión constante. El punto de rocío depende de la concentración de vapor de agua presente, y por lo tanto de la humedad relativa y de la temperatura del aire.

2.1.4.- Humedad Absoluta o Específica (ω).

La humedad absoluta o específica se define como el cociente de la masa de vapor de agua m_v entre la masa de aire seco m_a . Ésta se mide como la masa de agua que se encuentra en estado gaseoso en un kilogramo de aire seco, y se expresa en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire. También es conocida como relación de humedad.

2.1.5.- Humedad Relativa (ϕ).

Podemos definir la humedad relativa como la relación entre la cantidad de humedad que el aire contiene m_v y la cantidad máxima de humedad que el aire puede contener m_g a la misma temperatura. Se expresa en porcentaje. También puede expresarse como la relación entre la presión real de vapor de agua en el aire con la presión de vapor de agua si el aire estuviera saturado a la misma temperatura de bulbo seco.

2.1.6.- Entalpía (h).

La entalpía es la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con su entorno. Como propiedad termodinámica se define como la suma de la energía interna y el producto de su volumen multiplicado por la presión.

2.1.7.- Volumen Específico (v).

Es una de las propiedades termodinámicas más frecuentemente usadas y se define como el volumen por unidad de masa o el recíproco de la densidad, cuando se trata de gases el volumen es afectado de manera importante por la temperatura y la presión. Generalmente se expresa en $[m^3/kg]$,

2.1.8.- Aire Atmosférico.

El aire atmosférico está constituido aproximadamente de un 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% de argón, estos gases comprenden el porcentaje de aire seco del aire atmosférico. Para efectos prácticos se ignora el argón y considera una composición de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. A parte de estos gases, la atmósfera terrestre contiene también una concentración entre 1% y un 4% del volumen total de vapor de agua. Dicho vapor se incorpora a la atmósfera mediante el proceso de evaporación de la superficie, y es eliminado de ella mediante el proceso de condensación en las nubes.

2.1.9.- Carga Térmica.

Se define como la energía térmica presente en un ambiente. Está constituida por el aporte calórico del sol sobre las paredes y ventanas exteriores, así como el calor generado por las personas y equipos que ocupan dicho espacio. En caso de que se desee modificar determinadas condiciones de temperatura y humedad para una aplicación específica (ej. confort humano) en un espacio determinado, la carga térmica sería la energía que debe retirarse del mismo. Puede expresarse en Vatios [W] o [BTU], la unidad utilizada comercialmente es la Tonelada de refrigeración [TON].

2.1.10.- Calor Latente.

El calor latente es aquel que aplicado a una sustancia no origina un aumento de temperatura, pero si un cambio de fase. De manera mas especifica, es la cantidad de energía absorbida o generada durante un cambio de fase. Se expresa en [BTU/lb_{aire}] en el sistema inglés y en [W] en el sistema internacional. Se conoce el calor latente como la energía térmica asociada al cambio del estado del vapor de agua. Cuando se agrega o elimina humedad de un proceso en un espacio, una cantidad correspondiente de calor latente siempre está implicada, para vaporizar o condensar el agua.

2.1.11.-Calor Sensible.

El calor sensible es la energía térmica asociada al cambio de temperatura del aire entre dos estados. También se define como aquel que origina un aumento de temperatura cuando es aplicado a una sustancia. Se denomina calor seco, está expresado en [BTU/lb_{aire}] en el sistema inglés y en [W] en el sistema internacional y se refleja por medio de la temperatura de bulbo seco.

2.1.12.- Calor Total.

Es la suma de los valores de calor sensible y calor latente. Es el calor total contenido de la mezcla de aire y vapor de agua, se expresa en [BTU/lb_{aire}] en el sistema inglés y en [W] en el sistema internacional.

2.2.- PSICROMETRÍA.

En líneas generales la psicometría estudia las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor. La mayoría de las aplicaciones se refieren al aire húmedo, que no es más que la mezcla de aire seco y vapor de agua. La psicometría resulta entonces útil en el diseño y análisis de sistemas de diseño de equipos de refrigeración, estudio del secado de alimentos, estudios de aire acondicionado y climatización, torres de enfriamiento, y en todos los procesos industriales que exijan un fuerte control del contenido de vapor de agua en el aire.

Para realizar un estudio psicrométrico se deben tener claros los conceptos presentados en el apartado anterior.

2.2.1.- Carta Psicrométrica.

La carta psicrométrica es una herramienta gráfica que muestra como varía la relación de humedad de una cantidad de aire atmosférico en función de su temperatura de bulbo seco junto con otras propiedades como los son la humedad relativa, la temperatura de bulbo húmedo y la entalpía de la mezcla por masa de aire seco. Estas cartas son construidas a una presión constante para poder trazar en la misma línea de humedad relativa y temperatura de bulbo húmedo constantes.

Las cartas psicrométricas son utilizadas a nivel mundial ya que permiten el cálculo de diversas propiedades del aire atmosférico de manera sencilla. Son una valiosa ayuda en el estudio de los procesos de acondicionamiento del aire atmosférico, como por ejemplo: enfriamiento o calentamiento del aire, humidificación, deshumidificación, etc. A continuación se muestra un esquema de una carta psicrométrica.

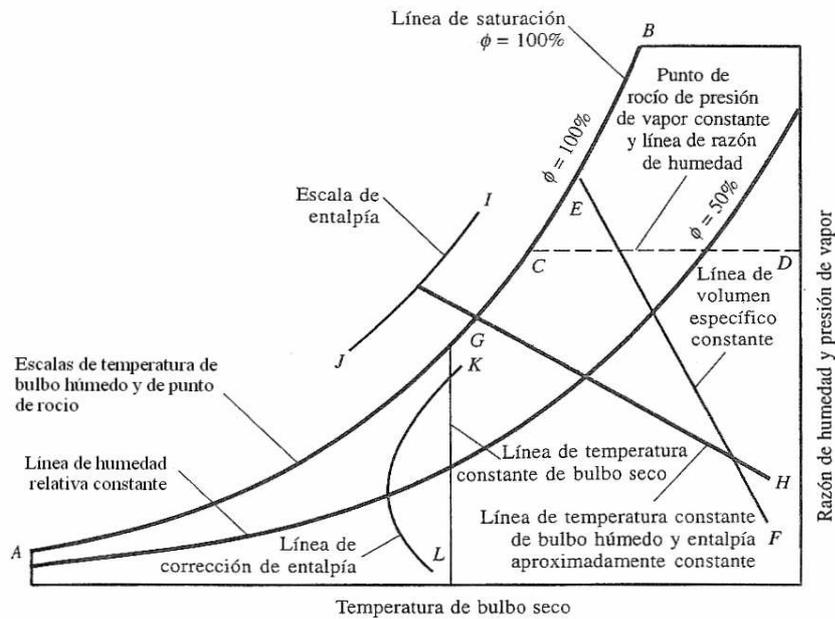


Fig. 2. 1.- Esquema explicativo de la carta psicrométrica.

2.3.- PROCESOS DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE.

El acondicionamiento de aire es el proceso de tratamiento del mismo en un ambiente interior con la finalidad de establecer y mantener los estándares requeridos de temperatura, humedad, limpieza y movimiento.

Para mantener ciertos ambientes (vivienda, construcción industrial, etc.) a temperaturas y humedades deseadas, son necesarios ciertos procesos de acondicionamientos de aire. Estos procesos pueden ser: el calentamiento simple (elevar la temperatura), el enfriamiento simple (disminuir la temperatura), la humidificación (agregar humedad) y la deshumidificación (eliminar humedad). Algunas veces es necesario aplicar dos o más de estos procesos para llevar el aire al nivel de temperatura y humedad que se desea. En la carta psicrométrica se pueden expresar distintos procesos de acondicionamiento de aire. Para los fines de este trabajo solo se dará una breve explicación del proceso de calentamiento o enfriamiento simple en el siguiente apartado.

2.3.1.- Proceso de Calentamiento o de Enfriamiento Simple.

Cuando se habla del funcionamiento de los sistemas de calefacción, se debe tener en cuenta que el aire que circula por estos sistemas se calienta al pasar por un ducto que contiene los tubos para los gases calientes o los alambres de la resistencia eléctrica (ver fig.2.2.). La cantidad de humedad en el aire permanece constante durante este proceso, ya que no se añade humedad o se elimina del aire. Esto implica que, la humedad específica del aire permanece constante ($\omega = \text{constante}$) durante un proceso de calentamiento (o enfriamiento) sin humidificación o deshumidificación. Dicho proceso de calentamiento procederá en la dirección de las crecientes temperaturas de bulbo seco seguirá una línea de humedad específica constante en la carta psicrométrica, la cual aparece como una línea horizontal.

Cabe destacar que la humedad relativa del aire disminuye durante un proceso de calentamiento, incluso si la humedad específica (ω) permanece constante. Esto se debe a que la humedad relativa es la relación entre el contenido de humedad y la capacidad de humedad del aire a la misma temperatura, y la capacidad de humedad aumenta con la temperatura. En consecuencia, la humedad relativa de aire caliente puede estar bastante por debajo de los niveles de confort, lo cual ocasiona resequedad en la piel, dificultades respiratorias y aumento en la electricidad estática.

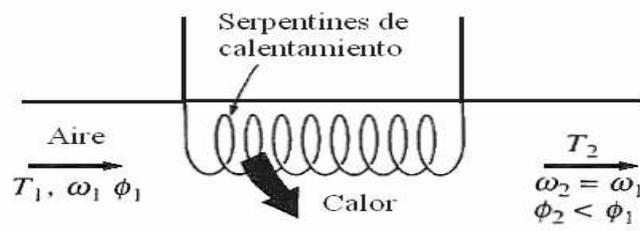


Fig. 2. 2.- Representación esquemática del proceso de calentamiento simple.

Un proceso de enfriamiento a humedad específica constante es similar al proceso de calentamiento analizado antes, excepto en que la temperatura de bulbo seco disminuye y la humedad relativa aumenta durante un proceso de este tipo, como se muestra en la figura 2.3. El enfriamiento puede lograrse al pasar el aire sobre algunos serpentines por los cuales fluye un refrigerante o agua fría.

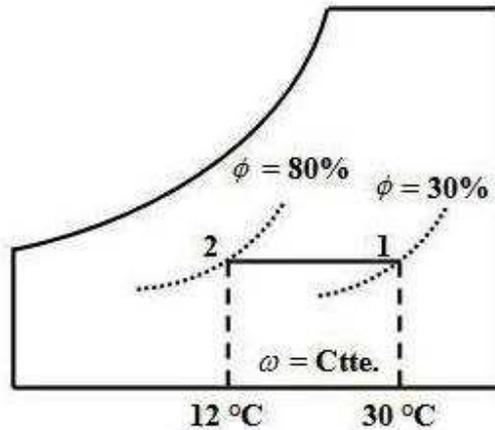


Fig. 2. 3.- Proceso de enfriamiento simple mostrado en una carta psicrométrica.

2.4.- MÉTODOS DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA TRADICIONALES SEGÚN LA SOCIEDAD AMERICANA DE INGENIERÍA PARA AIRE ACONDICIONADO, CALEFACCIÓN Y REFRIGERACIÓN (ASHRAE).

Los métodos de cálculos tomados en consideración para la realización de este trabajo, son los propuestos por la Sociedad Americana de Ingeniería para Aire Acondicionado, Calefacción y Refrigeración, (ASHRAE). La ASHRAE posee cinco métodos vigentes de cálculo de carga térmica reconocidos internacionalmente, los cuales se muestran en la figura 2.4, y serán explicados posteriormente:

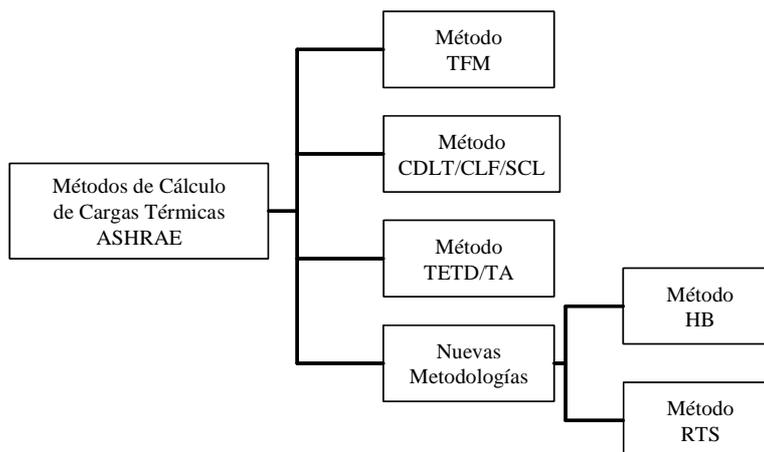


Fig. 2. 4.- Esquema de métodos de cálculo de carga térmica según ASHRAE.

2.4.1.- Método de Función de Transferencia, “Transfer Function Method”.

El método de función de transferencia es uno de los procedimientos más utilizados y tiene como fundamento estimar las cargas hora por hora para un día específico de diseño que se define en los Manuales de Fundamentos de ASHRAE según la latitud de la zona en estudio, de esta manera se predicen en alguna medida las condiciones del espacio interior. Para facilitar estos cálculos se sugiere el uso de programas de control y operación. A continuación se muestra en la figura 2.4 un esquema del cálculo de la carga térmica por el método TFM:

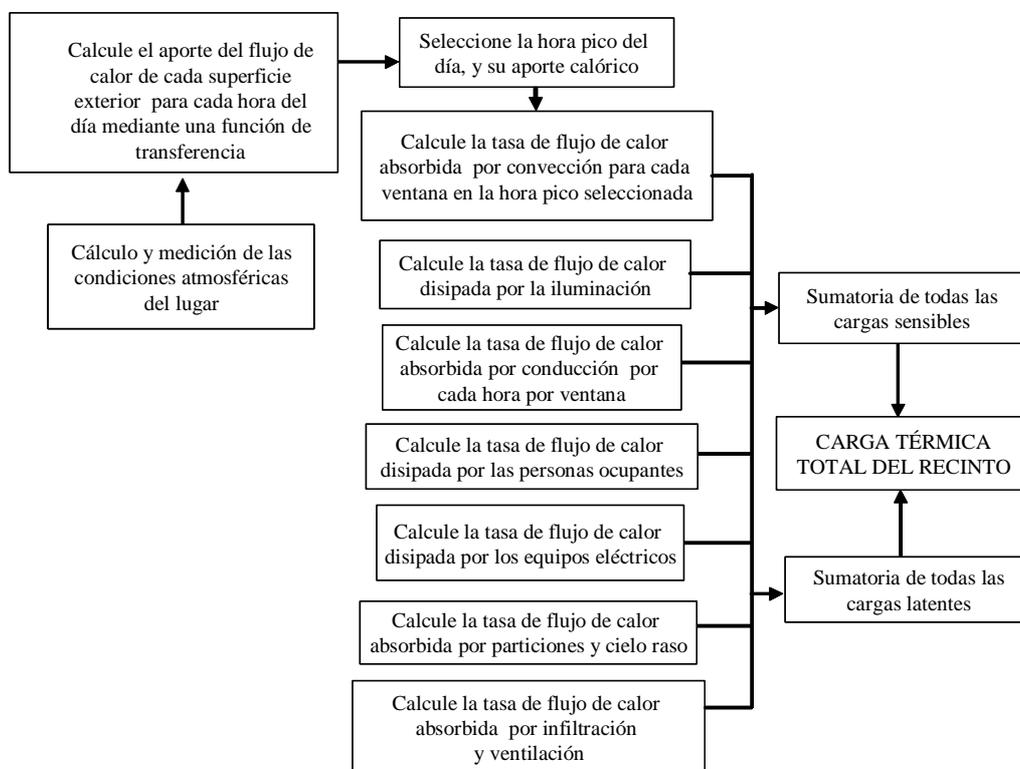


Fig. 2. 5.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método TFM de AHSRAE.

Ya que este método se fundamenta en el aporte térmico de las áreas soleadas del recinto, el primer paso consistirá en seleccionar el día de diseño más caluroso, según la ubicación geográfica del lugar para estimar la carga térmica de las áreas soleadas por hora, mediante una función de transferencia que tiene como objetivo simular la variación de la absorción de calor mediante paredes y techos y que se presenta a continuación:

Tabla 2. 1.- Carga térmica por techos y paredes soleadas.

Techos y Paredes	
ITEM	Ecuación
(2.1)	$q_{e,\theta} = A \left[\sum_{n=0} b_n (T_{e,\theta-n\delta}) - \sum_{n=1} \left[d_n (q_{e,\theta-n\delta}) / A \right] - T_{rc} - \sum_{n=0} c_n \right]$
Leyenda	<p>$q_{e,\theta}$: Tasa de flujo de calor absorbido por unidad de tiempo por paredes y techos. [BTU].</p> <p>A : Área del elemento de estudio. [ft²].</p> <p>θ : Hora para la cual se realiza el cálculo. [h].</p> <p>e : Elemento bajo análisis.</p> <p>δ : Intervalo de tiempo, normalmente 1 hora. [h].</p> <p>n : Número de horas significativas para el cálculo.</p> <p>$T_{e,\theta-n\delta}$: Temperatura del aire ambiente al tiempo $\theta - n\delta$. [°F].</p> <p>T_{rc} : Temperatura del interior del cuarto. [°F].</p> <p>b_n, c_n, d_n : Coeficientes de la función de transferencia por conducción.¹</p>
Temperatura del Aire Ambiente	
ITEM	Ecuación
(2.2)	$T_e = T_o + \frac{\alpha I_t}{h_o} - \frac{\epsilon \Delta R}{h_o}$
(2.3)	$T_{ea} = T_{oa} + \frac{\alpha}{h_o (I_{DT}/24)} - \frac{\epsilon \Delta R}{h_o}$
Leyenda	<p>T_e : Temperatura del aire ambiente promedio en 24 horas. [°F].</p> <p>T_o : Temperatura de bulbo seco. [°F].²</p> <p>α/h_o : Factor para superficies de color. (0,026 colores claros, 0,052 colores oscuros).³</p> <p>I_t : Carga solar total incidente =1,15 (SHGF).</p> <p>$SHGF$: Factor de ganancia de calor por la orientación.⁴</p> <p>$\epsilon \Delta R/h_o$: Factor de onda por radiación. (-7°F superficies horizontales, 0°F verticales).⁵</p> <p>T_{ea} : Temperatura promedio del aire en el ambiente. [°F].</p> <p>T_{oa} : Temperatura de bulbo seco promedio en 24 horas. [°F].</p> <p>I_{DT} : Fracción de flujo de calor solar absorbido diariamente.⁶</p>

¹ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 13 y 18.

² Ver Referencia: 5. Capítulo 26. Tabla 2.

³ Ver Referencia: 5.

⁴ Ver Referencia: 5. SHGF Capítulo 29. Tablas 15- 21.

⁵ Ver Referencia: 5.

⁶ Ver Referencia: 5. SHGF Capítulo 29. Tablas 15- 21.

Una vez obtenidos los resultados de esta fase, se tomará el mayor valor como el aporte de calor de techos y paredes para el día y la hora más calurosos del año, y se estimará el aporte térmico de otros factores como vidrios, iluminación, ocupantes etc. A continuación se encuentran las ecuaciones que sustentan estos cálculos:

Tabla 2. 2.- Carga térmica por vidrios, particiones, cielo raso, pisos y ocupantes.

Vidrios		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.4)	$q_{convectivo} = UA(T_o - T_i)$	$q_{convectivo} / solar$: Tasa de flujo de calor [BTU/h]. U : Coeficiente global de transferencia de calor, para vidrios. [BTU/ h.°F.ft ²]. ⁷ A : Área del elemento en estudio.[ft ²]. T_o : Temperatura de bulbo seco. [°F]. ⁸ T_i : Temperatura de diseño según condiciones de espacio. [°F].
(2.5)	$q_{solar} = A(SC)(SHGF)$	SC : Coeficiente de sombra. ⁹ $SHGF$: Factor de ganancia de calor por la orientación. ¹⁰
Particiones, Cielo Raso y Pisos		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.6)	$q = UA(T_b - T_i)$	q : Tasa de flujo de calor. [BTU/h]. T_b : Temperatura de espacios adyacentes. [°F]. T_i : Temperatura de diseño. [°F]. U : Coeficiente global de transferencia de calor de diseño, en este caso para pisos, particiones y techos.[BTU/ h.°F.ft ²]. $U=1/R$. ¹¹ A : Área del elemento en estudio.[ft ²].
Ocupantes		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.7)	$q_{sensible} = n(HG_s)$	$q_{sensible} / latente$: Tasa de flujo de calor. [BTU/h] n : Número de personas en el área en estudio.
(2.8)	$q_{latente} = n(HG_l)$	HG_s : Calor sensible absorbido por las personas. [BTU/h]. ¹² HG_l : Calor latente absorbido por las personas. [BTU/h]. ¹³

⁷ Ver Referencia: 5. Capítulo 29. Tabla5.

⁸ Ver Referencia: 5. Capítulo 26. Tabla 3A.

⁹ Ver Referencia: 5. Capítulo 29.

¹⁰ Ver Referencia: 5. SHGF Capítulo 29. Tablas 15- 21.

¹¹ Ver Referencia: 5. SHGF Capítulo 24. Tabla 4.

¹² Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 3.

¹³ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 3.

Tabla 2. 3.- Carga térmica por iluminación, equipos eléctricos a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.

Iluminación		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.9)	$q_{il} = 3,41WF_{ul}F_{sa}$	q_{il} : Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo. [BTU] W : Vatios de entrada, señalados en planos eléctricos. [W]. F_{ul} : Factor de uso de la iluminación. ¹⁴ F_{sa} : Factor de permisibilidad. ¹⁵
Equipos Asistidos por Motores Eléctricos		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.10)	$q_p = 2.545PE_F$	q_p : Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo. [BTU] P : Potencia, especificada en planos o manuales. [HP]. E_F : Factor de eficiencia. ¹⁶
Equipos a Gas y Vapor		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.11)	$q_{sensible} = q_{input}F_UF_R$	$q_{sensible}/latente$: Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo. [BTU] q_{input} : Energía de entrada. ($q_{latente} = 0$, si los equipos tienen campana de extracción). [BTU] ¹⁷ F_U, F_R y F_L : Factores de uso, de radiación y de carga, respectivamente. ¹⁸
(2.12)	$q_{latente} = q_{input}F_L$	
Ventilación e Infiltración de Aire		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.13)	$q_{sensible} = 1,1Q(T_o - T_i)$	$q_{sensible}/latente/total$: Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo. [BTU] Q : Tasa de flujo volumétrico de aire de ventilación. [ft ³ /min.] ¹⁹ T_o, T_i : Temperatura de salida y entrada del aire, respectivamente. [°F]. ω_o, ω_i : Humedad específica del aire de salida y entrada, respectivamente. [Lb. agua/Lb. aire seco]. H_o, H_i : Entalpía del aire de salida y entrada. [BTU/Lb.]
(2.14)	$q_{latente} = 4.840 Q(\omega_o - \omega_i)$	
(2.15)	$q_{total} = 4,5Q(H_o - H_i)$	

¹⁴ Ver Referencia: 5. Capítulo 28.

¹⁵ Ver Referencia: 5. Capítulo 28.

¹⁶ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 4 y 5.

¹⁷ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 5- 9.

¹⁸ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 6 y 7.

¹⁹ Para Ventilación ver STANDARS ASHRAE 1962; Para infiltración ver referencia 5. Capítulo 25.

Tabla 2. 4.- Cargas térmicas por enfriamiento.

Carga de Enfriamiento	
ITEM	Ecuación
(2.16)	$q_{sensible} = q_{rf} + q_{sc}$
Leyenda	<p>$q_{sensible}$: Tasa de flujo de calor sensible por unidad de tiempo. [BTU]</p> <p>q_{rf} : Carga de enfriamiento sensible para elementos que tengan componentes convectivos y de radiación. [BTU]</p> <p>q_{sc} : Carga de enfriamiento sensible para elementos que tengan solo componentes convectivos. [BTU]</p>
(2.17)	$q_{rf} = \sum (v_0 q_{\theta,i} + v_1 q_{\theta,i-\delta} + v_2 q_{\theta,i-2\delta} + \dots) - (w_1 q_{\theta-\delta} + w_2 q_{\theta-2\delta} + \dots)$
Leyenda	<p>v_n, w_n : Coeficientes de función de transferencia para cuartos.²⁰</p> <p>q_{θ} : Tasa de flujo de calor disipada por cada uno de los elementos que tienen componente radiante por unidad de tiempo. [BTU].²¹</p> <p>δ : Intervalo de tiempo, normalmente 1 hora.[h]</p>
(2.18)	$q_{sc} = \sum_{j=1} (q_{c,j})$
Leyenda	<p>$q_{c,j}$: Tasa de flujo de calor convectiva de cada uno de los elementos presentes en el cuarto por unidad de tiempo. [BTU].</p>
(2.19)	$q_{latente} = \sum_{n=1} (q_{c,n})$
Leyenda	<p>$q_{latente}$: Tasa de Flujo de calor latente por unidad de tiempo. [BTU].</p> <p>$q_{c,n}$: Tasa de flujo de calor sensible absorbido para cada uno de los elementos presentes en el cuarto. [BTU].</p> <p>n : Cantidad de elementos presentes en el cuarto.</p>

Finalmente la carga térmica total que se debe disipar para crear un ambiente de confort en el recinto en cuestión consistirá en la suma de todas las tasas de flujo de calor estimadas, sensibles y latentes, junto con el mayor valor obtenido de la función de transferencia.

²⁰ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 24 y 25.

²¹ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 24, 25 y 42.

Tabla 2. 5.- Carga térmica total.

Carga Total		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.20)	$q_{TOTAL} = \sum_{n=1} (q_n)$	q_{TOTAL} : Carga Térmica presente en el recinto por unidad de tiempo. [BTU] q_n : Aporte térmico por cada factor.

2.4.2.- Método de Cálculo de Cargas por Temperatura Diferencial y Factores de Carga de Enfriamiento, “Difference Temperature Cooling Load / Cooling Load Factor / Solar Cooling Load”.

Este método consiste en una herramienta simplificada para el cálculo de cargas térmicas, puesto que se basa en el uso de coeficientes ligados a la ubicación geográfica del la zona y hora del día (CDLT), o en el tiempo de operación de los equipos u ocupación de personas (CLF y SCL) que fueron determinados con el apoyo de el método TFM, también se incluye el uso del coeficiente global de transferencia de calor para varias combinaciones de materiales con los que comúnmente se construyen techos y paredes, que a pesar de no ser exactos, presentan resultados satisfactorios. Nuevamente el primer paso consistirá en identificar los datos geográficos del sitio en estudio y su correspondiente día más caluroso con su hora pico, estos datos están dados en la bibliografía especializada y se obtuvieron como se dijo antes mediante datos estadísticos fundamentados en el método TFM. De esta manera se procederá a mostrar un esquema de la metodología de cálculo en la figura 2.6. para luego presentar las ecuaciones, cuyos factores se encuentran tabulados en el Manual de Fundamentos de ASHRAE.

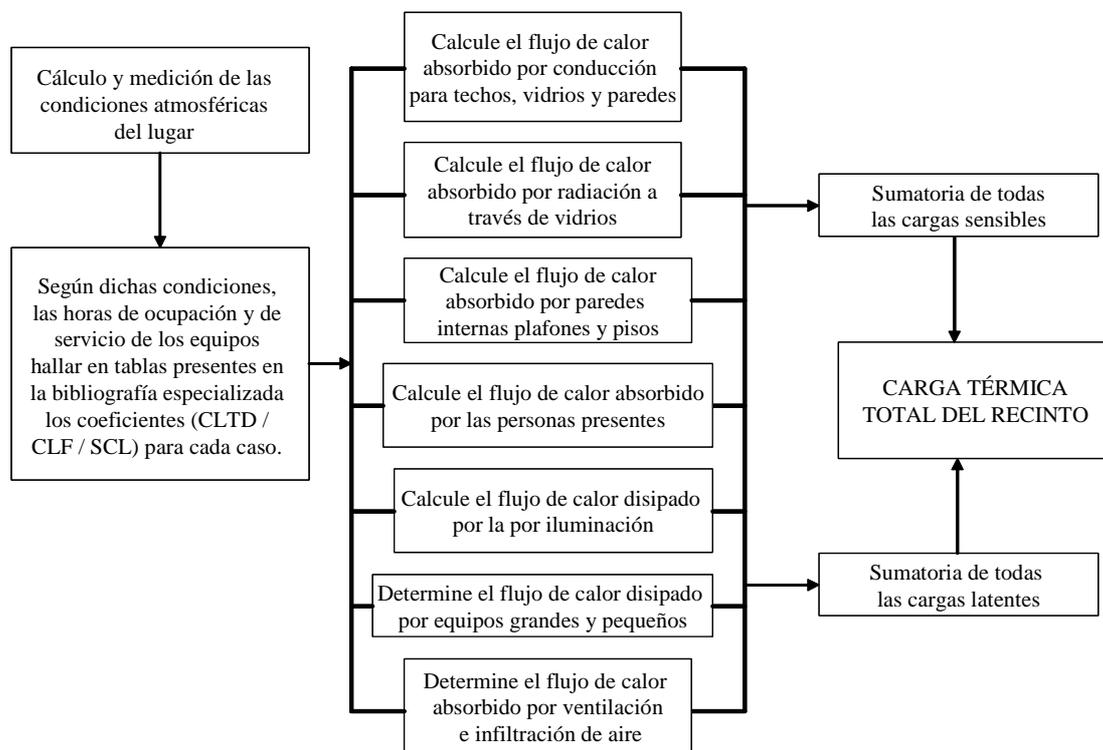


Fig. 2. 6.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método CLTD/CLF/SCL de AHSRAE.

- Carga de Enfriamiento Externo

Tabla 2. 6.- Carga térmica a través de techos y paredes.

Techos y Paredes		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.21)	$q = UA(CLTD)$	<p>q : Tasa de flujo de calor absorbido a través de paredes y techos. [BTU/h].</p> <p>U : Coeficiente global de transferencia de calor, en este caso para techos y paredes. [BTU/h.°F.ft²]. $U=1/R$.²²</p> <p>A : Área del techo, pared. [ft²].</p> <p>$CLTD$: Diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento.[°F]²³</p>

²² Ver Referencia: 5. Para techos y paredes capítulo 24, tabla 4. Para vidrios Capítulo 29, tabla 5.

²³ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 30 y 32.

Tabla 2. 7.- Carga térmica a través de vidrios, paredes internas, plafones y pisos.

Conducción a través de Vidrios		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.22)	$q = UA(CLTD)$	<p>q : Tasa de flujo de calor absorbido a través de vidrios [BTU/h].</p> <p>U : Coeficiente global de transferencia de calor, para vidrios. [BTU/ h.°F.ft²]. $U=1/R$.²⁴</p> <p>A : Área del vidrio.[ft²].</p> <p>$CLTD$: Diferencia de temperatura de la carga de enfriamiento. [°F].²⁵</p>
Radiación a través de Vidrios		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.23)	$q = A(SC)(SCL)$	<p>q : Tasa de flujo de calor absorbido por radiación a través de vidrios [BTU/h].</p> <p>SC : Coeficiente de sombra.²⁶</p> <p>SCL : Factor de carga de enfriamiento solar. [BTU/ h.ft²].²⁷</p> <p>A : Área del vidrio.[ft²].</p>
Paredes Internas, Plafones y Pisos		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.24)	$q = UA(T_b - T_{rc})$	<p>q : Tasa de flujo de calor absorbido a través de paredes internas, plafones y pisos [BTU/h].</p> <p>U : Coeficiente global de transferencia de calor, en este caso para pisos y paredes internas. [BTU/ h.°F.ft²].²⁸</p> <p>A : Área del piso, pared o plafón.[ft²].</p> <p>T_b : Temperatura de espacios adyacentes. [°F].</p> <p>T_{rc} : Temperatura de diseño interior. [°F].</p>

²⁴ Ver Referencia: 5. Para techos y paredes capítulo 24, tabla 4. Para vidrios Capítulo 29, tabla 5.

²⁵ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 30 y 32.

²⁶ Ver Referencia: 5. Capítulo 29.

²⁷ Ver Referencia: 5. Capítulo 29. Tablas 36.

²⁸ Ver Referencia: 5. Capítulo 29. Tablas 36.

- Carga de Enfriamiento Interna.

Tabla 2. 8.- Carga térmica por ocupantes, iluminación y equipos eléctricos.

Ocupantes		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.25)	$q_{sensible} = n(HG_s)CLF$	$q_{sensible}$: Tasa de flujo de calor sensible. [BTU/h] n : Número de personas en el área en estudio. HG_s : Ganancia de calor sensible. [BTU/h]. ²⁹ CLF : Factor de carga de enfriamiento por horas de ocupación. ($CLF = 1$). Con alta ocupación, durante las 24 horas de día o los fines de semana). ³⁰
ITEM	Ecuación	
N/A	$q_{latente}$, se estima con la ecuación (2.7).[BTU/h]	
Iluminación		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.26)	$q_{il} = 3,41WF_{ul}F_{sa}(CLF)$	q_{il} : Tasa de flujo de calor absorbida por iluminación. [BTU/h] W : Vatios de entrada, señalados en planos eléctricos. [W]. F_{ul} : Factor de uso de la iluminación. ³¹ F_{sa} : Factor de permisibilidad. ³² CLF : Factor de carga de enfriamiento, por hora de ocupación. ($CLF = 1$). Si las luces funcionan durante las 24 horas de día o los fines de semana). ³³
Equipos Asistidos por Motores Eléctricos		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.27)	$q_p = 2.545PE_F(CL F)$	q_p : Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo absorbida por equipos. [BTU] P : Potencia, especificada en planos o manuales. [HP]. E_F : Factor de eficiencia. ³⁴ CLF : Factor de carga de enfriamiento, por hora de ocupación. ($CLF = 1$). Si el aire acondicionado funciona durante las 24 horas de día o los fines de semana). ³⁵

²⁹ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 3.

³⁰ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 37.

³¹ Ver Referencia: 5. Capítulo 28.

³² Ver Referencia: 5. Capítulo 28.

³³ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 38.

³⁴ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 4 y 5.

³⁵ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 37.

Tabla 2. 9.- Carga térmica por equipos eléctricos a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.

Equipos Eléctricos a Gas y Vapor		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.28)	$q_{sensible} = q_{input} F_U F_R (CLF)$	$q_{sensible} / latente$: Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo. [BTU] q_{input} : Potencia de entrada. ($q_{latente} = 0$, si los equipos tienen campana de extracción). [BTU] ³⁶
(2.29)	$q_{latente} = q_{input} F_L (CLF)$	F_U, F_R y F_L : Factores de uso, de radiación y de carga, respectivamente. ³⁷ CLF : Factor de carga de enfriamiento, por hora de ocupación. ($CLF = 1$, cuando los equipos operan las 24 horas o durante los fines de semana). ³⁸ $q_{latente} = 0$, cuando los equipos tienen campanas de extracción.
Ventilación e Infiltración de Aire		
Ecuación		
$q_{sensible}$, se estima con la ecuación (2.13).		
$q_{latente}$, se estima con la ecuación (2.14).		
q_{total} , se estima con la ecuación (2.15).		

Finalmente la carga térmica total que se debe disipar para crear un ambiente de confort en el recinto en cuestión consistirá en la suma de todas las tasas de flujo de calor estimadas, sensibles y latentes por medio de la ecuación (2.20).

2.4.3.- Método de Temperatura Diferencial Total Equivalente y Tiempo Promedio, “Total Equivalent Temperature Differential”.

El método de temperatura diferencial total equivalente y tiempo promedio (TETD/TA), es un procedimiento recomendado para usuarios experimentados, fue concebido como un método de cálculo manual pero se ha comprobado que es solamente efectivo como aplicación informática. El procedimiento aplicado es similar al método TFM, estimando la carga horaria y además el diferencial de temperaturas en el tiempo. La diferencia básica de este método con respecto al antes mencionado es el cálculo de la

³⁶ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 5- 9.

³⁷ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 6 y 7.

³⁸ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tablas 37 y 39.

absorción de calor a través de techos y paredes, así como el absorbido por superficies interiores, infiltración y ventilación.

Para este método el coeficiente global de transferencia de calor (U), es calculado a través de tablas diseñadas con las características de los techos y paredes, de una manera mas específica para valores de conducción de superficies exteriores de 3,0 Btu/(h ft² °F) e interiores de 1,2 Btu/(h ft² °F). La ganancia de calor por paredes y techos puede ser calculada de dos maneras, cuando el almacenamiento de calor de la superficie de la pared es pequeña puede ser estimada por medio de la ecuación (2.6) y cuando es de mayor magnitud por la ecuación número (2.30).

En la figura 2.7 se muestra un esquema con la metodología de cálculo TETD/TA y posteriormente se procederá a presentar las ecuaciones pertinentes, cuyos factores se encuentran tabulados en el Manual de Fundamentos de ASHRAE:

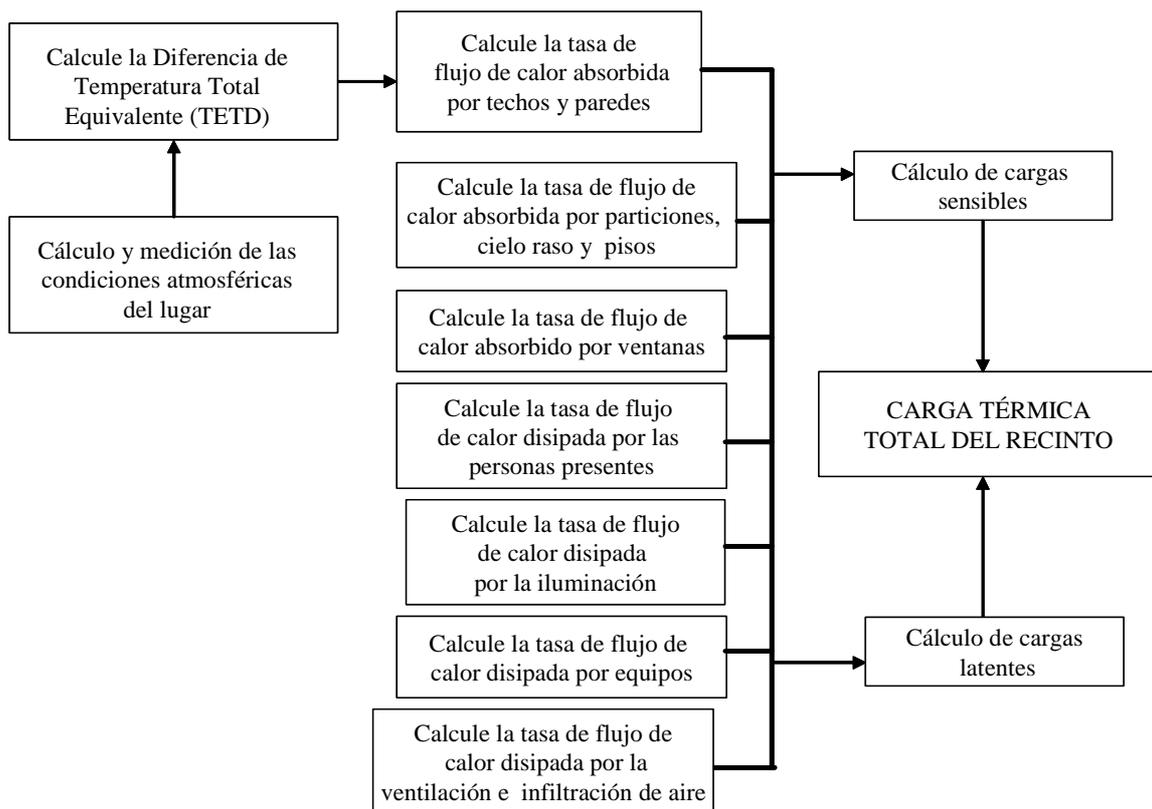


Fig. 2. 7.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método TETD/TA de AHSRAE.

- Absorción de Energía Térmica Externa

Tabla 2. 10.- Carga térmica por techos, paredes, vidrios, particiones, pisos y cielo raso.

Temperatura del Aire Ambiente		
Ecuación		
T_e , se estima con la ecuación (2.2)		
T_{ea} , se estima con la ecuación (2.3)		
Techos y Paredes		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.30)	$q = UA(TETD)$	q : Tasa de flujo de calor por unidad de tiempo absorbido a través de paredes y techos. [BTU]. U : Coeficiente global de transferencia de calor, en este caso para techos y paredes. [BTU/h.°F.ft ²]. $U=1/R$. ³⁹ A : Área del techo, pared. [ft ²]. $TETD$: Diferencia de temperatura total equivalente. [°F]. T_i : Temperatura de bulbo seco de diseño interior. [°F]. T_{ea} : Temperatura promedio del aire ambiente. [°F]. λ : Factor de decremento. $T_{e\delta}$: Temperatura ambiente para un factor de tiempo de retraso.
(2.31)	$TETD=T_{ea}-T_i + \lambda(T_{e\delta}-T_{ea})$	
Vidrios		
Ecuación		
$q_{convectivo}$ se estima con la ecuación (2.4).		
q_{solar} se estima con a ecuación (2.5).		
Particiones, Cielo Raso y Pisos		
Ecuación		
q , se estima con la ecuación (2.6).		

³⁹ Ver Referencia: 5. Para techos y paredes Capítulo 24, tabla 4. Para vidrios capítulo 29, tabla 5.

- Absorción de Energía Térmica Interna

Tabla 2. 11.- Carga térmica por personas, iluminación, equipos asistidos por motores eléctricos, a gas y vapor, ventilación e infiltración de aire.

Personas
Ecuación
$q_{sensible}$, se estima con la ecuación (2.7).
$q_{latente}$, se estima con la ecuación (2.8).
Iluminación
Ecuación
q_{il} , se estima con la ecuación (2.9).
Equipos Asistidos por Motores Eléctricos
Ecuación
q_p , se estima con la ecuación (2.10).
Equipos Eléctricos, a Gas y Vapor
Ecuación
$q_{sensible}$, se estima con la ecuación (2.11).
$q_{latente}$, se estima con la ecuación (2.12).
Ventilación e Infiltración de Aire
Ecuación
$q_{sensible}$, se estima con la ecuación (2.13).
$q_{latente}$, se estima con la ecuación (2.14).
q_{total} , se estima con la ecuación (2.15).

Tabla 2. 12.- Carga térmica por enfriamiento.

Carga de Enfriamiento	
ITEM	Ecuación
(2.32)	$q_{sensible} = q_{cf} + q_{arf} + q_c$
(2.33)	$q_{cf} = q_{s,1}(1 rf_1) + q_{s,2}(1 rf_2) + \dots + rf_n$
(2.34)	$q_{arf} = \sum_{\gamma=h_a+1-\theta} \frac{(q_{s,1}rf_1 + q_{s,2}rf_2 + \dots + rf_n) \gamma}{\theta}$
(2.35)	$q_c = (q_{sc,1} + q_{sc,2} + q_{sc,\beta})$
(2.36)	$q_{latente} = (q_{l,1} + q_{l,2} + q_{l,\beta})$
Leyenda	<p>$q_{sensible}$: Tasa de flujo de calor sensible por unidad de tiempo. [BTU]</p> <p>q_{cf} : Tasa de flujo de calor por convección por hora para n elementos. [BTU]</p> <p>$q_{s,n}$: Tasa de flujo de calor sensible absorbida por hora para n elementos. [BTU]</p> <p>rf_n : Fracción de radiación de calor sensible para n elementos.⁴⁰</p> <p>q_{arf} : Promedio de las fracciones radiantes por hora para n elementos. [BTU]</p> <p>θ : Número de horas sobre el cual se calcula el promedio de fracciones radiantes de la absorción de calor sensible.</p> <p>h_a : Hora para la cual se calcula la carga de enfriamiento de 1 a 24.</p> <p>q_c : Tasa de flujo de calor sensible absorbido por hora solo para elementos convectivos para β elementos. [BTU]</p>

Finalmente la carga térmica total que se debe disipar para crear un ambiente de confort con la metodología TETD/TA consistirá en la suma de todas las tasas de flujo de calor estimadas, sensibles y latentes por medio de la ecuación (2.20).

2.4.4.- Nuevas metodologías propuestas.

La aplicación de estos métodos en el presente trabajo no se llevó a cabo debido a la falta de información de los mismos, los basamentos matemáticos no estaban disponibles ya que es difícil y costoso hallar una versión reciente del Manual de Fundamentos ASHRAE, por lo cual se trabajó con el Manual del año 1999; es por ello

⁴⁰ Ver Referencia: 5. Capítulo 28. Tabla 44.

que no se dispone de las fórmulas pertinentes a estos métodos, y solo se dará una breve explicación teórica de su funcionamiento.

2.4.4.1.- Balance de Calor “Heat Balance”.

La estimación de la carga térmica para un espacio por medio del método de balance de calor, implica el cálculo del equilibrio de energía debido a la conducción, convección, y radiación para cada superficie del sitio y un balance de calor por convección del aire del sitio. Para usar esta metodología se debe asumir, primero, que el aire presente en la zona de estudio tiene una temperatura uniforme y, segundo, que las superficies del cuarto (paredes, ventanas, piso, etc.) pueden ser tratadas como si tuvieran:

- Temperatura superficial uniforme.
- Ondas de irradiación cortas y largas uniformes.
- Componentes de radiación difusa.
- Conducción de calor unidimensional.

Este llamado balance de calor se realizará en las siguientes etapas:

- Balance de la cara exterior del ambiente.

Donde se toman en cuenta los aportes generados por la absorción de radiación solar directa y difusa, el intercambio de calor por radiación y conducción con el aire exterior y la transferencia de calor por conducción a través de la pared, esta última se asume, por convenciones universales, como negativa porque es disipada por el elemento en estudio.

- Balance de la cara interior del ambiente

Conformado por el intercambio de calor radiante entre las superficies interiores, la radiación inducida por luces y lámparas, la tasa de flujo de calor por conducción a través de la pared, la radiación del calor transmitida por las paredes y el intercambio por convección con el aire interior.

- Balance del Aire

En el que se incluyen la tasa de flujo de calor absorbido a través de las paredes y los elementos internos por convección, por la infiltración de aire exterior y por la ventilación o el sistema de aire acondicionado.

De esta manera se procederá a mostrar un esquema de la metodología de cálculo en la figura 2.8:

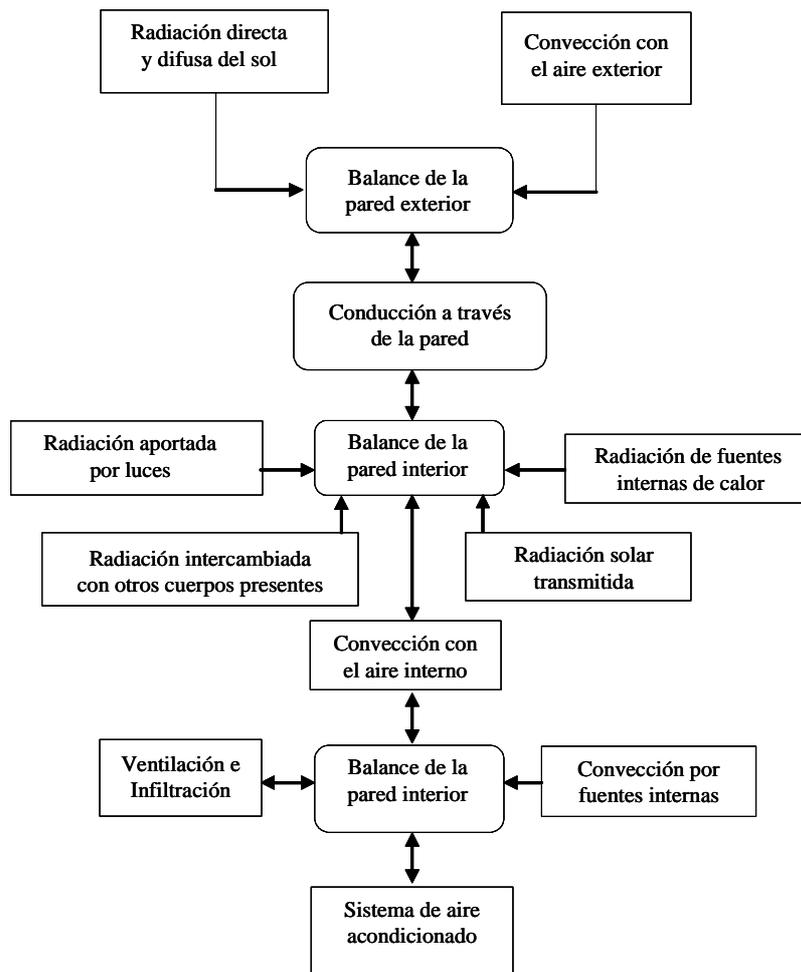


Fig. 2. 8.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método Heat Balance de AHSRAE.

2.4.4.2.- Serie de Tiempo Radiante “Radiant Time Series”.

Es el más reciente método propuesto por la ASHRAE para el cálculo de carga térmica, se caracteriza por ser único y simplificado, además se deriva del método balance de calor (HB) y a partir del año 2001 se incluyó en el Manual de Fundamentos ASHRAE. Se espera que el RTS pueda sustituir a todos los otros métodos simplificados (TFM, CLTD/CLF, y TETD/TA), éstos quedarán anulados y por ende, fuera de los próximos Manuales.

El método RTS es un método mas riguroso que no requiere cálculos iterativos, éste cuantifica la contribución de cada componente de cargas de enfriamiento (radiante y convectiva) a la carga total. Esta metodología es simple en concepto, pero implica también muchos cálculos que se utilizarán prácticamente como método manual, para esto se recomienda el uso del CLTD/CLF explicado anteriormente.

El procedimiento general para el cálculo de la carga de enfriamiento para cada componente de aporte (iluminación, personas, paredes, techos, ventanas, etc.) con RTS es el siguiente:

1. Estimar un perfil de los componentes que disipan calor para las 24 horas del día de diseño.
2. Separar las tasas de flujo de calor en partes convectivas y radiativas.
3. Aplicar de manera apropiada una RTS que incluya en la carga de enfriamiento la absorción de calor por radiación aportada por la energía almacenada en los elementos soleados.
4. Realizar la sumatoria de todas las cargas convectivas y radiativas por cada hora, para obtener la carga de enfriamiento total por cada hora.

A continuación se muestra un esquema del procedimiento a seguir en el uso de RTS, figura 2.9:

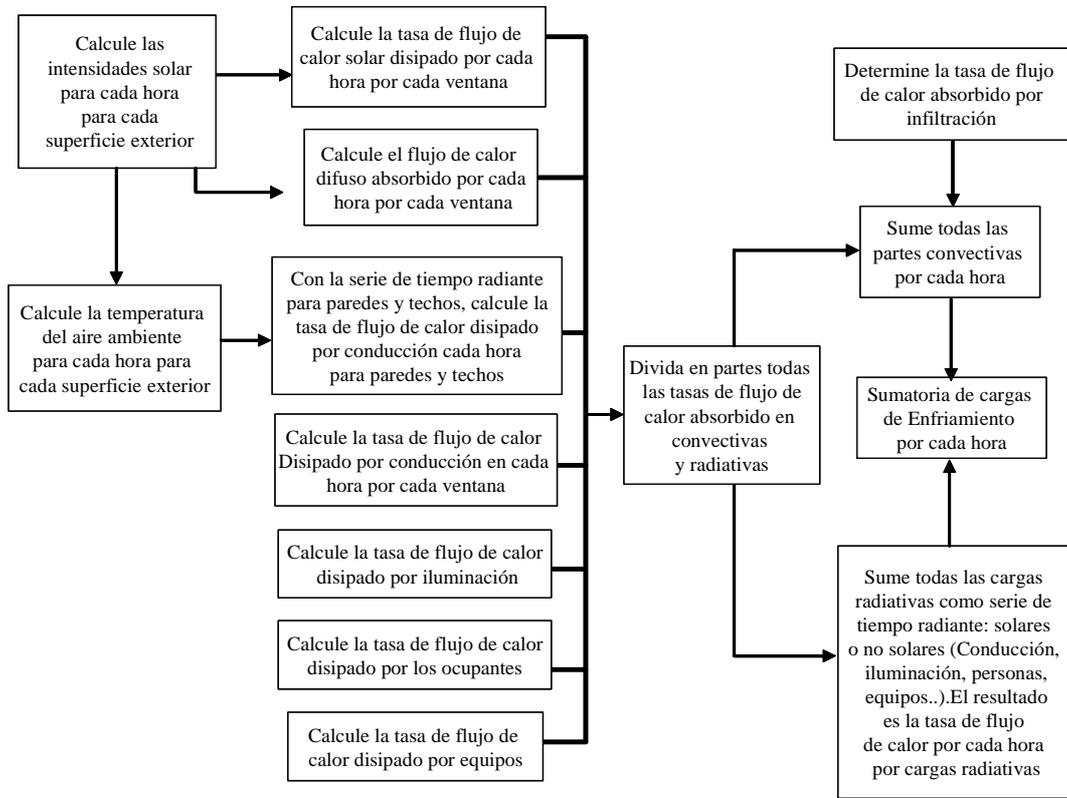


Fig. 2. 9.- Esquema del cálculo de carga térmica. Método RTS de AHSRAE.

2.5.- CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS POR TRANSFERENCIA DE CALOR.

Existen también otras maneras para estimar la carga térmica de un ambiente en las que no es necesario manejar tantas variables como en los métodos mostrados anteriormente, una de ellas es calcular el aporte de calor de los elementos presentes en dicho ambiente, así como de las condiciones del espacio interior y sus adyacencias. Este aporte térmico puede ocurrir mediante los mecanismos de transferencia de calor conocidos como conducción, convección y radiación. A continuación se muestra un esquema donde se identifican los mecanismos antes nombrados.

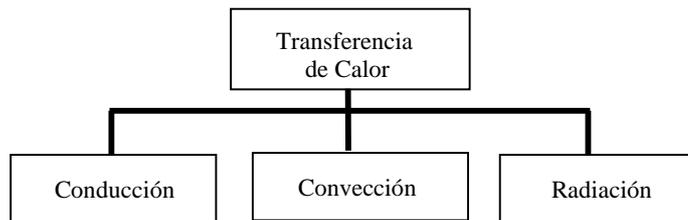


Fig. 2. 10.- Mecanismos de transferencia de calor.

Para los fines y características del presente trabajo solo la convección y la radiación son relevantes puesto que en la técnica usada se contará con mediciones de la temperatura superficial de los equipos.

2.5.1.- Transferencia de Calor por Convección.

La transferencia de calor por convección, se define como la que ocurre cuando un fluido en movimiento y una superficie limitante entran en contacto y existe entre ellas una diferencia de temperatura. Si se considera el flujo de un fluido sobre una superficie caliente, se provocará el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad variará desde cero hasta un valor finito u_{∞} como se muestra en la figura 2.11 , esta región del fluido se conoce como *capa límite hidrodinámica* o *de velocidad*. Adicionalmente por la presencia de un gradiente de temperatura entre el fluido y la superficie, se originará una región conocida como *capa límite térmica* en la que la temperatura varía de T_s en $y = 0$ a T_{∞} en el flujo exterior.

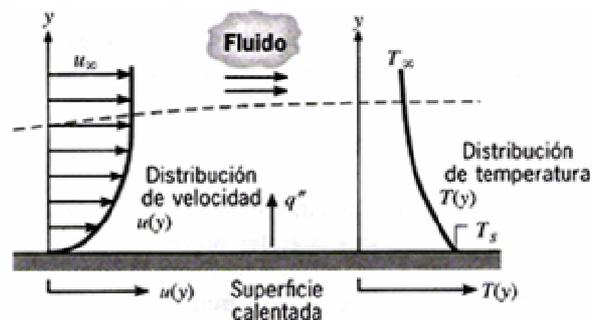


Fig. 2. 11.- Transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo a la naturaleza del flujo. Se habla de convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, como un ventilador, una bomba o una diferencia de alturas. Por el contrario, en la convección natural el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de un gradiente de densidades consecuencia de un gradiente de temperaturas en el fluido.

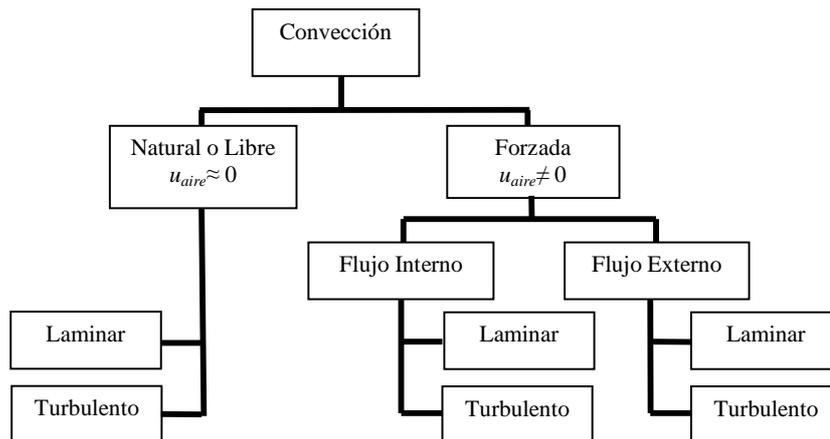


Fig. 2. 12.- Tipos de transferencia de calor por convección.

El mecanismo de transferencia de calor por convección, es regido por la ley de enfriamiento de Newton:

Tabla 2. 13.- Expresión de la ley de enfriamiento de Newton.

Ley de Enfriamiento de Newton		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.37)	$q = Ah_c (T_w - T_\infty)$	q : Tasa de flujo de calor por convección. [W]. A : Área del elemento en estudio. [m ²]. h_c : Coeficiente convectivo.[W.m ² /K]. T_w : Temperatura de la superficie. [K]. T_∞ : Temperatura del fluido. [K].

En la *ley de enfriamiento de Newton* el coeficiente convectivo h_c depende de las condiciones en la capa límite, en las que influye la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del fluido y de transporte, y el mismo puede ser obtenido, a través de correlaciones empíricas que parten de la definición de los parámetros adimensionales como los mostrados en la tabla 2.14 a continuación:⁴¹

Tabla 2. 14.- Grupos adimensionales.

ITEM	Descripción	Ecuación	Leyenda
(2.38)	<u>Número de Nusselt:</u> Relaciona la resistencia a la conducción con la resistencia a la convección en un fluido.	$Nu_S = \frac{h_c S}{k}$	h_c : Coeficiente convectivo del fluido. [W/m ² K]. S : Longitud característica. [m]. k : Conductividad térmica del fluido. [W/m.K].
(2.39)	<u>Número de Grashof:</u> Relaciona las fuerzas de empuje con las fuerzas viscosas en un fluido.	$Gr_S = \frac{g\beta S^3(T_w - T_\infty)}{\nu^2}$	g : Fuerza de gravedad. [m/s ²]. β : Coeficiente de expansión volumétrica. [1/K]. T_w : Temperatura de la superficie. [K]. T_∞ : Temperatura del fluido lejos de la superficie. [K]. ν : Viscosidad cinemática. [m ² /s]. S : Longitud característica. [m].
(2.40)	<u>Número de Reynolds</u> Relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas en un fluido.	$Re_S = \frac{u_\infty S}{\nu}$	u_∞ : Velocidad de referencia. [m/s]. S : Longitud característica. [m]. ν : Viscosidad cinemática. [m ² /s].
(2.41)	<u>Número de Prandtl:</u> Relaciona la capa límite fluido-dinámica con la capa límite térmica en un fluido.	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	ν : Viscosidad cinemática. [m ² /s]. α : Difusividad térmica. [m ² /s].
(2.42)	<u>Número de Rayleigh:</u> Es función del número de Grashof y el número de Prandtl.	$Ra = Gr \times Pr$	Gr : Número de Grashof. Pr : Número de Prandtl.

⁴¹ Ver Referencia 11.

La selección de los grupos adimensionales con los cuales se estima el valor de h_c por medio Nu_s dependerá del tipo de convección con el que se esté trabajando (natural o forzada), de la disposición del fluido (ascendente o descendente), de la geometría de la superficie en estudio (cilindro, aletas de convección, placa plana) y de la disposición del cuerpo (horizontal, vertical o inclinado), etc. Las propiedades termodinámicas del fluido y de transporte se relacionarán a través de Pr cuando se estudia convección natural o forzada, sin embargo la geometría de la superficie y la naturaleza del movimiento del fluido estarán representadas por Ra para convección natural y por Re_s para convección forzada.

Dada la geometría de los equipos presentes en los espacios a evaluar en este trabajo, solo se estudiarán casos en los que la convección se presente sobre placas planas (verticales y horizontales) ya sea en régimen laminar o turbulento, es por esto que:

- Cuando se habla de convección natural (flujo externo) se conoce que $Ra \leq 10^9$ para un fluido en régimen laminar y $Ra > 10^9$ para uno en régimen turbulento.⁴²
- Cuando se habla de convección forzada (flujo externo) se conoce que $Re < 5 \times 10^5$ para un fluido en régimen laminar y $Re \geq 5 \times 10^5$ para uno en régimen turbulento.⁴³

Los casos de interés para la realización de este trabajo en los que ocurre transferencia de calor por convección se presentan a continuación⁴⁴:

⁴² Ver Referencia: 11.

⁴³ Ver Referencia: 11.

⁴⁴ Ver Referencia: 20.

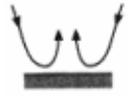
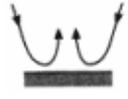
- Raithby y Hollands (1976) para convección natural en placas verticales.

Tabla 2. 15.- Correlaciones para convección natural en placa plana vertical.

ITEM	Descripción	Geometría	Correlación
(2.43)	Placas verticales con T_w y T_∞ constantes, en flujo laminar.		$Nu_L = \frac{2,8}{\ln \left(1 + \frac{2,8}{C_l Ra^{1/4}} \right)}$
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$ Para valores más precisos: $10^6 < Ra < 10^8$ Donde S es el largo de la placa.			
(2.44)	Placas verticales con T_w y T_∞ constantes, en flujo turbulento		$Nu_L = C_t^V Ra^{1/3}$
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$ Donde S es el largo de la placa.			
(2.45)	Placas verticales con T_∞ constante, en flujo laminar $10 \leq Ra \leq 10^{12}$		$Nu_L = \frac{1,83}{\ln \left(1 + \frac{1,83}{F_l Ra^{1/4}} \right)}$
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$ Donde S es el largo de la placa.			
-	Placas verticales con T_∞ constante, en flujo turbulento		Nu_L , se estima con la ecuación (2.44)
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$ Donde S es el largo de la placa.			

- Goldstain, Sparrow, Jones (1973), Lloyd y Moran (1974) para convección natural en placas horizontales.

Tabla 2. 16.- Correlaciones para convección natural en placa plana horizontal.

ITEM	Descripción	Geometría	Correlación
(2.46)	Flujo sobre placa horizontal $T_w > T_\infty$, (superficie caliente arriba), en régimen laminar.		$Nu_S = \frac{1,4}{\ln \left(1 + \frac{1,4}{0,835 \overline{C}_l Ra^{1/4}} \right)}$
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$			
Donde S es A/p , siendo A el área superficial de la placa y p el perímetro de la placa.			
(2.47)	Flujo sobre placa horizontal $T_w > T_\infty$, (superficie caliente arriba), en régimen turbulento.		$Nu_S = C_t^H Ra^{1/3}$
Consideraciones			
Comprobado para: $10 \leq Ra \leq 10^{12}$			
Donde S es A/p , siendo A el área superficial de la placa y p el perímetro de la placa.			

Los valores correspondientes a \overline{C}_l , C_t^v , \overline{F}_l y C_t^H dependen del fluido, del número de Prandtl y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. 17.- Dependencia de varias constantes en función del número de Prandtl.

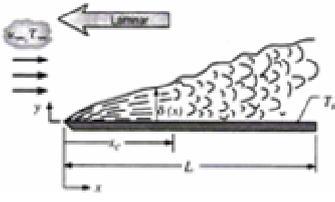
	Pr										
	Mercurio		Gases				Agua			Aceites	
	0,010	0,022	0,1	0,71	1,0	2,0	4,0	6,0	50	100	2000
C_l	0,181	0,215	0,290	0,386	0,400	0,426	0,446	0,456	0,487	0,492	0,501
\overline{C}_l	0,242	0,287	0,387	0,515	0,534	0,586	0,595	0,608	0,650	0,656	0,668
\overline{F}_l	0,266	0,315	0,422	0,555	0,574	0,607	0,633	0,645	0,684	0,691	0,703
C_t^H	0,14*	0,14*	0,14*	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15
C_t^v	0,047*	0,055*	0,075*	0,103	0,106	0,112	0,113	0,113	0,097	0,091	0,064

*Datos no verificados experimentalmente

En el caso de transferencia de calor por convección forzada, solo se encontró en la bibliografía disponible una correlación para el caso de flujo externo en régimen laminar con temperatura superficial uniforme, la cual se muestra a continuación:

- Morgan y Warner (1956) para convección forzada, en flujo externo.

Tabla 2. 18.- Correlación para convección forzada por flujo externo.

ITEM	Descripción	Geometría	Correlación
(2.48)	Flujo sobre placa plana horizontal en régimen laminar con temperatura superficial uniforme		$Nu_L = 0,664 Re_S^{1/2} Pr^{1/3}$ <p>si</p> $0,6 \leq Pr \leq 50$
Consideraciones			
Comprobado para: $Pr > 0,5$ Donde S es el largo de la placa.			

Es importante mencionar que según lo indicado en la fuente de la cual se extrajeron los parámetros adimensionales antes citados y para los casos de interés, todas las propiedades del fluido de trabajo como por ejemplo la viscosidad cinemática, el coeficiente de expansión volumétrico y la densidad, etc., serán estimadas o directamente ubicadas en tablas mediante un promedio de la temperatura superficial del cuerpo y la temperatura del entorno, llamada comúnmente temperatura de película.

2.5.2.- Transferencia de Calor por Radiación.

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque en este apartado se tratará la radiación de superficies sólidas, esta también puede provenir de líquidos o gases. Sin importar el estado de la materia la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. La energía de campo de la radiación es transportada por ondas electromagnéticas (fotones), y no requiere la presencia de un medio de propagación, de hecho la transferencia de calor por radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Si se consideran los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la figura (2.13), la radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por dicha superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área, se denomina potencia emisiva total E . Existe un límite superior para la potencia emisiva de un cuerpo, y se determina mediante la *ley de Stefan-Boltzman*.



Fig. 2. 13.- Transferencia de calor por radiación entre una superficie y el ambiente.

Tabla 2. 19.- Potencia emisiva total de un cuerpo negro.

Ley de Stefan-Boltzmann		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.49)	$E_b = \sigma T_s^4$	E_b : Potencia emisiva de un cuerpo negro. [W/m ²]. σ : Constante de Stefan-Boltzmann (5,67051x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴). T_s : Temperatura absoluta de la superficie. [K].

La emisividad de una superficie, proporciona una medida de la eficiencia con la que una superficie real emite energía en relación con un cuerpo negro y depende principalmente del material de la superficie y su acabado. La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores y sin tener en cuenta la fuente, se designa a la velocidad con la que toda esa energía incide sobre un área unitaria como irradiación. De aquí se extrae la definición de un cuerpo gris, que a diferencia de un cuerpo negro no absorbe e irradia toda la energía que incide sobre si mismo, si no que es capaz de transmitir, reflejar, absorber y emitir una fracción de dicha energía, siendo una herramienta matemática que facilita el estudio de los cuerpos reales.

La potencia emisiva de una superficie real es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura y viene dado por:

Tabla 2. 20.- Potencia emisiva total de cuerpo un real.

Potencia Emisiva Total de un Cuerpo Real		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.50)	$E = \varepsilon \sigma T_s^4$	E : Potencia emisiva de un cuerpo real. [W/m ²]. ε : Emisividad total de la superficie ($0 \leq \varepsilon < 1$) ⁴⁵ σ : Constante de Stefan Boltzmann ($5,67051 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴). T_s : Temperatura absoluta de la superficie. [K].
(2.51)	$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)}$	ε : Emisividad total de la superficie. E : Potencia emisiva de un cuerpo real. [W/m ²]. E_b : Potencia emisiva de un cuerpo negro. [W/m ²].

La fracción de la energía radiante es absorbida por un área unitaria se evalúa a partir del conocimiento de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad (α).

Tabla 2. 21.- Energía total absorbida por un cuerpo real.

Energía Total Absorbida por un Cuerpo Real		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.52)	$G_{abs} = \alpha G$	G_{abs} : Energía total absorbida por un cuerpo real. [W/m ²]. α : Absorptividad total de la superficie ($0 \leq \alpha < 1$) ⁴⁶ G : Energía total irradiada a una superficie.[W/m ²].

Si $\alpha < 1$, y la superficie es opaca, parte de la irradiación G se reflejará, si la superficie es semitransparente, parte de la irradiación se transmitirá:

⁴⁵ Ver Referencia 11. Tabla A.11

⁴⁶ Ver Referencia 11. Tabla A.11

Tabla 2. 22.- Energía total transmitida por una superficie gris.

Cuerpo Gris		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.53)	$G_{trans} = \tau G$	G_{trans} : Energía total transmitida por un cuerpo Gris. [W/m ²]. τ : Transmisividad total del material ($0 \leq \tau < 1$) G : Energía total irradiada a una superficie.[W/m ²].

Tabla 2. 23.- Energía total reflejada por una superficie gris.

Cuerpo Gris		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.54)	$G_{reflec} = \rho G$	G_{reflec} : Energía total reflejada por un cuerpo Gris. [W/m ²]. ρ : Reflectividad total del material. ($0 \leq \rho < 1$) G : Energía total irradiada a una superficie.[W/m ²].

Un caso especial que ocurre con frecuencia implica el intercambio de radiación entre una superficie pequeña y una superficie isotérmica más grande que la rodea. Los alrededores podrían ser las paredes de un cuarto a una temperatura superficial T_{alr} diferente a la temperatura superficial T_s del cuerpo estudiado, para tal condición la irradiación se aproxima con la emisión de un cuerpo negro (Ecuación 2.49), de ello se obtiene para esta pequeña superficie que:

Tabla 2. 24.- Consideraciones de un cuerpo gris

Cuerpo Gris		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.55)	$\frac{E(T)}{\alpha} = E_b(T)$	α : Absortividad total de la superficie ($0 \leq \alpha < 1$) E : Potencia emisiva de un cuerpo real. [W/m ²]. E_b : Potencia emisiva de un cuerpo negro. [W/m ²].

Y así, combinando (2.51) y (2.55) se obtiene que ($\alpha = \varepsilon$).

La velocidad de transferencia de calor por radiación desde la superficie será:

Tabla 2. 25.- Tasa de flujo de calor intercambiada entre dos superficies.

Radiación, entre dos Superficies	
ITEM	Ecuación
(2.56)	$q_{rad} = A\epsilon E_b T_s - \alpha G = (FV)A\epsilon\sigma(T_s^4 - T_{alr}^4)$
Leyenda	
q_{rad} : Tasa de flujo de Calor transferido entre dos superficies por radiación. [W]. A : Área de la superficie emisora. [m ²]. ϵ : Emisividad de la superficie ($0 \leq \epsilon < 1$) E_b : Potencia emisiva de un cuerpo negro. [W/m ²]. T_s : Temperatura de la superficie. [K]. α : Absortividad de la superficie ($0 \leq \alpha < 1$) G : Energía total irradiada a una superficie.[W/m ²]. σ : Constante de Stefan Boltzmann ($5,67051 \times 10^{-8}$ W/m ² K ⁴). T_{alr} : Temperatura absoluta superficial de los alrededores. [K]. FV : Factor de vista	

La ecuación (2.56) proporciona la diferencia entre la energía térmica que se libera debido a la emisión por radiación y la que se absorbe. En la figura 2.14 se muestra el intercambio de radiación entre una superficie y sus alrededores:

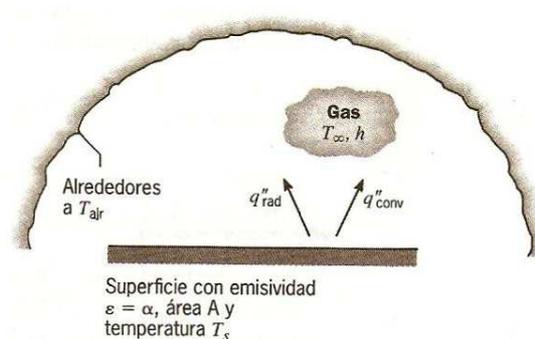


Fig. 2. 14.- Transferencia de calor por radiación, entre dos superficies.

El intercambio radiativo entre dos o más superficies depende en gran medida de las formas y orientaciones de las superficies, así como de sus propiedades radiativas y temperaturas. Para calcular el intercambio de radiación entre dos superficies se debe introducir el concepto factor de vista (también llamado factor de configuración, apariencia o forma). El factor de vista F_{ij} se define como la fracción de la radiación que sale de la superficie i que es interceptada por la superficie j . Para desarrollar una expresión general de F_{ij} , se consideraran las superficies orientadas de forma arbitraria A_i y A_j de la figura 2.15. Los elementos de área sobre cada superficie, dA_i y dA_j , están conectados por una línea de longitud R , que forma los ángulos polares θ_i y θ_j , respectivamente, con las normales a la superficies \mathbf{n}_i y \mathbf{n}_j . Los valores de R , θ_i y θ_j varían con la posición de los elementos de área sobre A_i y A_j .

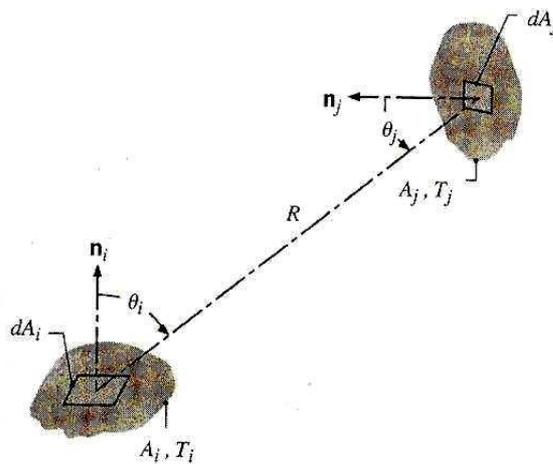


Fig. 2. 15.- Factor de forma asociado con el intercambio de radiación entre elementos superficiales de áreas dA_i y dA_j .

Las ecuaciones 2.57 y 2.58 se pueden usar para determinar el factor de vista asociado con dos superficies cualquiera que sean emisores difusos y reflectores que tengan una radiosidad uniforme. En la tabla 2.26 se presentan las ecuaciones 2.57 y 2.58:

Tabla 2. 26.- Factores de forma entre dos superficies emisores difusos y reflectores de radiosidad uniforme.

Factor de Vista Integral		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.57)	$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$	$F_{ij,ji}$: Factor de vista. A_{ij} : Área de la superficie. [m ²].
(2.58)	$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j$	R : Longitud. [m]. $\theta_{i,j}$: Ángulos polares. [$n\pi$]. π : 3,14159.

Una relación importante del factor de vista surge al igualar las ecuaciones 2.57 y 2.58 denominada relación de reciprocidad (ecuación 2.59), y es útil para determinar un factor de vista a partir del conocimiento del otro. Otra relación importante del factor de vista pertenece a las superficies de un recinto (ecuación 2.60). En la tabla 2.27 se presentan las relaciones del factor de vista.

Tabla 2. 27.- Relaciones de factor de vista.

Relaciones del Factor de Vista			
ITEM	Ecuación	Leyenda	Detalle
(2.59)	$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$	A_{ij} : Área de la superficie. [m ²]. $F_{ij,ji}$: Factor de vista.	Relación de Reciprocidad
(2.60)	$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1$	F_{ij} : Factor de vista. N : Superficies en el recinto.	Relación de Suma

De la definición del factor de vista, la regla de la suma se puede aplicar a cada una de las N superficies en el recinto. Esta regla se sigue del requerimiento de conservación de que toda la radiación que sale de la superficie i debe ser interceptada por las superficies del recinto. El término F_{ii} que aparece en esta suma representa la fracción de la radiación que sale de la superficie i y que es interceptada directamente por i . Si la superficie es cóncava, se enfrenta así misma y F_{ii} no es cero (0). Sin embargo, para una

superficie plana o convexa, F_{ii} es igual a cero (0). Para calcular el intercambio de radiación en un recinto de N superficies, se necesitan un total de N factores de vista, sin embargo no se necesitan calcular directamente todos los factores de vista gracias a las relaciones del factor de vista.

2.6.- TERMOGRAFÍA

Es una técnica que utiliza aparatos sensores infrarrojos para determinar la distribución de temperatura en la superficie de un equipo de difícil acceso. También es conocida como termografía infrarroja. Se usa una cámara de video infrarroja y la imagen se digitaliza enviándose a una computadora que asigna a la imagen una escala de colores asociados a las temperaturas registradas.

La termografía infrarroja capta la radiación que emiten los cuerpos simplemente por estar por encima del cero absoluto (-273 °C), un cuerpo que se encuentra a esta temperatura irradia una energía con una longitud de onda que se encuentra en el infrarrojo ($0,76 - 1.000$ μ), del espectro electromagnético. Cabe destacar que, el espectro visible se extiende desde longitudes de onda de $0,4$ μm para la luz ultravioleta hasta alrededor de $0,75$ μm , para la luz roja. Es por ello que es innecesario el contacto físico con el elemento a medir, ni la estabilización de temperaturas, de esta forma, las medidas son rápidas, precisas y fiables.

La termografía va más allá de la medida de temperatura, y abarca tanto aplicaciones industriales como de investigación y desarrollo. Algunos de sus campos de aplicación encuentran en la localización de defectos en instalaciones eléctricas, detección de pérdidas energéticas en edificaciones y hornos, control de procesos de fabricación, entre otros. Las leyes de la física son las que permiten convertir la medición de la radiación infrarroja en una medición de temperatura, esto se logra midiendo la radiación auto emitida en la porción del infrarrojo del espectro electromagnético desde la superficie del objeto y transformando estas mediciones en señales eléctricas. Dos de las leyes físicas que definen el comportamiento radiante son:

Tabla 2. 28.- Leyes que definen el comportamiento radiante.

Ley de Stefan Boltzmann		
Ecuación		
q , se estima con la ecuación (2.49)		
Ley de Desplazamiento de Wien.		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.61)	$\lambda_{max} \cdot T = b$	λ_{max} : Longitud de onda. [μm]. T : Temperatura absoluta. [K]. b : Constante de desplazamiento de Wien [2,897 $\mu\text{m K}$].

Las fallas electromecánicas antes de producirse se manifiestan generando e intercambiando calor. Este calor se traduce habitualmente en una elevación de temperatura que puede ser súbita, pero, por lo general y dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestar pequeñas variaciones. Si es posible detectar, comparar y determinar dicha variación, entonces se pueden detectar fallas que comienzan a gestarse y que pueden producirse en un futuro cercano o a mediano plazo. Con la termografía se focalizan los problemas que deben ser corregidos bajo las técnicas convencionales y además se pueden encontrar otros problemas que en circunstancias normales no serían detectados.

Los beneficios de reducción de costos incluyen ahorros de energía, protección de los equipos, velocidad de inspección y diagnóstico, verificación rápida y sencilla de la reparación, etc. Es por ello que muchas compañías están usando la termografía como técnica de evaluación de sus equipos debido a las ventajas que esto representa, de las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- La inspección se realiza a distancia sin contacto físico con el elemento en condiciones normales de funcionamiento. Hay una baja peligrosidad para el operario, ya que no es necesario el contacto con el equipo.
- Se trata de una técnica que permite la identificación precisa del elemento defectuoso, a diferencia de la pirometría que es una medida de temperatura de un punto.
- Es aplicable a los diferentes equipos eléctricos: bornes de transformadores, transformadores de intensidad, interruptores, cables y piezas de conexión, etc.

- Es utilizable para el seguimiento de defectos en tiempo "cuasi real", lo que permite cuantificar la gravedad del defecto y la repercusión de las variaciones de carga sobre el mismo para posibilitar programar las necesidades de mantenimiento en el momento más oportuno.

Como toda técnica también presenta desventajas, que comparadas con otras pueden resultar menospreciadas, entre estas podemos mencionar:

- Capacidad limitada para la identificación de defectos internos en la medida que el defecto no se manifieste externamente por incremento de la temperatura.
- Los reflejos solares pueden enmascarar o confundir defectos.
- El estado de carga del elemento bajo análisis puede influir en la determinación de las anomalías.

Es indudable que el mantenimiento y la mejora de las instalaciones son factores fundamentales que hay que tener en cuenta en las empresas a la hora de conseguir una mayor eficiencia en el trabajo. Es gracias a un correcto funcionamiento de los equipos y sistemas, que es posible prevenir averías, lograr un ahorro energético y económico al evitar paradas de trabajo inesperadas y accidentes laborales. La evolución tecnológica ha incrementado el uso de la termografía y por ende, de las cámaras termográficas. En sus inicios, la utilización de esta técnica de mantenimiento predictivo estaba limitada por el peso y tamaño de los equipos, los cuales para el año 1965 tenían un peso superior a los 30 Kg, pero en la actualidad existen cámaras portátiles de 2 Kg; capacidad de almacenamiento digital de datos; análisis mediante el uso de computadoras y software específicos; etc., y lo que es más importante la realización de las inspecciones por una sola persona. Los beneficios señalados sumados a las ventajas de esta técnica predictiva han impulsado su utilización generalizada en las instalaciones de tipo electromecánicas.

2.7.- CONFORT Y ESTRÉS TÉRMICO

2.7.1.- Confort Térmico

El confort térmico expresa el bienestar físico y psicológico del individuo cuando las condiciones de temperatura, humedad y movimiento del aire son favorables a la actividad que desarrolla y de otras variables como edad, sexo y vestimenta. Con base en la experiencia en el diseño de sistemas de aire acondicionado, se ha determinado que la mayoría de la gente se siente confortable cuando la temperatura oscila entre 21 °C y 26 °C, y la humedad relativa entre 30% y 70%. Estos valores se aplican cuando las personas están vestidas con ropa ligera, a la sombra y relativamente inactivas.

Cuando se diseña una edificación una de las exigencias primordiales es que las personas que en ella se encuentren se sientan térmicamente confortables, que no sientan ni frío ni calor. En el diseño térmico de un ambiente y de su ventilación (bien sea esta natural o mecánica) el confort térmico es la exigencia de habitabilidad a cumplir, alcanzarlo es esencial para el bienestar y la productividad. Se requiere por tanto conocer los fenómenos físicos, fisiológicos y psicológicos relacionados con la sensación térmica, las variables ambientales y de otra índole que la afectan.

La sensación térmica varía en torno a una serie de parámetros de diversos tipos, los cuales pueden clasificarse como sigue:

- Parámetros físicos como la temperatura, humedad y velocidad del aire.
- Parámetros circunstanciales como la actividad, la vestimenta y el tiempo de permanencia en el ambiente.
- Parámetros fisiológicos como la edad, el sexo y otras características de las personas.
- Parámetros psicológicos y sociológicos como las expectativas, la condición social y la nacionalidad.

La variación de cada parámetro afecta la manera como se percibe el ambiente, por lo que la posibilidad de lograr confort depende de ellos. A continuación se explica la influencia de cada uno.

- **Parámetros Físicos:**

Temperatura del Aire:

La temperatura del aire es corrientemente utilizada como índice del estado térmico de un ambiente. Sin embargo, a pesar de ser fundamental, es insuficiente en la práctica para explicar la sensación térmica. Una evaluación más adecuada requiere necesariamente combinarla con otros parámetros físicos, específicamente, la humedad y la velocidad del aire. La temperatura del aire es llamada temperatura de bulbo seco.

Humedad del Aire:

Se sabe que existen dos maneras de expresar la humedad del aire, de manera absoluta (Humedad Absoluta ω) y de manera relativa (Humedad Relativa ϕ), ambas explicadas con anterioridad en este capítulo. La importancia de la humedad del aire en la sensación térmica, es que esta determina la eficacia de la evaporación del sudor, tanto en la piel como en los pulmones y vías respiratorias, condicionando la disipación del calor sensible del cuerpo. El enlace entre la temperatura y la humedad dan ya una idea de cuál es la sensación térmica que podría esperarse en un ambiente. Así, en una primera convención se pueden clasificar los diferentes tipos de clima con base en los valores que tomen estos dos parámetros. En el anexo A.1 se encontrará una clasificación climática en un diagrama psicrométrico⁴⁷.

Velocidad del Aire:

El aire que hace contacto a las personas influye en la sensación térmica de dos maneras, modificando la cantidad de calor intercambiado por convección y aumentando la eficacia de la evaporación del sudor. Si la temperatura del aire es menor que la de la piel, la ventilación puede incrementar significativamente las pérdidas convectivas de calor. Esto ocurre porque el aire en movimiento entra en contacto directo con la piel caliente al fluir alrededor de ella y porque la cantidad de calor intercambiado por convección no sólo depende de la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie

⁴⁷ Ver Referencia: 27.

con la cual entra en contacto sino que también se ve afectada por la velocidad con la que este lo hace.

Es interesante resaltar que por encima de 2 m/s cualquier aumento de velocidad deja de tener influencia en el confort, en el anexo A.2 que se encuentra en los anexos se ilustra de manera genérica cómo más allá de esa velocidad el movimiento del aire deja de subsanar cualquier aumento de temperatura que tienda a producir malestar⁴⁸. La razón es que el enfriamiento producido por corrientes de aire es tanto más efectivo cuanto menor sea la temperatura del aire con respecto a la temperatura de la piel.

- **Parámetros circunstanciales:**

Factores como la edad de las personas o su sexo afectan en principio la percepción del entorno térmico, fundamentalmente por las variaciones en el comportamiento de la producción metabólica. En términos generales, las personas de sexo femenino y las de edad avanzada producen menos calor metabólico, haciendo que sean más propensas al frío y más lentas a adaptarse a condiciones térmicas cambiantes.

- **Parámetros Psicológicos y Sociológicos:**

Estudios recientes muestran que existe relación entre las expectativas psicológicas ante determinado ambiente térmico o el clima en que se vive y la sensación de confort térmico. Se presume que ante una situación de cambio térmico, se da una adaptación de la percepción de la información sensorial, la cual puede ser significativamente atenuada por las experiencias personales y las expectativas con relación a determinado clima, llevando a cabo una disminución de la intensidad con que se le percibe. Por otro lado, pudiese también presumirse un proceso fisiológico consistente en una adaptación genética de los grupos humanos al clima en que se desenvuelven.

2.7.2.- Zonas de Confort.

Las zonas de confort son el resultado de un estudio investigativo realizado durante muchos años, analizando las reacciones de un gran número de personas, para establecer un rango de temperaturas, humedades y movimiento del aire que provea el máximo de

⁴⁸ Ver Referencia: 27

confort. El resultado del estudio realizado por la ASHRAE encontró, que a una velocidad de aire dada, varias combinaciones de temperaturas de bulbo seco y humedad relativa, producían la misma sensación de confort al 90% de la gente. En el anexo A.3 se encontrará la carta de zonas de confort diseñadas por la ASHRAE, siendo esta seleccionada por las condiciones climáticas de la ciudad de Caracas⁴⁹. Posteriormente será utilizada para identificar el posible confort o disconfort en las S/E transformadoras estudiadas.

2.7.3.- Estrés Térmico.

El estrés térmico puede definirse como las agresiones intensas por un exceso de temperatura al organismo; por ello en situaciones extremas es necesario limitar estrictamente el tiempo de permanencia en tales condiciones. La sensación de malestar térmico se genera en razón de que los órganos internos requieren funcionar a una temperatura promedio de 37 °C. Para ello es necesario mantener un intercambio térmico constante entre el cuerpo y el medio ambiente.

La evaluación del estrés térmico se efectúa midiendo los factores climáticos y físicos del ambiente, evaluando entonces el organismo humano mediante el empleo del índice de estrés térmico apropiado. Algunos de sus efectos agudos son el golpe, agotamiento, calambres y erupciones por calor.

Es importante llevar a cabo un estudio intensivo de estrés térmico que permita “...garantizar a los trabajadores y trabajadoras, condiciones de seguridad, salud y bienestar en un ambiente de trabajo adecuado y propicio para el ejercicio pleno de sus facultades físicas y mentales, mediante la promoción del trabajo seguro y saludable, la prevención de los accidentes de trabajo y las enfermedades ocupacionales...” según lo establecido por la LOPCYMAT.⁵⁰

Debido a que no se contó con los equipos necesarios para la medición de las variables que abarcan un estudio de estrés térmico, la evaluación del mismo se realizará por medio de unas tablas que se encontrarán en los anexos A.4 y A.5.⁵¹

⁴⁹ Ver Referencia: 5.

⁵⁰ Ver Referencia: 9. Artículo 1.

⁵¹ Ver Referencia: 36.

2.8.- VENTILACIÓN

La ventilación se define como el movimiento del aire que ocupa un espacio, de un lugar a otro sin alterar directamente su temperatura y su humedad. Este movimiento puede ser producido por distintas causas y para distintos propósitos según los cuales se han establecido clasificaciones. La función principal de los sistemas de ventilación es el control del ambiente térmico en áreas de trabajo calurosas, para así prevenir situaciones en las que la carga térmica pueda alterar el equilibrio del organismo del personal que allí labora, originando reducción en la productividad, patologías profesionales y accidentes así como el recalentamiento de los equipos que puedan generar paradas inesperadas en un sistema de producción y costos de mantenimiento inesperados. En la siguiente figura se muestra la clasificación de los sistemas de ventilación:

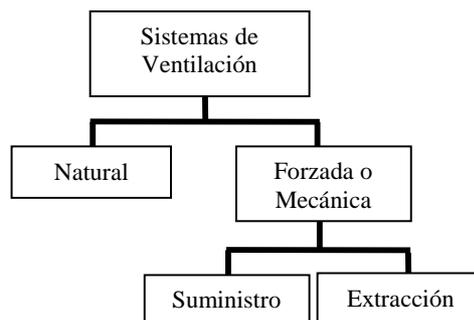


Fig. 2. 16.- Clasificación básica de los tipos de ventilación.

La ventilación natural es la generada de forma espontánea mediante corrientes de aire producidas por el viento exterior o por un cambio de densidades en el mismo, a través de orificios o espacios existentes en la fachada de los edificios. Para este tipo de ventilación los orificios presentes en la fachada de la estructura deberán localizarse en superficies transversales a la dirección del viento dominante en la zona.

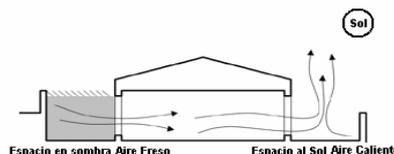


Fig. 2. 17.- Esquema de ventilación natural.

En caso de que el caudal que necesite extraerse del recinto sea mayor al extraído naturalmente, se recurrirá a medios mecánicos de extracción, un sistema de ventilación mecánica es aquel donde el flujo de aire es producido por ventiladores ya sea para extraerlo o para suministrarlo a un espacio. Si el ventilador está añadiendo aire a un espacio se llama “sistema de suministro”, si el ventilador está removiendo aire de un espacio se llama “sistema de extracción”. Frecuentemente se utilizan ambos tipos de ventiladores.

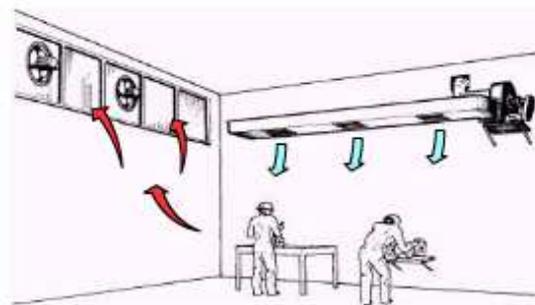


Fig. 2. 18.- Esquema de Ventilación Mecánica.

Los sistemas de ventilación mecánica más comúnmente usados en la actualidad se diferencian por su propósito y son los siguientes:

- Sistemas que inyectan aire exterior dentro de un recinto para refrescarlo o disminuir la concentración de contaminantes en el mismo a niveles aceptables. Como por ejemplo los presentes en un estacionamiento subterráneo.
- Sistemas que extraen el aire contaminado o gases tóxicos en determinados puntos de un recinto. Como los usados en baños públicos, laboratorios químicos y talleres de manufactura.
- Sistemas en los cuales el aire exterior es calentado y filtrado, para introducirse en un ambiente y compensar las pérdidas por el aire extraído.

La ventilación mecánica se ve con frecuencia en las industrias con generación de calor, donde las áreas son generalmente grandes y la densidad de población es baja, con la finalidad de removerlo y mantener las condiciones dentro de los límites tolerables. En las industrias con “calor seco” tales como forjas o formadores de vidrio, el problema es

de calor sensible excesivo. En una situación de “calor húmedo”, como es el caso de las lavanderías o una tintorería de una planta textil, la problemática se debe principalmente al excesivo calor latente (humedad).

Para calcular la tasa de flujo volumétrico de ventilación necesaria debe estimarse la cantidad de calor sensible y latente aportado por cada una de las fuentes. Las tasas de flujo volumétrico de aire calculadas a partir de las ecuaciones de la tablas 2.29 y 2.30 no deben ser sumadas, sino que debe emplearse como caudal de ventilación el mayor de los valores hallados, ya que los calores sensibles y latentes son eliminados simultáneamente. A continuación se presentan ecuaciones para estimar la ventilación natural y mecánica:

Tabla 2. 29.- Ecuación para el cálculo de la ventilación natural.⁵²

Ventilación Natural		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.62)	$Q = \frac{CT_t}{0,288.(DT)}$	<p>Q: Tasa de Flujo Volumétrico. [m³/h].</p> <p>CT_t: Carga Térmica total registrada en el interior del recinto. [kcal/h].</p> <p>0,288: Capacidad térmica específica del aire. [kcal/°C.m³].</p> <p>DT: Diferencia de temperatura entre el exterior y el interior del recinto ($6^{\circ}C \leq DT \leq 10^{\circ}C$), para el caso en estudio.</p>

Tabla 2. 30.- Ecuación para el cálculo de la ventilación mecánica.⁵³

Ventilación Mecánica		
ITEM	Ecuación	Leyenda
(2.63)	$Q = \frac{CT_s}{0,288.(IT)}$	<p>Q: Tasa de Flujo Volumétrico. [m³/h].</p> <p>CT_s: Carga Térmica sensible estimada en el interior del recinto.[kcal/h].</p> <p>0,288: Capacidad térmica específica del aire. [kcal/°C.m³].</p> <p>IT: Incremento de Temperatura. [°C].</p>
(2.64)	$Q = \frac{CT_l}{\Delta H . \rho}$	<p>Q: Tasa de Flujo Volumétrico. [m³/h].</p> <p>CT_l: Carga Térmica latente registrada en el interior del recinto. [kcal/h].</p> <p>ΔH: Diferencia entre la humedad absoluta del exterior y el máximo tolerable en el interior del recinto. [kg de vapor/kg de aire seco].</p> <p>ρ: Densidad del aire. [kg/m³].</p>

⁵² Ver Referencia 13.

⁵³ Ver Referencia 1.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se explican los pasos a seguir para cumplir con los objetivos de esta investigación por ello se hará referencia a las condiciones de: selección de las subestaciones del Sistema Metro; la disposición de los equipos dentro de las S/E transfo-rectificadoras; las diversas técnicas de medición y cálculo utilizadas, los cuales serán explicados a continuación:

3.1.- DEFINICIÓN DE LAS SUBESTACIONES EN ESTUDIO.

Las S/E transfo-rectificadoras están dispuestas en todas las líneas del Metro de Caracas para alimentar de manera uniforme todas las estaciones, tramos y vías del mismo, es por esto que cada una de ellas posee distintas características estructurales y funcionales; estas diferencias originan un comportamiento particular de la carga térmica en cada una de las instalaciones. Para este trabajo el Departamento de Electrificación y Tracción de la Gerencia de Electromecánica seleccionó un conjunto representativo de subestaciones consideradas como críticas, los criterios usados para la selección fueron los siguientes:

- Nivel de ubicación de la subestación (calle, andén, mezanina).
- Tipo de ventilación usada.
- Línea a la que pertenecen.
- También se consideró lo expresado por el personal del Departamento de Electrificación y Tracción con respecto a las continuas observaciones por el efecto térmico al que se ven expuestos los trabajadores que realizan el mantenimiento.
- Adicionalmente se realizó la selección por el mayor número de reportes de fallas con respecto a las alteraciones de origen térmico en el funcionamiento de los equipos, estos reportes son considerados confidenciales por la compañía y por lo tanto no se presentarán en este trabajo.

En la tabla 3.1 se presentan las subestaciones seleccionadas por la Gerencia de Electromecánica para este proyecto:

Tabla 3. 1.- Sistema de selección de las S/E Transfo-rectificadoras presentes en Metro de Caracas C.A.

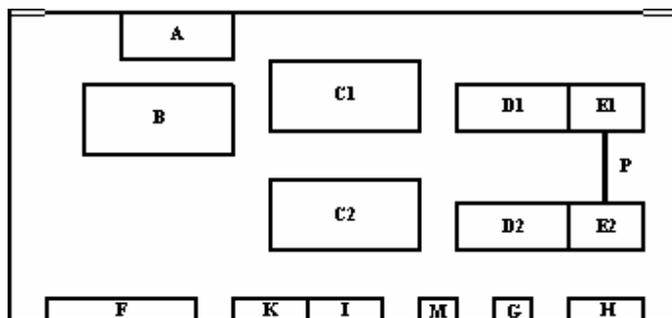
S/E Transfo-rectificadora por Línea	SUPERFICIALES (Nivel Calle)			SUBTERRÁNEAS					
	Ventilación Natural	Ventilación Mecánica		(Nivel Andén)			(Nivel Mezanina)		
		Suministro	Extracción	Ventilación Natural	Ventilación Mecánica		Ventilación Natural	Ventilación Mecánica	
				Suministro	Extracción		Suministro	Extracción	
Chacao / Línea 1								x	
La California / Línea 1								x	
Parque Carabobo / Línea 1								x	
Petare/Línea 1					x				
Plaza Venezuela / Línea 1							x		
Propatria / Línea 1			x						
La Paz / Línea 2					x				
Maternidad / Línea 2					x				
El Valle / Línea 3					x				
Los Símbolos / Línea 3					x				
Nuevo Circo / Línea 4								x	
Zona Rental / Línea 4								x	

3.2.- DISTRIBUCIÓN DE LOS EQUIPOS PRESENTES EN LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.

En el Capítulo I se enumeraron los equipos que frecuentemente se encuentran en las subestaciones, por lo que en este apartado solo se enunciarán los detalles de su disposición.

Parte fundamental para la realización de este proyecto fue el reconocimiento de las S/E transfo-rectificadoras seleccionadas anteriormente, mediante el cual se observó los equipos presentes, su funcionamiento, disposición y dimensiones. Además detalles como las dimensiones físicas de las edificaciones.

Los grupos transfo-rectificadores así como los disyuntores de 30 kVca y 750 Vcc son el corazón de las subestaciones, por lo tanto son ubicados en el centro de las mismas y espaciados simétricamente con la siguiente secuencia disyuntores 30 kVca-transfo-rectificadores-disyuntores 750 Vcc. Las celdas de distribución auxiliar (J1, J2 y J3) se encuentran generalmente colocadas junto al tablero cargador de baterías (J5 y J6), al igual que el CTN de su auxiliar. A continuación se presenta un esquema de la disposición de los equipos en las S/E transfo-rectificadoras:



A	Tomas de 30 Kvca	E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	I	Tablero Cargador de Baterías (J5 y J6)
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	F	Tableros de Control y Mando	K	Celdas de Distribución Auxiliar (J1, J2 y J3)
C	Transformador	G	CTN	M	Auxiliar CTN
D	Rectificador de Potencia	H	Caja de Retorno Negativa	P	Puente de Conexión

Fig. 3. 1.-Esquema general de distribución de equipos en las S/E transfo-rectificadoras.

El resto de los equipos (tableros de control y mando, auxiliar de CTN, etc.) se encuentran distribuidos de manera aleatoria, siempre espaciados entre si para permitir tanto el acceso al personal que realiza las labores de mantenimiento como la circulación de aire entre los mismos.

Como resultado de esta fase se construirán unos esquemas en los que se representan las dimensiones de las edificaciones, la distribución de los equipos y sus longitudes, que serán fundamentales en la fase de evaluación térmica. Es importante mencionar que todas estas longitudes fueron medidas con una cinta métrica marca STANLEY de 15 m. (ver especificaciones técnicas del equipo en el anexo B.1).

3.3.- SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO DE CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA.

Una vez explicadas las diferentes metodologías para el cálculo de cargas térmicas en el Capítulo II, se realizará una matriz de selección en donde se compararán las variables mínimas requeridas por cada método con las disponibles. Cuando alguno de los aspectos necesarios se encuentre disponible se valorará con una puntuación de uno (1), en el caso contrario se le asignará un valor de cero (0), aquellos métodos que en alguna de las variables requeridas presenten una puntuación igual a cero (0) no podrán ser aplicados, estableciéndose finalmente como método de cálculo aquel que reúna una puntuación ideal igual a cinco (5) siendo el que mejor se ajuste a las condiciones de cálculo. Para la realización de la matriz antes mencionada, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Tasa de flujo de calor disipado por los equipos: Se refiere al porcentaje de la energía consumida por el equipo que se disipa al ambiente en forma de calor, ya sea por medio de una eficiencia térmica o de algún criterio que permita aproximarla.
- Coeficiente de transferencia de calor: Ya sean globales o específicos para cada modo de transferencia de calor.
- Área superficial de los equipos: Manuales o mediciones previas que permitan conocer el área equivalente de radiación y convección de los equipos.

- Basamento matemático del método: Referido a si en las fuentes disponibles, se encuentran las ecuaciones que fundamentan el método de evaluación.
- Variables ambientales: Algún registro de las condiciones de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire del ambiente en estudio.

A continuación se presenta la matriz utilizada para la selección del método de cálculo de carga térmica:

Tabla 3. 2.- Matriz de selección de cálculo de cargas térmicas para las S/E transfo-rectificadoras.

Consideraciones	Métodos					
	TFM	CLDT/CLF/SCL	TETD/TA	HB	RTS	ANÁLISIS TÉRMICO
Tasa de flujo de calor disipado por los equipos	0	0	0	0	0	1
Coefficientes de transferencia de calor	0	0	0	0	0	1
Área superficial de los equipos	1	1	1	1	1	1
Basamento matemático del método	1	1	1	0	0	1
Variables ambientales	1	1	1	1	1	1
TOTAL	3	3	3	2	2	5

No se contó con información precisa a cerca del material de construcción de la infraestructura necesaria para la estimación del coeficiente global de transferencia de calor U en los métodos TFM, CLTD/CLF/SCL y TETD/TA propuestos por ASHRAE. La potencia de trabajo de algunos equipos requerida para el cálculo de la tasa de flujo de calor generado por los mismos tampoco pudo ser obtenida, ya que por razones de seguridad no se autorizó la apertura de los armarios que contienen a los equipos. Adicionalmente todos estos métodos dependen de datos obtenidos en investigaciones previas, salvo TFM, que sugiere realizar estudios de clima que pueden llevar hasta un año. Por otra parte no se podrá llevar a cabo la evaluación de las nuevas metodologías propuestas por ASHRAE (HB y RTS) puesto que los basamentos matemáticos no se encuentran plasmados en la versión disponible de la norma.

En vista de que no será posible aplicar los métodos tradicionales por lo anteriormente expuesto, la particularidad de los lugares en estudio y como resultado de la matriz de selección se utilizará como método el derivado de las ecuaciones de la transferencia de calor, estudiando el aporte térmico que genera cada equipo presente en las S/E transfo-rectificadoras. Este procedimiento resulta menos complejo que los métodos propuestos por ASHRAE, debido a que la obtención de las variables involucradas se realizará de una manera más rápida y segura.

3.4.- METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES AMBIENTALES DE LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS ESCOGIDAS.

En este apartado se pretende explicar las diversas fases de medición tanto de las variables ambientales (temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire) como de la temperatura superficial de los equipos, a su vez se hará mención a la inspección del estado, distribución, y especificaciones de los equipos de ventilación e iluminación de los ambientes en estudio, con el fin de:

- Estudiar el comportamiento de las variables ambientales en cada una de las subestaciones.
- Observar equipos que puedan estar generando problemas de origen térmico.
- Ubicar puntos máximos y mínimos de las variables ambientales.
- Comparar el comportamiento de las variables ambientales y de las temperaturas superficiales de los equipos en las diversas subestaciones.
- Estudiar con el resultado de esta fase el posible confort o discomfort para el personal que realiza el mantenimiento en las subestaciones, así como la posibilidad de estrés térmico.
- Identificar el tipo de transferencia de calor por convección: natural o forzada.
- Obtener las variables requeridas para la estimación de la tasa de flujo de calor disipado por los equipos, la carga térmica de las S/E transfo-rectificadoras y la tasa de flujo volumétrico requerido para disiparla.

3.4.1.- Metodología de Medición de Variables Ambientales y Temperaturas Superficiales de los Equipos en las S/E Transfo-rectificadoras.

Para la metodología de cálculo seleccionada, se requiere la evaluación de las siguientes variables: Temperatura, humedad relativa y velocidad del aire de la zona en estudio, al igual que la temperatura superficial de los equipos presentes en ella.

Se llevarán a cabo dos fases en la toma de mediciones, la primera consistirá en medir temperatura, humedad relativa y velocidad del aire y la segunda en la medición de la temperatura superficial de los equipos, ambas se explicaran con detalle a continuación:

- Fase de Medición de Variables Ambientales en las S/E Transfo-rectificadoras.

Una vez construidos los esquemas en los que se representan las dimensiones de las edificaciones, longitudes de los equipos y su distribución, se procederá a dividir el área en cuadrículas igualmente espaciadas (de ser posible), que deberán ser ubicadas de manera tal que sus líneas no choquen con los equipos. Al trazar líneas horizontales y verticales, se producirán intersecciones a las cuales llamaremos Puntos de Control, que serán identificados de la siguiente manera: A1, B2, C1, D3, etc. (ver figura 3.2), la cantidad de puntos de control dependerá del área total del ambiente en estudio y es en ellos donde se realizarán las mediciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, a tres alturas establecidas y medidas desde el piso (0,6; 1,5 y 2,3m.) con la finalidad de observar:

- La uniformidad del ambiente en estudio por medio del comportamiento de dichas variables a las diferentes alturas.
- Equipos que puedan estar generando problemas de origen térmico.
- Puntos críticos en el ambiente observando los valores máximos y mínimos registrados.
- Identificar que variable se encuentra fuera de rango y dentro del mismo con respecto a los valores de confort establecidos por ASHRAE.
- Establecer comparaciones de cada parámetro con otras estaciones a través de planos previamente graficados.

Es importante mencionar que cubrir la mayor parte de espacio posible generará un resultado más representativo y disminuirá el rango de error de la medición. A continuación se muestra un esquema de la cuadrícula ejemplificando la división del área en estudio, los puntos de control y su nomenclatura:

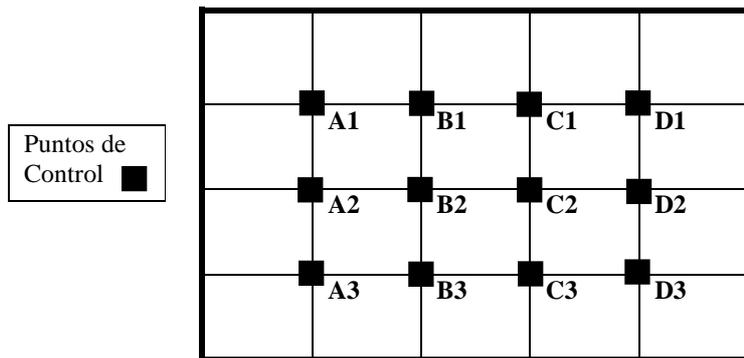


Fig. 3. 2.- Modelo explicativo de los puntos de control y su nomenclatura.

Para esta fase, se utilizará un Hidro/Termo/Anemómetro y un Psicrómetro/Termo/Higrómetro (ver especificaciones técnicas de equipo en el Anexo B.2 y B.3 respectivamente). Las mediciones serán llevadas a una planilla que contiene toda la identificación de la inspección (día, hora de inicio y finalización), nombre de la estación y puntos de control, además de los diversos parámetros de medición a las tres alturas antes mencionadas y sus respectivos promedios. A continuación se muestra en la tabla 3.3 un modelo de las planillas utilizadas para la recolección de los datos:

Tabla 3. 3.- Modelo de planilla usada en la de recolección de datos de las subestaciones.

Caracas, Día / Mes / Año												
Hora de Inicio: XX:XX am / pm												
Hora de Finalización: XX:XX am / pm												
S/E Transfo-Rectificadora:												
Puntos de Control	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Velocidad del Aire (m/s)			
	0,6m	1,5m	2,3m	Prom.	0,6m	1,5m	2,3m	Prom.	0,6m	1,5m	2,3m	Prom.
A1												
A2												
A3												
B1												
B2												
B3												
C1												
C2												
C3												
D1												
D2												
D3												
Promedio												
OBSERVACIONES:												

- Fase de Medición de Temperatura Superficial de los Equipos.

En esta fase se tiene como objetivo fundamental conocer la temperatura superficial de los equipos, la cual puede ser obtenida por medio de un termómetro láser o una cámara termográfica. Sin embargo el uso de la cámara termográfica facilitará la toma de datos ya que con los termogramas se obtiene la misma información que en múltiples mediciones realizadas con un termómetro láser; además Metro de Caracas C.A. posee dicho equipo (ver especificaciones técnicas de equipo en el anexo B.4). La cámara termográfica mide y reproduce en imágenes la radiación infrarroja emitida por un objeto, el hecho de que la radiación sea una función de la temperatura superficial del cuerpo le permite a la cámara calcular y mostrar esa temperatura. Sin embargo, la radiación medida por la cámara no solo depende de la temperatura, sino también de factores como la emisividad, la temperatura ambiente, la distancia entre el objeto y la cámara y la humedad relativa. Debido al alto costo del equipo y a que la selección de los parámetros involucrados para su uso requieren de experiencia, el dispositivo utilizado para las mediciones termográficas será operado por personal calificado perteneciente a la

Gerencia de Electromecánica de Metro de Caracas C.A. Los parámetros que deben ser introducidos al equipo por el operador son:

- Temperatura ambiente y humedad relativa, que serán medidos con un Psycrometro/Termo/Higrómetro.
- La emisividad, se encuentra normalmente entre 0,1 y 0,95 para este proyecto el valor exacto seleccionado por el operador de la cámara fue de 0,94, basado en la experiencia del mismo para el tipo de superficies en estudio.
- La distancia, es la separación entre el objeto y la cámara que se utiliza para corregir el hecho de que la radiación este siendo absorbida por el operador.

Ya que a través de los termogramas se puede evaluar el perfil de temperaturas de un cuerpo se hace más sencillo la estimación de la tasa de flujo de calor disipada por el mismo.

3.4.2.- Construcción de los Esquemas de Comportamiento de la Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire en las S/E Transfo-rectificadoras.

Una vez obtenidas las temperaturas, humedades relativas y velocidades de aire de los puntos de medición así como la temperatura superficial de los equipos que ocupan las S/E transfo-rectificadoras, se procederá a construir esquemas que muestren su comportamiento a través de toda el área en estudio utilizando el software Microsoft Excel y basados en el método de diferencias finitas, se programaran las celdas partiendo de valores fijos conocidos (según lo explicado en el apartado 3.3.2) de manera que a través de un proceso iterativo de hasta mil (1.000) iteraciones (resultado de la experiencia obtenida en investigaciones previas de Metro de Caracas C.A. y para una convergencia aproximada de 700 iteraciones en este tipo de evaluaciones), cada una tomará el valor del promedio de de sus cuatro (4) celdas adyacentes. A continuación se muestra en la figura 3.3 un ejemplo de lo explicado:

	C	
B	$\frac{A+B+C+D}{4}$	A
	D	

Fig. 3. 3.- Método de aproximación utilizado para la realización de los esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad.

Se realizará un esquema de cada variable por cada altura medida para observar el comportamiento de cada una de ellas en relación a las alturas evaluadas en todas las S/E transfo-rectificadoras. En los casos en el que más del 80% de los puntos medidos a distintas alturas, no presenten variaciones entre sí mayores al 10% se asumirá un promedio de los tres valores y se construirá un solo esquema para la respectiva variable. Una vez construido el esquema podrá obtenerse los valores promedios de las variables ambientales considerando el aporte realizado por los equipos.

Después de realizar un sondeo de los valores máximos, mínimos y promedios de las variables ambientales en las subestaciones evaluadas, se programará cada celda de los esquemas antes mencionados para mostrar un determinado color de acuerdo al intervalo de temperatura, humedad relativa o velocidad del aire en el que se encuentren; el color negro identificará la ubicación de los equipos. En las tablas 3.4; 3.5 y 3.6 se muestran los colores y los intervalos seleccionados para los esquemas de todas las subestaciones:

Tabla 3. 4.- Rangos de temperaturas y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras.

Intervalo de Temperatura de Bulbo Seco	Color	Descripción
Valores menores a 27°C		Rango de temperaturas mínimas observadas en las subestaciones. Estas temperaturas posiblemente no causan efectos adversos a los trabajadores ni a los equipos.
Valores entre 27°C y 36°C		Rango de temperaturas medias observadas en las subestaciones. Estas temperaturas pueden llegar a causar efectos adversos a los trabajadores.
Valores mayores a 36°C		Rango de temperaturas altas observadas en las subestaciones. Estas temperaturas seguramente causarán efectos adversos a los trabajadores y a los equipos.

Tabla 3. 5.- Rangos de humedad relativa y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras.

Intervalo de Humedad Relativa	Color	Descripción
Valores menores a 30 %		Rango de humedades relativas mínimas observadas en las subestaciones. Estas humedades relativas seguramente causarán efectos adversos a los trabajadores.
Valores entre 30 % y 42 %		Rango de humedades relativas medias observadas en las subestaciones. Estas humedades relativas posiblemente no causarán efectos adversos a los trabajadores.
Valores mayores a 42 %		Rango de humedades relativas altas observadas en las subestaciones. Estas humedades relativas podrían causar efectos adversos a los trabajadores.

Tabla 3. 6.- Rangos de velocidades de aire y colores seleccionados para los esquemas de las S/E transfo-rectificadoras.

Intervalo de Velocidad del Aire	Color	Descripción
Valores menores a 0,3 m/s		Rango de velocidades de aire mínimas observadas en las subestaciones. Estas velocidades refieren un proceso de transferencia de calor por convección natural en las subestaciones. Velocidades de aire no perceptibles por los trabajadores.
Valores entre 0,3 y 2 m/s		Rango de velocidades de aire medias observadas en las subestaciones. Estas velocidades refieren un proceso de transferencia de calor por convección forzada en las subestaciones. Velocidades de aire perceptibles por los trabajadores.
Valores mayores a 2 m/s		Rango de velocidades de aire altas observadas en las subestaciones. Estas velocidades refieren un proceso de transferencia de calor por convección forzada en las subestaciones. Velocidades de aire perceptibles y molestas para los trabajadores.

A continuación se presenta en la figura 3.4 un esquema ejemplificando lo antes mencionado:

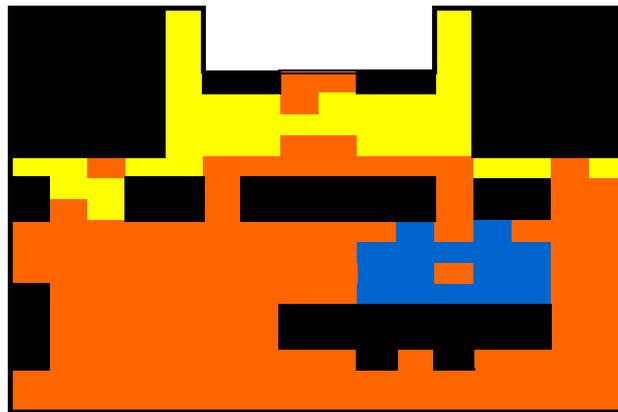


Fig. 3. 4.- Ejemplo de esquema para observación de las variables medidas en las S/E transfo-rectificadoras.

3.4.3.- Inspección de los Sistemas de Ventilación e Iluminación.

Se realizará una inspección de la información de placa de los ventiladores (RPM de operación, tasa de flujo volumétrico que manejan, sentido de giro, potencia, etc.), se observará la distribución de las rejillas extracción y difusores, la geometría y ubicación de las tomas o salidas de aire según sea el caso, además del estado de los mismos, con la finalidad de comparar dichas características con las requeridas por el ambiente. Otra fuente donde podrá encontrarse las especificaciones de los ventiladores, son los manuales técnicos de ventilación de las S/E transfo-rectificadoras, sin embargo de no contarse con la datos de placas ni los manuales técnicos se procederá a recomendar posibles equipos de acuerdo a la información disponible.

La inspección de la iluminación será de utilidad para la estimación de su aporte a la carga térmica total, por esto se contarán las luminarias en funcionamiento y se tomarán datos de las lámparas como la cantidad de bombillos y los vatios con los que trabajan.

3.5.- METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA Y DE LA TASA DE FLUJO VOLUMÉTRICO REQUERIDA PARA DISIPARLA EN LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS.

Determinada la metodología de cálculo (apartado 3.3.1), se procederá a dar una guía detallada de los pasos a seguir para su aplicación, mencionando y justificando las consideraciones que deben tomarse en cuenta. A continuación se muestra un esquema representativo de la metodología de cálculo a seguir:

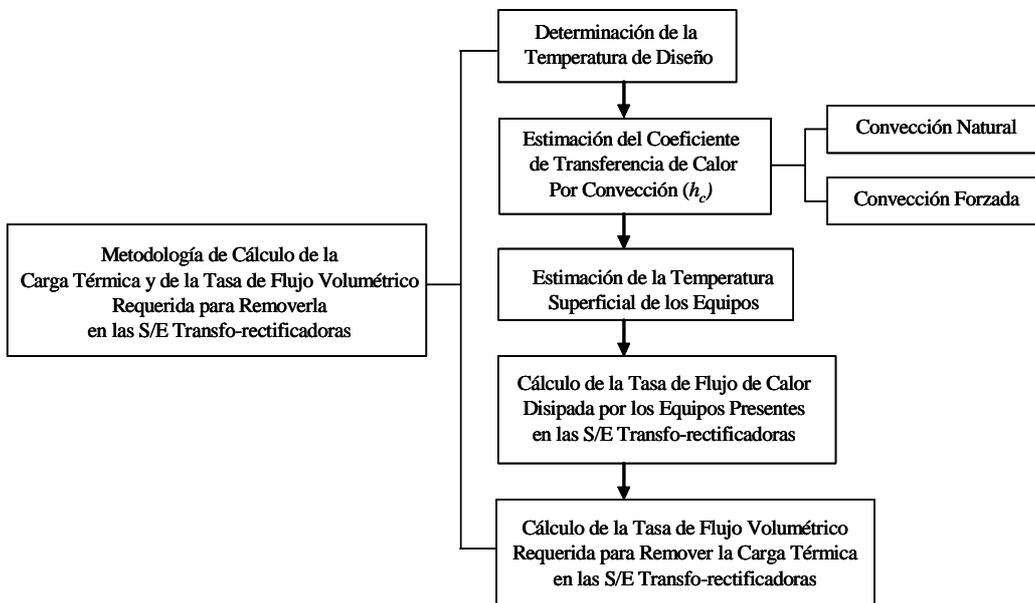


Fig. 3. 5.- Esquema de metodología de cálculo de cargas térmicas y de la tasa de flujo volumétrico.

3.5.1.- Determinación de la temperatura de diseño recomendada.

Siempre que va a evaluarse un sistema de climatización, deben establecerse unas condiciones de funcionamiento. Como en este proyecto se está tratando con sistemas de ventilación mecánica y natural, la condición ambiental óptima que puede alcanzarse en las S/E transfo-rectificadoras es la temperatura de bulbo seco del ambiente exterior. La obtención de este parámetro requerido para el cálculo de la carga térmica y su disipación se realizará en base a un estudio climatológico de las temperaturas de bulbo seco y húmedo de la ciudad de Caracas durante un período de diez años (datos obtenidos de la

estación metereológica Cajigal) en donde se construyeron histogramas y graficas que muestran la frecuencia y el comportamiento con la que se registraron dichas temperaturas en los tres periodos del año en los que la radiación solar tiene mas influencia sobre el clima de la ciudad (Marzo- Abril; Junio- Julio y Diciembre).⁵⁴

3.5.1.1.- Determinación de la temperatura de diseño recomendada para la estimación de la carga térmica.

Cuando va a seleccionarse una temperatura de referencia en base a la que se estimará una carga térmica es fundamental tener en cuenta las limitaciones ambientales que pueden presentarse al momento de disiparla, por esta razón es recomendable seleccionar la mayor temperatura registrada en la investigación referenciada en el apartado anterior y así garantizar que el sistema de ventilación tenga la capacidad de disipar la carga térmica presente en la edificación hasta en las condiciones ambientales más exigentes. Analizando la figura 3.6, correspondiente a la distribución de temperatura de bulbo seco para los meses estudiados en la ciudad de Caracas, se seleccionó una temperatura de 29,5 °C que coincide con la serie de Marzo-Abril a las catorce (14) horas.

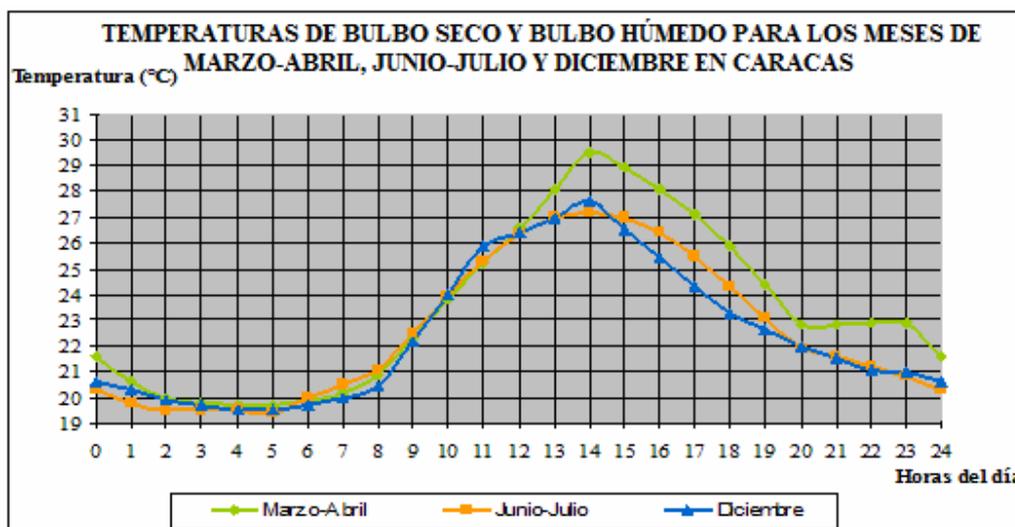


Fig. 3. 6.- Distribución de la temperatura de bulbo seco para los meses estudiados de la ciudad de Caracas.

⁵⁴ Ver Referencia: 17

3.5.1.2.- *Determinación de la temperatura de diseño recomendada para la estimación de la tasa de flujo volumétrico de aire requerido para disipar la carga térmica.*

Para el cálculo de la tasa de flujo volumétrico la temperatura de diseño recomendada es 29,5 °C que como ya se mencionó anteriormente representa el caso mas desfavorable para el diseño de la ventilación y garantizaría la remoción de la carga térmica hasta en el caso más exigente, sin embargo por sugerencia de la empresa Metro de Caracas C.A con el objetivo de abaratar costos y bajo la filosofía de ahorro de energía, se seleccionó una temperatura de bulbo seco igual a 26,3 °C que representa la mayor temperatura mas frecuente registrada en las fuente antes referenciada.

A continuación se presenta en la figura 3.7 el histograma correspondiente a los meses Junio- Julio en donde se registro la temperatura seleccionada:

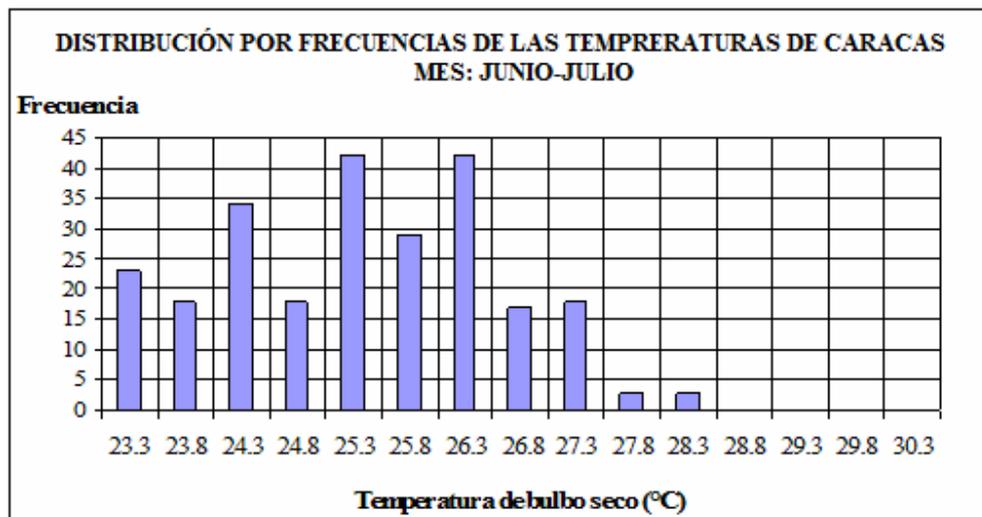


Fig. 3. 7.- Distribución por frecuencias de la temperatura de bulbo seco para los meses de Junio-Julio en de la ciudad de Caracas.

3.5.2.- Estimación del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección (h_c).

Este coeficiente varía de acuerdo a factores tales como: el medio involucrado en el intercambio de calor, su temperatura, la disposición entre el fluido y la superficie y la velocidad con la que se mueve, siendo esta última la que se tomará como punto de partida para este proyecto. Según lo explicado en el Capítulo II, cuando la velocidad del aire es aproximadamente cero ($u_{aire} \approx 0$), se asume un proceso de transferencia de calor por convección natural, en el caso contrario ($u_{aire} \neq 0$), se habla de convección forzada, sin embargo para facilitar los cálculos de este proyecto se asumirá cualquiera de los dos casos (Convección Forzada o Natural) de acuerdo a la uniformidad con la que se comporte la velocidad del aire en los ambientes en estudio.

Para los fines de este trabajo se asumirá convección forzada o natural según los esquemas de velocidades explicados en el apartado 3.3.3, en donde si el 80% de las celdas en los esquemas muestran un valor menor o igual a 0,3 m/s se asumirá convección natural sin importar cuán altas sean las velocidades del 20% restante, de igual manera si el 80% de las celdas muestra un valor mayor a 0,3 m/s se asumirá convección forzada. Es importante mencionar que estos valores son resultado de la experiencia obtenida por Metro de Caracas C.A, basándose en estudios realizados en los diferentes sistemas de distribución de aire.

3.5.2.1.- Convección Natural

En el Capítulo II tablas (2.14, 2.15 y 2.16) de este trabajo se presentaron un grupo de ecuaciones que permiten de acuerdo a la geometría de las superficies en estudio, estimar un valor de h_c para los casos en que se asuma que la transferencia de calor por convección de los equipos al ambiente se esta generando de manera natural. Sin embargo los equipos presentes en las subestaciones manejan magnitudes de tensión y voltaje de alto riesgo para la seguridad humana, es por esto que la compañía Metro de Caracas C.A. posee políticas que restringen su manipulación; impidiendo así la obtención de medidas específicas en ciertas superficies como es el caso de las aletas de convección y de las rejillas de protección. Es importante mencionar que esta información no pudo ser extraída de los manuales técnicos de los equipos, ya que por cambios internos de la compañía los

mismos han sido extraviados. Por todo lo antes mencionado se aproximarán todas las superficies en estudio al caso más predominante en los recintos, placa plana vertical. Para facilitar los cálculos del trabajo y apoyándose en investigaciones realizadas por Metro de Caracas C.A. que han arrojado resultados satisfactorios para ambientes similares (espacios cerrados, velocidades que tienden a cero y cargas térmicas superiores como es el caso de los Cuartos de Control de Trenes), se asumirá para cualquier caso de convección natural un valor de $h_c = 21 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.⁵⁵

3.5.2.2.- Convección Forzada

Cuando el análisis de la distribución de velocidades del aire en las S/E Transformadoras indique que la transferencia de calor está ocurriendo por convección forzada (para este trabajo ($u_{\text{aire}} \geq 0,3$) en un 80% del ambiente en estudio) se estimará el valor del coeficiente convectivo (h_c) de la siguiente manera:

- Se estimarán los parámetros adimensionales Re_s y Pr según las ecuaciones (2.40) y (2.41) respectivamente, obteniendo las propiedades termofísicas del aire necesarias a través de las tablas de gases a presión atmosférica⁵⁶, usando como referencia un promedio entre la temperatura del ambiente y la temperatura de la superficie en estudio (temperatura de película). El valor de la longitud característica dependerá de la geometría estudiada.
- Con los valores de los parámetros adimensionales (Re_s y Pr) y por medio de la ecuación (2.48) presente en la tabla (2.18), se estimará Nu_s para superficies planas en régimen laminar con temperatura superficial uniforme.
- Finalmente con el valor Nu_s se obtendrá el valor de h_c a través de la ecuación (2.38), obteniendo las propiedades termofísicas del aire necesarias a través de las tablas de gases a presión atmosférica. El valor de la longitud característica será el mismo que el utilizado para el cálculo de Re_s .

⁵⁵ Ver Referencia: 14.

⁵⁶ Ver Referencia: 11. Apéndice A, tabla A.4.

Cabe destacar que por los mismos motivos expuestos en el subapartado anterior se aproximarán todas la superficies al caso más general y predominante, placa plana vertical en régimen laminar, con temperatura superficial uniforme.

3.5.3.- Estimación de la Temperatura Superficial de los Equipos.

Una vez obtenidos los termogramas (según lo explicado en el apartado 3.3.2), se procederá a ubicar las temperaturas máximas y mínimas de los equipos, a su vez se situarán puntos de manera aleatoria que permitirán estimar una temperatura equivalente para toda la superficie en estudio. Esto será posible mediante una escala en la que los cambios de temperatura de menor a mayor serán representados por cambios de tonalidades de más oscuras a más claras respectivamente. Lo antes dicho se realizará con una licencia perteneciente a Metro de Caracas C.A. del software IRwin OLE 1.1 en su versión 1.07 y a través de aplicaciones de Microsoft Excel. A continuación se presenta un modelo de termograma en la figura 3.8:

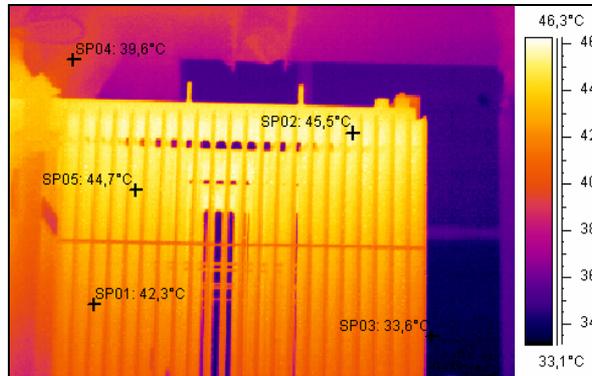


Fig. 3. 8.- Modelo de un termograma en el software IRwin OLE 1.1.

3.5.4.- Cálculo de la Tasa de Flujo de Calor Disipada por los Equipos Presentes en las S/E Transfo-rectificadoras.

Los equipos que posean una temperatura superficial mayor a la temperatura ambiental de las S/E transfo-rectificadoras se encontrarán disipando calor al ambiente, por experiencia del personal perteneciente a la Gerencia de Electromecánica de Metro de Caracas C.A. se conoce que los equipos con mayor disipación de calor suelen ser los

transformadores, rectificadores, resistencias de balastos pertenecientes a los rectificadores y disyuntores; siendo estos los principales equipos a estudiar para este proyecto. El objetivo de esta fase será cuantificar este aporte de calor para totalizar la carga térmica presente en cada subestación. Cada equipo disipará calor al ambiente mediante dos modos de transferencia de calor, convección y radiación.

Para estimar la tasa de flujo de calor convectada de manera natural o forzada al ambiente se realizará el siguiente procedimiento:

- Se estimará el valor del área superficial del equipo en estudio (A) según las medidas tomadas en el apartado 3.2, tomando en cuenta solo las superficies que este en contacto directo con el ambiente.
- El coeficiente convectivo h_c , según sea el caso (convección natural o forzada) se determinará de acuerdo al apartado 3.5.2.
- Se obtendrá el valor de temperatura superficial del equipo en estudio (T_w) a través del procedimiento explicado en el apartado 3.5.3.
- El valor de la temperatura de diseño recomendada de la ciudad de Caracas (T_∞) tendrá un valor de 29,5 °C, según lo explicado en el apartado 3.5.1.
- Finalmente se obtendrá el valor de la tasa de flujo de calor convectado por medio de la ley de enfriamiento de Newton (ecuación 2.37) del Capítulo II, introduciendo en ella las variables antes mencionadas.

Análogamente la tasa de flujo de calor irradiada al ambiente será estimada de la siguiente manera:

- Por restricciones de la compañía no fue posible la determinación específica de las áreas y geometrías de los equipos presentes en las S/E transfo-rectificadora, es por esto que el valor de FV será igual 1 ($0 \leq FV \leq 1$); con este valor se estará sobre estimando la componente radiativa y no se verán afectados los objetivos del presente trabajo.
- Se estimará el valor del área superficial del equipo en estudio (A) según las medidas tomadas en el apartado 3.2, tomando en cuenta solo las superficies que este en contacto directo con el ambiente.

- Se obtendrá el valor de temperatura superficial del equipo en estudio (T_w) a través del procedimiento explicado en el apartado 3.5.3.
- El valor de la temperatura de diseño recomendada de la ciudad de Caracas (T_∞) tendrá un valor de 29,5 °C, según lo explicado en el apartado 3.5.1.
- La constante de Stefan Boltzmann σ tendrá un valor fijo de $\sigma = 5,67051 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.
- Se mantendrá el mismo valor del coeficiente de emisividad de la superficie ϵ (0,94) utilizado en la fase de medición de temperatura superficial de los equipos, explicado con anterioridad en el apartado 3.4.1.
- El valor de la tasa de flujo de calor intercambiada entre los equipos y el ambiente se obtendrá utilizando la (ecuación 2.56) del Capítulo II.

Por último la carga térmica total registrada en el recinto (CT_r) será la suma de todas las tasas de flujo de calor, convectivas, radiativas y por iluminación. En esta etapa del trabajo fueron tomadas en cuenta las siguientes consideraciones:

- El aporte de calor disipado por las personas presentes en las S/E transfo-rectificadoras será despreciable puesto que estos lugares están diseñados para trabajar sin supervisión, por lo tanto no cuentan con un número de ocupantes fijo.
- El aporte térmico de las paredes y techos resulta despreciable en comparación con el generado por los equipos, es por esto que no será considerado.
- De igual manera el aporte térmico generado por ventanas tendrá un valor de cero (0), por ser las S/E Transfo-rectificadoras estructuras carentes de vidrios.
- Por su parte el calor disipado por la iluminación, será estimado con la ecuación (2.26), asumiendo los valores de CLF , F_{ul} y F_{sa} iguales a uno (1) ya que las luces se encuentran encendidas las 24 horas del día los 7 días de la semana.
- El valor total de carga térmica será multiplicado por un factor de seguridad de 1,2 para cubrir posibles errores por aproximación y aspectos que no se hayan tomado en cuenta.

3.5.5.- Cálculo de la Tasa de Flujo de Volumétrico Requerida para Disipar la Carga Térmica en las S/E Transfo-rectificadoras.

Una vez estimada la carga térmica de las subestaciones, se establece un método de evaluación que permita comprobar si los sistemas de ventilación instalados son capaces de disipar su respectiva carga térmica. Para esto se calculará la tasa de flujo volumétrico requerido en cada subestación y se comparará con la manejada por los ventiladores existentes en las subestaciones, este procedimiento será dividido según el tipo de ventilación presente en la estructura.

La tasa de flujo volumétrico requerido para remover la carga térmica en los casos en que la ventilación sea natural, será estimada por medio de la ecuación (2.62) del Capítulo II bajo el siguiente procedimiento:

- El valor de la carga térmica total registrada en el interior del recinto será la suma de todas las tasas de flujo de calor, convectivas, radiativas y por iluminación incluyendo el factor de seguridad de 1,2; según lo explicado en el apartado 3.5.4.
- El valor de la capacidad térmica específica del aire será igual a $0,288 \text{ kcal} / \text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- DT corresponderá a la diferencia de temperatura exterior (T_∞ estimada según el apartado 3.5.2.1) y el interior del recinto (temperatura promedio obtenida de los esquemas de temperaturas realizados según el apartado 3.4.2).

Como los equipos presentes en las S/ E transfo-rectificadoras no trabajan con vapores y el personal presente es regularmente escaso, la carga térmica latente será despreciable en comparación a la carga sensible, es por esto que la tasa de flujo volumétrico requerido para remover la carga térmica en los casos en que la ventilación sea mecánica, se realizará por medio de la ecuación (2.63) del Capítulo II bajo el siguiente procedimiento:

- La carga térmica sensible será igual a la carga térmica total estimada según el apartado 3.5.4.
- $0,288 \text{ kcal} / \text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$ corresponderá al valor de la capacidad térmica específica del aire.

- DT corresponderá a la diferencia de temperatura exterior (T_{∞} estimada según el apartado 3.5.2.1) y el interior del recinto (temperatura promedio obtenida de los esquemas de temperaturas realizados según el apartado 3.4.2).

3.6.- PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE LOS VENTILADORES.

Una vez estimada la tasa de flujo volumétrico de aire requerida para disipar la carga térmica presente en las S/E transfo-rectificadoras, se procederá a comparar este valor con la capacidad de los equipos de ventilación instalados y de ser necesario se recomendarán unidades nuevas capaces de manejar las magnitudes de aire solicitadas. En el caso de que no se cuente con información precisa de los ventiladores instalados se procederá a recomendar un nuevo equipo.

Las tablas de factores de corrección de las variables involucradas serán proporcionadas por el fabricante, siendo este seleccionado por ser una de las empresas proveedoras de Metro de Caracas C.A y disponer de la información técnica necesaria (catálogos y manuales). Los sistemas de ventilación serán diseñados bajo la filosofía de la compañía, en la que a pesar de instalarse dos (2) ventiladores, un solo equipo debe tener la capacidad de disipar toda la carga térmica presente en la subestación. A continuación se explicará el procedimiento a seguir para la selección de los ventiladores⁵⁷:

- Se procederá a ingresar a una tabla de factor de corrección por variación de la densidad de aire, conociendo la temperatura del proceso (temperatura promedio de las subestaciones obtenida de los esquemas construidos según el apartado 3.3.3, en este caso °F) y la altura sobre el nivel del mar del lugar donde van a ser instalados los equipos (el valor de la altitud fue proporcionado por la compañía y para todas las subestaciones será de 875 m.s.n.m equivalente a 2871 p.s.n.m) ; en los casos en que no se encuentren los valores exactos requeridos deberán realizarse interpolaciones. Dicha tabla se encuentra en el anexo B.5.⁵⁸
- Se multiplicará el valor del factor de corrección a la tasa de flujo volumétrico requerido para disipar la carga térmica de la subestación (estimada según lo

⁵⁷ Ver Referencia: 2

⁵⁸ Ver Referencia: 16.

explicado en el apartado 3.5.5), obteniéndose así la tasa de flujo volumétrica a condiciones de operación estándar (0 m.s.n.m y 21,11 °C) necesaria para ingresar a la curva de selección.

- El valor de la presión total será de 2,5 pulgH₂O, siendo este un valor límite propuesto por Metro de Caracas C.A. para abarcar los casos más desfavorables.
- La presión total deberá ser corregida multiplicándole el mismo factor de corrección que depende de la altitud y la temperatura empleado en el proceso de corrección utilizado para la tasa de flujo volumétrico.
- Se buscará obtener una eficiencia entre un 70% y 80% en todas las subestaciones, obteniendo con esto un rendimiento satisfactorio y la posibilidad de tener un buen funcionamiento de originarse un cambio en alguno de los parámetros involucrados.
- La potencia del motor se obtendrá de las curvas. De igual manera deberá añadirsele un factor de servicio que tome en cuenta las pérdidas por desplazamientos, transmisión, etc. El factor de servicio en este caso tendrá un valor de 1,25 correspondiente a un servicio continuo de 6 a 16 horas por día.
- Todos los ventiladores tendrán un arreglo tipo 4 (sistema de transmisión directa) que representa un sistema de transmisión directa, lo que permite evitar problemas de tensión, mantenimiento y reemplazo de correas.
- La filosofía de ventilación (extracción o suministro) dependerá de la subestación (nivel de ubicación).

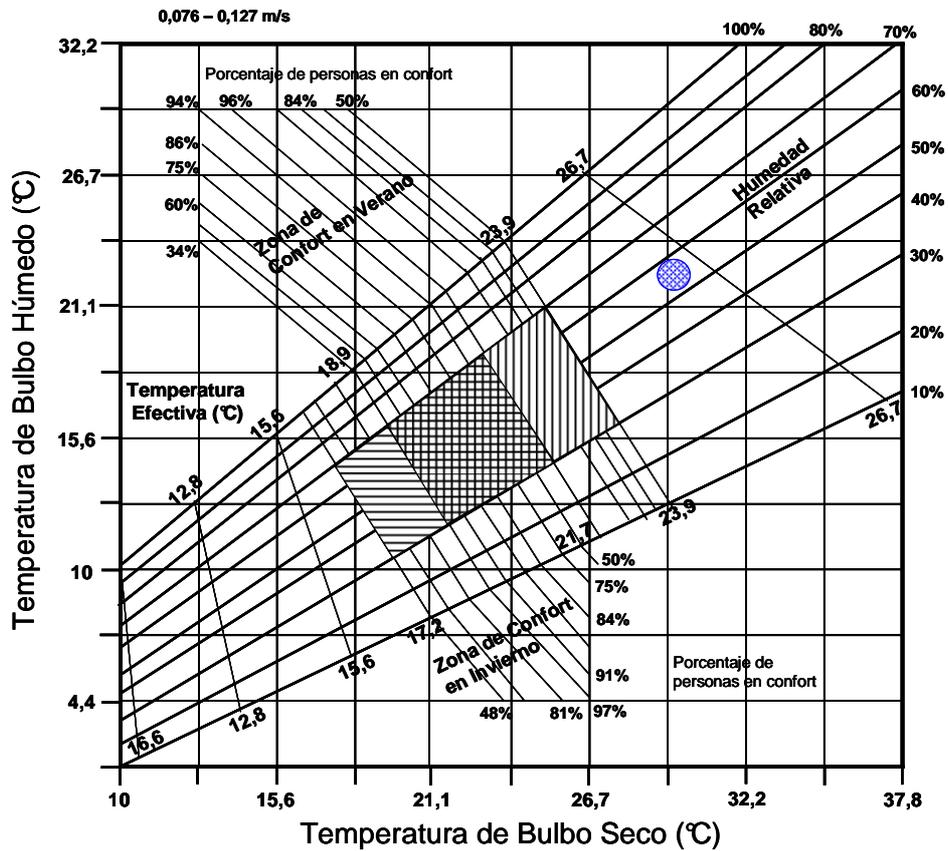
3.7.- EVALUACION DE ZONAS DE CONFORT Y ESTRÉS TÉRMICO.

A pesar de no formar parte de los objetivos de este trabajo especial de grado, con este apartado se pretende dar una alerta sobre el posible confort y estrés térmico presente en las S/E transfo-rectificadoras, es por esto que se procederá a realizar un estudio superficial de dichas condiciones. Para esto:

- De los esquemas construidos según el apartado 3.3.3, se obtiene el valor promedio de la temperatura y humedad relativa.

- Con los valores antes mencionados, se evaluará las zonas de confort según la figura que representa una carta de zonas de confort diseñada por ASHRAE (anexo A.3).
- Se compararán los valores promedios de temperatura y humedad relativa registrados de cada subestación con los rangos establecidos en la zona de confort para clima de verano de la carta ASHRAE, a fin de verificar la situación de confort en la que se encuentran.
- Utilizando los valores de temperatura y humedad relativa promedio se determinará para aquellas estaciones que se encuentren fuera de confort, el nivel de estrés térmico a través de la tabla de sensación térmica del anexo A.4.
- De la tabla de sensación térmica se obtendrá un valor con el que podrá ubicarse en el anexo A.5 que se encontrará en los anexos, la categoría del peligro y los posibles síndromes provocados por calor que pueden presentarse en el personal de mantenimiento de las subestaciones.

A continuación se muestra en la figura 3.8 un ejemplo de la evaluación del confort en las subestaciones. Seguidamente se presenta en las tablas 3.7 y 3.8 un ejemplo para la estimación del estrés térmico y las posibles enfermedades laborales que pueden presentarse en el personal:



SUBESTACIÓN TRANSFO-RECTIFICADORA EN ESTUDIO.
 Temperatura de bulbo seco promedio 29,65 °C
 Humedad relativa promedio 45,62 %

Fig. 3. 9.- Modelo de evaluación de confort para una subestación en la carta de confort térmico de ASHRAE.

Tabla 3. 7.- Tabla de sensación térmica por el efecto combinado de la temperatura y la humedad.

Sensación térmica por el efecto combinado del calor y la humedad Parte A																				Incremento de la sensación térmica debido al viento Parte B						
T (°C)	Humedad Relativa (%)																			Velocidad del viento (km/h)						
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	< 12,5	12,5 - 21,5	21,5 - 36	36 - 50	> 50
20	16	16	17	17	17	18	18	19	19	19	19	20	20	20	21	21	21	21	21	21	21	0	-1	-3	-4	-4
21	18	18	18	19	19	19	19	19	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	22	22	23	0	-1	-3	-4	-4
22	19	19	19	20	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	23	23	23	23	23	23	24	0	-1	-2	-3	-4
23	20	20	20	20	21	21	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	24	24	24	25	25	0	-1	-2	-3	-4
24	21	21	22	22	22	22	23	23	23	24	24	24	24	25	25	25	25	26	26	26	26	0	-1	-2	-3	-4
25	22	23	23	23	24	24	24	24	24	24	25	25	25	26	26	26	27	27	27	28	28	0	-1	-2	-3	-4
26	24	24	24	24	25	25	25	26	26	26	26	26	27	27	27	28	28	29	29	29	30	0	-1	-2	-3	-3
27	25	25	25	25	26	26	26	27	27	27	27	28	28	29	29	30	30	31	31	31	33	0	-1	-2	-3	-3
28	26	26	26	26	27	27	27	28	28	28	29	29	29	30	31	32	32	33	34	34	36	0	-1	-2	-3	-3
29	26	26	27	27	27	28	29	29	29	29	30	31	33	33	34	35	35	37	38	40	40	0	0	-1	-2	-3
30	27	27	28	28	28	29	29	30	30	31	32	33	34	35	36	37	39	40	41	45	45	0	0	-1	-2	-2
31	28	28	29	29	29	29	30	31	31	31	33	34	35	36	37	39	40	41	45	50	50	0	0	-1	-2	-2
32	29	29	29	29	30	31	31	33	33	34	35	35	37	39	40	42	44	45	51	55	55	0	0	-1	-1	-1
33	29	29	30	30	31	33	33	34	34	35	36	38	39	42	43	45	49	49	53	54	55	0	0	0	-1	-1
34	30	30	31	31	32	34	34	35	36	37	38	41	42	44	47	48	50	52	55			0	0	0	0	0
35	31	32	32	32	33	35	35	37	37	40	40	44	45	47	51	52	55					0	0	0	0	1
36	32	33	33	34	35	36	37	39	39	42	43	46	49	50	54	55						0	0	0	1	1
37	32	33	34	35	36	38	38	41	41	44	46	49	51	55								0	0	0	1	2
38	33	34	35	36	37	39	40	43	44	47	49	51	55									0	0	0	1	2
39	34	35	36	37	38	41	41	44	46	50	50	55										0	0	1	2	2
40	35	36	37	39	40	43	43	47	49	53	55											0	0	1	2	3
41	35	36	38	40	41	44	45	49	50	55												0	0	1	2	3
42	36	37	39	41	42	45	47	50	52	55												0	0	1	2	3
43	37	38	40	42	44	47	49	53	55													0	0	1	2	3
44	38	39	41	44	45	49	52	55														0	0	1	2	3
45	38	40	42	45	47	50	54	55														0	0	1	2	3
46	39	41	43	45	49	51	55															0	0	1	2	3
47	40	42	44	47	51	54	55															0	0	1	2	3
48	41	43	45	49	53	55																0	0	1	2	3
49	42	45	47	50	54	55																0	0	1	2	3
50	42	45	48	50	55																	0	0	1	2	3

Tabla 3. 8.- Modelo para la estimación de los síndromes provocados por calor en el personal de una subestación.

Categoría del Peligro	Sensación Térmica ST (°C)	Color	Síndrome Provocado por el Calor
Extremo peligro	$ST \geq 55$		Golpe de calor, insolación inminente
Peligro	$40 \leq ST < 55$		Insolación, golpe de calor, calambres, muy posibles por exposición prolongada o actividad física
Precaución extrema	$32 \leq ST < 40$		Insolación, golpe de calor, calambres, posibles por exposición prolongada o actividad física
Precaución	$27 \leq ST < 32$		Posible fatiga por exposición prolongada o actividad física

 **SUBESTACIÓN TRANSFO- RECTIFICADORA EN ESTUDIO**
Temperatura de bulbo seco promedio 29,65 °C
Humedad relativa promedio 45,62 %
ST = 31

CAPÍTULO IV

PRESENTACION DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los datos recopilados en las mediciones antes descritas, los resultados de los cálculos realizados para estimar la carga térmica y el caudal requerido para disiparla en las S/E Transfo-rectificadoras de la compañía Metro de Caracas C.A. Con fines didácticos se tomará una subestación como modelo para mostrar el procedimiento de cálculo detallado, el resto de los resultados serán expuestos directamente en tablas.

4.1.- RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROYECTO.

El proceso de inspección realizado en las S/E Transfo-rectificadoras, permitió obtener valores de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire para cada una de las estaciones seleccionadas. A continuación se presentan los resultados (por subestación) siguiendo el siguiente esquema:

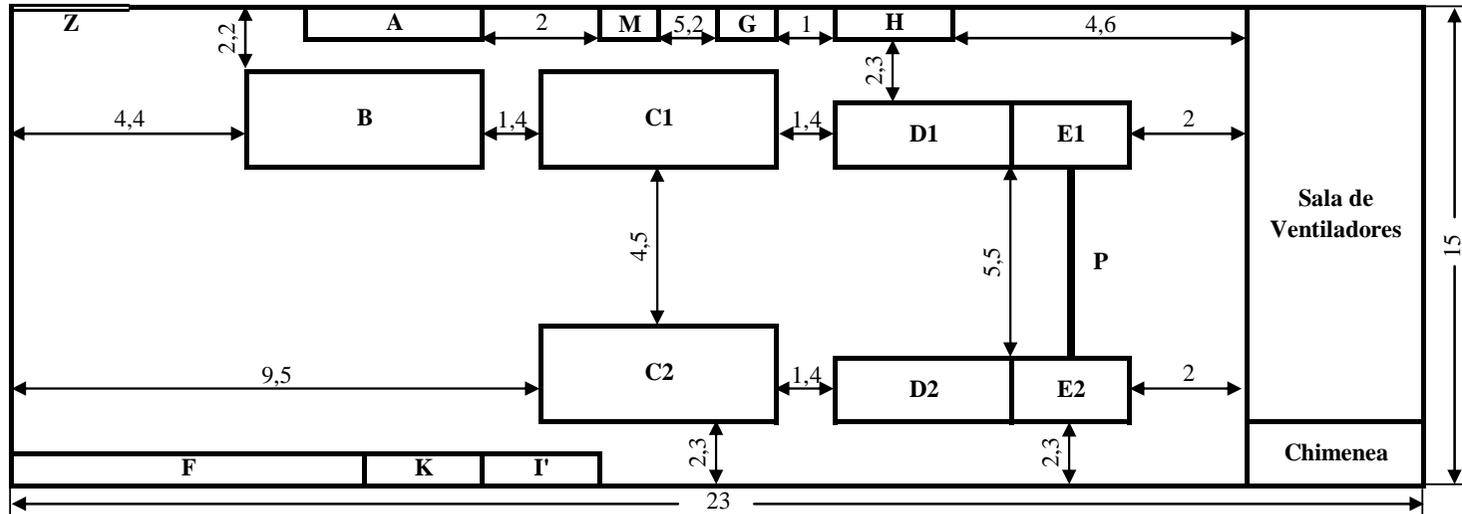
- Croquis de la S/E Transfo-rectificadora en los que pueden apreciarse los equipos presentes y la ubicación de los puntos de control antes mencionados.
- Planilla de recolección de datos utilizada para la inspección de las subestaciones.
- Esquemas de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.
- Termogramas con su respectivo análisis.
- Cálculos tipo de carga térmica y de la tasa de flujo volumétrico de aire requerida.
- Estudio de confort según la carta de zonas de confort de ASHRAE.
- Estimación de la sensación térmica del personal presente en las S/E Transfo-rectificadoras.
- Tabla resumen con la recopilación de los resultados obtenidos.
- Tablas de condiciones estándar y operación de los ventiladores propuestos (según los resultados de Q obtenidos) y los instalados en las S/E transfo-rectificadoras cuyas especificaciones se encuentren disponibles. Esta tabla se presentará en los sistemas de unidades internacional e inglés respectivamente.

- Tabla de modelos de ventiladores propuestos e instalados en las S/E transformadoras cuyas especificaciones se encuentren disponibles.

Cabe destacar que en este capítulo se aplicará el esquema antes expuesto solo en la primera subestación como un modelo, en el resto solo se mostrarán los croquis de las subestaciones y la tabla resumen, encontrando la información adicional en los anexos C.

4.1.1.- Subestación Transfo-rectificadora Petare.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN PETARE.

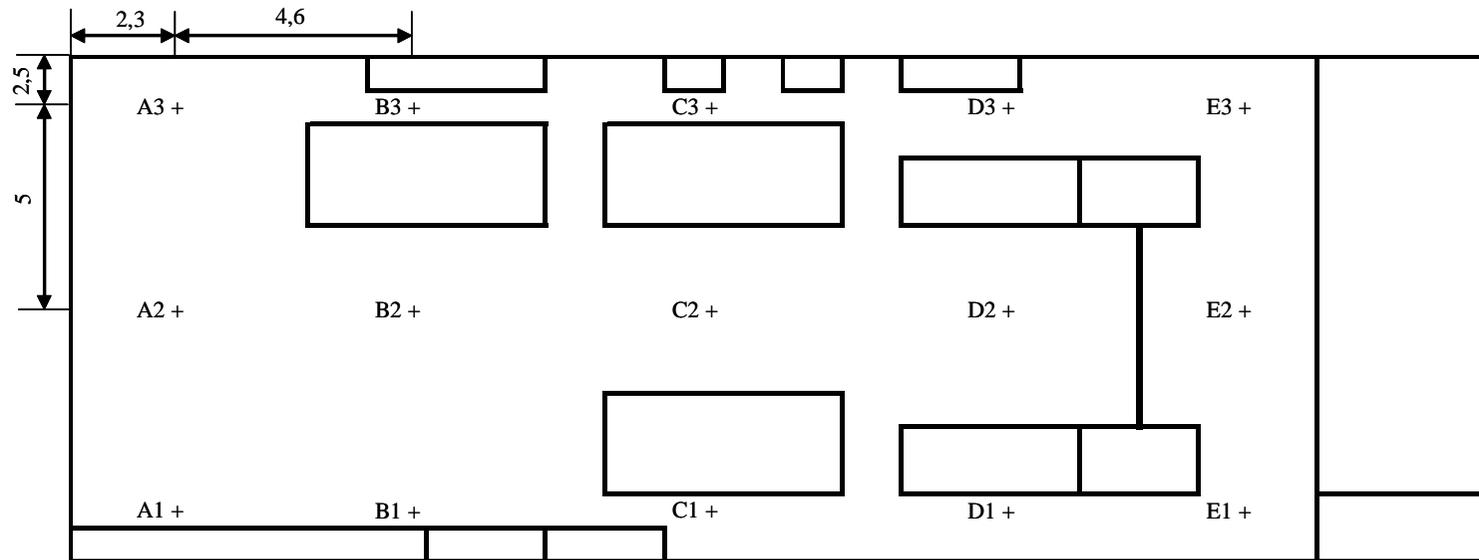


Medidas en metros.

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	I	Tablero Cargador de Baterías	2,65	1,87	0,8	15
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	I'	Tablero Cargador de Baterías	1,8	1,8	0,8	10,8
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,01	2,05	1,58	17,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3	Z	Puerta	-	-	-	-

Fig. 4. 1.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Petare.

UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN EN LA SUBESTACIÓN PETARE.



Medidas en metros.

Fig. 4. 2.- Ubicación de los puntos de medición equipos en la S/E Transfo-rectificadora Petare.

PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS AMBIENTALES.

Tabla 4. 1.- Mediciones obtenidas en la subestación Petare.

Caracas, 27/07/2007												
Hora de Inicio: 10:35 a.m.												
Hora de Finalización: 10:55 a.m.												
S/E Transfo-rectificadora: Petare												
Puntos de Control	Temperatura (°C)				Humedad Relativa (%)				Velocidad del Aire (m/s)			
	0,6,	1,5m	2,3m	Prom.	0,6m	1,5m	2,3m	Prom.	0,6m	1,5m	2,3m	Prom.
A1	28,70	28,70	29,80	29,07	47,50	49,00	46,80	47,77	0,0	0,0	0,0	0,00
A2	29,00	29,10	28,80	28,97	45,50	46,70	46,30	46,17	0,0	0,0	0,0	0,00
A3	29,10	29,10	29,10	29,10	46,50	47,10	46,00	46,53	0,0	0,0	0,0	0,00
B1	28,90	28,90	29,10	28,97	45,70	46,30	46,10	46,03	0,0	0,0	0,0	0,00
B2	29,10	29,00	29,00	29,03	48,00	46,90	45,80	46,90	0,0	0,0	0,0	0,00
B3	29,00	29,10	29,30	29,13	46,90	50,90	49,50	49,10	0,0	0,0	0,0	0,00
C1	29,50	29,60	29,40	29,50	44,40	46,30	45,20	45,30	0,0	0,0	0,0	0,00
C2	29,30	29,30	29,40	29,33	45,10	46,30	45,50	45,63	0,0	0,0	0,0	0,00
C3	29,40	29,40	29,30	29,37	46,40	46,60	46,10	46,37	0,0	0,0	0,0	0,00
D1	29,40	29,30	29,60	29,43	45,90	45,70	44,90	45,50	0,0	0,0	0,0	0,00
D2	29,60	29,50	29,60	29,57	45,80	45,40	45,00	45,40	0,0	0,0	0,0	0,00
D3	29,20	29,30	29,50	29,33	44,70	47,70	48,10	46,83	0,0	0,0	0,0	0,00
E1	29,50	29,70	29,70	29,63	42,30	44,00	44,00	43,43	0,0	0,0	0,0	0,00
E2	29,90	29,90	29,70	29,83	46,90	43,40	43,80	44,70	0,0	0,0	0,0	0,00
E3	29,80	29,80	29,90	29,83	43,60	44,30	45,00	44,30	0,0	0,0	0,0	0,00
Promedio	29,29	29,31	29,41	29,34	45,68	46,44	45,87	46,00	0,00	0,00	0,00	0,00
OBSERVACIONES: Ventilación Apagada, condición más desfavorable. Cuando la ventilación se enciende, de dos ventiladores solo uno se encontró en funcionamiento.												

A partir de estos datos se crearon planos de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire que muestran el comportamiento de dichos parámetros en tres niveles de altura, para el caso de esta subestación se observó que las medidas no varían en un rango mayor a un 5% entre un nivel de altura y otro, por lo tanto se asume que el comportamiento del ambiente es uniforme a lo largo de toda la extensión de la subestación y se construirá un esquema promedio para cada variable.

ESQUEMA DE TEMPERATURAS DE BULBO SECO MEDIDAS EN LA SUBESTACIÓN PETARE.

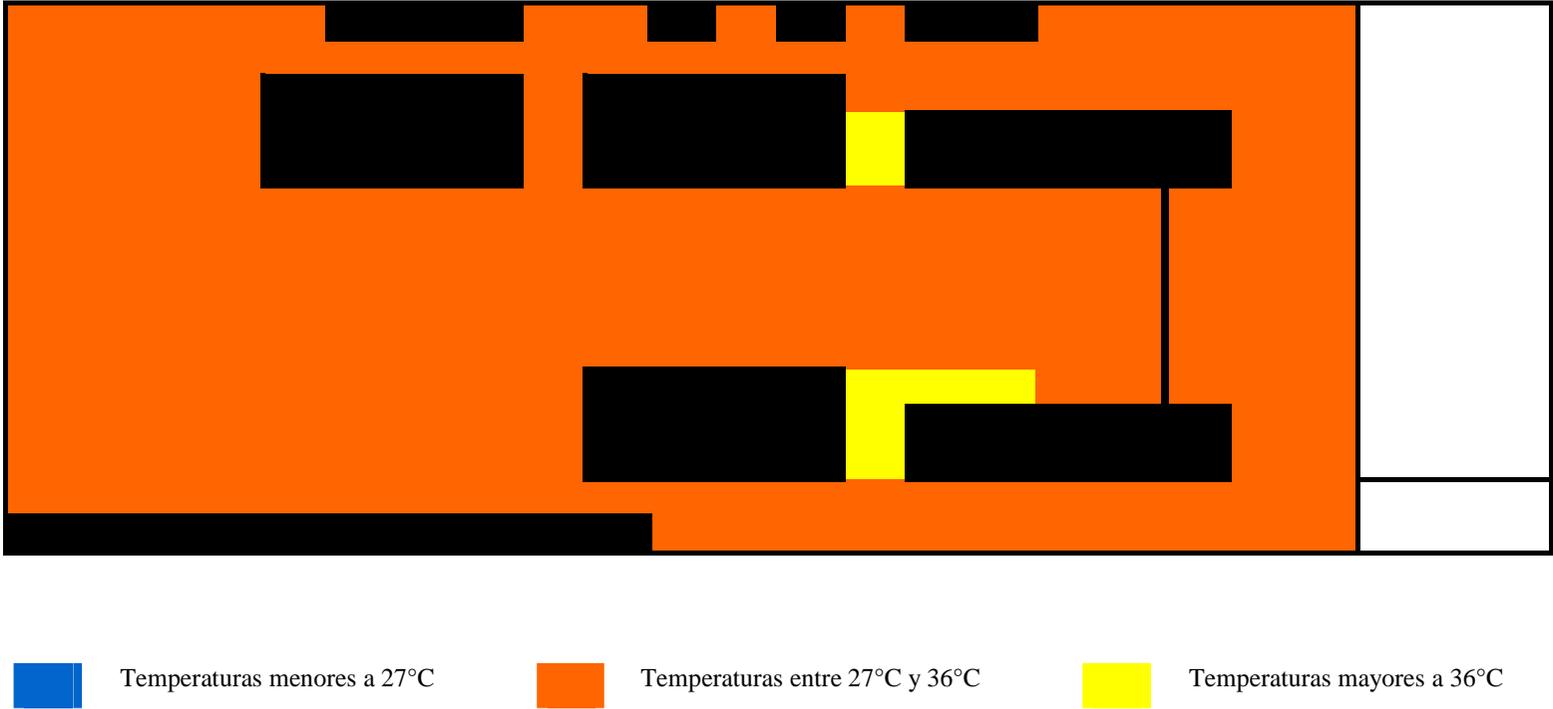


Fig. 4. 3.- Esquema de temperaturas de bulbo seco medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.

ESQUEMA DE HUMEDADES RELATIVAS MEDIDAS EN LA SUBESTACIÓN PETARE.

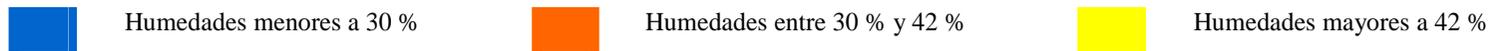
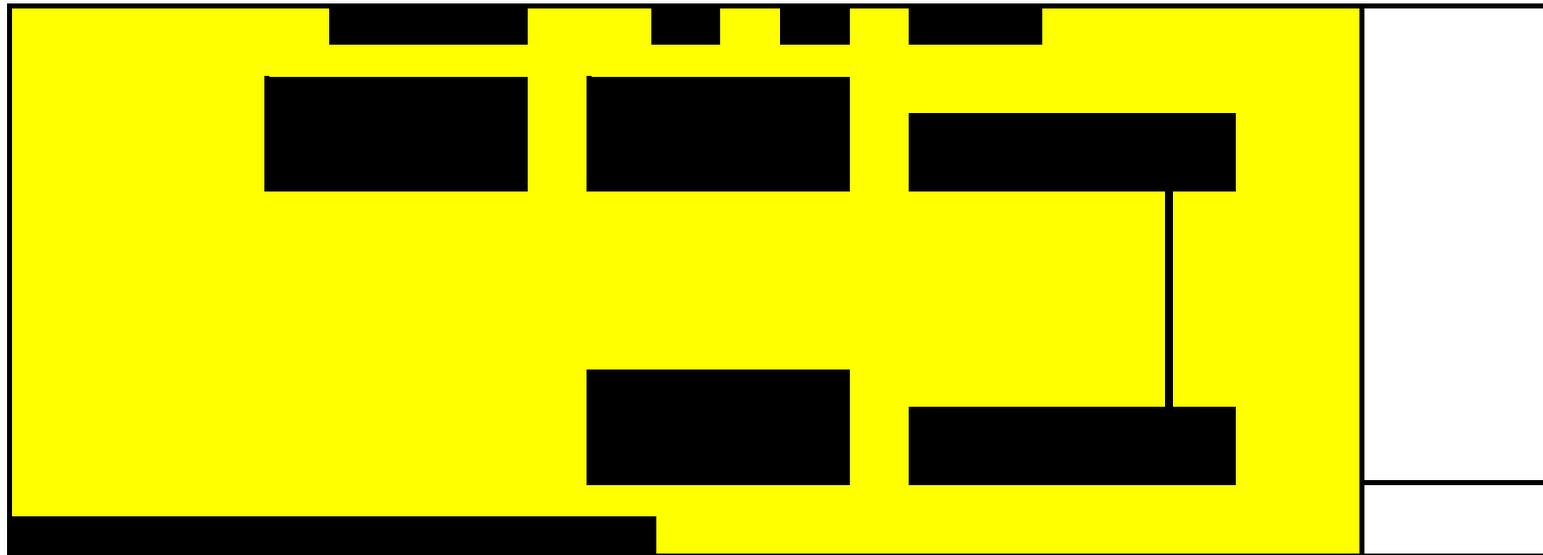


Fig. 4. 4.- Esquema de humedades relativas medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.

ESQUEMA DE VELOCIDADES DEL AIRE MEDIDAS EN LA SUBESTACIÓN PETARE.

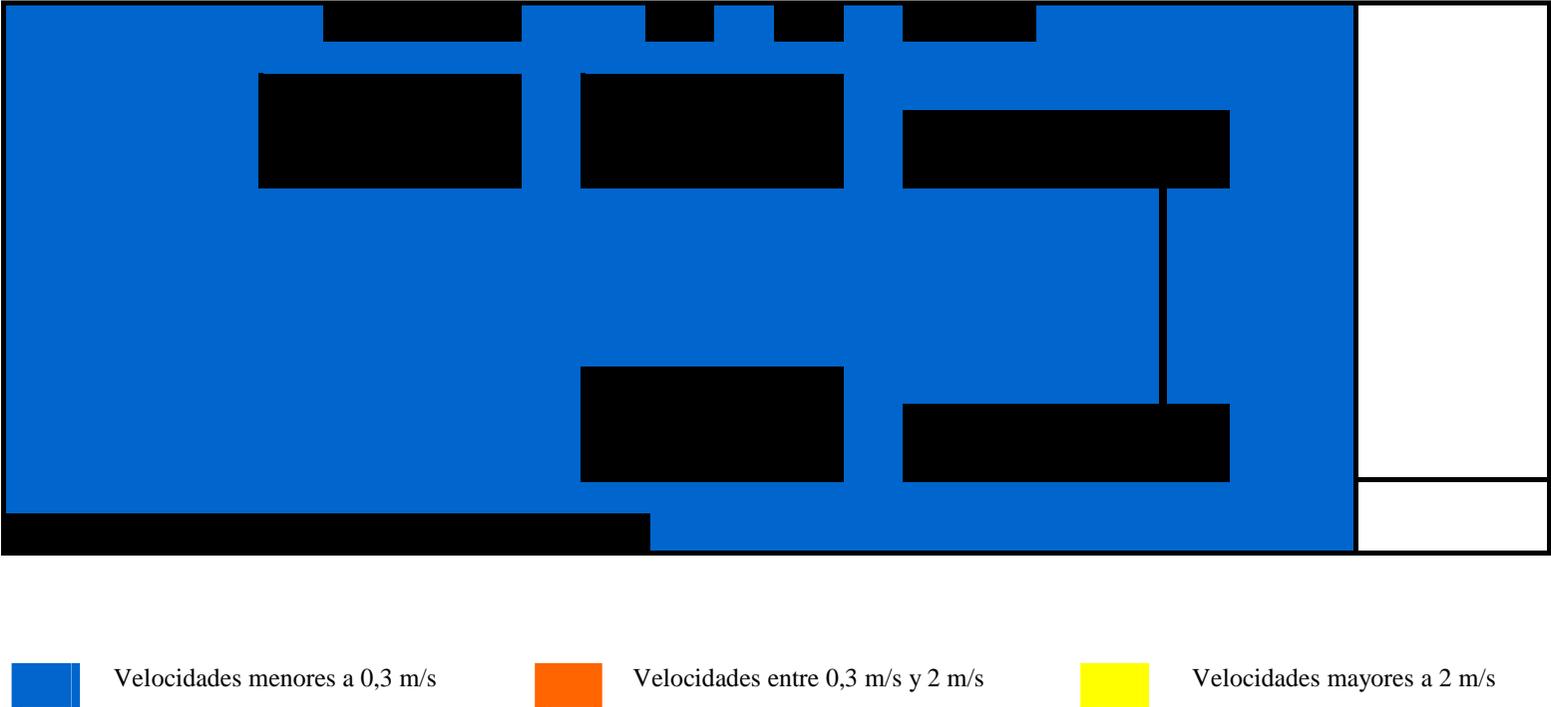


Fig. 4. 5.- Esquema de velocidades medidas en la S/E Transfo-rectificadora Petare.

TERMOGRAMAS REALIZADOS EN LA SUBESTACIÓN PETARE.

Para presentar los resultados obtenidos a través de la cámara termográfica se muestran los termogramas de los equipos que posean las mayores temperaturas superficiales, en la S/E Transfo-rectificadora Petare. El resto de los termogramas de esta subestación serán presentados en los Anexos C.1.

Tabla 4. 2.- Análisis termográfico de la parte superior del radiador perteneciente al Transformador 2.

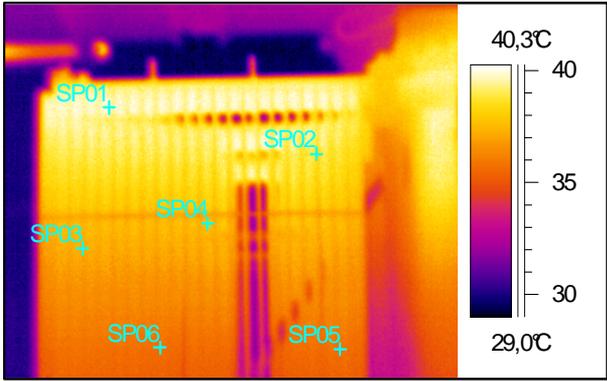
			
Fecha: 27/07/2007	Hora: 9:46 a.m.	Estación: Petare	
Equipo: T2 convector parte superior lado del rectificador.	ε : 0,94	Área. (m²): 66,9	
Distancia. (m): 5	% HR: 47	Temp. Amb. (°C): 28,2	
Temp. Máx. (°C): 40,6	Temp. Mín. (°C): 31,8	Temp. Eq. (°C): 37,28	
Observaciones: La temperatura es considerablemente mayor en la parte superior de las aletas que en la parte inferior.			

Tabla 4. 3.- Análisis termográfico de la parte superior de la cuba perteneciente al Transformador 1.

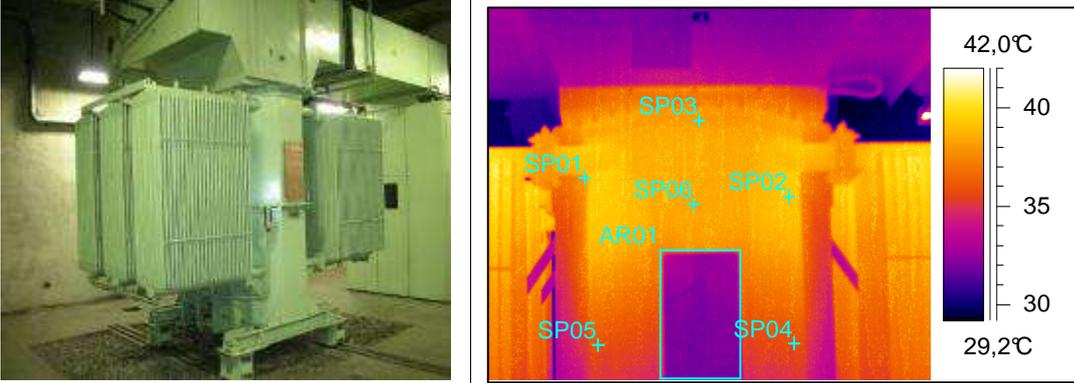
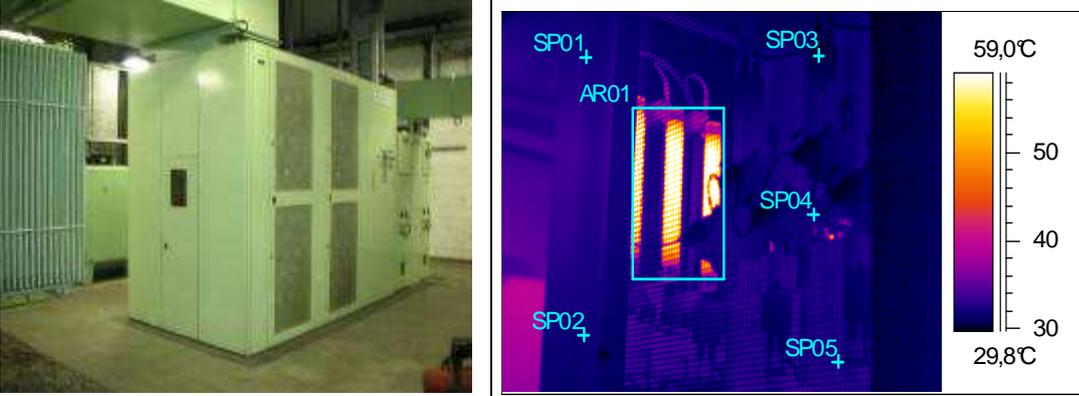
		
Fecha: 27/07/2007	Hora: 9:39 a.m.	Estación: Petare
Equipo: T1 cuba parte superior.	ε : 0,94	Área. (m ²): 66,9
Distancia. (m): 5	% HR: 47	Temp. Amb. (°C): 28,2
Temp. Máx. (°C): 40,8	Temp. Mín. (°C): 34,4	Temp. Eq. (°C): 37,55
<p>Observaciones: La temperatura es considerablemente mayor en la parte superior que en la parte inferior de la cuba. Se observa una zona a menor temperatura correspondiente a la placa de especificaciones del equipo.</p>		

Tabla 4. 4.- Análisis termográfico de los balastros superiores pertenecientes al rectificador 2.

		
Fecha: 27/07/2007	Hora: 9:51 a.m.	Estación: Petare
Equipo: R2 resistencia de balastros superior lado pared.	ε : 0,94	Área. (m²): 0,0518 c/u
Distancia. (m): 3,5	% HR: 47	Temp. Amb. (°C): 28,2
Temp. Máx. (°C): 77,7	Temp. Mín. (°C): 29,5	Temp. Eq. (°C): 77,7
Observaciones: Tienen un área superficial pequeña, pero un temperatura muy alta.		

CÁLCULOS TIPO REALIZADOS PARA LA SUBESTACIÓN PETARE.

A continuación se realizará el modelo cálculo de carga térmica para la S/E Transfo-rectificadora Petare.

Transformador 1.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (66,9 \text{ m}^2) (310,55 - 302,5) \text{ K} = 11.304 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94 (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (66,9 \text{ m}^2) (310,55^4 - 302,5^4) \text{ K}^4 = 3.376 \text{ W}$$

Transformador 2.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (66,9 \text{ m}^2) (310,77 - 302,5) \text{ K} = 11.613 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94 (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (66,9 \text{ m}^2) (310,77^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 3.472 \text{ W}$$

Rectificador 1.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (39,8 \text{ m}^2) (311,18 - 302,5) \text{ K} = 7.046 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94 (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (39,8 \text{ m}^2) (311,18^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 2.177 \text{ W}$$

Rectificador 2.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (39,8 \text{ m}^2) (306,811 - 302,5) \text{ K} = 3.065 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94 (5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) (39,8 \text{ m}^2) (306,811^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 1.057 \text{ W}$$

Disyuntor y Tablero de 30kVca.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (57,93 \text{ m}^2) (302,76 - 302,5) \text{ K} = 324 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)(57,93 \text{ m}^2)(302,76^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 93 \text{ W}$$

Disyuntor y Tablero de 750Vcc 1.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (17,86 \text{ m}^2)(306,82 - 302,5) \text{ K} = 1.620 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)(17,86 \text{ m}^2)(306,82^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 475 \text{ W}$$

Tablero de Auxiliares.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (16,6 \text{ m}^2)(303,93 - 302,5) \text{ K} = 500 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)(16,6 \text{ m}^2)(303,93^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 144 \text{ W}$$

Resistencias Superiores.

$$q_{conv} = h_c A (T_{eq} - T_{req})$$

$$q_{conv} = 21 \text{ W/m}^2 \text{ K} (0,0518 \text{ m}^2)(350,7 - 302,5) \text{ K} = 315 \text{ W}$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma A (T_{eq}^4 - T_{req}^4)$$

$$q_{rad} = 0,94(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)(0,0518 \text{ m}^2)(350,7^4 - 302,5^4) \text{ K}^4$$

$$q_{rad} = 19 \text{ W}$$

$$\sum q_{conv} = [11.304 + 11.613 + 7046 + 3.065 + 324 + 1.620 + 500 + 6x(315)] \text{ W}$$

$$\sum q_{conv} = 38.168 \text{ W}$$

$$\sum q_{rad} = [3.376 + 3.472 + 2.177 + 1.057 + 93 + 475 + 144 + 19]W$$

$$\sum q_{rad} = 11.290W$$

Tasa de Flujo de Calor Disipado por la Iluminación.

$$q_{il} = 24(75W)(2) = 3.600W$$

$$q_{equipos} = \sum q_{conv} + \sum q_{rad} = (38.168W + 11.290W) = 49.458W$$

$$q_{total} = q_{equipos} + q_{il} = 49.458W + 3.600W = 53.058W$$

Utilizando un factor de seguridad del 20%:

$$q_{total} = 53.058 \times (1,2) = 63.670W = 217.259 BTU/hr$$

$$TR = \frac{217.259 BTU/hr}{12000} = 18 TON$$

La tasa de flujo volumétrico de aire para disipar esta carga térmica se calcula de la siguiente manera:

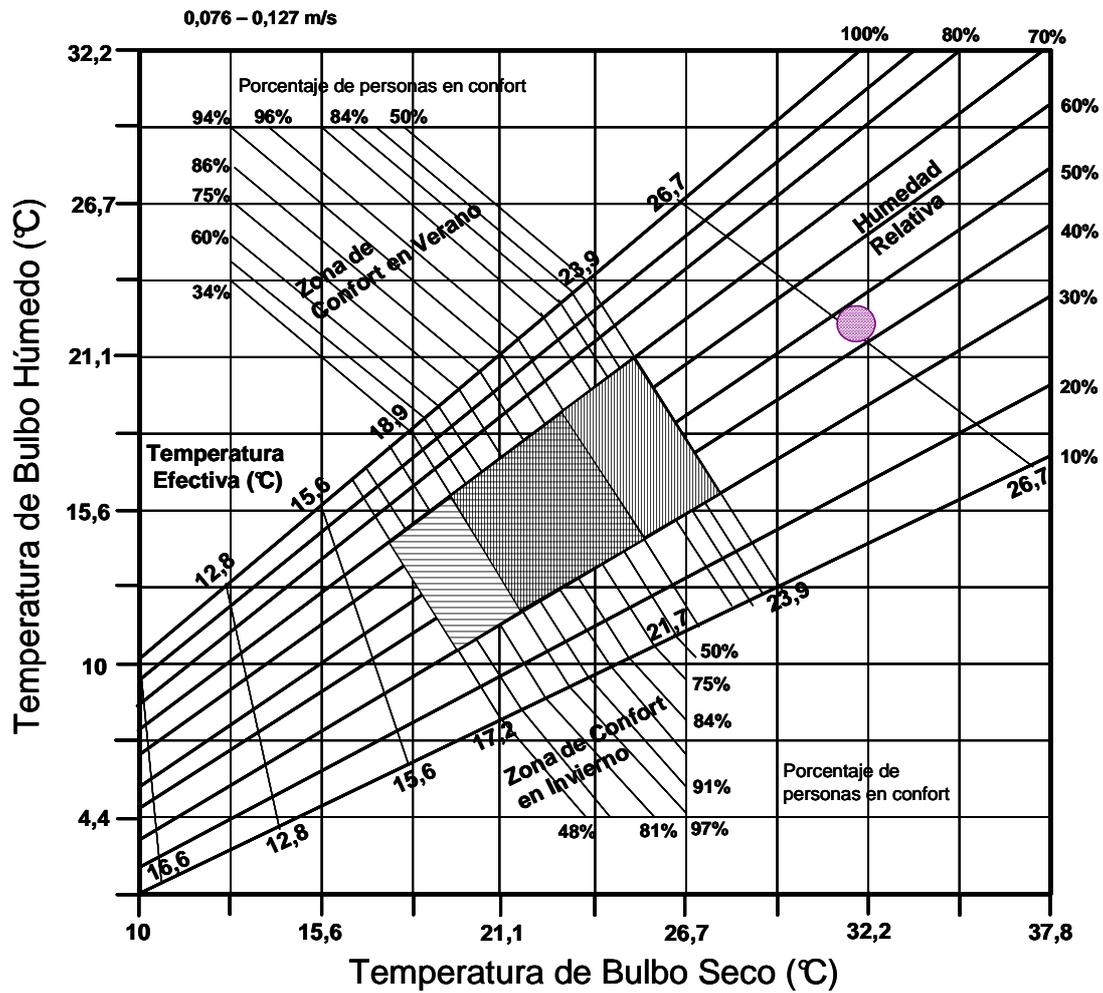
$$q_{total} = 217.259 BTU/hr \times 0,252 kCal/BTU = 54.749 kCal/hr$$

$$Q = \frac{q_{total}}{0,288 \times DT} = \frac{54.749}{0,288 \times (31,3 - 26,25)} = 44.210 m^3/hr = 44.210 \frac{m^3}{hr} \times \frac{1hr}{3.600s}$$

$$Q = 12 m^3/s$$

UBICACIÓN DEL AMBIENTE DE LA SUBESTACIÓN PETARE EN LA CARTA DE CONFORT DE ASHRAE.

Para la subestación Petare la carta de zonas de confort de ASHRAE señala la siguiente:



*Fig. 4. 6.- Ubicación del ambiente en la carta de zona de confort ASHRAE
para la subestación Petare.*

CARTA DE SENSACIÓN TÉRMICA.

Tabla 4. 5.- Carta de sensación térmica en función de la temperatura y la humedad relativa.

Sensación térmica por el efecto combinado del calor y la humedad Parte A																				Incremento de la sensación térmica debido al viento Parte B						
T (°C)	Humedad Relativa (%)																				Velocidad del viento (km/h)					
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	< 12,5	12,5 - 21,5	21,5 - 36	36 - 50	> 50
20	16	16	17	17	17	18	18	19	19	19	19	19	20	20	20	21	21	21	21	21	21	0	-1	-3	-4	-4
21	18	18	18	19	19	19	19	19	20	20	20	20	21	21	21	22	22	22	22	22	23	0	-1	-3	-4	-4
22	19	19	19	20	20	20	20	20	21	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23	24	0	-1	-2	-3	-4
23	20	20	20	20	21	21	22	22	22	23	23	23	24	24	24	24	24	24	25	25	25	0	-1	-2	-3	-4
24	21	21	22	22	22	22	23	23	23	24	24	24	24	25	25	25	25	26	26	26	26	0	-1	-2	-3	-4
25	22	23	23	23	24	24	24	24	24	24	25	25	25	26	26	26	27	27	27	28	28	0	-1	-2	-3	-4
26	24	24	24	24	25	25	25	26	26	26	26	27	27	27	27	28	28	29	29	29	30	0	-1	-2	-3	-3
27	25	25	25	25	26	26	26	27	27	27	27	28	28	29	29	30	30	31	31	31	33	0	-1	-2	-3	-3
28	26	26	26	26	27	27	27	28	28	28	29	29	29	30	31	32	32	33	34	34	36	0	-1	-2	-3	-3
29	26	26	27	27	27	28	29	29	29	29	30	30	31	33	33	34	35	35	37	38	40	0	0	-1	-2	-3
30	27	27	28	28	28	29	29	29	30	30	31	32	33	34	35	36	37	39	40	41	45	0	0	-1	-2	-2
31	28	28	29	29	29	29	30	31	31	31	33	34	35	36	37	39	40	41	45	45	50	0	0	-1	-2	-2
32	29	29	29	29	30	31	31	33	33	34	35	35	37	39	40	42	44	45	51	51	55	0	0	-1	-1	-1
33	29	29	30	30	31	33	33	34	34	35	36	38	39	42	43	45	49	49	53	54	55	0	0	0	-1	-1
34	30	30	31	31	32	34	34	35	36	37	38	41	42	44	47	48	50	52	55			0	0	0	0	0
35	31	32	32	32	33	35	35	37	37	40	40	44	45	47	51	52	55					0	0	0	0	1
36	32	33	33	34	35	36	37	39	39	42	43	46	49	50	54	55						0	0	0	1	1
37	32	33	34	35	36	38	38	41	41	44	46	49	51	55								0	0	0	1	2
38	33	34	35	36	37	39	40	43	44	47	49	51	55									0	0	0	1	2
39	34	35	36	37	38	41	41	44	46	50	50	55										0	0	1	2	2
40	35	36	37	39	40	43	43	47	49	53	55											0	0	1	2	3
41	35	36	38	40	41	44	45	49	50	55												0	0	1	2	3
42	36	37	39	41	42	45	47	50	52	55												0	0	1	2	3
43	37	38	40	42	44	47	49	53	55													0	0	1	2	3
44	38	39	41	44	45	49	52	55														0	0	1	2	3
45	38	40	42	45	47	50	54	55														0	0	1	2	3
46	39	41	43	45	49	51	55															0	0	1	2	3
47	40	42	44	47	51	54	55															0	0	1	2	3
48	41	43	45	49	53	55																0	0	1	2	3
49	42	45	47	50	54	55																0	0	1	2	3
50	42	45	48	50	55																	0	0	1	2	3

Tabla 4. 6.- Leyenda de la carta de sensación térmica en función de la temperatura y la humedad relativa.

Categoría del Peligro	Sensación Térmica ST (°C)	Escala de Color	Síndrome Provocado por el Calor
Extremo peligro	$ST \geq 55$		Golpe de calor, insolación inminente
Peligro	$40 \leq ST < 55$		Insolación, golpe de calor, alambres, muy posibles por exposición prolongada o actividad física
Precaución extrema	$32 \leq ST < 40$		Insolación, golpe de calor, calambres, posibles por exposición prolongada o actividad física
Precaución	$27 \leq ST < 32$		Posible fatiga por exposición prolongada o actividad física

 **PETARE, ST = 31**

Temperatura de Bulbo Seco Promedio 31,30 °C

Humedad relativa Promedio 45,80 %

Los valores promedios de la temperatura de bulbo seco y de la humedad relativa obtenidos en la subestación Petare fueron 31,30 °C y 45,80 % respectivamente, arrojando como resultado posible fatiga por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en las S/E Transfo-rectificadoras, según la tabla de sensación térmica utilizada para este proyecto

TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN PETARE.

Tabla 4. 7.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	31,3
Humedad relativa promedio (%)	45,8
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 8.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 31, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar fatiga por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 9.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	37,55	11.304	38.574	3.376	11.521
Transformador 2	66,9	37,77	11.613	39.628	3.472	11.849
Rectificador 1	39,8	38,19	7265	24.792	2.177	7.428
Rectificador 2	39,8	35,4	3.065	10.459	1057	3607
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	57,93	29,76	324	1.107	93	318
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	33,82	1.620	5.529	475	1.621
Tablero de Auxiliares	16,6	30,93	500	1.705	144	493
Resistencias Superiores	0,0518	77,7	315	1.073	19	65
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			38.168 / 130.240			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			11.290 / 38.525			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			3.600 / 12.284			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			63.669 / 217.259 / 18			
Q [m ³ /s]			10			

NOTA:

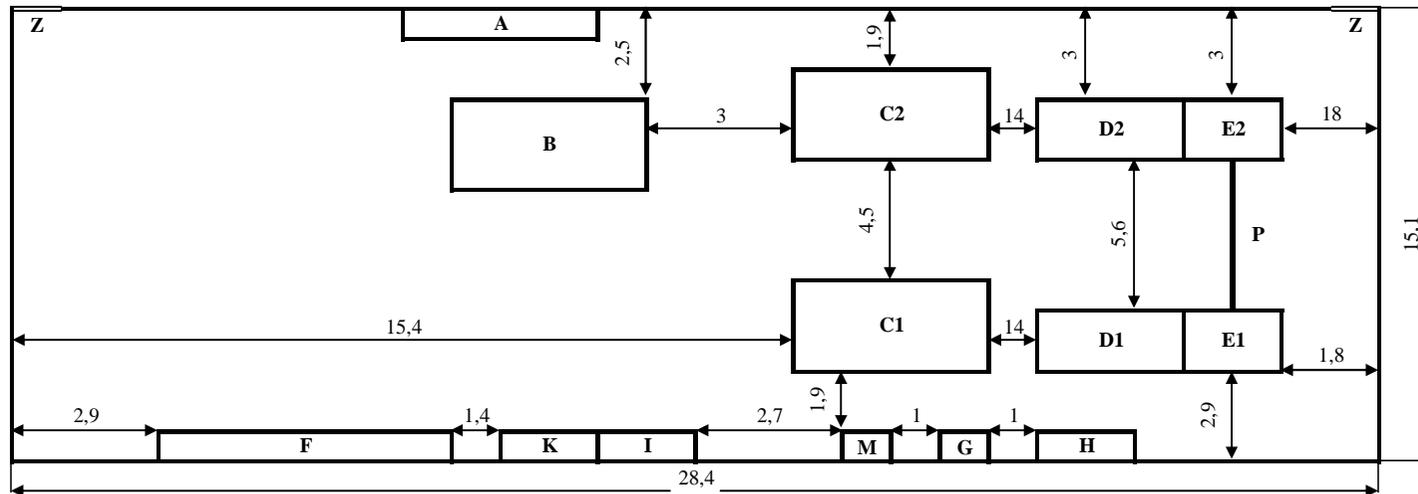
LOS PUNTOS DE MEDICIÓN Y ESQUEMAS DE TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y VELOCIDAD DEL AIRE, LAS PLANILLAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, LOS TERMOGRAMAS Y SU RESPECTIVO ANÁLISIS, LAS CARTAS DE ZONAS DE CONFORT Y LA TABLA SENSACIÓN TÉRMICA, PARA EL RESTO DE LAS S/E TRANSFO-RECTIFICADORAS SE ENCUENTRAN UBICADOS EN EL DISCO DE ANEXOS COMO DOCUMENTOS DE MICROSOFT WORD DEBIDAMENTE IDENTIFICADOS SEGÚN LO INDICADO EN LA SIGUIENTE TABLA:

Tabla 4. 10.- Identificación de los anexos por subestación.

S/E Transfo-rectificadora	ANEXO
Chacao	C.2
La California	C.3
Parque Carabobo	C.4
Plaza Venezuela	C.5
Propatria	C.6
La Paz	C.7
Maternidad	C.8
El Valle	C.9
Los Símbolos	C.10
Nuevo Circo	C.11
Zona Rental	C.12

4.1.2.- Subestación Transfo-rectificadora Chacao.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN CHACAO.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	Alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	I	Tablero Cargador de Baterías	2,65	1,87	0,8	15
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	38,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,01	2,05	1,58	17,9	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3						

Fig. 4. 7.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Chacao.

TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN CHACAO.

Tabla 4. 11.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	34,88
Humedad relativa promedio (%)	42,49
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coeficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 12.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

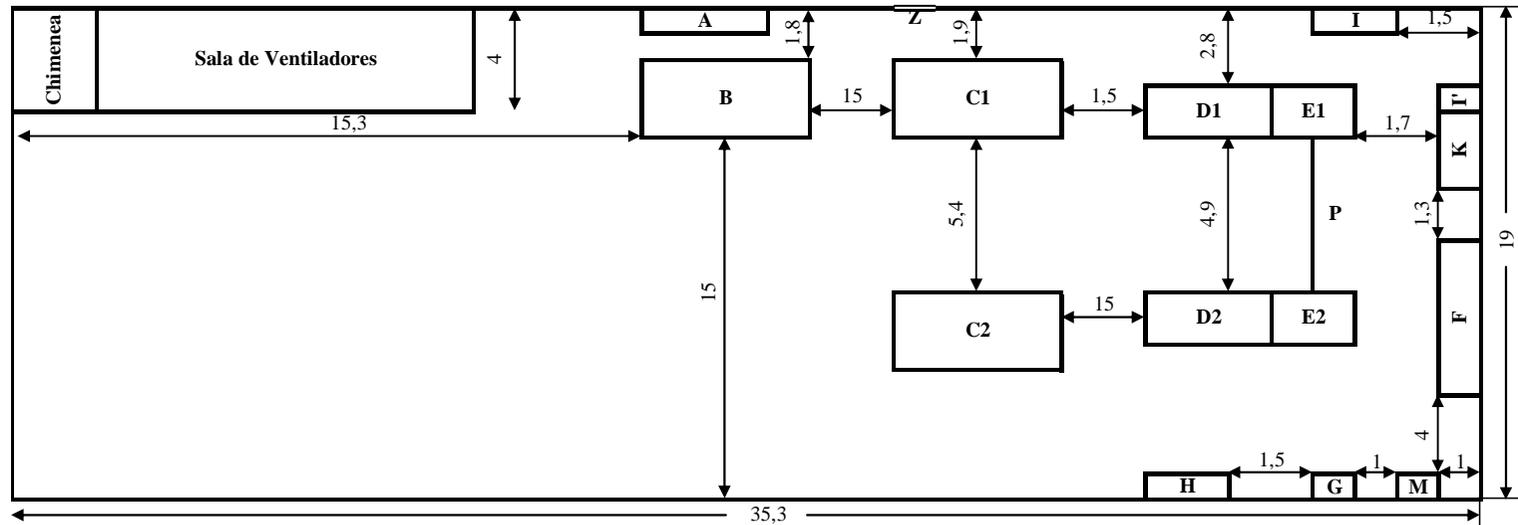
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 39, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 13.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	43,93	20.268	69.162	6.247	21.317
Transformador 2	66,9	45,07	21.860	74.593	6.775	23.120
Rectificador 1	39,8	40,11	8.673	29.594	2.684	9.159
Rectificador 2	39,8	37,91	7.034	24.001	2.105	7.182
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	37,79	3.109	10.609	930	3.173
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	17,86	38,32	3.309	11.292	992	3.386
Resistencias Superiores	0,0518	123,7	615	2.099	46	158
Balastos Inferiores	0,0518	247,8	1.426	4.865	184	628
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			66.439/ 226.710			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			19.949 / 68.073			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			3900 / 13.308			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			108.346 / 369.709 / 31			
Q [m ³ /s]			10			

4.1.3.- Subestación Transfo-rectificadora La California.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN LA CALIFORNIA.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	Alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	I	Tablero Cargador de Baterías	2,65	1,87	0,8	15
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	I'	Tablero Cargador de Baterías	0,6	1,8	0,8	5,52
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,01	2,05	1,58	17,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3	Z	Puerta	-	-	-	-

Fig. 4. 8.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora La California.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
LA CALIFORNIA.**

Tabla 4. 14.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	33,61
Humedad relativa promedio (%)	37,2
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 15.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

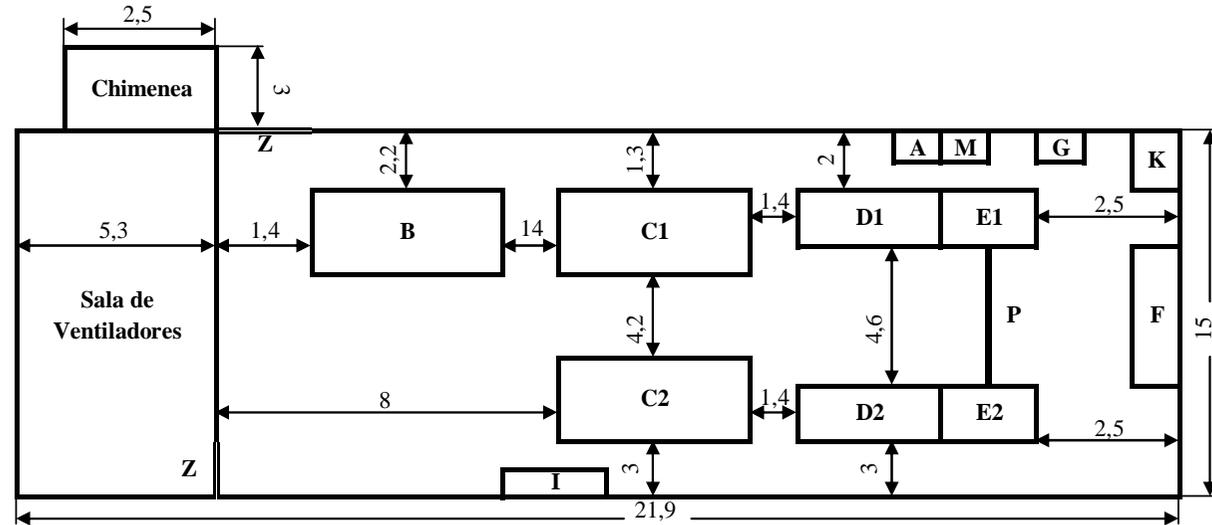
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 34, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 16.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	43,13	19.145	65.328	5.878	20.057
Transformador 2	66,9	44,03	20.409	69.641	6.294	21.475
Rectificador 1	39,8	42,58	10.930	37.298	3.347	11.420
Rectificador 2	39,8	38,84	7.810	26.650	2.348	8.011
Disyuntor y Tablero de 30 kVcc	57,9312	33,4	4.745	16.190	1.388	4.737
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	38,1	3.226	11.008	966	3.297
Tablero Cargador de Baterías	11,008	40,7	2.589	8.835	785	2.680
Resistencias Superiores	0,0518	103,7	485	1.654	33	113
Balastos Inferiores	0,0518	247,3	1.423	4.854	183	625
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			70.761 / 241.458			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			21.222 / 72.415			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			3.900 / 13.308			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			115.059 / 392.617 / 33			
Q [m ³ /s]			13			

4.1.4.- Subestación Transfo-rectificadora Parque Carabobo.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN PARQUE CARABOBO.



Medidas en metros.

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	I	Tablero Cargador de Baterías	1,8	1,84	0,8	11
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,01	2,05	1,58	17,9	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3						

Fig. 4. 9.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
PARQUE CARABOBO.**

Tabla 4. 17.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	40,11
Humedad relativa promedio (%)	30,3
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 18.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

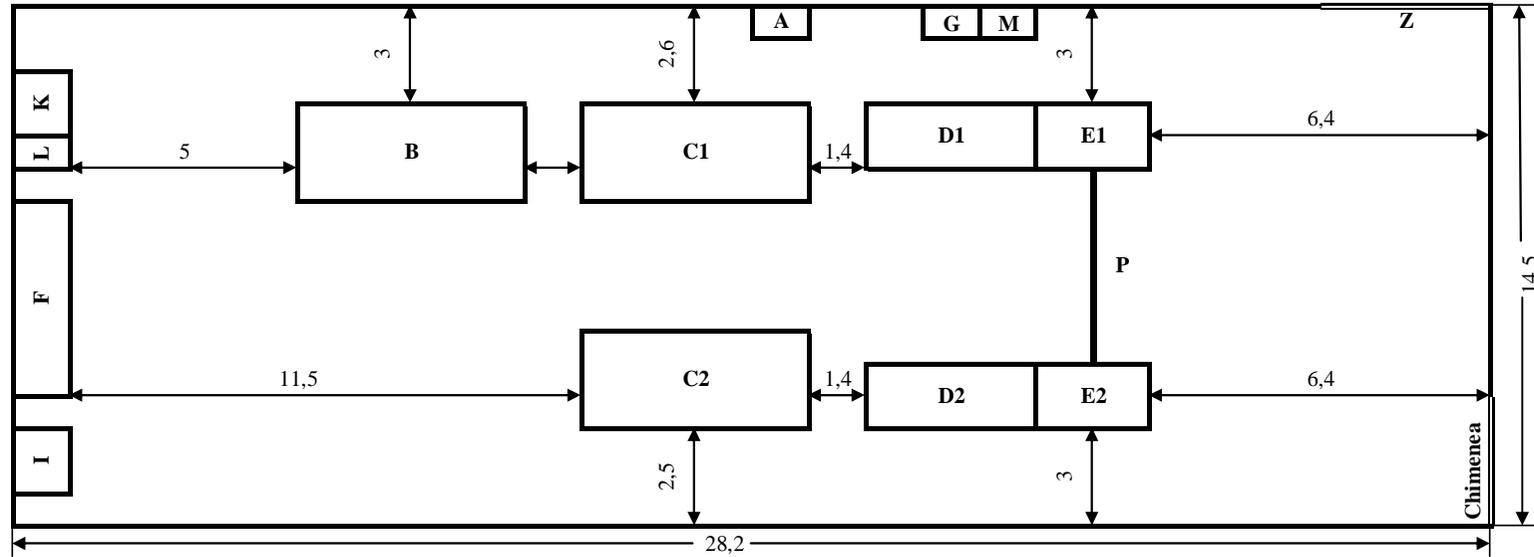
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 43, El régimen de temperaturas y humedades relativas genera una gran posibilidad golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 19.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	q _{convectado}		q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	49,81	28.522	97.327	9.049	30.876
Transformador 2	66,9	49,19	27.649	94.346	8.745	29.839
Rectificador 1	39,8	46,53	14.244	48.606	4.447	15.174
Rectificador 2	39,8	44,27	12.349	42.138	3.812	13.009
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	45,16	5.872	20.036	1.821	6.213
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	17,86	45,36	5.947	20.292	1.846	6.298
Tablero Cargador de Baterías	11,008	42,4	2.982	10.176	912	3.113
Tablero de Control y Mando	37,7264	40,67	8.847	30.188	2.683	9.156
Resistencias Superiores	0,0518	106,7	504	1.721	35	120
Balastros Inferiores	0,0518	309,2	1.827	6.234	300	1.026
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			111.256 / 379.639			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			34.536 / 117.485			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			825 / 2.815			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			175.813 / 599.927 / 50			
Q [m ³ /s]			11			

4.1.5.- Subestación Transfo-rectificadora Plaza Venezuela.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN PLAZA VENEZUELA.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomás 30 kVca	-	-	-	-	G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	I	Tablero Cargador de Baterías	2,65	1,87	0,8	15
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,01	2,05	1,58	17,9	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-

Fig. 4. 10.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
PLAZA VENEZUELA.**

Tabla 4. 20.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	29,65
Humedad relativa promedio (%)	45,6
Velocidad del aire promedio (m/s)	0,024
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 21.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

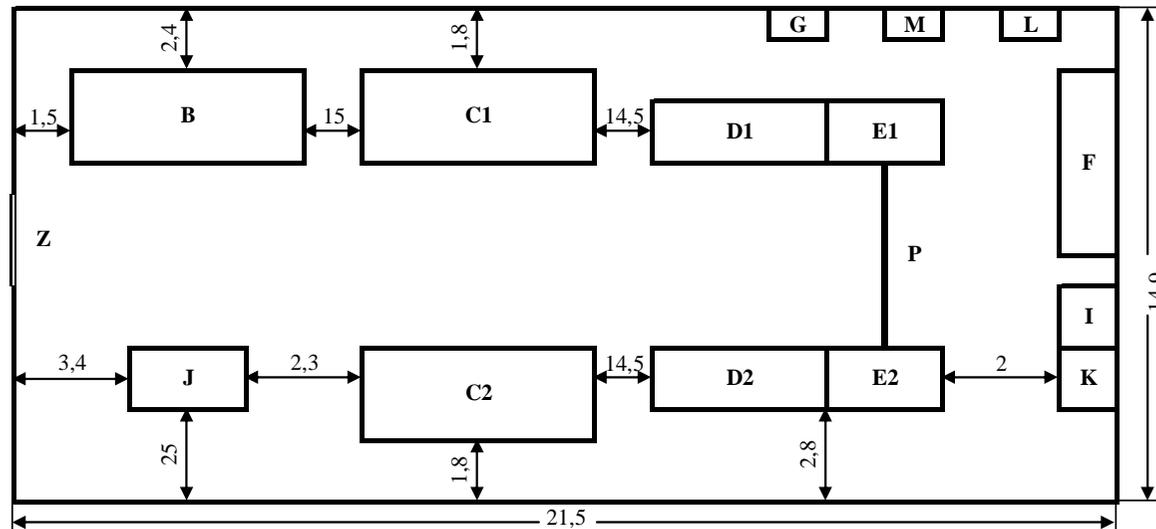
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 31, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar fatiga por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 22.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	39,49	14.026	47.861	4.230	14.432
Transformador 2	66,9	39,27	13.720	46.816	4.133	14.102
Rectificador 1	39,8	36,92	6.202	21.162	1.847	6.301
Rectificador 2	39,8	36,08	5.497	18.758	1.630	5562
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	57,9312	29,54	54	183	15	52
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	17,86	33	1.313	4.480	383	1.308
Tablero Cargador de Baterías	15	30,09	186	633	53	182
Resistencias Superiores	0,0518	87,9	381	1.301	24	83
Balastros Inferiores	0,0518	280,6	1.639	5.592	241	823
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			42.831 / 144.616			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			12.503 / 42.664			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			5.550 / 18.938			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			73.061 / 249305 / 21			
Q [m ³ /s]			18			

4.1.6.- Subestación Transfo-rectificadora Propatria.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN PROPATRIA.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	I	Tablero Cargador de Baterías	2,65	1,87	0,8	15
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	J	Transformador Auxiliar	2,64	2,94	1,75	30,4
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,03	2,29	1,87	17,9	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3						

Fig. 4. 11.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Propatria.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
PROPATRIA.**

Tabla 4. 23.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	33,9
Humedad relativa promedio (%)	44,89
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 24.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

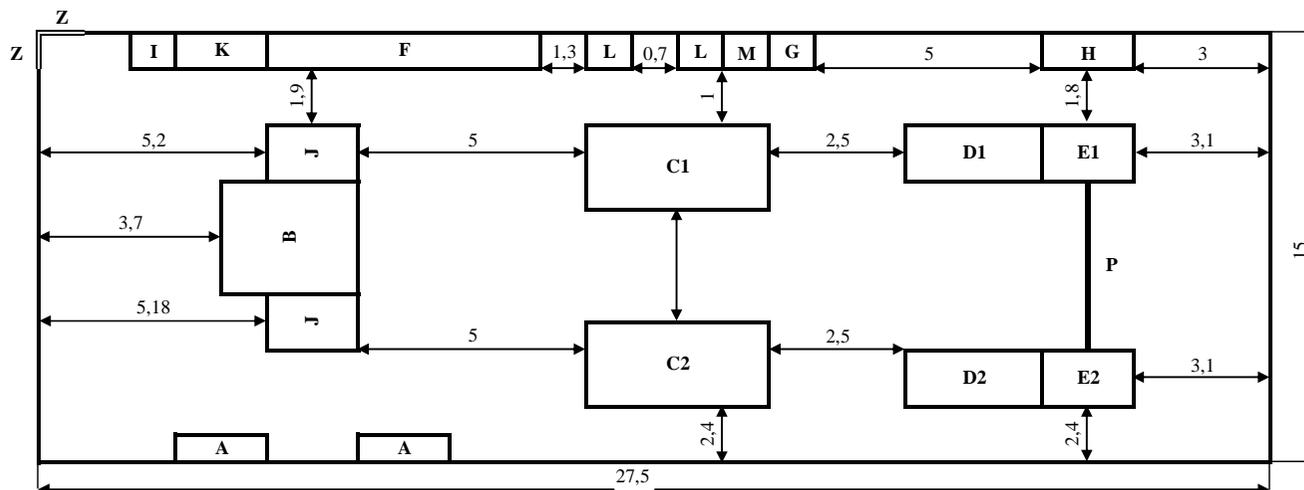
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 37, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 25.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	41,79	17.257	58.886	5.263	17.960
Transformador 2	66,9	41,76	17.210	58.726	5.248	17.908
Rectificador 1	39,8	48,2	15.638	53.362	4.922	16.795
Rectificador 2	39,8	44,7	12.711	43.374	3.933	13.419
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	57,9312	32,7	3.8923	13.284	1.135	3.874
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	36,59	3.227	11.010	959	3.273
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	17,86	35,74	2.838	9.683	840	2.866
Tablero de Control y Mando	37,7264	32,6	2.456	8.381	716	2.442
Tablero Cargador de Baterías	15	42,4	2.982	10.176	912	3.113
Transformador Auxiliar TX	30,4332	32	1.598	5.452	464	1.584
Resistencias Superiores	0,0518	84,6	360	1.228	23	77
Balastos Inferiores	0,0518	270	1571	5.360	222	756
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			81.740 / 278.922			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			24.637 / 84.068			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			2.700 / 9.213			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			130.893 / 446.645 / 37			
Q [m ³ /s]			14			

4.1.7.- Subestación Transfo-rectificadora La Paz.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN LA PAZ.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	I	Tablero Cargador de Baterías	0,6	1,8	0,8	5,52
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	J	Transformador Auxiliar	2,64	2,94	1,75	30,4
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	L	Cajetín de Comunicaciones	-	-	-	-
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,03	2,29	1,87	17,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3	Z	Puerta	-	-	-	-
H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10						

Fig. 4. 12.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora La Paz.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
LA PAZ.**

Tabla 4. 26.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	29,09
Humedad relativa promedio (%)	40,01
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 27.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

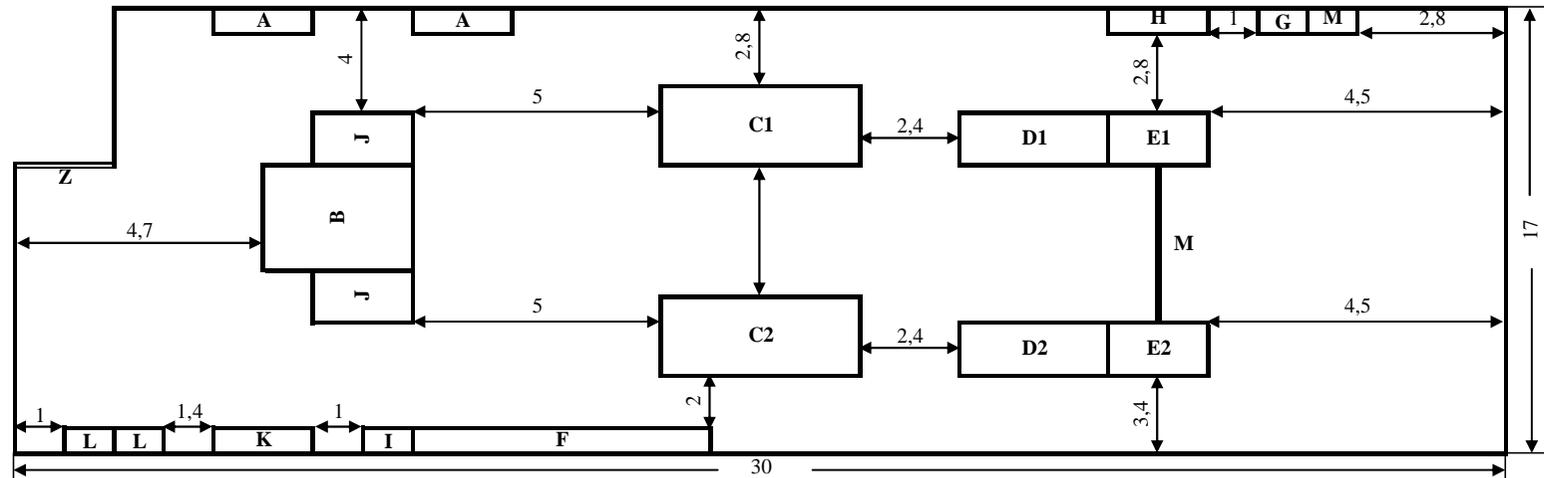
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 29, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar fatiga por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 28.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T ^{Superficial} (°C)	q _{convectado}		q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	34	6.319	21.563	1.855	6.329
Transformador 2	66,9	32,98	4.899	16.718	1.431	4.882
Rectificador 1	39,8	32,17	2.229	7.605	649	2.335
Rectificador 2	39,8	33,03	2.953	10.077	863	2.943
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	57,9312	30,51	1.230	4.197	355	1.211
Disyuntor y Tablero de 750Vcc 1	17,86	29,89	146	498	42	143
Disyuntor y Tablero de 750Vcc 2	17,86	29,66	58	199	17	57
Tablero Cargador de Baterías	5,52	32,24	318	1.086	93	316
Transformador Auxiliar Tx1	30,4332	33,08	2.286	7.802	668	2.279
Transformador Auxiliar Tx2	30,4332	31,18	1.072	3.659	310	1.059
Resistencias Superiores	0,0518	79,9	329	1.122	20	69
Balastros Inferiores	0,0518	287	1681	5.735	254	866
$\sum q_{convectado}$			[W] / [BTU / hr]		23.609/ 88.615	
$\sum q_{irradiado}$			[W] / [BTU / hr]		6.579 / 24.800	
q_{il}			[W] / [BTU / hr]		5.250 / 17.915	
q_{total}			[W] / [BTU / hr] / [TON]		42.526 / 145.110 / 12	
Q			[m ³ /s]		12	

4.1.8.- Subestación Transfo-rectificadora Maternidad.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN MATERNIDAD.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	I	Tablero Cargador de Baterías	0,6	1,8	0,8	5,52
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	4,43	2,83	3,23	57,9	J	Transformador Auxiliar	2,64	2,94	1,75	30,4
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	K	Celdas de Distribución Auxiliar	2,78	2,29	0,53	16,6
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	L	Cajetín de Comunicaciones	-	-	-	-
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,03	2,29	1,87	17,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	P	Puente de Conexión	-	-	-	-
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3	Z	Puerta	-	-	-	-
H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10						

Fig. 4. 13.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Maternidad.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
MATERNIDAD.**

Tabla 4. 29.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	34,4
Humedad relativa promedio (%)	37,9
Velocidad del aire promedio (m/s)	0
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 30.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

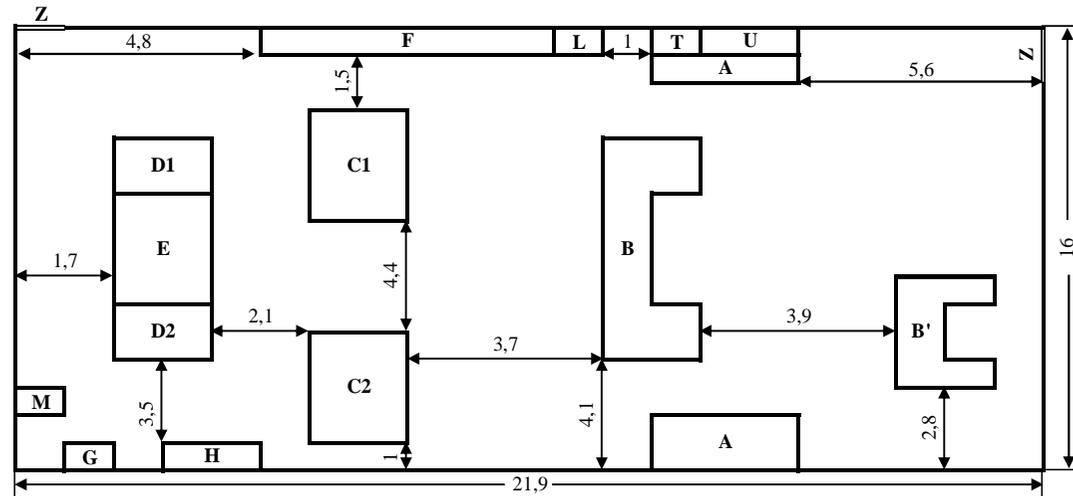
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 36, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 31.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	66,9	42,07	18.458	62.986	5.653	19.291
Transformador 2	66,9	40,29	17.647	60.217	5.389	18.390
Rectificador 1	39,8	39,64	9.017	30.770	2.730	9.315
Rectificador 2	39,8	35,04	8.479	28.932	2.559	8.731
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	57,9312	35,04	6.745	23.016	1.990	6.790
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	17,86	38,2	3.263	11.136	978	3.337
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	17,86	38,82	3.497	11.932	1.051	3.586
Tablero de Control y Mando	37,7264	35,45	4.718	16.100	1395	4.759
Tableros Auxiliares	16,6332	34,34	1.692	5.774	497	1.698
Transformador Auxiliar Tx1	30,4332	36,96	4.772	16.283	1421	4.849
Transformador Auxiliar Tx2	30,4332	36,34	4.374	14.925	1299	4.431
Resistencias Superiores	0,0518	70,2	265	906	16	53
Balastros Inferiores	0,0518	247	1.420	4.844	183	623
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			84.581 / 301.797			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			26.399 / 90.081			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			900 / 3.071			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			138.891 / 473.939 / 39			
Q [m ³ /s]			14			

4.1.9.- Subestación Transfo-rectificadora El Valle.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN EL VALLE.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	7,7	2,24	2,34	62,9	L	Cajetín de Comunicaciones	-	-	-	-
B'	Disyuntores y Tableros 30 kVca	-	-	-	-	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
C	Transformador	4,2	3,24	1,89	47,4	T	Sistema de Emergencia Distribución 48Vca / 120 Vcc	1,5	2,15	0,62	10,046
D	Rectificador de Potencia	2,10	2,20	1,53	19,2	U	Tablero Auxiliar SET	1,56	2,35	0,54	10,7124
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	3,63	2,87	1,80	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-
F	Tableros de Control y Mando	4,30	2,29	0,84	27,2						
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3						

Fig. 4. 14.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora El Valle.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
EL VALLE.**

Tabla 4. 32.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	35,99
Humedad relativa promedio (%)	36,48
Velocidad del aire promedio (m/s)	0.,09
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 33.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

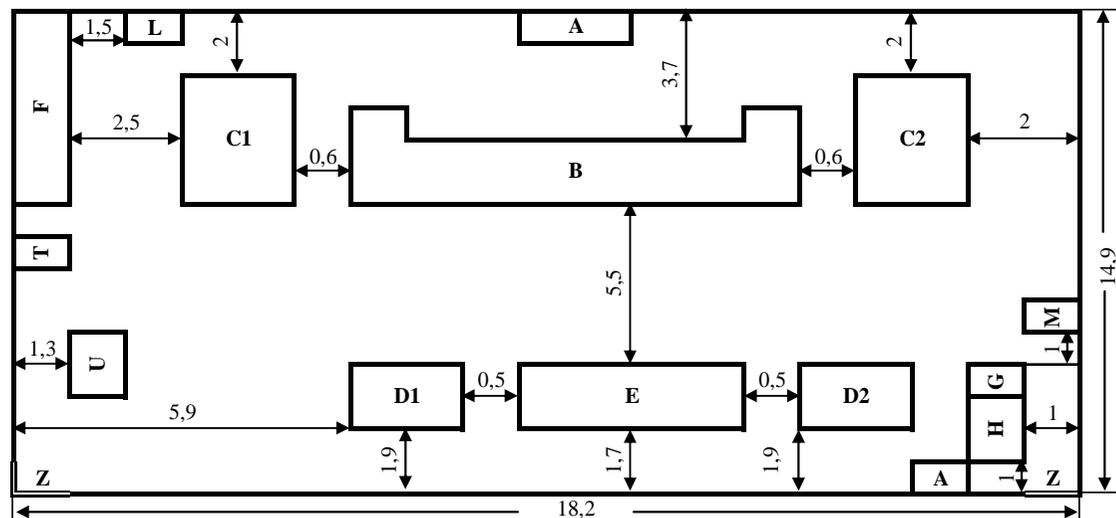
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 39, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede causar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 34.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T ^{Superficial} (°C)	q _{convectado}		i _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	47,4012	61,78	32.130	109.638	10.806	36.872
Transformador 2	47,4012	60,62	30.980	105.713	10.361	35.353
Rectificador 1	19,185	43,18	5.511	18.804	1.692	5.774
Rectificador 2	19,185	44,27	5.949	20.301	1.837	6.267
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	62,9972	39,8	13.626	46.497	4.115	14.043
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	37,7022	33,72	3.343	11.407	980	3.343
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 2	37,7022	35,92	5.085	17.351	1.507	5.141
Tablero de Control y Mando	27,1532	33,64	2.363	8.064	692	2.363
Tableros Auxiliares	10,7124	35,46	1.340	4.572	396	1.351
CTN	11,3	32,95	820	2.798	239	815
Balastos Inferiores	0,0518	171,2	463	1.580	86	294
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			101.610 / 346.722			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			32.711 / 111.619			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			825 / 2.815			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			162.174 / 553.388 / 46			
Q [m ³ /s]			14			

4.1.10.- Subestación Transfo-rectificadora Los Símbolos.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN LOS SÍMBOLOS.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
A	Tomas 30 kVca	-	-	-	-	H	Caja de Retorno Negativo	1,87	1,83	0,57	10
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	7,7	2,24	2,34	62,9	L	Cajetín de Comunicaciones	-	-	-	-
C	Transformador	4,06	3,04	3,84	66,9	M	Auxiliar CTN	0,74	0,85	0,46	2,1
D	Rectificador de Potencia	3,60	2,83	2,10	39,8	T	Sistema de Emergencia Distribución 48Vca / 120 Vcc	1,5	2,15	0,62	10,046
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	2,03	2,29	1,87	17,9						
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	U	Tablero Auxiliar SET	1,56	2,35	0,54	10,7124
G	CTN	1,03	2,31	1,16	11,3	Z	Puerta	-	-	-	-

Fig. 4. 15.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos..

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
LOS SÍMBOLOS.**

Tabla 4. 35.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	39,6
Humedad relativa promedio (%)	29,42
Velocidad del aire promedio (m/s)	0.,1507
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 36.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

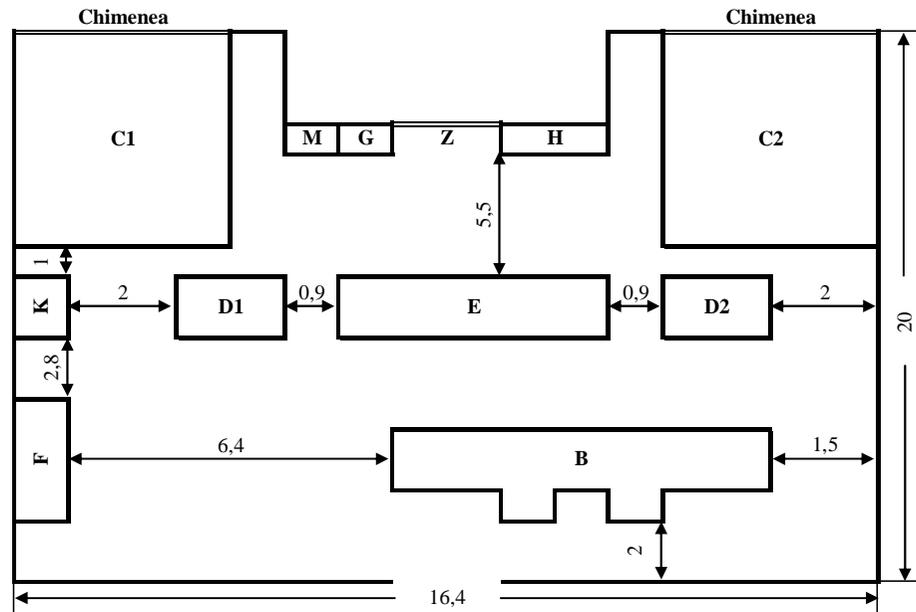
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 43, El régimen de temperaturas y humedades relativas genera una gran posibilidad de golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora

Tabla 4. 37.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	q _{convectado}		q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	47,4012	61,81	32.163	109.751	10.819	36.917
Transformador 2	47,4012	68,08	38.401	131.037	13315	45.436
Rectificador 1	19,185	45,96	6.630	22.623	2.064	7.042
Rectificador 2	19,185	44,27	5.949	20.301	1.837	6.267
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	37,7022	35,99	5.138	17.531	1.523	5.196
Tablero de Control y Mando	27,1532	38,7	5.246	17.901	1.576	5.377
Tableros Auxiliares	10,7124	37,01	1.690	5.765	503	1.717
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			95.217 / 324.908			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			31.636 / 107.953			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			750 / 2559,225			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			153.124 / 522.504 / 44			
Q [m ³ /s]			10			

4.1.11.- Subestación Transfo-rectificadora Nuevo Circo.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN NUEVO CIRCO.



Medidas en metros

Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos		Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
		largo	alto	ancho				largo	alto	ancho	
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca	7,86	2,24	2,39	67,5	G	CTN	0,94	2,10	1,02	9,19
C	Transformador	7,38	2,32	3,65	78,1	H	Caja de Retorno Negativo	1,84	1,80	0,55	9,62
D	Rectificador de Potencia	2,55	2,20	2,03	25,3	K	Celdas de Distribución Auxiliar	1,83	2,28	0,66	12,6
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc	4,38	2,20	1,63	36,3	M	Auxiliar CTN	0,85	0,88	0,49	2,77
F	Tableros de Control y Mando	6,44	2,28	0,76	37,7	Z	Puerta	-	-	-	-

Fig. 4. 16.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
NUEVO CIRCO.**

Tabla 4. 38.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	34,15
Humedad relativa promedio (%)	39,27
Velocidad del aire promedio (m/s)	0,01
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 39.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

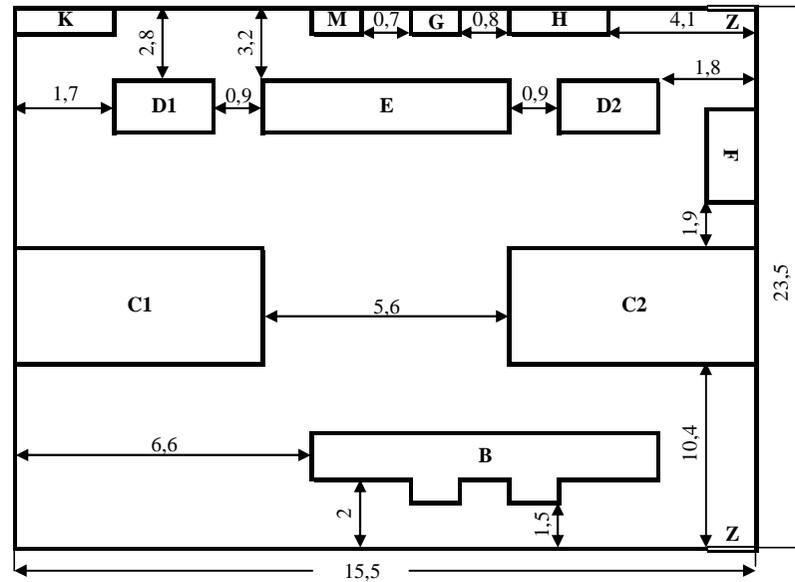
Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 36, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede generar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 40.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	78,1162	65,19	58.544	199.770	20.018	68.306
Transformador 2	78,1162	66,39	60.513	206.487	20.811	71.014
Rectificador 1	25,3285	39,82	5.490	18.734	1.658	5.659
Disyuntor y Tablero de 30 kVca	67,4798	31,14	2.330	7.952	674	2.301
Disyuntor y Tablero de 750 Vcc 1	36,2969	32,57	2.340	7.985	682	2.327
Tablero de Control y Mando	37,7264	33,62	3.264	11.138	956	3.263
CTN	9,1908	31,57	399	1.361	116	395
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			138.370 / 453.427			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			46.574 / 153.264			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			3.600 / 12.284			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			217.675 / 742.771 / 64			
Q [m ³ /s]			23			

4.1.12.- Subestación Transfo-rectificadora Zona Rental.

CROQUIS DE LA SUBESTACIÓN ZONA RENTAL.



Medidas en Metros

Equipos	Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)	Equipos	Dimensiones (m)			Área Superficial Total (m ²)
	largo	alto	ancho			largo	alto	ancho	
B	Disyuntores y Tableros 30 kVca			67,5	G	CTN			9,19
C	Transformador			78,1	H	Caja de Retorno Negativo			9,62
D	Rectificador de Potencia			25,3	K	Celdas de Distribución Auxiliar			12,6
E	Disyuntores y Tableros 750 Vcc			36,3	M	Auxiliar CTN			2,77
F	Tableros de Control y Mando			37,7	Z	Puerta			-

Fig. 4. 17.- Croquis y ubicación de los equipos en la S/E Transfo-rectificadora Zona Rental.

**TABLAS DE RESULTADOS RESUMEN DE LA SUBESTACIÓN
ZONA RENTAL.**

Tabla 4. 41.- Resultados obtenidos de las mediciones medio-ambientales.

Temperatura promedio (°C)	33,65
Humedad relativa promedio (%)	45,73
Velocidad del aire promedio (m/s)	0,093
Transferencia de calor por convección del tipo:	Natural
Coefficiente convectivo usado [W/m ² .K]	21

Tabla 4. 42.- Resultados obtenidos de la evaluación de confort y estrés térmico.

Zona de confort	La subestación se encuentra fuera de las zonas de confort
Sensación térmica	ST = 37, El régimen de temperaturas y humedades relativas puede generar golpes de calor, insolaciones, calambres, por exposición prolongada o actividad física para el personal presente en la S/E Transfo-rectificadora.

Tabla 4. 43.- Resultados obtenidos de las mediciones termográficas.

Equipos	Área (m ²)	T _{Superficial} (°C)	Q _{convectado}		Q _{irradiado}	
			[W]	[BTU/hr]	[W]	[BTU/hr]
Transformador 1	83,8619	51,84	39.351	134.277	12.609	43.024
Transformador 2	83,8619	58,64	51.326	175.140	17.001	58.011
Rectificador 1	25,3285	35,23	3.048	10.400	900	3.071
Rectificador 2	25,3285	32,53	1.612	5.499	470	1.602
Disyuntor y Tablero de 750Vcc 1	36,2969	29,95	343	1.170	99	337
$\sum q_{convectado}$ [W] / [BTU / hr]			95.679 / 326.487			
$\sum q_{irradiado}$ [W] / [BTU / hr]			31.077 / 106.045			
q_{il} [W] / [BTU / hr]			3.600 / 12.284			
q_{total} [W] / [BTU / hr] / [TON]			156.428 / 533.780 / 44			
Q [m ³ /hr]			18			

4.1.13.- Tablas de condiciones estándar y operación de ventiladores propuestos y los existentes disponibles.

Tabla 4. 44.- Condiciones de operación, equipos propuestos y existentes en el sistema de unidades internacional.

S/E Transfo-rectificadoras	q_{total} (W)	Condiciones de Ventilación Propuestas							Condiciones de Ventilación Existentes		
		Operación		Estándar				MHP^{59} (W)	Estándar		
		Q (m^3/s)	P (Pa)	Q (m^3/s)	P (Pa)	η (%)	BHP (W)		Q (m^3/s)	P (Pa)	BHP (W)
Petare	63.669	10	622	12	719	75-76	11.190	13.988	-	-	-
Chacao	108.346	10	622	12	724	75	12.682	15.853	-	-	-
La California	115.059	13	622	15	721	77-80	14.920	18.650	-	-	-
Parque Carabobo	175.813	11	622	13	736	75-77	13.428	16.785	-	-	-
Plaza Venezuela	73.061	18	622	21	713	80	20.142	25.178	-	-	-
Propatria	130.893	14	622	16	722	77-80	15.666	19.583	-	-	-
La Paz	42.526	12	622	14	711	75-77	13.428	16.785	-	-	-
Maternidad	138.891	14	622	16	725	77-80	16.412	20.515	-	-	-
El Valle	162.174	14	622	16	727	77-80	15.666	19.583	17	435	18.500
Los Símbolos	153.124	10	622	12	735	75-77	11.190	13.988	19	684	18.500
Nuevo Circo	217.675	23	622	27	723	80	26.110	32.638	19	571	14.500
Zona Rental	156.428	18	622	21	722	75-77	17.158	21.448	19	571	14.500

⁵⁹ Estos valores serán presentados en unidades comerciales en la tabla 4.44.

Tabla 4. 45.- Condiciones de operación, equipos propuestos y existentes en el sistema de unidades inglés.

S/E Transfo-rectificadoras	q_{total} (TON)	Condiciones de Ventilación Propuestas								Condiciones de Ventilación Existentes		
		Operación		Estándar				MHP (HP)	Comercial (HP)	Estándar		
		Q (PCM)	P (inH ₂ O)	Q (PCM)	P (inH ₂ O)	η (%)	BHP (HP)			Q (PCM)	P (inH ₂ O)	BHP (HP)
Petare	18	21.189	2,5	24.509	2,89	75-76	15	19	20	-	-	-
Chacao	31	21.189	2,5	24.666	2,91	75	17	21,5	25	-	-	-
La California	13	27.545	2,5	31.948	2,90	77-80	20	25	25	-	-	-
Parque Carabobo	50	23.308	2,5	27.579	2,96	75-77	18	22,5	25	-	-	-
Plaza Venezuela	21	38.140	2,5	43.692	2,86	80	27	34	40	-	-	-
Propatria	37	29.664	2,5	34.437	2,90	77-80	21	26,5	30	-	-	-
La Paz	12	25.427	2,5	29.071	2,86	75-77	18	22,5	25	-	-	-
Maternidad	39	29.664	2,5	34.554	2,91	77-80	22	27,5	30	-	-	-
El Valle	46	29.664	2,5	34.660	2,92	77-80	21	26,5	30	35.000	1,75	25
Los Símbolos	44	21.189	2,5	25.032	2,95	75-77	15	19	20	40.000	2,75	25
Nuevo Circo	64	48.734	2,5	56.617	2,90	80	35	44	50	40.000	2,3	19,5
Zona Rental	44	38.140	2,5	44.241	2,90	75-77	23	29	30	40.000	2,3	19,5

4.1.14.- Tabla de modelos de ventiladores propuestos y los existentes disponibles.

Tabla 4. 46.- Modelos de ventiladores propuestos y existentes en las S/E transfo-rectificadoras.

Subestaciones	Modelos de Ventiladores	
	Existentes	Propuestos
Petare	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
Chacao	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
La California	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B5 - 1750 RPM
Parque Carabobo	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B5 - 1750 RPM
Plaza Venezuela	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
Propatria	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
		Metal Blower. Hongo Helicoidal Serie 550, Modelo HKD-30, 1150 RPM, 1,7 HP
La Paz	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
Maternidad	-	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
El Valle	SIROCCO HOWDEN. Arr 4. Axial Tipo D200LD. 1175 RPM	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
Los Símbolos	SIROCCO HOWDEN. Arr 4. Axial Tipo D200LD. 1175 RPM	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B7 - 1750 RPM
Nuevo Circo	WITT&SOHN. Arr 4. Axial Tipo A-N6T5/VO.1/1250/D/6vz. 1165 RPM	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43B5 - 1750 RPM
Zona Rental	WITT&SOHN. Arr 4. Axial Tipo A-N6T5/VO.1/1250/D/6vz. 1165 RPM	Metal Blower. Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4. TAM 43C7 - 1750 RPM

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se discutirán los resultados de importancia para el cumplimiento de los objetivos de la presente investigación, realizándose un enfoque global seguido de un análisis detallado por subestación.

5.1.- ANÁLISIS GENERALES.

5.1.1.- De los Croquis de las S/E Transfo-rectificadoras.

- En cuanto al área de las S/E transfo-rectificadoras estudiadas, se determinó que todas se encontraron en un rango entre los 530 y los 271 m² siendo de mayor tamaño la subestación La California y la de menor la subestación Los Símbolos.
- En las subestaciones pertenecientes a las Líneas 1 y 2, se observó que los transformadores, rectificadores y disyuntores están ubicados en el área central de las edificaciones.
- En las subestaciones pertenecientes a las Líneas 3 y 4, la distribución de los equipos varía de acuerdo a la edificación, manteniendo siempre el orden lógico de los mismos (Disyuntor de 30 kVca – Transformador – Rectificador – Disyuntor de 750 Vcc).
- Para obtener resultados uniformes, se utilizó la misma cantidad de puntos de control (15) en la mayoría de las subestaciones; salvo el caso de la subestación Zona Rental en donde la distribución de los equipos solo permitió la ubicación de 12 puntos de control.
- La ubicación de los puntos de control se vio afectada en algunas de las subestaciones por el gran tamaño de los equipos, sin embargo los mismos fueron reubicados tratando de no afectar la uniformidad de su distribución.
- A pesar de que las subestaciones llegan a tener alturas hasta de 9 metros, por limitaciones de las herramientas disponibles (medidor de volumen y distancia láser)

solo pudieron evaluarse las variables ambientales hasta los 2,3 metros, sin embargo esta altura se encontró próxima a la altura máxima de los equipos (transformadores 3,8 m), pudiéndose así generar un espectro del perfil de los mismos.

- Todas las distancias medidas en este trabajo, fueron aproximaciones afectadas por la precisión del instrumento de medición utilizado (Cinta métrica, rango de apreciación 0,001 m).
- Cabe destacar que por las restricciones de seguridad del lugar en estudio, todas las inspecciones estuvieron supeditadas por la Gerencia de Operaciones de Metro de Caracas C.A, viéndose afectadas la precisión y el alcance en la toma de mediciones.
- El campo magnético que producen los equipos presentes en la subestación puede generar errores de precisión en los instrumentos de medición electrónicos.

5.1.2.- De los Esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire.

- A través de ellos se observó el comportamiento de las variables medioambientales (temperatura, humedad relativa y velocidad del aire) en toda la extensión de las subestaciones de forma clara.
- El valor de temperatura máxima se registro en la subestación El Valle con un valor de 57,3 °C. El menor valor de temperatura fue de 26,1 °C en la subestación Plaza Venezuela.
- En el caso de la humedad relativa el mayor valor censado fue de 52,7 % en la subestación La Paz y el menor en la subestación Los Símbolos con un 28,5 %.
- Por medio de los esquemas de velocidad del aire, se identificó si la transferencia de calor por convección ocurre de manera natural o forzada. El mayor valor de velocidad de aire observado fue de 3,2 m/s en el punto de control D1 a los 2,3 m en la subestación La Paz.
- Aun cuando se observaron diferencias marcadas entre los valores máximos y mínimos de las variables medioambientales evaluadas; en el 80 % de las áreas en estudio no se presento una variación mayor al 10% de los parámetros medidos en ninguna de las subestaciones.

- En las mediciones realizadas para un mismo punto de control a las tres alturas establecidas (0,6; 1,5; 2,3 m) no se registraron variaciones mayores al 10 % de su valor en más del 80% del área de cada una de las subestaciones evaluadas.
- Observando las temperaturas de bulbo seco censadas en los puntos de control establecidos, se determinó que normalmente los valores más altos se encontraron alrededor de los puntos de control B, C y D que por lo general coinciden con la ubicación de los grupos transfo-rectificadores; Un ejemplo de esto fue la S/E transfo-rectificadora Parque Carabobo donde la temperatura de bulbo seco promedio del ambiente obtenida fue 36,8 °C y los valores de los puntos citados se ubicaron en un rango de 36 °C a 37,9 °C.
- Todos los valores de temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire medidos en este trabajo, fueron aproximaciones afectadas por la precisión de los instrumentos de medición utilizados (Hidro/Termo/Anemómetro y Psicrómetro/Termo/Higrómetro, rango de apreciación 0,1 °C, 0,1 %, 0,1 m/s).
- A pesar de que se encontraron equipos que superan los 2,3 m (Transformadores 3,04 m y Rectificadores 2,84 m), no se contó con las herramientas necesarias para evaluar las variables medioambientales en un rango de alturas que cubriera por completo a estos equipos.

5.1.3.- De los Termogramas.

- Fue posible observar de forma precisa el comportamiento de la temperatura de toda la superficie de los equipos analizados.
- Los grupos transfo-rectificadores mostraron las temperaturas superficiales más elevadas, el mayor valor registrado fue de 67 °C en los transformadores secos de la subestación Nuevo Circo.
- Cuando la temperatura superficial de los equipos se encontró muy próxima a la temperatura de referencia introducida a la cámara termográfica (temperatura del ambiente), esta no fue capaz de establecer una diferencia entre el ambiente y las superficies de los equipos, construyendo termogramas mal definidos y de poca calidad.

- Parámetros como la temperatura ambiente, humedad relativa, emisividad de la superficie y distancia entre la cámara y el objeto; deben ser introducidos al equipo de medición por el operador, pudiéndose generar posibles errores humanos de apreciación en la toma de datos.

5.1.4.- Del Confort y La Sensación Térmica.

- Fue posible comparar la situación de confort térmico de cada subestación con respecto a lo sugerido por ASHRAE.
- Para la evaluación del confort térmico es necesario conocer un mínimo de dos variables involucradas en la carta de zonas de confort ASHRAE, para este proyecto se utilizó la temperatura y humedad relativa promedio de cada subestación.
- Subestaciones como Plaza Venezuela, La Paz y Petare se encontraron entre los menores niveles de sensación térmica ($29 \leq ST \leq 31$), sin embargo el personal de mantenimiento que labora en la mismas puede sufrir de posible fatiga por exposición prolongada o actividad física.
- Las subestaciones Parque Carabobo y Los Símbolos mostraron elevados niveles de sensación térmica ($40 \leq ST \leq 43$) pudiéndose generar enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente dependiendo del tiempo de exposición.
- No fue posible realizar un estudio mas profundo que permitiera evaluar el confort y la sensación térmica de manera precisa (índice de temperatura de globo de bulbo húmedo), ya que no se contó con los equipos necesarios (termómetro de globo) para la medición de las variables involucradas.

5.1.5.- De la Ventilación Instalada en las S/E Transfo-rectificadoras.

- En la mayoría de las subestaciones los ventiladores se encontraron fuera de servicio.
- Las rejillas y los ductos de distribución de aire en muchas de las subestaciones estaban mal distribuidos, deteriorados y hasta desmantelados.
- En todas las subestaciones el movimiento del aire inducido por los ventiladores fue casi nulo.

- Las tasas de flujo volumétrico de aire requeridas para disipar las cargas térmicas estimadas en este Trabajo Especial de Grado resultaron inferiores a las manejadas por los ventiladores presentes en la mayoría de las S/E Transfo-rectificadoras en las que se obtuvo las especificaciones del sistema de ventilación.
- Solo fue posible obtener los datos de los equipos de ventilación en las subestaciones El Valle, Los Símbolos, Nuevo Circo y Zona Rental. En las subestaciones restantes se encontraron placas pintadas y colocadas a diez metros de altura (Propatria), equipos completamente desmantelados (Parque Carabobo) y placas removidas (La Paz), impidiendo la comparación entre los ventiladores presentes y los propuestos para cada S/E transfo-rectificadora.
- Por motivos de seguridad no se autorizó encender o apagar la ventilación en algunas de las subestaciones (La California y Maternidad entre otras), por lo que no fue posible verificar si la ventilación instalada es capaz de remover la carga térmica presente. Además se vio afectada la uniformidad de los resultados generales puesto que no todas las subestaciones pudieron ser evaluadas en su condición más desfavorable.
- Se observó en las S/E transfo-rectificadoras evaluadas que el nivel al que estas se encuentran (calle, andén y mezanina) no fue determinante en la selección del tipo de ventilador (todos los ventiladores propuestos fueron del tipo axial).

5.2.- DE LAS SUBESTACIONES ESTUDIADAS.

A pesar de que el comportamiento de muchos aspectos evaluados tienden a ser similares en todas las subestaciones, durante la realización de este proyecto se notaron particularidades ligadas a cada recinto específico. Es por esto que se procederá a realizar un análisis detallado de las mismas.

5.2.1.- S/E Transfo-rectificadora Petare.

- Con respecto a los equipos, la subestación Petare presenta la particularidad de poseer dos tableros cargadores de baterías uno al lado del otro.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Petare se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 29,3 °C a los 0,6 m; 29,3 °C a los 1,5 m y 29,4 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Petare se observó: Una humedad relativa promedio de 45,7 % a los 0,6 m; 46,4 % a los 1,5 m y 45,9 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Petare se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Petare con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 37,6 °C, temperatura mínima igual a 29 °C y temperatura promedio igual a 31,30 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores.
- Para esta subestación se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida, y a pesar de no ser el caso utilizado para el cálculo de cargas térmicas es importante mencionar que se observó un valor de temperatura máxima igual a 37,6 °C, temperatura mínima igual a 28 °C y temperatura promedio igual a 30,88 °C. Ubicándose nuevamente las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores y observándose una diferencia de temperatura entre la ventilación encendida y apagada no mayor a 1 °C.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Petare con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 49,1 %, humedad relativa mínima igual a 44,3 % y humedad relativa promedio igual a 45,80 %.

- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Petare con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 47,03 %, humedad relativa mínima igual a 44,86 % y humedad relativa promedio igual a 46,05 %. No se presenta una variación mayor al 3 % con respecto a la humedad relativa entre la ventilación encendida y apagada.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Con respecto a la ventilación encendida se puede decir que el movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en los puntos de control A2, B2, D2 y E2, coincidiendo estos con el pasillo interno que forman los grupos transfo-rectificadores. El mayor valor para la velocidad se encontró en el punto de control B2 con 1,8 m/s a los 2,3 metros de altura.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y los disyuntores de 750 Vcc, con temperaturas aproximadas a los 38 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 63,7 kW (18 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Petare es de 10 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente. Sin embargo cuando se encendió solo un ventilador se encontraba operativo.
- Con los valores 31,30 °C y 45,80 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Petare se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 31,30 °C y 45,80 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la

subestación. En Petare el valor de ST fue igual a 31, colocándola en un nivel de precaución.

- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Petare, necesaria para la selección del ventilador fue de 12 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 719 Pa (2,89 in H₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Petare fue de 11,2 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 14 kW (20 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 75 – 76 %.

5.2.2.- S/E Transfo-rectificadora Chacao.

- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Chacao se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 33,1 °C a los 0,6 m; 33,2 °C a los 1,5 m y 33,1 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Chacao se observó: Una humedad relativa promedio de 42,6 % a los 0,6 m; 42,6 % a los 1,5 m y 42,4 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Chacao se observó: Una velocidad del aire promedio (ventilación apagada) de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Chacao con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 42,8 °C, temperatura mínima igual a 33,1 °C y temperatura promedio igual a 34,9 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores y los tableros y disyuntores de 750 Vcc.

- Para esta subestación se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida, y a pesar de no ser el caso utilizado para el cálculo de cargas térmicas es importante mencionar que se observó un valor de temperatura máxima igual a 42,6 °C, temperatura mínima igual a 33,1 °C y temperatura promedio igual a 34,9 °C. Ubicándose nuevamente las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores y los disyuntores de 750 Vcc, observándose una diferencia de temperatura entre la ventilación encendida y apagada no mayor a 0,2 °C.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Chacao con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 49,1 %, humedad relativa mínima igual a 44 % y humedad relativa promedio igual a 42,49 %.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Chacao con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 46,5 %, humedad relativa mínima igual a 44 % y humedad relativa promedio igual a 45,3 %. No se presenta una variación mayor al 3 % con respecto a la humedad relativa entre la ventilación encendida y apagada.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Con respecto a la ventilación encendida se puede decir que el movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en los puntos de control A1, B1, B3, C1 y D2, coincidiendo el maximo con el pasillo interno que forman los grupos transfo-rectificadores. El mayor valor para la velocidad se encontró en el punto de control B1 con 1,1 m/s a los 2,3 metros de altura.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores con temperaturas superiores a los 40 °C.

- Se obtuvo una carga térmica de 108,4 kW (31 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Chacao es de 10 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente.
- Con los valores 34,90 °C y 45,30 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Chacao se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 34,90 °C y 45,30 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Chacao el valor de ST fue igual a 39, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Chacao, necesaria para la selección del ventilador fue de 12 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 724 Pa (2,91 in H₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Chacao fue de 13 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 15.9 W (25 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 75 %.

5.2.3.- S/E Transfo-rectificadora La California.

- Con respecto a los equipos, la subestación La California presenta la particularidad de poseer dos tableros cargadores de baterías uno al lado del otro.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.

- De los puntos de control de la subestación La California se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 31,4 °C a los 0,6 m; 31,4 °C a los 1,5 m y 31,6 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación La California se observó: Una humedad relativa promedio de 36,7 % a los 0,6 m; 37,4 % a los 1,5 m y 37,3 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación La California se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) promedio de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación La California con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 41,3 °C, temperatura mínima igual a 30,4 °C y temperatura promedio igual a 33,61 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores y los tableros y disyuntores de 750 Vcc.
- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida por razones de seguridad.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación La California con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 39,2 %, humedad relativa mínima igual a 34,6 % y humedad relativa promedio igual a 37,2 %.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores con temperaturas superiores a los 40 °C.

- Se obtuvo una carga térmica de 115,1 kW (33 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación La California es de 13 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente.
- Con los valores 33,61 °C y 37,2 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación La California se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 33,61 °C y 37,2 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En La California el valor de ST fue igual a 34, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación La California, necesaria para la selección del ventilador fue de 15 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 721 Pa (2,90 in H₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación La California fue de 15 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 18,7 kW (25 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 77 - 80 %.

5.2.4.- S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.

- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Parque Carabobo se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 36,5 °C a los 0,6 m; 36,8 °C a los 1,5 m y

337,2 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.

- De los puntos de control de la subestación Parque Carabobo se observó: Una humedad relativa promedio de 30,2 % a los 0,6 m; 30,7 % a los 1,5 m y 30 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Parque Carabobo se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) promedio de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Parque Carabobo con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 47,7 °C, temperatura mínima igual a 35,3 °C y temperatura promedio igual a 40,11 °C. Generándose un perfil bastante uniformes de temperaturas con pequeños picos alrededor de los transformadores.
- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida porque se encontraba desmantelado.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Parque Carabobo con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 34 %, humedad relativa mínima igual a 27,8 % y humedad relativa promedio igual a 30,3 %.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y los tableros y disyuntores de 750 Vcc, todos con temperaturas superiores a los 44 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 175,9 kW (50 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.

- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Parque Carabobo es de 11 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente.
- Con los valores 40,11 °C y 30,3 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Parque Carabobo se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 40,11 °C y 30,3 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Parque Carabobo el valor de ST fue igual a 43, colocándola en un nivel de peligro.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Parque Carabobo, necesaria para la selección del ventilador fue de 13 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 736 Pa (2,96 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Parque Carabobo fue de 13,5 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 16,8 kW (25 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 75 - 77 %.

5.2.5.- S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela.

- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Plaza Venezuela se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 27,4 °C a los 0,6 m; 27,7 °C a los 1,5 m y 27,5 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Plaza Venezuela se observó: Una humedad relativa promedio de 45,7 % a los 0,6 m; 45,9 % a los 1,5 m y 45,2 % a

los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.

- De los puntos de control de la subestación Plaza Venezuela se observó: Una velocidad del aire promedio de 0,1 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Plaza Venezuela se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 37,5 °C, temperatura mínima igual a 26,1 °C y temperatura promedio igual a 29,65 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Plaza Venezuela se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 48 %, humedad relativa mínima igual a 42,2 % y humedad relativa promedio igual a 45,62 %.
- La ventilación en la subestación Plaza Venezuela se lleva a cabo de manera natural, los valores máximos, mínimos y promedios resultaron menores a 0,3 m/s para el 80% de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Con respecto a la ventilación se puede decir que el movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en los puntos cercanos a una gran chimenea que se encuentra en la subestación.
- Se detectó un mayor movimiento de aire en los puntos de control C1, D1 y E1, todos con una velocidad de 0,3 m/s a los 0,6 metros de altura.
- Para determinar la velocidad con la que ingresa el aire a la subestación, se midió el área de la chimenea y para diversos puntos de la misma se censó la velocidad, arrojando esto un valor de velocidad de aire de entrada promedio de 1,3 m/s.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y el tablero cargador de baterías, con temperaturas aproximadas a los 40 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 73,1 kW (21 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.

- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Plaza Venezuela es de 18 m³/s.
- Con los valores 29,65 °C y 45,62 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Plaza Venezuela se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 29,65 °C y 45,62 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Plaza Venezuela el valor de ST fue igual a 31, colocándola en un nivel de precaución.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Plaza Venezuela, necesaria para la selección del ventilador fue de 21 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 713 Pa (2,86 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Plaza Venezuela fue de 20,2 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 25,2 kW (40 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 80 %.

5.2.6.- S/E Transfo-rectificadora Propatria.

- Con respecto a los equipos, la subestación Propatria presenta la particularidad de poseer un transformador auxiliar (TX).
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Propatria se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 29,9 °C a los 0,6 m; 29,9 °C a los 1,5 m y 29,9 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.

- De los puntos de control de la subestación Propatria se observó: Una humedad relativa promedio de 44,7 % a los 0,6 m; 44,7 % a los 1,5 m y 45,3 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Propatria se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) promedio de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Propatria con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 43,8 °C, temperatura mínima igual a 29,2 °C y temperatura promedio igual a 33,99 °C. Generándose un perfil bastante uniformes de temperaturas con pequeños picos alrededor de los transformadores.
- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida porque se encontraba descompuesta.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Propatria con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 46,5 %, humedad relativa mínima igual a 43,8 % y humedad relativa promedio igual a 44,89 %.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y los tableros y disyuntores de 750 Vcc, todos con temperaturas superiores a los 41 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 130,9 kW (37 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Propatria es de 14 m³/s.

- El sistema de ventilación funciona extrayendo aire fresco mecánicamente.
- Con los valores 33,99 °C y 44,89 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Propatria se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 33,99 °C y 44,89 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Propatria el valor de ST fue igual a 37, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Propatria, necesaria para la selección del ventilador fue de 16 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 722 Pa (2,90 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Propatria fue de 15,7 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 19,6 kW (30 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 77 - 80 %.

5.2.7.- S/E Transfo-rectificadora La Paz.

- Con respecto a los equipos presenta la particularidad de poseer dos transformadores de auxiliares (TX), uno de cada lado del disyuntor y tablero de 30 kVca.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación La Paz se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 27,1 °C a los 0,6 m; 27,1 °C a los 1,5 m y 27,1 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.

- De los puntos de control de la subestación La Paz se observó: Una humedad relativa promedio de 48,8 % a los 0,6 m; 49 % a los 1,5 m y 49,2 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación La Paz se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) promedio de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación La Paz con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 32,3 °C, temperatura mínima igual a 26,50 °C y temperatura promedio igual a 29,09 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores.
- Para esta subestación se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida, y a pesar de no ser el caso utilizado para el cálculo de cargas térmicas es importante mencionar que se observó un valor de temperatura máxima igual a 32 °C, temperatura mínima igual a 26,20 °C y temperatura promedio igual a 28,88 °C. Ubicándose nuevamente las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores y observándose una diferencia de temperatura entre la ventilación encendida y apagada no mayor a 1 °C.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación La Paz con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 50,4 %, humedad relativa mínima igual a 45,3 % y humedad relativa promedio igual a 49,01 %.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación La Paz con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 52,7 %, humedad relativa mínima igual a 49,8 %, y humedad relativa promedio igual a 51,03 %. No se presenta una variación mayor al 3 % con respecto a la humedad relativa entre la ventilación encendida y apagada.
- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de

toda la subestación, por lo que el un proceso de transferencia de calor por convección es natural.

- Con respecto a la ventilación encendida se puede decir que el movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en los puntos de control A1, A2, A3 y D1, coincidiendo estos con uno de los extremos de la subestacion, específicamente en el pasillo de entrada. El mayor valor para la velocidad se encontró en el punto de control D1 con 3,2 m/s a los 2,3 metros de altura.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores, los tableros y disyuntores de 30 kVca y los TX, con temperaturas aproximadas a los 34 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 42,6 kW (12 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación La Paz es de 12 m³/s.
- Con los valores 29,09 °C y 49,01 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación La Paz se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 29,09 °C y 49,01 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En La Paz el valor de ST fue igual a 29, colocándola en un nivel de precaución.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación La Paz, necesaria para la selección del ventilador fue de 14 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 711 Pa (2,86 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación La Paz fue de 13,5 kW, luego de tomar en cuenta

un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 16,8 kW (25 HP).

- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 75 - 77 %.

5.2.8.- S/E Transfo-rectificadora Maternidad.

- Al igual que la subestación Maternidad posee dos transformadores de auxiliares (TX), uno de cada lado del disyuntor y tablero de 30 kVca.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Maternidad se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 32,1 °C a los 0,6 m; 32,1 °C a los 1,5 m y 32,1 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Maternidad se observó: Una humedad relativa promedio de 37,3 % a los 0,6 m; 37,5 % a los 1,5 m y 37,2 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Maternidad se observó: Una velocidad del aire (ventilación apagada) promedio de 0 m/s a los 0,6 m; 0 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Maternidad con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 40,7 °C, temperatura mínima igual a 31 °C y temperatura promedio igual a 34,4 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores.
- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida por razones de seguridad.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Maternidad con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 42,6 %, humedad relativa mínima igual a 31 % y humedad relativa promedio igual a 37,9 %.

- La ventilación apagada se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde los valores máximos, mínimos y promedios resultaron iguales a cero (0), con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y los disyuntores de 750 Vcc, con temperaturas aproximadas a los 43 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 132,9 kW (38 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Maternidad es de 14 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente. Los dos ventiladores se encontraban apagados.
- Con los valores 34,4 °C y 37,9 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Maternidad se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 34,4 °C y 37,9 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Maternidad el valor de ST fue igual a 36, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Maternidad, necesaria para la selección del ventilador fue de 16 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 725 Pa (2,91 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Maternidad fue de 16,5 kW, luego de tomar en

cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 20,6 kW (30 HP).

- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 77 - 80 %.

5.2.9.- S/E Transfo-rectificadora El Valle.

- Con respecto a los equipos, presenta la particularidad de poseer dos transformadores secos, tableros auxiliares y celdas de distribución independientes.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación El Valle se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 31,7 °C a los 0,6 m; 31,7 °C a los 1,5 m y 31,7 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación El Valle se observó: Una humedad relativa promedio de 36,5 % a los 0,6 m; 36,5 % a los 1,5 m y 36,4 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación El Valle se observó: Una velocidad del aire (ventilación encendida) promedio de 0,2 m/s a los 0,6 m; 0,1 m/s a los 1,5 m y 0,1 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación El Valle con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 52,5 °C, temperatura mínima igual a 30,5 °C y temperatura promedio igual a 35,55 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores, los tableros y disyuntores de 750 Vcc y los tableros y disyuntores de 30 kVca.
- Para esta subestación se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida, y como se eligió este caso para el cálculo de cargas térmicas es importante mencionar que se observó un valor de temperatura máxima igual a 52,7 °C, temperatura mínima igual a 31,1 °C y temperatura promedio igual a 35,98 °C. Ubicándose nuevamente las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores, los tableros y disyuntores de 750 Vcc y los tableros y

disyuntores de 30 kVca, observándose que la temperatura con la ventilación encendida es mayor que con la ventilación apagada.

- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación El Valle con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 43 %, humedad relativa mínima igual a 38,4 % y humedad relativa promedio igual a 40,04 %.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación El Valle con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 37,5 %, humedad relativa mínima igual a 35,5 % y humedad relativa promedio igual a 36,48 %. observándose que la humedad relativa con la ventilación encendida es menor que con la ventilación apagada.
- La ventilación encendida se presentó como el caso más desfavorable para la subestación, en donde se observó lo siguiente: Velocidad el aire máxima igual a 1,1 m/s, Velocidad el aire mínima igual a 0 m/s y Velocidad el aire promedio igual a 0,04 m/s, con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- El movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en la chimenea y en el punto de control D3, que coincide con la ubicación del tablero auxiliar. El mayor valor de velocidad encontrado fue en la chimenea con 1,1 m/s.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los transformadores con temperaturas superiores a los 60 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 164 kW (47 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte. Este valor de carga térmica es elevado para las dimensiones de la edificación.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación El Valle es de 14 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente.

- Con los valores 35,98 °C y 36,48 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación El Valle se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 35,98 °C y 36,48 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En El Valle el valor de ST fue igual a 39, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación El Valle, necesaria para la selección del ventilador fue de 16 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 727 Pa (2,92 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación El Valle fue de 15,7 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 19,6 kW (30 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 77 - 80 %.
- Se encontró que la subestación El Valle actualmente posee un equipo con la capacidad de manejar a condiciones estándar una tasa de flujo volumétrico de aire de 17 m³/s, una presión total de 435 Pa y que requiere un motor de 18,5 kW de potencia.

5.2.10.- S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos.

- Con respecto a los equipos, presenta la particularidad de poseer dos transformadores secos, tableros auxiliares y celdas de distribución independientes.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Los Símbolos se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 34,2 °C a los 0,6 m; 34,5 °C a los 1,5 m y

34,3 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.

- De los puntos de control de la subestación Los Símbolos se observó: Una humedad relativa promedio de 29,4 % a los 0,6 m; 29,5 % a los 1,5 m y 29,3 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Los Símbolos se observó: Una velocidad del aire (ventilación encendida) promedio de 0,1 m/s a los 0,6 m; 0,2 m/s a los 1,5 m y 0,2 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Los Símbolos con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 57,3 °C, temperatura mínima igual a 32,7 °C y temperatura promedio igual a 39,07 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores, los tableros y disyuntores de 750 Vcc y los tableros y disyuntores de 30 kVca.
- Para esta subestación se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación encendida, y como se eligió este caso para el cálculo de cargas térmicas es importante mencionar que se observó un valor de temperatura máxima igual a 57,6 °C, temperatura mínima igual a 33,8 °C y temperatura promedio igual a 39,59 °C. Ubicándose nuevamente las mayores temperaturas alrededor de los grupos transfo-rectificadores, los tableros y disyuntores de 750 Vcc y los tableros y disyuntores de 30 kVca., y observándose que la temperatura con la ventilación encendida es mayor que con la ventilación apagada.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Los Símbolos con la ventilación apagada se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 32,1 %, humedad relativa mínima igual a 30,7 % y humedad relativa promedio igual a 31,45 %.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Los Símbolos con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 30,3 %, humedad relativa mínima igual a 28,5 % y humedad relativa promedio igual a 29,42 %. observándose que la humedad relativa con la ventilación encendida es menor que con la ventilación apagada.

- La ventilación encendida se presentó como el caso mas desfavorable para la subestación, en donde se observó lo siguiente: Velocidad el aire máxima igual a 0,63 m/s, Velocidad el aire mínima igual a 0 m/s y Velocidad el aire promedio igual a 0,16 m/s, con esto se cumple un perfil de velocidades menor a 0,3 m/s a lo largo de toda la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- El movimiento de aire fue perceptible en zonas muy focalizadas, más específicamente en la chimenea y en el punto de control C3, que coincide con la ubicación de los tableros y disyuntores de 30kVca., en donde se encontró el mayor valor de velocidad 1 m/s. a 2,3 m. de altura.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los transformadores con temperaturas superiores a los 60 °C.
- Se obtuvo una carga térmica de 153,2 kW (44 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Los Símbolos es de 10 m³/s.
- El sistema de ventilación funciona suministrando aire fresco mecánicamente.
- Las rejillas de los ductos de suministro de aire no se encuentran dispuestas sobre los equipos mas calientes.
- Con los valores 39,59 °C y 29,42 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Los Símbolos se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 39,59 °C y 29,42 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Los Símbolos el valor de ST fue igual a 43, colocándola en un nivel de peligro.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Los Símbolos, necesaria para la selección del ventilador fue de 12 m³/s.

- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 735 Pa (2,95 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Los Símbolos fue de 11,2 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 14 W (20 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 75 - 77 %.
- Se encontró que la subestación Los Símbolos actualmente posee un equipo con la capacidad de manejar a condiciones estándar una tasa de flujo volumétrico de aire de 19 m³/s, una presión total de 684 Pa y que requiere un motor de 18,5 kW de potencia.

5.2.11.- S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo.

- Con respecto a los equipos, presenta la particularidad de poseer transformadores secos.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 15 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Nuevo Circo se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 30,3 °C a los 0,6 m; 30,3 °C a los 1,5 m y 30,3 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Nuevo Circo se observó: Una humedad relativa promedio de 39,4 % a los 0,6 m; 39,2 % a los 1,5 m y 39,3 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Nuevo Circo se observó: Una velocidad del aire (ventilación encendida) promedio de 0,1 m/s a los 0,6 m; 0,1 m/s a los 1,5 m y 0 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Nuevo Circo con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 54,1 °C,

temperatura mínima igual a 30 °C, y temperatura promedio igual a 34,29 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transformadores secos.

- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación apagada, ya que no se autorizó el apagado de los ventiladores.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Nuevo Circo con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 40 %, humedad relativa mínima igual a 39 % y humedad relativa promedio igual a 39,27 %.
- El flujo de aire se encontró focalizado en las tomas de ventilación distribuidas a lo largo de toda la subestación, más específicamente en los puntos de control A1, E1 y E3. El mayor valor para la velocidad se encontró en el punto de control E3 con 0,8 m/s a los 0,6 y 1,5 metros de altura.
- Los valores máximos, mínimos y promedios resultaron menores a 0,3 m/s para el 80% de la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y a los disyuntores de 750 Vcc, con temperaturas aproximadas a los 67 °C.
- Se observó que la temperatura superficial en los transformadores secos (65,2 °C) es mucho mayor que la de los sumergidos en aceite (45 °C) presentes en las Líneas 1 y 2.
- La combinación del gran tamaño de los transformadores secos y su alta temperatura superficial hicieron de este equipo el mayor disipador de calor de todas las subestaciones evaluadas.
- Se obtuvo una carga térmica de 226,3 kW (64 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Nuevo Circo es de 23 m³/s.

- La ventilación se encuentra suministrando aire, los ventiladores se encontraban encendidos.
- La distribución de aire se realiza mediante tres (3) tanquillas que se encuentran a nivel del suelo.
- A diferencia del resto de las subestaciones, las pertenecientes a la Línea 4 presentan el movimiento de aire correspondiente a la ventilación de manera ascendente.
- El acceso a los ventiladores no fue permitido.
- Con los valores 34,29 °C y 39,27 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Nuevo Circo se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 34,29 °C y 39,27 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Nuevo Circo el valor de ST fue igual a 36, colocándola en un nivel de precaución extrema.
- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Nuevo Circo, necesaria para la selección del ventilador fue de 27 m³/s.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 723 Pa (2,90 inH₂O).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Nuevo Circo fue de 26,2 kW, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de 1,25 se obtuvo una potencia del motor total de 32,7 kW (50 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de 80 %.
- Se encontró que la subestación Nuevo Circo actualmente posee un equipo con la capacidad de manejar a condiciones estándar una tasa de flujo volumétrico de aire de 19 m³/s, una presión total de 571 Pa y que requiere un motor de 14,5 kW de potencia.

5.2.12.- S/E Transfo-rectificadora Zona Rental.

- Con respecto a los equipos, presenta la particularidad de poseer transformadores secos.
- La distribución de los equipos y las dimensiones del recinto permitieron la ubicación de 12 puntos de control.
- De los puntos de control de la subestación Zona Rental se observó: Una temperatura de bulbo seco promedio de 27,6 °C a los 0,6 m; 27,7 °C a los 1,5 m y 27,7 °C a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Zona Rental se observó: Una humedad relativa promedio de 45,7 % a los 0,6 m; 45,7 % a los 1,5 m y 45,7 % a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- De los puntos de control de la subestación Zona Rental se observó: Una velocidad del aire (ventilación encendida) promedio de 0,3 m/s a los 0,6 m; 0,2 m/s a los 1,5 m y 0,1 m/s a los 2,3 m. Presentándose así una variación menor al 10 % entre las diferentes alturas.
- Del esquema de temperatura elaborado para la subestación Zona Rental con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Temperatura máxima igual a 53 °C, temperatura mínima igual a 27,4 °C, y temperatura promedio igual a 33,65 °C. Ubicándose las mayores temperaturas alrededor de los grupos transformadores secos.
- Para esta subestación no se pudo hacer la evaluación de las variables medioambientales con la ventilación apagada, ya que no se autorizó el apagado de los ventiladores.
- Del esquema de humedad relativa elaborado para la subestación Zona Rental con la ventilación encendida se observó lo siguiente: Humedad relativa máxima igual a 46,8 %, humedad relativa mínima igual a 45 % y humedad relativa promedio igual a 45,74 %.
- El flujo de aire se encontró focalizado en las tomas de ventilación distribuidas a lo largo de toda la subestación. El mayor valor para la velocidad se encontró en el punto de control B3 con 0,8 m/s a los 1,5 metros de altura.

- Los valores máximos, mínimos y promedios resultaron menores a 0,3 m/s para el 80% de la subestación, por lo que el proceso de transferencia de calor por convección es natural.
- Por medio de las termografías se pudo evaluar que para esta subestación los equipos que se encontraban disipando la mayor tasa de flujo de calor al ambiente fueron los grupos transfo-rectificadores y a los disyuntores de 750 Vcc, con temperaturas aproximadas a los 59 °C.
- Se observó que la temperatura superficial en los transformadores secos (65,2 °C) es mucho mayor que la de los sumergidos en aceite (45 °C) presentes en las Líneas 1 y 2.
- La combinación del gran tamaño de los transformadores secos y su alta temperatura superficial hicieron de este equipo el mayor disipador de calor de todas las subestaciones evaluadas.
- Se obtuvo una carga térmica de 156,5 kW (44 Toneladas de refrigeración), siendo el componente convectivo el que genera un mayor aporte.
- La tasa de flujo volumétrico de aire requerida para remover la carga térmica de la subestación Zona Rental es de 18 m³/s.
- La ventilación se encuentra suministrando aire, los ventiladores se encontraban encendidos.
- La distribución de aire se realiza mediante tres (3) tanquillas que se encuentran a nivel del suelo.
- A diferencia del resto de las subestaciones, las pertenecientes a la Línea 4 presentan el movimiento de aire correspondiente a la ventilación de manera ascendente.
- El acceso a los ventiladores no fue permitido.
- Con los valores 33,65 °C y 45,74 % de temperatura de bulbo seco y humedad relativa respectivamente, se determinó de acuerdo a la carta de zonas de confort de ASHRAE que la subestación Zona Rental se encuentra fuera de confort.
- Con los valores 33,65 °C y 45,74 % de temperatura y humedad relativa respectivamente, se determinó mediante la carta de sensación térmica los posibles síndromes provocados por calor en los operadores que laboran en la subestación. En Zona Rental el valor de ST fue igual a 37, colocándola en un nivel de precaución extrema.

- La tasa de flujo volumétrico de aire a condiciones estándar obtenida para remover la carga térmica de la subestación Zona Rental, necesaria para la selección del ventilador fue de $21 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La presión total a condiciones estándar requerida para la selección del ventilador fue de 722 Pa ($2,90 \text{ inH}_2\text{O}$).
- La potencia del motor a condiciones estándar obtenida de las curvas de los ventiladores para la subestación Zona Rental fue de $17,2 \text{ kW}$, luego de tomar en cuenta un factor de servicio de $1,25$ se obtuvo una potencia del motor total de $21,5 \text{ kW}$ (30 HP).
- Según los valores de la tasa de flujo volumétrico de aire y presión total se obtuvo un equipo con una eficiencia de $75 - 77 \%$.
- Se encontró que la subestación Zona Rental actualmente posee un equipo con la capacidad de manejar a condiciones estándar una tasa de flujo volumétrico de aire de $19 \text{ m}^3/\text{s}$, una presión total de 571 Pa y que requiere un motor de $14,5 \text{ kW}$ de potencia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó, de forma general y con respecto a cada una de las subestaciones:

6.1.- CONCLUSIONES GENERALES.

6.1.1.- De la Metodología de Medición.

- Del reconocimiento de las subestaciones en estudio se pudo concluir que la distribución de los equipos en general es la misma en la mayoría de las subestaciones, presentándose algunas particularidades en las Líneas 1 y 2 con respecto a las Líneas 3 y 4, sin embargo todas están orientadas de manera que coincidan con el orden lógico del funcionamiento de los equipos.
- Permitió de manera satisfactoria y a través de mediciones sencillas construir esquemas que representaron el comportamiento de las variables medioambientales en zonas amplias.
- El uso de la cámara termográfica constituye un aporte tecnológico de gran importancia, pues muestra de manera sencilla el comportamiento térmico de las superficies evaluadas.
- Las termografías permitieron estimar la tasa de energía disipada por los equipos al ambiente de manera más precisa que otros métodos, como el del efecto Joule.
- La técnica termográfica es de gran utilidad pero depende del criterio del operador, parámetros como la emisividad y la distancia entre el objeto estudiado y la cámara quedan a juicio del mismo, es por esto que se llegará a resultados satisfactorios siempre que las variables sean seleccionadas bajo el criterio apropiado.
- La utilización de una mayor cantidad de puntos de control (siempre que el área en estudio lo permita) generará un mejor perfil del comportamiento de las variables medioambientales.

6.1.2.- De la Metodología de Cálculo.

- Permitted obtener resultados precisos utilizando un método basado en el análisis térmico, fundamentado en ecuaciones básicas de transferencia de calor.
- El coeficiente convectivo h_c seleccionado proporcionó resultados muy próximos a los esperados, dando como resultados valores de caudales semejantes e inferiores a los manejados por los equipos existentes.
- A pesar de que la temperatura de diseño recomendada seleccionada para el proyecto, se fundamenta en un trabajo experimental basado en datos climatológicos por hora y mes de los últimos 10 años de las estaciones meteorológicas Cajigal, La Carlota y U.C.V. para la ciudad de Caracas, es importante mencionar que dicha temperatura se encuentra fuera de las zonas de confort establecidas por ASHRAE.
- La estimación de la carga térmica se llevo a cabo seleccionando la mayor temperatura de diseño, el mayor valor de h_c dentro del rango indicado, así como la mayor temperatura superficial obtenida de las termografías de un mismo equipo con la finalidad de cubrir el caso más desfavorable.
- Observando que la tasa de flujo de calor convectada resultó mucho mayor que la irradiada, se puede concluir que el criterio de selección para el factor de vista usado fue acertado, ya que este no afectó de manera apreciable los resultados y objetivos del presente trabajo.

6.1.3.- De los Esquemas de Temperatura, Humedad Relativa y Velocidad del Aire.

- La temperatura y la humedad relativa en las tres alturas evaluadas, presentaron un comportamiento uniforme, no se observaron variaciones mayores al 10%.
- Pudo observarse que los equipos que disipan calor lo hacen en su mayoría por la cara superior, esto se evidencia por la marcada diferencia entre la temperatura superficial de un equipo y la temperatura de bulbo seco de sus laterales adyacentes. Cabe destacar que por restricciones de seguridad de la compañía no se permitió el contacto cercano a los equipos, limitándose así el estudio en las aéreas superiores.

- Los esquemas de velocidad resultaron muy efectivos en el estudio del comportamiento de la velocidad del aire en los ambientes, lo que permitió realizar la selección del método de cálculo (Transferencia de calor por convección natural o forzada).

6.1.4.- De las Termografías.

- De las termografías se pudo concluir que los equipos con una mayor temperatura superficial son los grupos transfo-rectificadores seguidos de los disyuntores de 750 Vcc.
- Se puede concluir que los equipos presentaron temperaturas superficiales más elevadas en las aéreas verticales superiores que en las inferiores, en la mayoría de los casos.
- Del análisis de los termogramas correspondientes a los rectificadores, se pudo concluir que las altas temperaturas en los mismos se encuentran asociadas a las resistencias de los balastos, brazos de diodos y bobina de interfase.
- Del análisis de los termogramas se concluye que la temperatura superficial de los transformadores secos es notablemente mayor que la de los sumergidos en aceite.

6.1.5.- De la Ventilación.

- A pesar de que la mayoría de las subestaciones evaluadas poseen sistemas de ventilación mecánica, no se registró una velocidad de aire mayor a 0,3 m/s, indicando esto que la tasa de flujo de calor convectada por los equipos se esta realizando de manera natural.
- El movimiento forzado del aire en forma descendente contrarresta el ascenso natural del aire caliente y crea una zona de acumulación de calor en algunas subestaciones.
- La distribución del aire fresco no se realiza adecuadamente, la ventilación se encuentra muy focalizada, las corrientes de aire que deben aprovecharse para ventilar los equipos calientes, se encuentran en zonas vacías.

- La extracción se mostró como un método viable para la ventilación de las subestaciones, sin embargo la errada ubicación de los sensores de temperatura no permite el completo aprovechamiento de este tipo de sistema.
- La diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior de los equipos, permitió concluir que la ventilación no se está realizando de manera adecuada; de ser así la temperatura superficial de los equipos disminuiría y sería más uniforme.
- En las subestaciones en las que se pudo realizar mediciones con la ventilación apagada y encendida se muestra como dichos sistemas no afectan la temperatura del recinto, ya que la variación no es mayor a los 2 °C.
- Las tasas de flujo volumétrico de aire requeridas para disipar la carga térmica estimadas en este Trabajo Especial de Grado resultaron inferiores a las manejadas por los ventiladores presentes en la mayoría de las S/E Transfo-rectificadoras cuyas especificaciones se encontraron disponibles, sin embargo la temperatura superficial de los equipos y la sensación térmica de los trabajadores allí presentes se encontraron fuera de los límites permisibles. De esto puede concluirse que los problemas de origen térmico en las subestaciones son causados por motivos ajenos a la capacidad de los ventiladores como por ejemplo la filosofía de movimiento de aire del sistema de ventilación (suministro o extracción).
- El valor de presión total seleccionado para dimensionar los ventiladores recomendados, cubrió un gran espectro de las magnitudes de pérdidas que puedan presentarse.
- Se puede concluir que la diferencia de temperaturas entre el aire interior y el exterior del recinto tiene una influencia directa sobre la cantidad de aire requerido para disipar la carga térmica en las S/E transfo-rectificadoras.
- La selección de una temperatura de diseño recomendada para la ventilación de 26,25 °C, arrojó resultados satisfactorios, puesto que la tasa de flujo volumétrico estimada resultó muy próxima y superior a la manejada por los equipos instalados en las S/E transfo-rectificadoras de los cuales se encontraron especificaciones.

6.1.6.- Del Confort y La Sensación Térmica.

- Según lo establecido en la carta de zonas de confort de ASHRAE, ninguna de las subestaciones evaluadas se encontró en confort térmico.
- Como la temperatura de diseño recomendada seleccionada para este proyecto se encuentra fuera de las zonas de confort establecidas por ASHRAE, se debe concluir que los sistemas de ventilación existentes no son suficientes para el acondicionamiento y el confort de las áreas evaluadas.
- Debido a que ninguna de las subestaciones se encontró en confort, fue necesaria la sugerencia de alertas para evitar la sensación de malestar térmico en el personal que allí labora ya que las mismas se ubicaron en categorías de: precaución, precaución extrema y peligro.

6.2.- DE LAS SUBESTACIONES EVALUADAS.

6.2.1.- S/E Transfo-rectificadora Petare.

- En comparación con el rango de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Petare se ubicó en las de baja magnitud con un valor de 63,7 kW (18 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación no se encuentra en sus condiciones óptimas dado que los ductos que sirven como toma de aire a los ventiladores se encontraron desarmados en algunos tramos, los filtros de alimentación de aire se hallaron obstruidos con algunos desperdicios y las rejillas de los ductos de suministro están obstruidas por polvo, mayormente dobladas y mal sujetadas.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Petare fue de 10 m³/s.
- Cuando se encendieron los ventiladores, solo uno se encontraba operativo.
- La subestación Petare se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Petare fue una de las que presentó un menor riesgo laboral para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución.

- Los operadores que realizan el mantenimiento de los equipos pueden sufrir posible fatiga por exposición prolongada o actividad física, dependiendo del tiempo de exposición.

6.2.2.- S/E Transfo-rectificadora Chacao.

- En comparación con el rango de cargas térmicas obtenidas en todas las zonas de estudio, la subestación Chacao se ubicó en las de baja magnitud con un valor de 108,4 kW (31 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación no se encuentra en sus condiciones óptimas dado que los filtros de alimentación de aire se hallaron obstruidos con algunos desperdicios y las rejillas de los ductos de suministro están completamente obstruidas por polvo y aparentemente cubiertas con hongos.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Chacao fue de 10 m³/s.
- La subestación Chacao se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Chacao presentó un riesgo laboral medio para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.

6.2.3.- S/E Transfo-rectificadora La California.

- En comparación con el rango de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación La California se ubicó en las de magnitud media con un valor de 115,1 kW (33 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación se encuentra físicamente en buenas condiciones.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación La California fue de 13 m³/s.
- La subestación La California se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.

- La subestación La California presentó un riesgo laboral medio para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.

6.2.4.- S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo.

- En comparación con el rango de cargas térmicas obtenidas en todas las zonas de estudio, la subestación Parque Carabobo se ubicó en las de alta magnitud con un valor de 175,9 kW (50 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación se encontró completamente desarmado.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Parque Carabobo fue de 11 m³/s.
- La subestación Parque Carabobo se encuentra tan fuera de confort que no pudo ser evaluada por medio de la carta de zonas de confort ASHRAE, ya que los valores de temperatura promedio son tan altos que la escala de la misma no abarca dicho rango.
- La subestación Parque Carabobo presentó un riesgo laboral relativamente alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de peligro.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos tienen una alta posibilidad de sufrir enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.

6.2.5.- S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Plaza Venezuela se ubicó en las de baja magnitud con un valor de 73,1 kW (21 Toneladas de refrigeración).
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Plaza Venezuela fue de 18 m³/s.

- La subestación Plaza Venezuela se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Plaza Venezuela que presentó un menor riesgo laboral para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución.
- Como la subestación se encuentra fuera de confort los operadores que realizan el mantenimiento de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como posible fatiga por exposición prolongada o actividad física.

6.2.6.- S/E Transfo-rectificadora Propatria.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Propatria se ubicó en las de magnitud media con un valor de 130,9 kW (37 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación no se encuentra en sus condiciones óptimas dado que los filtros de alimentación de aire se hallaron obstruidos con algunos desperdicios y polvo.
- Al momento de la evaluación los hongos de extracción de la subestación Propatria no se encontraron operativos.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Propatria fue de 14 m³/s.
- La subestación Propatria se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Propatria presentó un riesgo laboral relativamente alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.
- En el capítulo IV fueron recomendados nuevos hongos de extracción para la subestación Propatria, sin embargo al fallar dos (2) de los seis (6) hongos a instalar no se estaría cubriendo la tasa de flujo volumétrico de aire requerida para la disipación de la carga térmica en la subestación, es por esto que fue seleccionado un ventilador que cubra completamente la disipación de dicha carga.

6.2.7.- S/E Transfo-rectificadora La Paz.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación La Paz se ubicó en las de magnitud media con un valor de 42,6 kW (12 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación no se encuentra en sus condiciones óptimas dado que los filtros de alimentación de aire se hallaron obstruidos con algunos desperdicios y las rejillas de los ductos de suministro están obstruidas por polvo.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación La Paz fue de 12 m³/s.
- La subestación La Paz se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación La Paz presentó un menor riesgo laboral para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir de enfermedades como fatigas por exposición prolongada o actividad física.

6.2.8.- S/E Transfo-rectificadora Maternidad.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Maternidad se ubicó en las de magnitud media, con un valor de 132,9 kW (38 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación no se encuentra en sus condiciones óptimas dado que los filtros de alimentación de aire se hallaron obstruidos con algunos desperdicios y las rejillas de los ductos de suministro están obstruidas por polvo.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Maternidad fue de 14 m³/s.
- La subestación Maternidad se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Maternidad presentó un riesgo laboral relativamente alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.

- Como la subestación se encuentra tan fuera de confort los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como insolación, golpe de calor, posibles calambres por exposición prolongada o actividad física.

6.2.9.- S/E Transfo-rectificadora El Valle.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación El Valle se ubicó en las de alta magnitud con un valor de 164 kW (47 Toneladas de refrigeración).
- El sistema de ventilación se encuentra estructuralmente en buen estado, sin embargo la chimenea por la que se expulsa el aire de la subestación se encontró llena de desechos sólidos.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación El Valle fue de 16 m³/s.
- Aún cuando la estructura del sistema de ventilación se encontró en buen estado, para la subestación El Valle fueron más elevadas las temperaturas con el sistema encendido que apagado, esto puede deberse al movimiento forzado del aire en forma descendente, lo que solo trae como resultado la concentración del calor en el área evaluada.
- A pesar de que la filosofía de diseño de los equipos de ventilación en Metro de Caracas C.A indique que un solo equipo está en capacidad de disipar toda la carga térmica existente, en la subestación El Valle la misma no esta siendo disipada con solo un ventilador en funcionamiento.
- La subestación El Valle se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación El Valle presentó un riesgo laboral medio para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.
- Una vez comprobado que los ventiladores de la S/E transfo-rectificadora El Valle tienen la capacidad de mover la tasa de flujo volumétrico requerido, concluimos que

el sistema de ventilación de dicha subestación esta fallando posiblemente por causas como: Errada estimación de pérdidas (por ductos y accesorios) por lo que se genera una caída en la eficiencia de los equipos; no se realiza el barrido del aire caliente de forma adecuada ya que las temperaturas superficiales de los equipos se encuentran por encima de los límites permitidos.

6.2.10.- S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Los Símbolos se ubicó en las de alta magnitud con un valor de 153,2 kW (44 Toneladas de refrigeración).
- Aún cuando la estructura del sistema de ventilación se encontró en buen estado, para la subestación Los Símbolos fueron más elevadas las temperaturas con el sistema encendido que apagado, esto puede deberse al movimiento forzado del aire en forma descendente, lo que solo trae como resultado la concentración del calor en el área evaluada, también al mal diseño del cuarto de ventiladores en donde la toma de aire de uno de los ventiladores esta muy próxima a la pared.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Los Símbolos fue de 10 m³/s.
- La subestación Los Símbolos se encuentra tan fuera de confort que no pudo ser evaluada por medio de la carta de zonas de confort ASHRAE, ya que los valores de temperatura promedio son tan altos que la escala de la misma no abarca dicho rango.
- La subestación Los Símbolos presentó un riesgo laboral alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de peligro.
- Los operadores que realizan los mantenimientos de los equipos tienen una alta posibilidad de sufrir enfermedades laborales como golpe de calor, calambres o insolación inminente, dependiendo del tiempo de exposición.
- Una vez comprobado que los ventiladores de la S/E transfo-rectificadora Los Símbolos tienen la capacidad de mover la tasa de flujo volumétrico requerido, concluimos que el sistema de ventilación de dicha subestación esta fallando

posiblemente por causas como: Errada estimación de pérdidas (por ductos y accesorios) por lo que se genera una caída en la eficiencia de los equipos; no se realiza el barrido del aire caliente de forma adecuada ya que las temperaturas superficiales de los equipos se encuentran por encima de los límites permitidos.

6.2.11.- S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Nuevo Circo fue la de mayor magnitud con un valor de 226,3 kW (64 Toneladas de refrigeración).
- A pesar de que el movimiento del aire se induce de manera ascendente, la magnitud de la carga térmica fue la mayor registrada, de esto se concluye que la tasa de flujo volumétrico de aire entrante no es suficiente para disipar el calor presente en la subestación.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Nuevo Circo fue de 23 m³/s.
- La subestación Nuevo Circo se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Nuevo Circo presentó un riesgo laboral relativamente alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Como la subestación se encuentra fuera de confort los operadores que realizan el mantenimiento de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como insolación, golpe de calor, posibles calambres por exposición prolongada o actividad física, dependiendo del tiempo de exposición.
- Concluimos que la tasa de flujo volumétrico de aire manejada por los ventiladores instalados en la S/E transfor-rectificadora Nuevo Circo, no es adecuada ya que al compararse con la estimada en este proyecto, resultó insuficiente.

6.2.12.- S/E Transfo-rectificadora Zona Rental.

- En comparación con el rango de valores de cargas térmicas obtenidos en todas las zonas de estudio, la subestación Zona Rental se ubicó en las de alta magnitud con un valor de 156,5 kW (44 Toneladas de refrigeración).
- Al igual que en Nuevo Circo el movimiento del aire se induce de manera ascendente, la magnitud de la carga térmica fue la una de las mayores registradas, de lo que se puede concluir que la tasa de flujo volumétrico de aire entrante no es suficiente para disipar el calor presente en la subestación.
- La tasa de flujo volumétrico obtenida para la subestación Zona Rental fue de 18 m³/s.
- La subestación Zona Rental se encuentra fuera de confort de acuerdo a la carta de confort de ASHRAE.
- La subestación Zona Rental presentó un riesgo laboral relativamente alto para el personal, encontrándose en un nivel de sensación térmica de precaución extrema.
- Como la subestación se encuentra fuera de confort los operadores que realizan el mantenimiento de los equipos pueden sufrir de enfermedades laborales como insolación, golpe de calor, posibles calambres por exposición prolongada o actividad física, dependiendo del tiempo de exposición.
- Una vez comprobado que los ventiladores de la S/E transfo-rectificadora Zona Rental tienen la capacidad de mover la tasa de flujo volumétrico requerido, concluimos que el sistema de ventilación de dicha subestación está fallando posiblemente por causas como: Errada estimación de pérdidas (por ductos y accesorios) por lo que se genera una caída en la eficiencia de los equipos; no se realiza el barrido del aire caliente de forma adecuada ya que las temperaturas superficiales de los equipos se encuentran por encima de los límites permitidos.

RECOMENDACIONES

GENERALES:

- Se recomienda que en las subestaciones en las que los ventiladores puedan ser invertidos, estos sean colocados para funcionar en extracción.
- Si se desea realizar una evaluación térmica más rigurosa se recomienda a la empresa adquirir instrumentos de medición más precisos y que permitan censar las variables evaluadas en alturas mayores.
- Se recomienda comparar los resultados obtenidos con la metodología utilizada con otros métodos, como por ejemplo el de Balance de Calor (Heat Balance).
- La realización de jornadas de mantenimiento a los equipos de ventilación constituirían un aporte valioso para su efectividad, al igual que la limpieza periódica de las subestaciones en general, ya que en la mayoría de las subestaciones en las que se contó con las especificaciones del sistema de ventilación se observó que los ventiladores son capaces de manejar las magnitudes de tasa de flujo volumétrico de aire estimadas.
- En vista de la limitada información obtenida de los ventiladores instalados (como por ejemplo marca, capacidad y presiones de trabajo), se recomienda a la empresa proveer a las subestaciones y departamentos pertinentes con la información básica de estos equipos ya sea por medio de manuales o placas a los mismos.
- Se recomienda ubicar los puntos de alimentación o extracción de aire (según lo permita el caso) de manera que estos generen un barrido adecuado del aire (perpendicular a la superficie en el caso de extracción, y paralelo a esta para el suministro).
- Para el caso particular de Propatria, se recomienda ubicar los sensores de temperatura que encienden y apagan los extractores en la parte superior de los equipos, y no a sus laterales.
- Se recomienda una evaluación profunda del confort y el estrés térmico en las S/E transfo-rectificadoras según lo estipulado en las normas de seguridad y trabajo

vigentes en el país, particularmente la COVENIN 2254:1995 (Calor y frío. Límites máximos permisibles).

- Mientras no se realice una evaluación adecuada del confort y estrés térmico, puede recomendarse un aumento en la velocidad del aire (no mayor a 5 m/s) para aquellas subestaciones que se encuentren a menos de 36 °C de temperatura de bulbo seco, así como también tomar medidas para conservar el balance hídrico de los trabajadores proporcionando bebidas ligeramente saladas o aromatizadas que se encuentren entre los 15 °C y 20 °C por lo menos cada hora.
- Se recomienda un estudio detallado de pérdidas (en ductos y accesorios) para la correcta selección de los sistemas de ventilación.
- Se recomienda la instalación de los equipos de ventilación propuestos para las S/E transfo-rectificadoras en el Capítulo IV de este trabajo.

DE LAS SUBESTACIONES ESTUDIADAS

S/E Transfo-rectificadora Petare:

Para la subestación Petare se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Chacao:

Para la subestación Chacao se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora La California:

Para la subestación La California se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B5 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Parque Carabobo:

Para la subestación Parque Carabobo se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B5 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Plaza Venezuela:

Para la subestación Plaza Venezuela se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Propatria:

Como el sistema de ventilación implementado en la subestación Propatria funciona mediante hongos de extracción, se hará una recomendación de los mismos. Es importante mencionar que los mismos no cumplen con los principios de diseño de la compañía, por esto se propone el uso de ventiladores:

- Seis (6) Hongos de extracción:

Hongo Helicoidal Serie 550

Modelo HKD-30, 1150 RPM, 1,7 HP

Marca: Metal Blower.

- Dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora La Paz:

Para la subestación La Paz se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Maternidad:

Para la subestación Maternidad se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora El Valle:

Para la subestación El Valle se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Los Símbolos:

Para la subestación Los Símbolos se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Nuevo Circo:

Para la subestación Nuevo Circo se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43B5 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

S/E Transfo-rectificadora Zona Rental:

Para la subestación Zona Rental se recomienda el uso de dos (2) ventiladores:

Venaxial tipo S, Ajustable Arr 4.

TAM 43C7 – 1750 RPM

Marca: Metal Blower.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. “Ventilacion Industrial”, Manual de Recomendaciones Prácticas para la Prevención de Riesgos Profesionales, España 1992, Generalitat Valenciana, 1^{era} Edición 480 páginas.
- 2.- Amezquita, U. “Método de Aplicación: Ventilación Exhaustiva Localizada”, Caracas 1993, 1^{era} Edición, 238 páginas.
- 3.- Arias, Fidias G., “El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica”, Caracas 2006, Episteme, 5^{ta} Edición, 143 páginas.
- 4.- Arteaga, E. y Soto, J., “Estudio de la calidad térmica en ambientes de los andenes de diferentes estaciones de un sistema de trenes subterráneo” Caracas 2001, Tesis Ingeniero Mecánico, U.C.V., Fac. de Ing., Esc. de Ing. Mec., 217 páginas.
- 5.- ASHRAE, *Fundamentals Handbook, Physiological Principles, Comfort and Health*. Atlanta 1997.
- 6.- Barrosa C. y Ucrós J. L., “Estudio de la calidad térmica del ambiente de la sala de máquinas de una planta termoeléctrica”, Caracas 1999, Tesis Ingeniero Mecánico, U.C.V., Fac. de Ing., Esc. de Ing. Mec., 123 páginas.
- 7.- Cohen M., “Apuntes de Aire Acondicionado”, Tomo I y Tomo II. Caracas 1986, U.C.V., Fac. de Ing., Esc. de Ing. Mec.
- 8.- COVENIN. (2254-95), “Calor y Frío”. Límites Máximos Permisibles, Caracas 1995, Fondonorma, 7 páginas.
- 9.- República Bolivariana de Venezuela GACETA OFICIAL N° 38236. División de Ambiente, Salud y Trabajo Departamento de Higiene y Seguridad Caracas. (2005). “Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo”. 110 páginas.
- 10.- FLIR Systems AB. “ThermaCAMTM PM595 Manual de Operación”. (Publicación N° 557384). Edición A.
- 11.- Incropera, F. y De Witt, D., “Fundamentos de Transferencia de Calor”, México 1999, Wiley, 4^{ta} edición, 886 páginas.

12.- U.C.V. “Instructivo para Elaborar el Anteproyecto de Trabajo Especial”, Fac. de Ing., Esc. de Ing. Mec., Consejo de Escuela, Caracas 1997.

13.- Maldonado, R., “Manual Práctico de Ventilación Industrial Estática Natural” España 2000, Editorial DOSSAT, 126 páginas.

14.- Medina, A., “Evaluación térmica en cuartos de control de trenes en las estaciones de un sistema de transporte subterráneo”. Caracas 2006, Tesis Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional Experimental Politécnica “ANTONIO JOSE DE SUCRE”, Vice-Rectorado “LUIS CABALLERO MEJÍAS”, 260 páginas.

15.- Metal Blower C.A. “Ventilador Hongo Helicoidal serie 550”. (Boletín 550). 4 páginas.

16.- Metal Blower C.A. “Venaxial de Paso Ajustable Tipo S”. (Boletín 147-1). 10 páginas.

17.- Nediani G, Amézquita U. y Segura, J., “Procesamiento de datos Climáticos para el Análisis de Cargas Térmicas de las Edificaciones en Caracas”, Caracas (nd), Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

18.- Pita, E., “Acondicionamiento de Aire”, México 1997, Editorial Continental. Segunda Edición.

19.- Rohsenow, W. y Choi, H., “Heat, Mass, and Momentum Transfer”, Englewood Cliffs N.J 1961, Prentice Hall Series Engineering, 537 páginas.

20.- Rohsenow, W., Hatnett, J. y Ganié, E., “Handbook of Heat Transfer Fundamentals”, New York 1985, Mc Graw-Hill, 2^{da} Edición, 1440 páginas.

21.- Cengel Y., y Boles M., “Termodinámica”, México 2002, Mc Graw-Hill, 4^{ta} Edición, 829 páginas.

Documentos en Línea

22.- Canales Opazo Tatiana. (nd). Formato APA Quinta Edición. Disponible: http://www.uninorte.edu.co/observatorio/documentos/Apa_Edicion5.pdf.

[Consulta: 2007, agosto 06]

23.- Ingeniería Energética. (nd). Teoría de Ingeniería Térmica, Correlaciones para la Convección Natural. Disponible:

<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/14.pdf>.

[Consulta: 2007, septiembre 20].

24.- Ingeniería Energética. (nd). Teoría de Ingeniería Térmica, Correlaciones para la Convección Forzada. Disponible:

<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/15.pdf>

[Consulta: 2007, septiembre 20].

25.- Morillón Gálvez David. (2002). Introducción a los Sistemas Pasivos de Enfriamiento. Disponible: http://www.riraas.net/documentacion/CD_03/PONENCIA04.pdf

[Consulta: 2007, julio 06].

26.- Oficina Internacional del trabajo Ginebra. (2001). Factores Ambientales en el Lugar de Trabajo. Disponible:

<http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cops/spanish/download/s000009.pdf>

[Consulta: 2007, agosto 20].

27.- Rosales Luis. (2006). Tema 1 Confort Térmico. Disponible: <http://red.fau.ucv.ve:8080/static/clima/files/confort%20termico.pdf>.

[Consulta: 2007, julio 20].

28.- Rosales Luis. (2006). Tema 2 Clima. Disponible: <http://red.fau.ucv.ve:8080/static/clima/files/clima.pdf>. [Consulta 2007, julio 20].

29.- Rosales Luis. (2006). Tema 5 Ventilación Natural. Disponible: <http://red.fau.ucv.ve:8080/static/clima/files/ventilacion%20natural.pdf>.

[Consulta: 2007, julio 20].

30.- Rosales Luis. (2006). Tema 6 Diseño Bioclimático en Venezuela. Disponible: <http://red.fau.ucv.ve:8080/static/clima/files/disenio%20bioclimatico.pdf>.

[Consulta: 2007, julio 20].

31.- Siem, G. y Sosa, M. (nd). Manual de Diseño para Edificaciones Energéticamente Eficientes en el Trópico. Disponible: <http://www.arq.ucv.ve/idec/racionalidad/Paginas/manual.html>.

[Consulta: 2007, agosto 11].

32.- Unidad de Servicios Técnicos Fiberglass Colombia. (2002). Beneficios del Aire Acondicionado. Disponible:
[http://www.fiberglasscolombia.com.co/website/Administ.nsf/vstImagenporNombre/ntaa54/\\$file/NTAA54.pdf](http://www.fiberglasscolombia.com.co/website/Administ.nsf/vstImagenporNombre/ntaa54/$file/NTAA54.pdf). [Consulta: 2007, agosto 11].

Fuentes World Wide Web

33.- The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2007). [Página web en línea]. Disponible en: (<http://www.ashrae.com>) [Consulta: 2007 mayo 25].

34.- Metro de Caracas C.A. (2005). [Página web en línea]. Disponible en: (<http://www.metrodecaracas.com.ve>). [Consulta 2007, mayo 09].

35.- Electric Traction Power Supplies. (2007). [Página web en línea]. Disponible en: (<http://www.railway-technical.com/etracp.shtml>). [Consulta: 2007, mayo 03]

36.- FISICANET. (2007). [Página web en línea]. Disponible en: (http://www.fisicanet.com.ar/tecnicos/tecnologia/te01_acondicionamiento_ambienttal.php). [Consulta, 2007, Junio 22].

37.- PORTAL DE REFRIGERACION AIRE ACONDICIONADO Y VENTILACION. (2007). [Página web en línea]. Disponible en: (<http://www.portalrefrigeracion.com>). [Consulta: 2007, junio 14].

38.- Ventilación Mecánica Industrial. (nd). [Página web en línea]. Disponible en: (<http://www.bani.com.ar/Ventilaci%F3n%20Mec%Elnica%20Industrial.htm>). [Consulta 2007, julio 10].

ANEXOS