

**ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN
CONDUCTORES DESNUDOS, BAJO LA CONDICIÓN DE ESTADO ESTABLE**

IVÁN ALBERTO SANÍN RINCÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
BUCARAMANGA**

2008

**ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN
CONDUCTORES DESNUDOS, BAJO LA CONDICIÓN DE ESTADO ESTABLE**

IVÁN ALBERTO SANÍN RINCÓN

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director

PhD. Gabriel Ordóñez Plata

Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
BUCARAMANGA**

2008

En memoria de Olga Rodríguez de Sanín y Maria Elena López de Rincón.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de todo corazón a Dios por darme la oportunidad de nacer y vivir en un hogar lleno de amor, ternura y comprensión, virtudes que a través de mis padres y hermanos siempre me han acompañado e instruido en el diario vivir. A ellos, también quiero agradecerles de manera muy especial el haberme enseñado que todo gran logro empieza siendo un gran sueño y todo gran sueño debe hacerse una realidad.

A mi Director de Tesis y amigo, Gabriel Ordóñez Plata, por la confianza y el apoyo incondicional que siempre me ha brindado. Así como por las valiosas enseñanzas éticas, profesionales y académicas que a lo largo de mi vida estudiantil me transmitió.

A Aláin Hernández Arboleda, por la gran amistad y el apoyo incondicional que me ha brindado a lo largo de estos 12 meses, durante los cuales la amistad, el trabajo y el estudio se combinaban en el día a día.

Al Dr. Carlos Costa Posada, director del IDEAM, por haberme facilitado el acceso a la información meteorológica asociada con las zonas geográficas consideradas en este trabajo de grado.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN CONDUCTORES DESNUDOS.....	3
1.1 ESTÁNDAR IEEE 738	3
1.1.1 Cálculo de la ampacidad en estado estable	6
Refrigeración por convección.	7
Refrigeración por radiación.....	10
Ganancia térmica por insolación.....	11
Ganancia térmica por efecto Joule.	14
1.1.2 Cálculo de la ampacidad en estado dinámico	15
1.1.3 Estructura de la metodología propuesta por el IEEE para el cálculo de la ampacidad.....	17
Cálculos en la condición de estado estable.	20
Cálculos en la condición de estado dinámico.	21
1.2 METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL CIGRÉ	26
1.2.1 Cálculo de la ampacidad en estado estable	29
Calentamiento por efecto Joule y magnético.	30
Calentamiento por efecto solar.	33
Calentamiento por efecto corona.....	37
Refrigeración por convección.	37
Refrigeración por radiación.....	42
Refrigeración por evaporación.....	43

1.2.2	Cálculo de la ampacidad en estado dinámico	43
1.2.3	Estructura de la metodología propuesta por el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad.....	52
	Cálculos en la condición de estado estable.....	55
	Cálculos en la condición de estado dinámico.....	56
2.	ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS ASOCIADOS AL CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CALENTAMIENTO Y REFRIGERACIÓN EN LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD	62
2.1	REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN	63
2.1.1	Análisis de los modelos matemáticos presentados en el Std IEEE para el cálculo de la refrigeración por convección.....	63
2.1.2	Análisis del modelo matemático presentado por el CIGRÉ para el cálculo de la refrigeración por convección.....	66
2.2	REFRIGERACIÓN POR RADIACIÓN	67
2.2.1	Análisis del modelo matemático presentado por el IEEE para el cálculo de la refrigeración por radiación.....	68
2.2.2	Análisis del modelo matemático presentado por el CIGRÉ para el cálculo de la refrigeración por radiación.....	69
2.3	CALENTAMIENTO POR INSOLACIÓN	69
2.3.1	Análisis del modelo matemático presentado por el IEEE para el calentamiento por efecto solar.....	70
2.3.2	Análisis de los modelos matemáticos presentados por el CIGRÉ para el cálculo del calentamiento por insolación	71

2.4 INCERTIDUMRE ASOCIADA AL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ.....	73
2.5 APLICABILIDAD DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS AL TERRITORIO COLOMBIANO.....	76
3. COMPARACIÓN ENTRE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y RECOMENDACIONES PARA SU APLICACIÓN	77
3.1 COMPARACIÓN ENTRE LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO TÉRMICO PRESENTADAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ	82
3.1.1 Calentamiento por efecto solar.....	82
Posición solar.....	82
Intensidad solar.....	83
3.1.2 Refrigeración por convección.....	85
3.1.3 Refrigeración por radiación.....	89
3.1.4 Calentamiento por efecto Joule y magnético.....	89
3.2 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ AL TERRITORIO COLOMBIANO	92
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1 CONCLUSIONES	96
4.2 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS DESARROLLOS	99
BIBLIOGRAFÍA.....	101

ANEXOS.....104

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el Std IEEE 738	4
Tabla 2. Valor de la constante C en función de ω y χ	12
Tabla 3. Coeficientes de la ecuación 12 en función del tipo de atmósfera	13
Tabla 4. Calor específico de algunos metales	15
Tabla 5. Nomenclatura utilizada por el CIGRÉ	27
Tabla 6. Albedo asociado a diferentes tipos de terreno	36
Tabla 7. Factor de corrección de la radiación solar directa por efecto de la altura geográfica	36
Tabla 8. Constantes para el Cálculo del Número de Nusselt en la Refrigeración Natural	40
Tabla 9. Constantes para el Cálculo del Número de Nusselt en la Refrigeración Forzada	42
Tabla 10. Densidad de masa y capacidad de calor específico de algunos metales	45
Tabla 11. Predicción teórica del error asociado al cálculo de la ampacidad	75
Tabla 12. Interconexiones de ISA a 500 kV seleccionadas para el análisis	78
Tabla 13. Interconexiones de ISA a 230 kV seleccionadas para el análisis	78
Tabla 14. Zonas geográficas seleccionadas para el análisis de las metodologías	79
Tabla 15. Máximos errores en el cálculo de la refrigeración por convección	88
Tabla 16. Velocidades de viento asociadas al máximo error (m/s)	89
Tabla 17. Paralelo entre el estándar del IEEE y el CIGRÉ	91
Tabla A 1. Longitud de onda y frecuencia asociada a los colores del rango visible	108

Tabla B 1. Valores de resistividad asociados a la fabricación de conductores desnudos 124

Tabla B 2. Coeficientes de dilatación térmica asociados a la fabricación de conductores desnudos 124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Comportamiento de la temperatura del conductor ante la variación de carga.....	16
Figura 2. Estructura general de la metodología IEEE	19
Figura 3. Estructura lógica para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable con el Std IEEE 738.....	22
Figura 4. Estructura lógica para el cálculo de la temperatura asociada a la corriente de carga en estado estable con el Std IEEE 738.....	23
Figura 5. Estructura lógica para el cálculo de la temperatura de operación en estado dinámico con el Std IEEE 738.....	24
Figura 6. Estructura lógica para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico con el Std IEEE 738.....	25
Figura 7. Comportamiento de la temperatura del conductor ante la variación de carga.....	47
Figura 8. Estructura general de la metodología del CIGRÉ	54
Figura 9. Estructura lógica para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable con la metodología del CIGRÉ	57
Figura 10. Estructura lógica para el cálculo de la temperatura asociada a la corriente de carga en estado estable con la metodología del CIGRÉ.....	58
Figura 11. Estructura lógica para el cálculo del tiempo de operación en estado dinámico con la metodología del CIGRÉ	59
Figura 12. Estructura lógica para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico con la metodología del CIGRÉ.....	60
Figura 13. Interconexiones de ISA y departamentos seleccionados para el análisis	84

Figura 14. Convección forzada aplicando la proporcionalidad de 0.55 del CIGRÉ	85
Figura 15. Convección forzada asumiendo $\delta = 45^\circ$ en el método del CIGRÉ	86
Figura 16. Comparación entre la convección natural y la forzada para diferentes ángulos	87
Figura 17. Variación de la refrigeración por convección en función de la altura	88
Figura 18. Sensibilidad de la refrigeración por radiación ante la variación del coeficiente de emisividad	94
Figura 19. Sensibilidad del calentamiento por insolación ante la variación del coeficiente de absorptividad	94
Figura A 1. Intensidad de radiación de cuerpo negro para diferentes temperaturas	107
Figura A 2. Intensidad de la radiación electromagnética emitida por el sol (espectro característico de un cuerpo negro a 5250°C)	109
Figura A 3. Distribución de la radiación solar al interactuar con el planeta tierra.	110
Figura A 4. Descripción de la posición del sol por medio de la altitud solar y el acimut solar	112
Figura A 5. Avalancha de electrones en el cátodo	116
Figura A 6. Capas de carga espacial generadas después de la primera avalancha	117
Figura A 7. Desarrollo de la avalancha de electrones en la descarga corona negativa	119
Figura A 8. Desarrollo de las avalanchas cerca al ánodo y propagación de carga en el aire	121
Figura A 9. Desarrollo de la avalancha de electrones en la descarga corona positiva	122

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. FUNDAMENTOS TEÓRICOS ASOCIADOS A LA REFRIGERACIÓN Y AL CALENTAMIENTO EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	104
ANEXO B. RESISTIVIDADES Y COEFICIENTES DE DILATACIÓN TÉRMICA..	124
ANEXO C. RESULTADOS DEL ANÁLISIS REALIZADO EN EL TERRITORIO COLOMBIANO.....	125
ANEXO D. CÁLCULOS TIPO EN LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ.....	186

RESUMEN

TITULO: Análisis de metodologías para el cálculo de la ampacidad en conductores desnudos, bajo la condición de estado estable.

AUTOR: Iván Alberto Sanín Rincón.**

PALABRAS CLAVES: Ampacidad, capacidad de transporte, límite térmico, equilibrio térmico, líneas de transmisión.

El presente trabajo de grado está formado por tres secciones. La primera de ellas, presenta y describe las metodologías para el cálculo de la ampacidad en conductores desnudos desarrolladas por el IEEE y el CIGRÉ. Así mismo, presenta los tipos de cálculos asociados con el análisis térmico de las líneas de transmisión y el diagrama de ejecución propuesto para cada uno de ellos. La segunda sección presenta el análisis de propagación del error aplicado a las metodologías para el cálculo de la ampacidad y a los modelos matemáticos que las componen. Así mismo, presenta y valida las ecuaciones desarrolladas para el cálculo de la incertidumbre asociada con la aplicación de las metodologías del IEEE y el CIGRÉ en toda clase de territorio y de condición atmosférica.

Finalmente, la tercera sección desarrolla un análisis comparativo entre las dos metodologías para el cálculo de la ampacidad estudiadas, el cual, toma como base 77 puntos geográficos del territorio Colombiano, los cuales, se relacionan directamente con las zonas geográficas que atraviesan las principales líneas del sistema de transmisión nacional STN, las cuales son propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. A partir del análisis, se describe el comportamiento de cada una de las metodologías ante diferentes condiciones de estudio y se comparan los resultados obtenidos en cada uno de los factores de calentamiento y refrigeración considerados.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones. Director Gabriel Ordoñez Plata.

ABSTRACT

TITLE: Analysis of methodologies to calculate steady state overhead conductors ampacity.*

AUTHOR: Iván Alberto Sanín Rincón.**

KEY WORDS: Ampacity, load capability, thermal rating, thermal stability, transmission lines.

The present document is conforming for three sections. The first one, present and describe the methodologies that the community use commonly to calculate steady state overhead conductors ampacity. These methodologies were developed by IEEE and CIGRÉ. Hence the document presents the different kinds of options to calculate the transmission lines thermal rating and the process diagrams to execute each option. The second one section presents the analysis of errors propagation applies to the methodologies to calculate steady state overhead conductors ampacity and to the mathematics models that conform each one. Hence, the document presents the validation process applied to each equation developed to calculate the uncertainty associated with the application to the IEEE and CIGRÉ methodologies to calculate the transmission lines thermal rating in every kind of terrain and atmospheric conditions.

Finally, the third one section develops a comparative analysis between both methodologies to calculate steady state overhead conductors ampacity that were studied. This analysis considers 77 geographic regions of Colombian territory. These ones have directly relation with the geographic zones that the main STN's transmission lines crosses. These transmission lines are property of Interconexión Eléctrica S.A E.S.P. The analysis permit describe the behaviour of each methodology to calculate steady state overhead conductors Ampacity in different study conditions and make a comparison between the results calculated in each heating and cooling factors that the methodologies consider.

* Project of Degree

** Faculty of Physics-Mechanics Engineerings. School of Electric Electronic and Telecommunications Engineerings. Director Gabriel Ordoñez Plata.

INTRODUCCIÓN

La planeación y operación de un sistema de potencia debe garantizar el funcionamiento óptimo, económico y eficiente de los recursos disponibles buscando que éste responda de manera efectiva a las exigencias de operación normal o de contingencia que se presenten, garantizando así, la continuidad del suministro eléctrico en el territorio nacional. Para ello, es necesario que cada línea de transmisión tenga un margen de utilización o cargabilidad asociada (ampacidad). Dicho margen permitirá operar la línea de forma segura, conservando las características mecánicas del conductor, y respetando los criterios de seguridad que establece la ley. Por esta razón, en la etapa de diseño de una línea de transmisión, es importante seleccionar el conductor considerando la ampacidad que está asociada a cada una de las alternativas propuestas para el proyecto, de tal forma, que se alcance un alto grado de optimización operativa y económica.

En la actualidad son reconocidas internacionalmente dos metodologías: “El Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors” del IEEE y “The Thermal Behavior of Overhead Conductors” del CIGRÉ. Aunque ambas se fundamentan en el mismo principio físico (equilibrio térmico), al aplicarlas a un mismo caso de estudio, los resultados difieren. De aquí surge la necesidad de analizarlas y establecer las diferencias y compatibilidades que presentan ante las condiciones atmosféricas y geográficas de nuestro país para que el análisis de cargabilidad realizado sea confiable.

Con base en lo anterior se desarrolla el presente trabajo de grado, el cual toma como eje central el análisis del equilibrio térmico que debe existir en el entorno de una línea de transmisión, identificando las variables ambientales que influyen en el

balance térmico y estableciendo si existe o no alguna restricción en los rangos de operación para cada una de ellas, determinando adicionalmente, bajo qué condiciones las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ son válidas. Así mismo, este análisis se complementa con la comparación directa de las metodologías estudiadas, teniendo en cuenta un enfoque teórico, que da una visión clara y profunda al lector de cada uno de los conceptos físicos que se asocian con el cálculo de la ampacidad, y un enfoque práctico que evidencia el comportamiento de cada metodología ante diferentes condiciones de aplicación.

1. METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN CONDUCTORES DESNUDOS

Actualmente, existen dos metodologías aceptadas internacionalmente para el cálculo de la ampacidad en conductores desnudos. Estas fueron desarrolladas de forma independiente por los grupos de trabajo del IEEE y del CIGRÉ. La primera de ellas se titula “IEEE Standard for Calculating the Current – Temperature of Bare Overhead Conductors”, y su última revisión fue publicada por el IEEE en el 2007. La segunda es conocida como “The Thermal Behaviour of Overhead Conductors”, cuya publicación oficial la realizó el CIGRÉ en 1992.

Aunque ambas metodologías se basan en la ecuación de equilibrio térmico, la cual considera un balance perfecto entre el calor ganado y el calor emitido por el conductor al medio circundante, cada una de ellas considera diferentes factores de aporte térmico y de refrigeración, adicionalmente, cada una desarrolla modelos matemáticos propios para el cálculo de los mismos. En las secciones 1.1 y 1.2 se desarrollan los fundamentos teóricos que componen la metodología IEEE y la metodología CIGRÉ respectivamente.

1.1 ESTÁNDAR IEEE 738

La formulación matemática que plantea el estándar IEEE 738: STANDARD FOR CALCULATING THE CURRENT – TEMPERATURE OF BARE OVERHEAD CONDUCTORS puede ser utilizada en dos condiciones diferentes: el estado estable (carga invariante en el tiempo) y el estado dinámico (considerando variación de carga en un intervalo de tiempo conocido).

Antes de abordar la metodología planteada por este estándar, es necesario definir la nomenclatura que se utiliza a lo largo de este documento. La tabla 1 presenta esta información.

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en el Std IEEE 738

PARÁMETROS DEL CONDUCTOR	
A'	= Área proyectada por el conductor (m^2 / m)
D	= Diámetro del conductor (mm)
mC_p	= Capacidad de calor total del conductor ($J / (m^\circ C)$)
M_i	= Peso por unidad de longitud del iésimo hilo del conductor (kg / m)
$R(T_c)$	= Resistencia a.c a 60 ó 50 Hz del conductor a temperatura T_c (Ω / m)
T_c	= Temperatura del conductor ($^\circ C$)
T_f	= Temperatura del conductor lograda después de un incremento súbito de corriente y de la constante de tiempo térmica ($^\circ C$)
T_i	= Temperatura del conductor antes del incremento súbito de corriente ($^\circ C$)
C_{pi}	= Calor específico del iésimo hilo del conductor ($W.s / (kg^\circ C)$)
T_{low}	= Mínima y máxima temperatura del conductor para las cuales se especifica la resistencia de conductor en 60 ó 50 Hz ($^\circ C$)
T_{high}	
α	= Coeficiente de absorción solar (0 a 1)
ε	= Coeficiente de emisividad (0 a 1)
τ	= Constante de tiempo térmica del conductor (min)

PARÁMETROS GEOGRÁFICOS

H_c	=	Altitud solar ($^{\circ}$)
H_e	=	Elevación del conductor sobre el nivel del mar (m)
$K_{\text{ángulo}}$	=	Factor de dirección del viento
K_{solar}	=	Factor de altitud solar
K_f	=	Conductividad térmica del aire a una temperatura T_{film} ($W/(m^{\circ}C)$)
T_a	=	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
V_w	=	Velocidad del viento (m/s)
ϕ	=	Ángulo entre el viento y el eje del conductor ($^{\circ}$)
δ	=	Declinación solar (0° a 90°)
θ	=	Ángulo efectivo de incidencia de los rayos del sol ($^{\circ}$)
ρ_f	=	Densidad del aire (kg/m^3)
Q_{se}	=	Radiación Solar total corregida por altura (W/m^2)
Q_s	=	Radiación Solar total (W/m^2)
Lat	=	Grados de latitud norte ($+^{\circ}$) ó sur ($-^{\circ}$)
Z_c	=	Acimut solar ($^{\circ}$)
C	=	Constante asociada al acimut solar
ω	=	Ángulo de la hora local ($^{\circ}$)
χ	=	Variable asociada al acimut solar
μ_f	=	Viscosidad dinámica del aire ($Pa-s$)

PARÁMETROS GENERALES Y DE OPERACIÓN

I	=	Corriente a través el conductor (<i>Ampere a 60 ó 50 Hz</i>)
I_i	=	Corriente inicial por el conductor antes de una variación súbita (<i>Ampere a 60 ó 50 Hz</i>)

I_f	=	Corriente final por el conductor después de la variación (Ampere a 60 ó 50 Hz)
T_{film}	=	Temperatura de la película de aire $((T_c + T_a)/2)$ ($^{\circ}C$)
β	=	Ángulo entre el viento y el eje perpendicular al conductor ($^{\circ}$)
N	=	Día del año para el cual se realiza el cálculo (Enero 24 = 24; Marzo 12 = 72, etc.)
ZI	=	Acimut de la línea de transmisión ($^{\circ}$)
NOMENCLATURA ADICIONAL		
$q_c, q_{cn}, q_{c1},$	=	Pérdidas de calor por convección (W / m)
q_{c2}		
q_r	=	Pérdidas de calor por radiación (W / m)
q_s	=	Ganancia de calor solar (W / m)
W	=	Watt
Δt	=	Intervalo de tiempo utilizado en el cálculo transitorio (s)
ΔT_c	=	Incremento en la temperatura del conductor correspondiente a un Δt ($^{\circ}C$)

Fuente: Std IEEE 738 de 2006

1.1.1 Cálculo de la ampacidad en estado estable [1].

Para el cálculo de la ampacidad se considera que las condiciones atmosféricas y ambientales son invariantes en el tiempo. La metodología IEEE ofrece la opción de realizar dos cálculos diferentes en estado estable:

- Calcular la temperatura del conductor cuando la corriente circulante es conocida.
- Calcular la intensidad de corriente que lleva el conductor al límite térmico definido por el usuario.

El análisis en estado estable parte de la ecuación (1), llamada ecuación de equilibrio térmico, donde la cantidad de calor emitido por el sistema, es igual a la que éste absorbe. El std IEEE 738 define como fuentes generadoras de calor, la insolación y el efecto Joule. Por otro lado, asume como fuentes de refrigeración, el viento (enfriamiento por convección) y la radiación térmica del conductor hacia el medio circundante¹.

$$I^2 R_{(T_c)} + q_s - q_c - q_r = m C_p \frac{dT_c}{dt} = 0 \quad (a) \quad (1)$$

$$I^2 R_{(T_c)} + q_s - q_c - q_r = 0 \quad (b)$$

donde:

$I^2 R_{(T_c)}$ calentamiento producido por efecto Joule (q_j) (W / m)

q_s calentamiento producido por efecto solar (W / m)

q_c enfriamiento por acción del viento (W / m)

q_r enfriamiento por la radiación térmica hacia el medio (W / m)

$\frac{dT_c}{dt} = 0$ en estado estable la variación de la temperatura en el tiempo es cero

Refrigeración por convección. En el Std IEEE 738, la refrigeración por convección se analiza desde tres perspectivas diferentes. La primera asume la refrigeración de forma natural (velocidad de viento cero), la segunda y la tercera consideran vientos de baja y alta velocidad respectivamente. El comportamiento de cada una de ellas está caracterizado en modelos matemáticos independientes, como se muestra en las ecuaciones (2) a (4). Debido a la alta subjetividad asociada con la caracterización de las velocidades de viento, este estándar

¹ La descripción teórica de los fenómenos de refrigeración y calentamiento se presenta en el anexo A

propone utilizar como factor de refrigeración por convección el mayor valor de los q_c obtenidos a partir de los modelos matemáticos presentados en las ecuaciones (2), (3) y (4).

Velocidad de viento cero (convección natural),

$$q_{cn} = 0,0205 \rho_f^{0,5} D^{0,75} (T_c - T_a)^{1,25} \quad (2)$$

Velocidad de viento baja (convección forzada),

$$q_{c1} = \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] k_f K_{Angulo} (T_c - T_a) \quad (3)$$

Velocidad de viento alta (convección forzada),

$$q_{c2} = 0,0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6} k_f K_{Angulo} (T_c - T_a) \quad (4)$$

donde:

q_{cn} refrigeración por convección natural en W/m .

ρ_f densidad del aire en kg/m^3 .

D diámetro del conductor en mm .

T_c temperatura del conductor en $^{\circ}C$.

T_a temperatura ambiente en $^{\circ}C$.

q_{c1} refrigeración por convección forzada con viento bajo en W/m .

V_w velocidad del viento en m/s .

μ_f viscosidad dinámica del aire en $Pa \cdot s$.

k_f conductividad térmica del aire a la temperatura $T_{film} = \frac{(T_c - T_a)}{2}$, en $W/(m \cdot ^{\circ}C)$.

K_{Angulo} factor de corrección angular del viento, es adimensional.

q_{c2} refrigeración por convección forzada con viento fuerte en W / m .

La conductividad térmica k_f , la densidad ρ_f y la viscosidad del aire μ_f se calculan utilizando las ecuaciones (5), (6) y (7) para la temperatura T_{film} . Adicionalmente, el factor de corrección asociado con el ángulo de incidencia del viento K_{Angulo} , se obtiene a partir de la ecuación (8).

$$k_f = 2,424 \times 10^{-2} + 7,477 \times 10^{-5} T_{film} - 4,407 \times 10^{-9} T_{film}^2 \quad (5)$$

$$\rho_f = \frac{1,293 - 1,525 \times 10^{-4} H_e + 6,379 \times 10^{-9} H_e^2}{1 + 0,00367 T_{film}} \quad (6)$$

$$\mu_f = \frac{1,458 \times 10^{-6} (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383,4} \quad (7)$$

$$K_{Angulo} = 1,194 - \cos(\phi) + 0,194 \cos(2\phi) + 0,368 \sin(2\phi) \quad (8)$$

donde:

k_f conductividad térmica del aire a la temperatura $T_{film} = \frac{(T_c - T_a)}{2}$, en $W / (m \cdot ^\circ C)$.

ρ_f densidad del aire en kg / m^3 .

μ_f viscosidad dinámica del aire en $Pa - s$.

H_e altura del conductor sobre el nivel del mar en (m) .

K_{Angulo} factor de corrección angular del viento, es adimensional.

En la ecuación (7), ϕ es el ángulo con que incide el viento sobre el eje del conductor. A partir de investigaciones realizadas por Tapani Seppa se recomienda utilizar un ángulo de incidencia menor o igual de 30° para el cálculo de la ampacidad durante el día y 20° para el cálculo de la ampacidad durante la noche [2][3]. Esta consideración permite realizar el cálculo de forma conservativa bajo la condición envolvente más desfavorable. En la literatura anterior al 2003 es común

encontrar como valor típico $\phi = 90^\circ$. Sin embargo, a partir de los apagones ocurridos en el 2003 (Dinamarca, Suecia, Italia, Este de los Estados Unidos) se ha considerado que asumir dicho valor puede poner en riesgo la operación del sistema, pues, en el momento en que se presente un margen de refrigeración inferior, lo cual es altamente probable teniendo en cuenta la no uniformidad de la catenaria, la línea de transmisión operará fuera de las condiciones para las cuales fue diseñada.

Refrigeración por radiación. La refrigeración por radiación define la capacidad que posee el conductor de transferir calor al medio circundante a través de la emisión de ondas electromagnéticas asociadas con la temperatura que posee. Este fenómeno depende básicamente del coeficiente de emisividad propio del conductor " ε ". Dale Douglass en su libro, "Conductor Selection and Transmission Line Optimization"[4], recomienda utilizar en conductores nuevos $\varepsilon = 0,2$, y en conductores deteriorados por el tiempo $\varepsilon = 0,9$. Adicionalmente, sugiere asumir una emisividad de 0,5 cuando el estado del conductor se desconoce.

El modelo matemático para el cálculo de la refrigeración por radiación se presenta en la ecuación (9).

$$q_r = 0,0178 D \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

donde:

q_r refrigeración por radiación en W / m

D diámetro del conductor en mm

T_c temperatura del conductor en $^\circ C$

T_a temperatura ambiente en $^\circ C$

Ganancia térmica por insolación. El aporte térmico debido a la incidencia de los rayos solares, depende de los factores que se describen a continuación:

- El coeficiente de absorción α que caracteriza al conductor. Dale Douglass recomienda utilizar tres valores típicos, $\alpha = 0,2$ para conductores nuevos, $\alpha = 0,9$ para conductores deteriorados por el tiempo y $\alpha = 0,5$ cuando el estado de la superficie del conductor es desconocido [5].

- El ángulo de altura solar H_c (altitud solar) y la orientación angular del sol con respecto al horizonte Z_c (acimut solar), cuyos valores dependen de la latitud propia de la zona geográfica donde está ubicada la línea de transmisión. Las ecuaciones (10) y (11) permiten obtener estos parámetros con base en la latitud geográfica y la declinación solar.

$$H_c = \sin^{-1}[\cos(Lat)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(Lat)\sin(\delta)] \quad (10)$$

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \quad (11)$$

donde:

Z_c acimut solar en ($^\circ$)

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat)\cos(\omega) - \cos(Lat)\tan(\delta)}$$

Lat latitud geográfica de la zona donde se encuentra ubicada la línea

ω ángulo de la hora local

H_c altitud solar en ($^\circ$)

$$\delta = 23,4583 \sin\left[\frac{284 + N}{365} 360\right], \text{ siendo } N \text{ el día del año en el que se realiza el}$$

cálculo

C constante asociada con el acimut solar, se selecciona de la tabla 2

Tabla 2. Valor de la constante C en función de ω y χ

Ángulo Horario ω (°)	C si $\omega \geq 0$	C si $\omega < 0$
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega \leq 180$	180	360

Fuente: Std IEEE 738 de 2006

- La radiación solar total " Q_s " de la zona geográfica donde se encuentra la línea de transmisión, la cual el Std IEEE 738 modela matemáticamente en función de la altitud del sol (en grados) y el tipo de atmósfera (Industrial o limpia). Adicionalmente, le aplica un factor de corrección por efecto de la altura sobre el nivel del mar (ver ecuaciones (12) y (13)).

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \quad (12)$$

donde:

Q_s radiación solar incidente total en (W/m^2).

H_c altitud solar calculada a partir de la ecuación (10).

A, B, C, D, E y F coeficientes del modelo matemático y se seleccionan de la tabla 3 con base en el tipo de atmósfera presente en la zona.

Tabla 3. Coeficientes de la ecuación (12) en función del tipo de atmósfera

Atmósfera limpia (Nivel de contaminación Bajo ó Medio)	
A	-42,2391
B	63,8044
C	-1,922
D	3,46921E-02
E	-3,61118E-04
F	1,94318E-06
G	-4,07608E-09
Atmósfera industrial (Nivel de contaminación Medio-Alto ó Alto)	
A	53,1821
B	14,2110
C	6,6138E-01
D	-3,1658E-02
E	5,4654E-04
F	-4,3446E-06
G	1,3236E-08

Fuente: Std IEEE 738 de 2006

$$Q_{Se} = K_{SOLAR} Q_s \quad (13)$$

donde:

Q_{Se} radiación solar incidente total corregida por la altura en (W / m^2)

$$K_{solar} = 1 + 1,148 \times 10^{-4} H_e - 1,108 \times 10^{-8} H_e^2$$

Q_s radiación solar incidente total en (W / m^2)

El modelo matemático para el cálculo de la ganancia térmica por efecto solar se presenta en la ecuación (14).

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A' \quad (14)$$

donde:

q_s ganancia térmica por efecto solar en (W / m)

α coeficiente de absorción solar del conductor de fase

Q_{se} radiación solar incidente total corregida por la altura en (W / m^2)

$A' = D / 1000$

D diámetro del conductor en (mm)

$\theta = \cos^{-1}[\cos(H_c)\cos(Z_c - Z_l)]$

H_c altitud solar calculada a partir de la ecuación (10).

Z_c acimut solar en $(^\circ)$

Z_l acimut de la línea de transmisión en $(^\circ)$

Ganancia térmica por efecto Joule. El Std IEEE 738 considera que el incremento de temperatura por efecto Joule depende únicamente de la resistencia propia del material a la temperatura considerada T_c . Esto se debe a que el análisis es realizado bajo condiciones de estado estable (intensidad de corriente constante). Debido a lo anterior, es necesario ajustar por temperatura el valor de la resistencia que proporciona el fabricante. Este ajuste se realiza a través del modelo matemático presentado en la ecuación (15).

$$R_{(T_c)} = \left[\frac{R_{T_{High}} - R_{T_{Low}}}{T_{High} - T_{Low}} \right] (T_c - T_{Low}) + R_{T_{Low}} \quad (15)$$

donde:

$R_{(T_c)}$ resistencia del conductor a la temperatura T_c

$R_{T_{low}}$ y $R_{T_{high}}$ resistencia eléctrica especificada para T_{Low} y T_{High} respectivamente
 T_{Low} y T_{High} mínima y máxima temperatura del conductor para las cuales se especifica la resistencia de conductor a las frecuencias de 60 ó 50 Hz ($^{\circ}C$)

1.1.2 Cálculo de la ampacidad en estado dinámico [1] (variación de carga).

Este cálculo considera condiciones ambientales y atmosféricas invariantes en el tiempo, por lo tanto, solo son variables de interés la corriente y la temperatura. La formulación matemática desarrollada en el Std IEEE 738 nuevamente se basa en la ecuación de equilibrio térmico, pero en este contexto, aparece un nuevo término que considera la refrigeración debida a la capacidad de calor propia del material. Esta refrigeración, compensa la variación del calentamiento por efecto Joule (Δq_j) que se origina ante cualquier variación de carga. La ecuación (16) presenta el modelo matemático utilizado para el cálculo.

$$I^2 R_{(T_c)} + q_s = q_c + q_r + m C_p \frac{dT_c}{dt} \quad (16)$$

En la ecuación (16), m representa el peso del conductor por unidad de longitud, y C_p el calor específico del material. La tabla 4 presenta los valores típicos de C_p para los metales utilizados en la fabricación de conductores aéreos.

Tabla 4. Calor específico de algunos metales

Material	Cp (W-s / m °C)
Aluminio	954,60
Cobre	423,29
Acero	476,20
Alumoweld	533,52

Fuente: Std IEEE 738 de 2006

Cuando el conductor es sometido a una variación de carga, el cambio de temperatura en él no es instantáneo, éste se da de forma exponencial creciente ó decreciente, hasta alcanzar la estabilidad a una temperatura final T_f . La figura 1 muestra este comportamiento para el caso de incremento en la corriente de carga.

El modelo matemático presentado en la ecuación (17) describe la variación de temperatura del conductor en función del tiempo.

$$T_c(t) = T_i + (T_f - T_i) \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (17)$$

donde:

T_c temperatura del conductor en el instante t

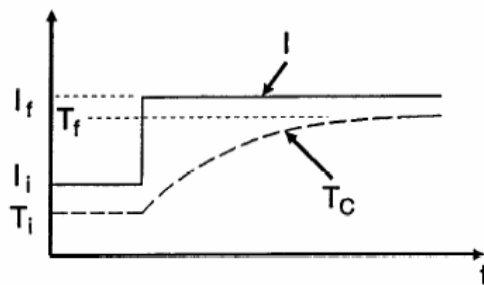
T_i temperatura del conductor antes de experimentar la variación de carga

T_f temperatura final del conductor al experimentar la variación de carga

La constante térmica del conductor es igual a:

$$\tau = \frac{(T_f - T_i) \times mC_p}{R(T_c) \times (i_f^2 - i_i^2)} \quad (18)$$

Figura 1. Comportamiento de la temperatura del conductor ante la variación de carga



Fuente: Std IEEE 738

El modelo matemático desarrollado en el Std IEEE 738 para el cálculo de la ampacidad en condiciones dinámicas, permite estimar a través de procesos iterativos la intensidad de corriente que llevará el conductor a su límite térmico en un intervalo de tiempo definido. Adicionalmente, permite conocer la temperatura que experimentará el conductor ante una eventual variación de carga (asumiendo ésta como el escalón de corriente presentado en la figura 1).

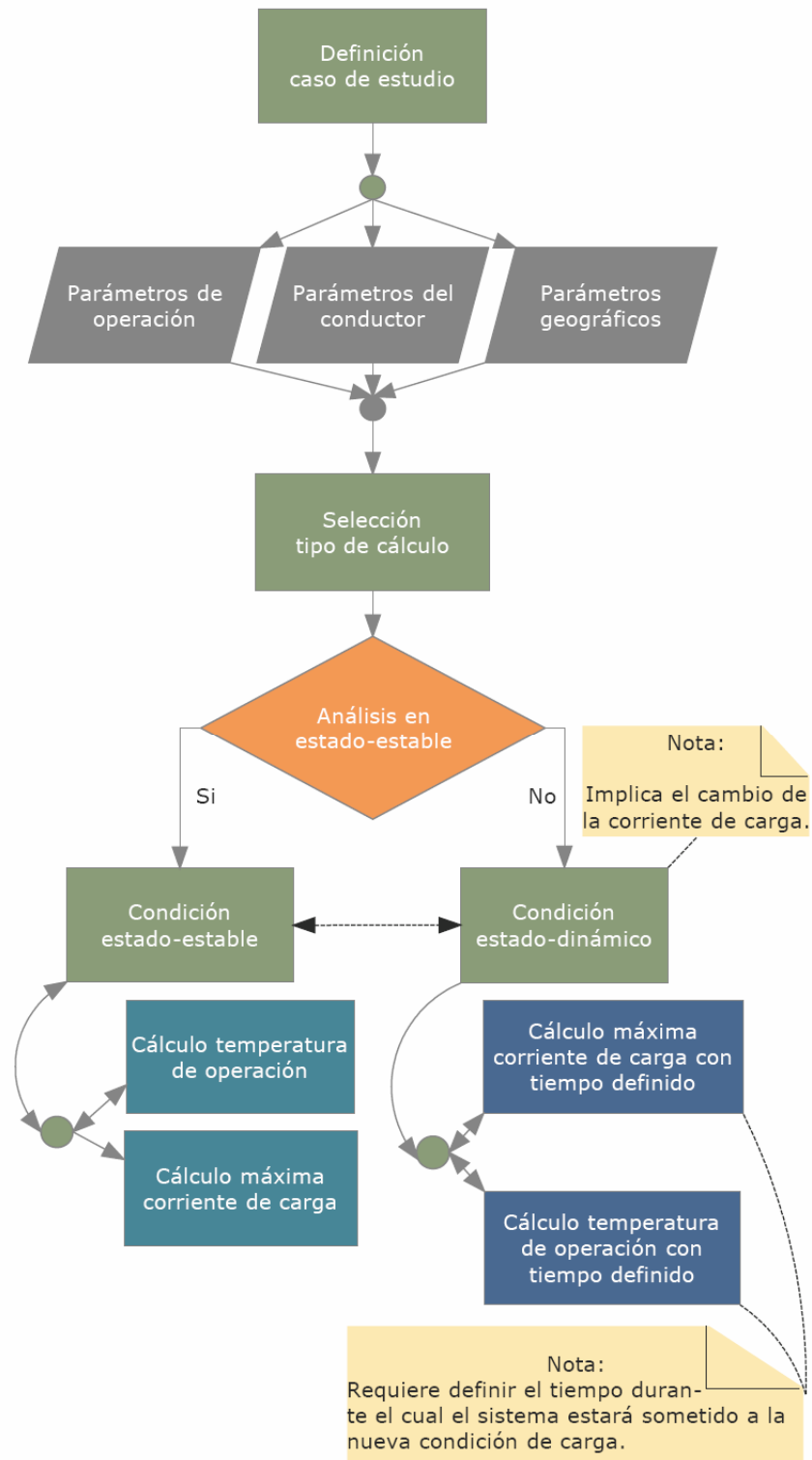
1.1.3 Estructura de la metodología propuesta por el IEEE para el cálculo de la ampacidad.

El estándar IEEE 738 contiene la información general de los modelos matemáticos propuestos para el análisis del comportamiento térmico de los conductores utilizados en las líneas de transmisión. Haciendo uso de dicha información, se ha complementado el estándar, desarrollando un conjunto de procesos que desglosan la estructura general de la metodología IEEE, permitiendo de esta forma, alcanzar un mayor nivel de comprensión en el momento de abordar su aplicación.

En la figura 2 se presenta la estructura general de la metodología IEEE. Obsérvese que una vez se aborda el caso de estudio es necesario definir los parámetros de operación de la línea de transmisión (nivel de tensión, potencia a transmitir, corriente de carga en estado estable, número de circuitos y número de conductores por fase), las características del conductor (coeficientes de emisividad y absorptividad, temperatura límite del conductor, diámetro del conductor, resistencia eléctrica) y las condiciones atmosféricas de la zona geográfica donde se encuentra la línea de transmisión (velocidad del viento, ángulo de incidencia del viento sobre el conductor, altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, latitud geográfica y el tipo de atmósfera dominante). Una vez se definen los parámetros generales del caso de estudio, la metodología IEEE permite asumir

una de dos condiciones de operación, la primera de ellas es la condición de estado estable, en la cual se considera que la corriente de carga permanece invariante en el tiempo. La segunda es la condición de estado dinámico, la cual tiene en cuenta la variación instantánea de la corriente de carga durante un intervalo de tiempo definido. Obsérvese que existe una relación bidireccional entre la condición de estado dinámico y la condición de estado estable. Esto se debe a que la condición de estado dinámico requiere abordar algunas etapas del cálculo en estado estable con el fin de obtener las condiciones iniciales de los estados térmicos del conductor.

Figura 2. Estructura general de la metodología IEEE



Fuente: El Autor

Finalmente, la estructura general de la metodología IEEE se compone de dos tipos de cálculo en cada una de las condiciones de operación descritas anteriormente. Estos se enfocan en la temperatura de operación ante una corriente de carga definida y en la máxima corriente de carga que el conductor es capaz de soportar sin que se produzca el recocimiento de su superficie (pérdida de propiedades mecánicas y eléctricas).

Cálculos en la condición de estado estable. Bajo esta condición de operación los cálculos de la máxima corriente de carga y de la temperatura están estructurados conforme se muestra en las figuras 3 y 4 respectivamente. Se observa que para el cálculo de la máxima corriente la metodología está constituida de forma unidireccional, ésta inicia con el cálculo de los factores de calentamiento por efecto solar, refrigeración por radiación y refrigeración por convección. En este último es necesario seleccionar el mayor valor entre la convección natural, la convección forzada con viento leve y la convección forzada con viento fuerte. Una vez se calculan los factores de refrigeración y calentamiento se realiza el ajuste térmico a la resistencia del conductor, para finalmente obtener la máxima corriente de carga.

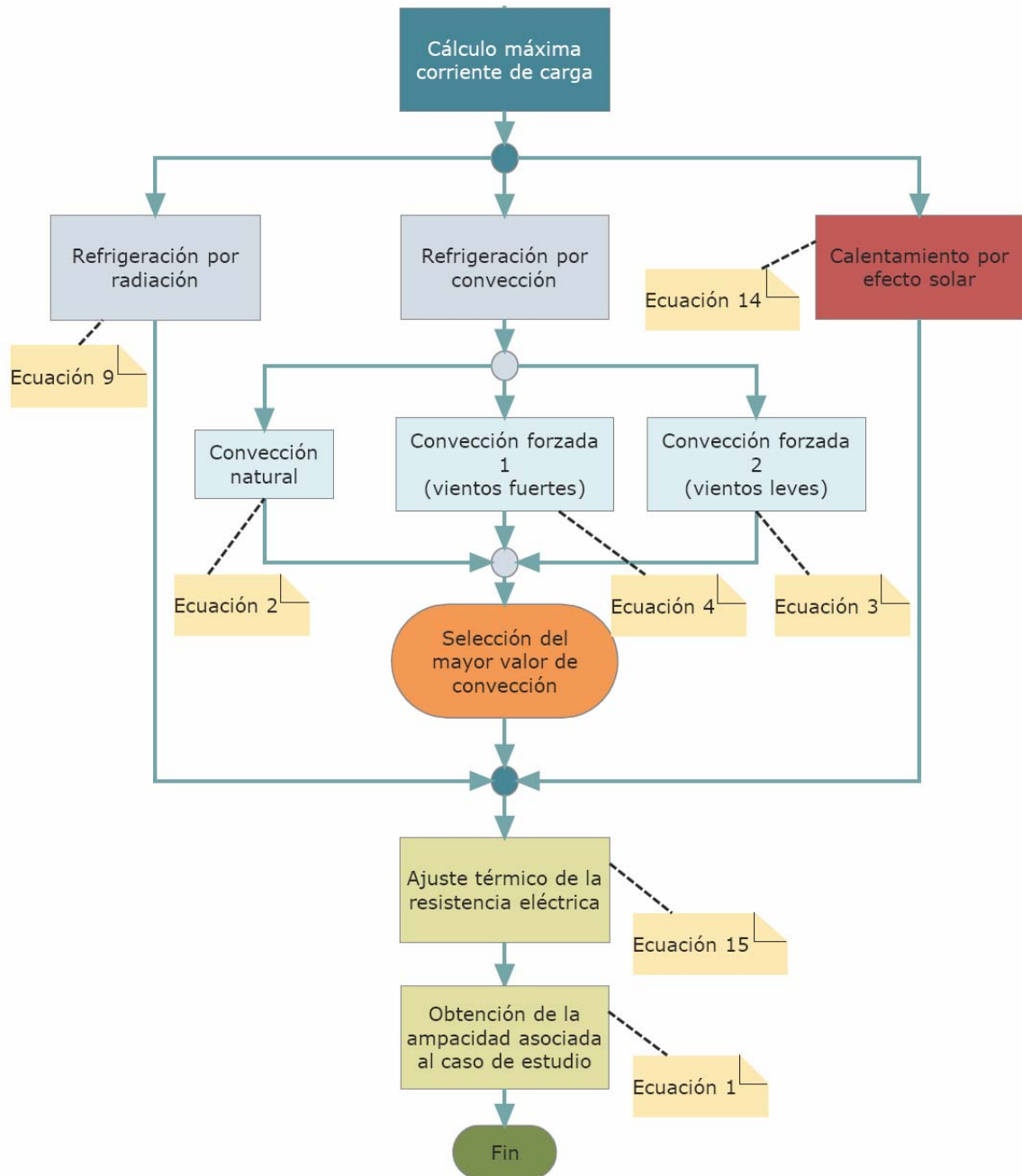
Para el cálculo de la temperatura de operación del conductor en estado estable la metodología está constituida como un ciclo anidado, ya que requiere la realización de un proceso iterativo para su solución numérica, pues, los modelos matemáticos para el cálculo de los factores de refrigeración y calentamiento son ecuaciones no lineales que dependen de la temperatura. El cálculo inicia con la identificación de la corriente de carga asociada al análisis y el cálculo del factor de calentamiento por efecto solar. Conociendo estos parámetros se da inicio al proceso iterativo, el cual considera como temperatura de referencia la temperatura ambiente “ T_a ”. A partir de ella, se calcula la corriente “ I_d ” asociada a dicha temperatura. Con base en este procedimiento se va incrementando la temperatura del conductor hasta

que la corriente “ I_d ” asociada a la temperatura de prueba sea igual a la corriente de carga asociada al análisis. Dentro del proceso iterativo se deben recalculan los factores de refrigeración por radiación y convección, ya que la variación de la temperatura los afecta fuertemente; mientras que el calentamiento por efecto solar está influenciado por las condiciones geográficas de la zona, las cuales permanecen invariantes en el análisis.

Cálculos en la condición de estado dinámico. La estructura de la metodología IEEE para el cálculo de la temperatura del conductor y de la máxima corriente de carga bajo esta condición de operación se presenta en las figuras 5 y 6 respectivamente.

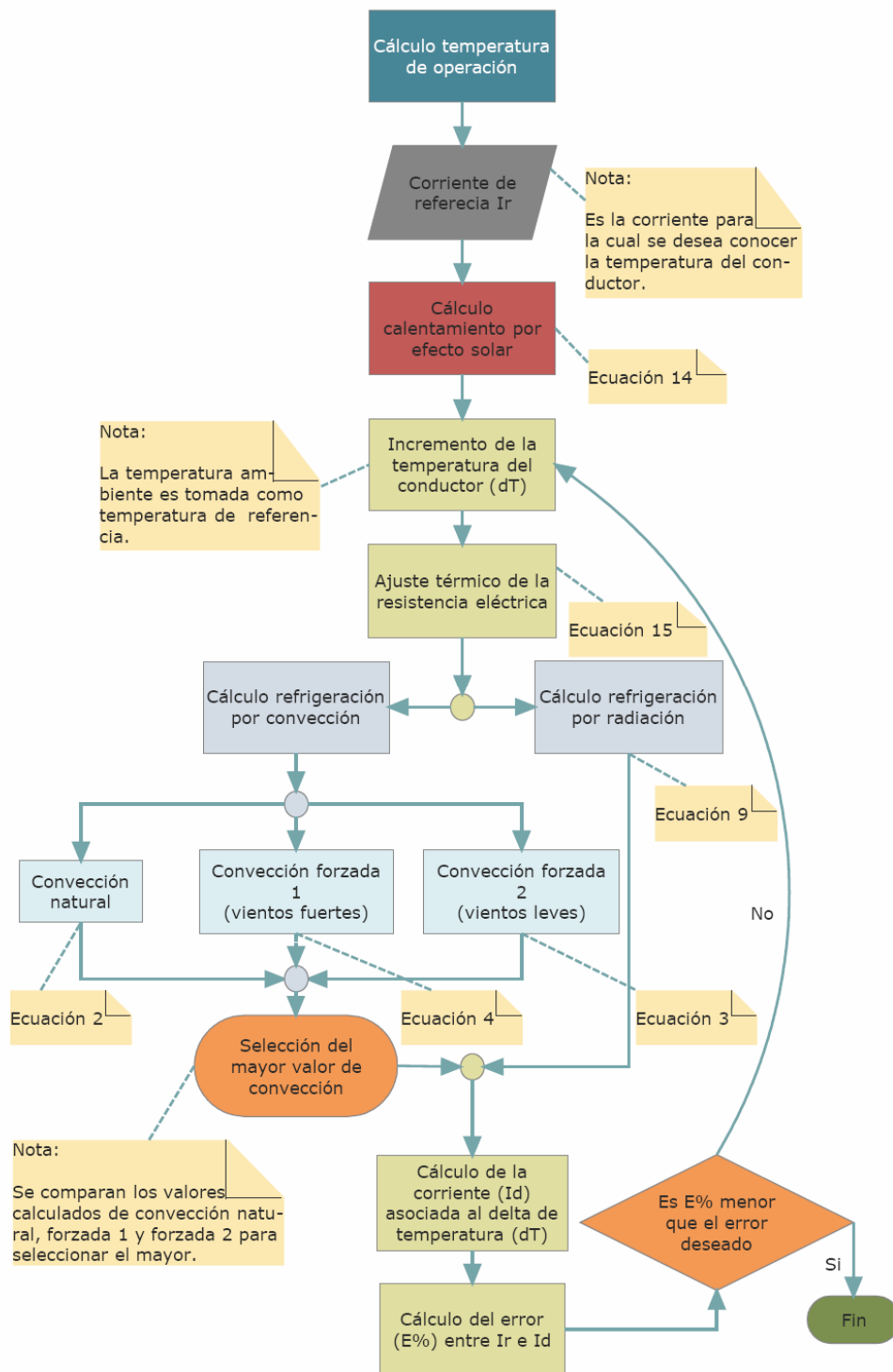
El cálculo de la temperatura del conductor en estado dinámico se estructura entorno a dos ciclos anidados. El primero está asociado con el cálculo de la condición inicial de temperatura para el conductor. En el desarrollo de éste es necesario recurrir al método de cálculo en estado estable presentado anteriormente (ver figura 4), y el resultado del primer proceso iterativo junto al factor de calentamiento por efecto solar son datos de entrada para el segundo proceso iterativo, el cual toma como parámetro de referencia “ I_{ref} ” el valor final de corriente “ I_f ” asociado al caso de estudio. Adicionalmente, a lo largo de este proceso se modifica la temperatura del conductor y se calcula la corriente “ I_d ” asociada a dicho valor de temperatura hasta que la diferencia entre la corriente de referencia y la corriente “ I_d ” sea mínima. Finalmente, haciendo uso de la ecuación (17) se calcula la temperatura del conductor para el instante de interés “ t ”.

Figura 3. Estructura propuesta para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable con el Std IEEE 738



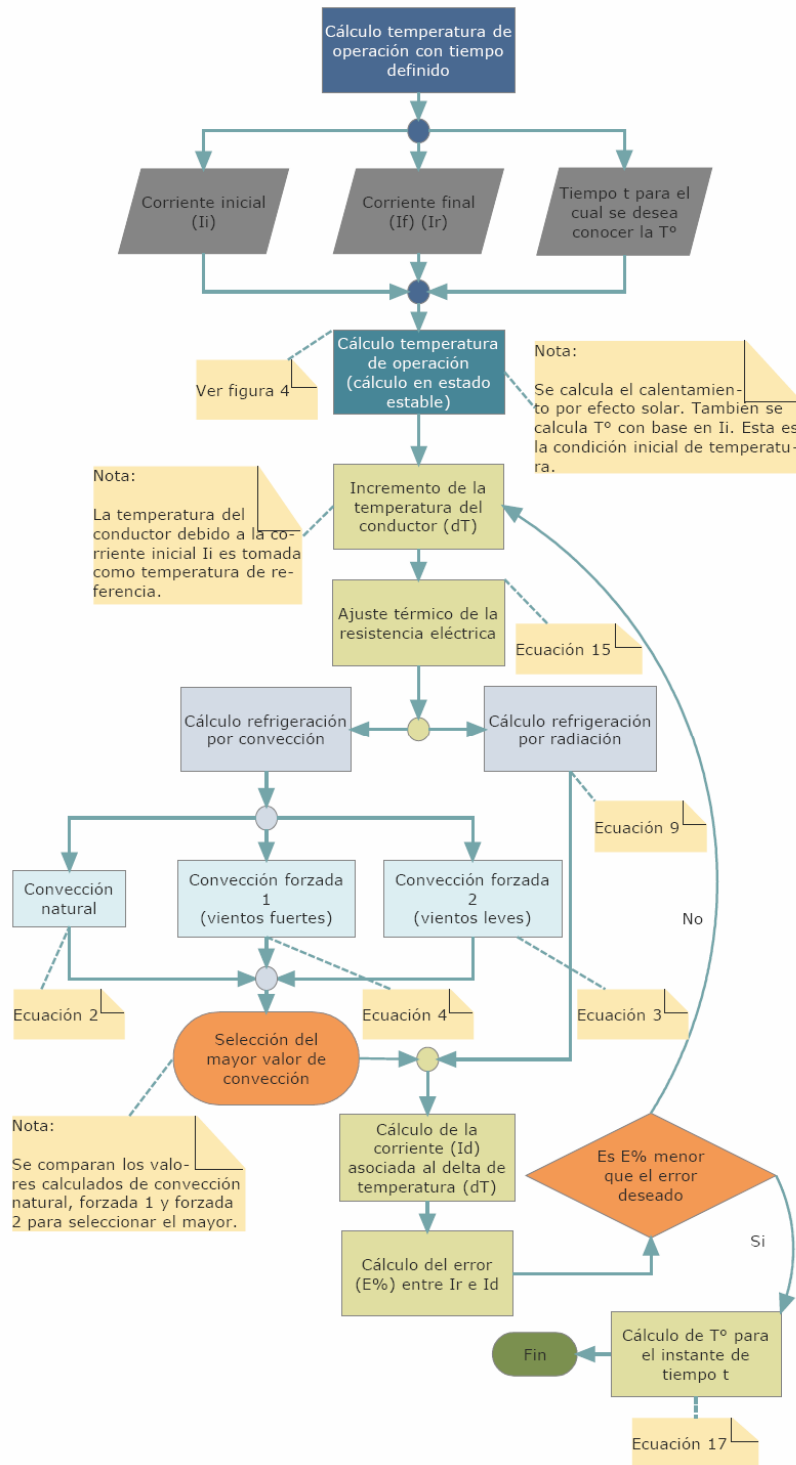
Fuente: El Autor

Figura 4. Estructura propuesta para el cálculo de la temperatura asociada a la corriente de carga en estado estable con el Std IEEE 738



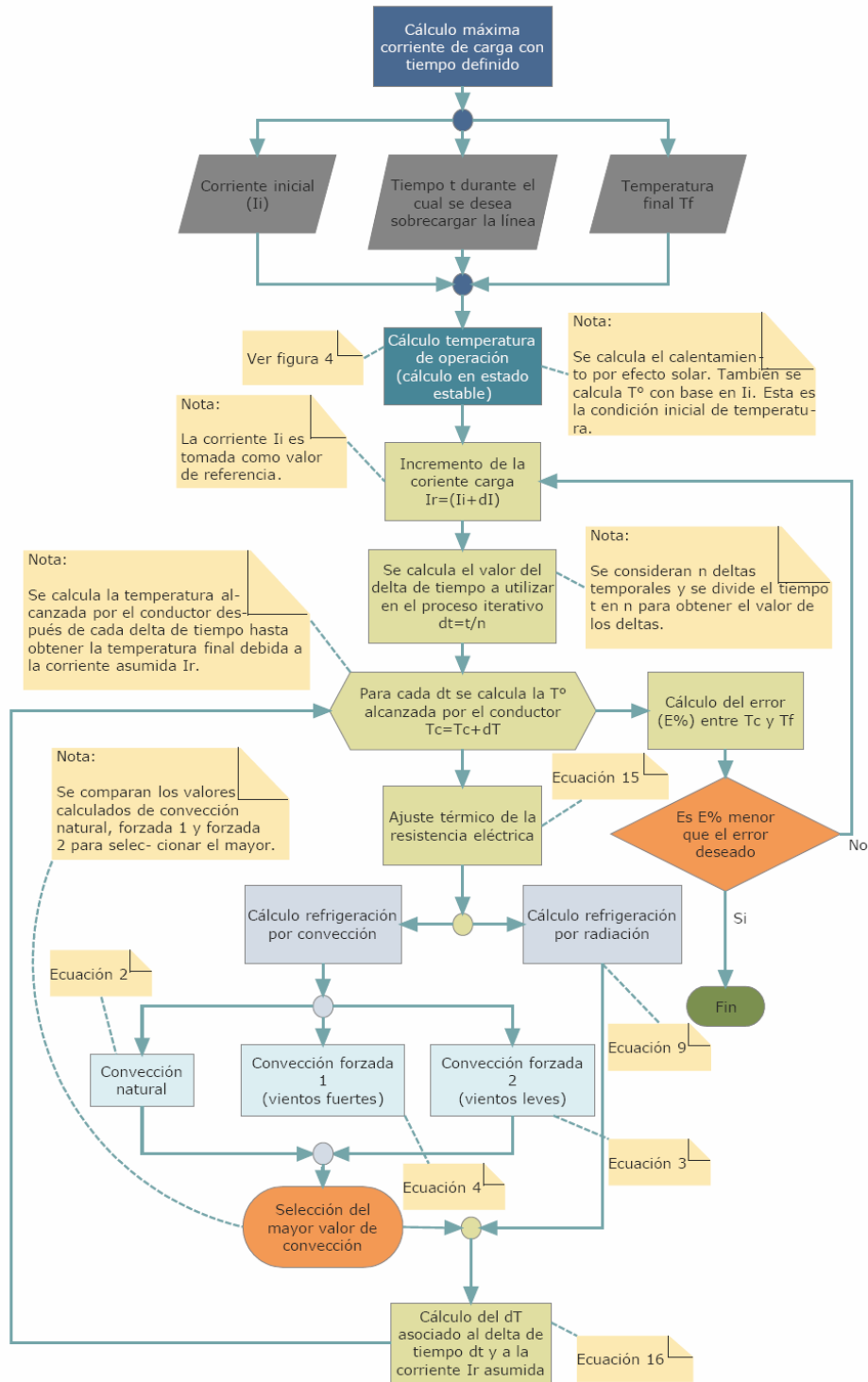
Fuente: El Autor

Figura 5. Estructura propuesta para el cálculo de la temperatura de operación en estado dinámico con el Std IEEE 738



Fuente: El Autor

Figura 6. Estructura propuesta para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico con el Std IEEE 738



Fuente: El Autor

Así mismo, el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico se estructura en tres ciclos anidados. De los cuales dos son procesos iterativos y el tercero es un proceso con número de ciclos definido. El primero de los procesos iterativos está asociado con el cálculo de la condición inicial de temperatura para el conductor. En el desarrollo de éste es necesario recurrir al método de cálculo en estado estable presentado en la figura 4, y el resultado del primer proceso iterativo junto al factor de calentamiento por efecto solar son valores de entrada para el segundo proceso iterativo. En éste se realiza un incremento porcentual de la corriente de operación “ I_r ” con base en la diferencia de temperaturas inicial y final asociadas al caso de estudio. Esta nueva corriente de carga, es tomada como parámetro de entrada para el cálculo de la temperatura del conductor “ T_c ” en cada uno de los Δt que componen el intervalo de tiempo “ t ”, durante el cual se desea someter el conductor a dicha condición de carga. Una vez se conoce la temperatura del conductor “ T_c ” en el último Δt se calcula la diferencia entre ésta y la temperatura de referencia “ T_f ”. Si dicho valor no cumple con el grado de exactitud deseado, se debe modificar la corriente de carga asumida con base en la diferencia calculada y repetir el proceso hasta que la diferencia obtenida entre “ T_c ” y “ T_f ” sea mínima.

Finalmente, es importante resaltar que en los procesos iterativos que se realizan considerando cambios en la temperatura del conductor, debe estar contenido el cálculo de los factores de refrigeración por convección y radiación, así como el ajuste por temperatura de la resistencia eléctrica ya que estos parámetros son influenciados fuertemente por las variaciones térmicas en el conductor.

1.2 METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL CIGRÉ

Las metodologías propuestas por el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad, también se basan en las condiciones de estado estable y dinámico, entendiendo

nuevamente el estado dinámico como la variación de la intensidad de corriente en la carga (no considera el estado transitorio presente en el sistema). En 1992 y 1997 se publicaron las metodologías propuestas para el estado estable y dinámico respectivamente. A continuación se presenta la nomenclatura utilizada en las metodologías y los modelos matemáticos propuestos por el CIGRÉ, así como sus fundamentos teóricos.

Tabla 5. Nomenclatura utilizada por el CIGRÉ

PARÁMETROS DEL CONDUCTOR	
<i>A</i>	= Sección transversal del conductor (mm^2)
<i>C</i>	= Capacidad de calor específico del conductor ($J/(kg K)$)
<i>D</i>	= Diámetro del conductor (m)
<i>D2</i>	= Diámetro del núcleo de acero (m)
<i>d</i>	= Diámetro del hilo utilizado en la capa externa (m)
<i>da</i>	= Diámetro del hilo no ferroso utilizado en las capas del conductor (m)
<i>ds</i>	= Diámetro del hilo utilizado en el núcleo (m)
<i>Kj</i>	= Factor de efecto piel
<i>lz</i>	= Radio de la capa Z del conductor (m)
<i>R</i>	= Resistencia eléctrica por unidad de longitud (Ω/m)
<i>Rf</i>	= Rugosidad del conductor
<i>α</i>	= Coeficiente térmico de la resistencia eléctrica ($1/K$)
<i>α_s</i>	= Coeficiente de absortividad del conductor
<i>ε</i>	= Coeficiente de emisividad del conductor
<i>ρ_a</i>	= Resistividad del material no ferroso utilizado en las capas del conductor

ρ_s = Resistividad del acero

PARÁMETROS GEOGRÁFICOS

F = Albedo ó reflectancia del terreno

H_s = Altitud solar ($^\circ$)

ID = Radiación solar directa (W / m^2)

Id = Radiación solar difusa (W / m^2)

S = Radiación solar global (W / m^2)

v = Velocidad del viento (m / s)

y = Altura sobre el nivel del mar (m)

Z = Ángulo horario del sol; positivo en sentido horario ($^\circ$)

γ_s = Acimut del sol ($^\circ$) (Positivo de sur a oeste)

η = Ángulo de incidencia solar sobre el conductor ($^\circ$)

μ = Viscosidad del aire (kg / ms)

ν = Viscosidad cinemática del aire (m^2 / s)

ρ_r = Densidad relativa del aire

ρ_o = Densidad relativa del aire al nivel del mar

Φ = Latitud de la zona geográfica ($^\circ$) (Norte positivo, Sur negativo)

PARÁMETROS GENERALES Y DE OPERACIÓN

I = Corriente efectiva (A)

I_{dc} = Corriente de carga d.c (A)

I_k = Corriente d.c por unidad de área (A / mm^2)

N = Día del año para el cual se realiza el cálculo (Enero 24 = 24; Marzo 12 = 72, etc.)

δ = Ángulo de incidencia del viento sobre el conductor (0° a

	90°)
γ_c	= Acimut del conductor (°) (Positivo de sur a oeste)
NOMENCLATURA ADICIONAL	
Gr	= Número de Grashof
Nu	= Número de Nusselt
Pr	= Número de Prandtl
Re	= Número de Reynolds
g	= Aceleración de la gravedad (m/s)
hc	= Coeficiente de transferencia térmica ($W/(m^2 K)$)
λ	= Conductividad térmica (W/mK)

Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°144 Octubre de 1992

1.2.1 Cálculo de la ampacidad en estado estable [6].

La metodología propuesta por el CIGRÉ considera como factores de calentamiento: la insolación, el efecto Joule, el efecto magnético y el calentamiento por efecto corona. Además considera como factores de refrigeración: la convección, la radiación electromagnética y la refrigeración por evaporación. La ecuación de balance térmico utilizada es la siguiente²:

$$P_j + P_m + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (19)$$

donde:

P_j calentamiento por efecto joule (W/m)

P_m calentamiento por efecto magnético (W/m)

² La descripción teórica de los fenómenos de calentamiento y refrigeración se presentan en el anexo A

P_s calentamiento por insolación (W / m)

P_i calentamiento por efecto corona (W / m)

P_c refrigeración por convección (W / m)

P_r refrigeración por radiación (W / m)

P_w refrigeración por evaporación (W / m)

Calentamiento por efecto Joule y magnético. Este tipo de calentamiento está asociado con las corrientes generadas por el flujo magnético en el conductor (corrientes de Eddy). Aunque la presencia de estas corrientes es inminente (debido a los campos magnéticos circundantes), su efecto térmico se considera insignificante en conductores homogéneos, y relativamente despreciable en conductores como el ACSR. Por esta razón, solo se presenta como un fenómeno teórico y no se considera en los cálculos.

Por otro lado, el CIGRÉ considera el calentamiento por efecto Joule dependiendo del tipo de conductor que se esté analizando. Si el conductor es homogéneo, su cálculo se realiza con base en la corriente alterna circulante (i), la resistencia d.c del conductor a 20°C ($R_{d.c}$), el coeficiente de variación de la resistencia (α), la temperatura promedio $\left(T_{av} = \frac{(T_a + T_s)}{2} \right)$ y el factor de efecto piel ($K_j = 1,0123$). La ecuación (20) presenta el modelo matemático planteado.

$$P_j = K_j \times i^2 \times R_{d.c} \times [1 + \alpha \times (T_{av} - 20)] \quad (20)$$

donde:

P_j calentamiento por efecto Joule (W / m)

$K_j = 1,0123$ factor de efecto piel recomendado por el CIGRÉ

i corriente a.c circulante

$R_{d.c}$ resistencia d.c del conductor a 20°C

α coeficiente de variación térmica del conductor³ (1/ K)

$T_{av} = \frac{(T_a + T_s)}{2}$ temperatura promedio donde T_a y T_s son la temperatura ambiente y superficial del conductor respectivamente (°C).

Por otro lado, si el conductor es no homogéneo (p. ej *steel cored*), el CIGRÉ propone una metodología diferente para el cálculo de este calentamiento. Dicha metodología plantea la ecuación (20) en función de parámetros de corriente continua. (ver ecuación (21)).

$$P_j = i_{d.c}^2 \times R_{d.c} \times [1 + \alpha \times (T_{av} - 20)] \quad (21)$$

donde:

P_j calentamiento por efecto Joule (W / m)

$i_{d.c} = \sqrt{i_{a.c}^2 \frac{R_{a.c}}{R_{d.c}}}$ corriente d.c circulante (A)

$R_{d.c}$ resistencia d.c del conductor a 20°C (Ω)

α coeficiente de variación térmica del conductor a 20°C (1/ K)

$T_{av} = \frac{(T_a + T_s)}{2}$ temperatura promedio donde T_a y T_s son la temperatura ambiente y superficial del conductor respectivamente (°C).

Al utilizar la aproximación para el caso no homogéneo se calcula la corriente continua asociada al límite térmico del conductor, por ello es necesario estimar su equivalente en corriente alterna. Con base en esto, el CIGRÉ propone los siguientes modelos matemáticos que son aplicables a conductores no

³ El anexo B presenta los coeficientes de dilatación térmica para diferentes materiales utilizados en la fabricación de conductores desnudos.

homogéneos con 1, 2 ó 3 capas de aluminio. Dichos modelos matemáticos son función del área nominal del conductor.

- Para conductores con un área mayor de 175 mm^2

$$I_{a.c} = \frac{I_{d.c}}{\sqrt{1,0045 + 0,09 \times 10^{-6} \times I_{d.c}}} \quad (22)$$

- Para conductores con un área menor de 175 mm^2 y alguna de las siguientes relaciones en función de $I_k = \frac{I_{d.c}}{A}$, donde A es el área en mm^2 .

Si $I_k \leq 0,742$, entonces

$$I_{a.c} = I_{d.c} \quad (23)$$

Si $0,742 \leq I_k \leq 2,486$, entonces:

$$I_{a.c} = \frac{I_{d.c}}{\sqrt{[1 + 0,02 \times (25,62 - 133,9 \times I_k + 288,8 \times I_k^2 - 334,5 \times I_k^3 + 226,5 \times I_k^4 - 89,73 \times I_k^5 + 19,31 \times I_k^6 - 1,744 \times I_k^7)]}} \quad (24)$$

Si $2,486 \leq I_k \leq 3,908$, entonces:

$$I_{a.c} = \frac{I_{d.c}}{\sqrt{[1 + 0,02 \times (2,978 - 22,02 \times I_k + 24,87 \times I_k^2 - 11,64 \times I_k^3 + 2,973 \times I_k^4 - 0,4135 \times I_k^5 + 0,02445 \times I_k^6)]}} \quad (25)$$

Si $I_k \geq 3,908$, entonces

$$I_{a.c} = \frac{I_{d.c}}{\sqrt{1,1}} \quad (26)$$

Adicionalmente, la resistencia d.c es calculada con base en la siguiente formulación matemática:

$$\frac{1}{R_{d.c}} = \frac{1}{R_s} + \sum_1^Z \frac{1}{R_{az}} \quad (27)$$

donde:

- $\frac{1}{R_s} = \frac{\pi d_s^2}{4 \rho_s} \times \left[1 + \sum_1^Z \frac{6 Z}{K_{sz}} \right]$

$$K_{sz} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d_s}{l_z} \right)^2}$$

d_s , diámetro del alma de acero.

Z , número de capas.

ρ_s , resistividad del núcleo de acero a 20°C. ⁴

l_z , cociente entre el ancho de la capa Z_i y el ancho total.

- $\frac{1}{R_{az}} = \frac{\pi d_a^2 n_{az}}{4 \rho_a K_{az}}$

$$K_{az} = \sqrt{1 + \pi \left(\frac{d_a}{l_z} \right)^2}$$

d_a , diámetro del alambre utilizado en la capa Z.

n_{az} , número de filamentos en la capa Z.

ρ_a , resistividad del material utilizado en la capa Z a 20°C.

Calentamiento por efecto solar. Este tipo de calentamiento esta relacionado directamente con la radiación solar que incide en la zona, el coeficiente de absorción propio del conductor y el diámetro exterior del mismo. El CIGRÉ define

⁴ El anexo B presenta los valores de resistividad de diferentes materiales utilizados en la fabricación de conductores desnudos.

dos métodos para su cálculo. El primero de ellos considera la radiación global incidente y es el más utilizado debido a que los equipos de medición de la radiación solar global son relativamente económicos, presentan muy buen desempeño y un alto grado de precisión; adicionalmente, no necesitan cuidado especial y son muy confiables. La ecuación (28) presenta el modelo matemático utilizado para el cálculo.

$$P_s = \alpha_s \times S \times D \quad (28)$$

donde:

P_s , calentamiento por efecto solar (W / m)

α_s , coeficiente de absorción propio del conductor. El CIGRÉ propone utilizar 0,27 para conductores nuevos, 0,95 para conductores viejos y en aquellos casos donde este parámetro es desconocido 0,5.

S , radiación solar global de la zona (W / m^2).

D , diámetro externo del conductor (m).

El segundo método propuesto por el CIGRÉ considera: la radiación solar directa, la radiación solar difusa y el albedo⁵ del terreno. Es muy poco utilizado debido al alto costo y la poca confiabilidad asociada a los equipos de metrología necesarios para estimar estos parámetros solares. La mayor limitante se presenta con el equipo de medición de la radiación solar difusa ya que exige especial cuidado y su operación en zonas remotas, lejos de condiciones ambientales controladas, presenta resultados con incertidumbres elevadas. La ecuación (29) presenta el modelo matemático propuesto por el CIGRÉ.

$$P_s = \alpha_s D [I_D (\sin \eta + \frac{\pi}{2} F \sin H_s) + B] \quad (29)$$

donde:

⁵ Albedo es la proporción de reflexión de la luz de un cuerpo que no ilumina por sí mismo.

P_s calentamiento por efecto solar (W / m)

α_s , coeficiente de absorción propio del conductor. El CIGRÉ propone utilizar 0,27 para conductores nuevos, 0,95 para conductores viejos y en aquellos casos donde este parámetro es desconocido 0,5.

D , diámetro externo del conductor (m).

$$I_D = \frac{1280 \sin H_s}{\sin H_s + 0,314} \text{ radiación solar directa}$$

$H_s = \arcsin[\sin \phi \sin \delta_s + \cos \phi \cos \delta_s \cos Z]$ altitud solar

$\eta = \arccos[\cos H_s \cos(\gamma_s - \gamma_c)]$ ángulo del sol con respecto al eje del conductor

$$\gamma_s = \arcsin\left[\frac{\cos \delta_s \sin Z}{\cos H_s}\right] \text{ acimut del sol}$$

γ_c acimut de la línea de transmisión

$\delta_s = 23,4 \sin[360^\circ(284 + N)/365]$ declinación solar

ϕ latitud geográfica de la zona

Z hora angular del sol, aumenta 15° por cada hora a partir de las 12

N día del año para el cual se desea realizar el análisis

$$B = I_d (\pi / 2)(1 + F)$$

I_d radiación solar difusa

F albedo asociado al tipo de terreno presente en la zona (ver tabla 6)

Adicionalmente la radiación solar directa debe ser corregida con base en la altura sobre el nivel del mar asociada a la zona geográfica en estudio (ver tabla 7).

Tabla 6. Albedo asociado a diferentes tipos de terreno

Tipo de Superficie	Albedo F
Agua	0,05
Bosque	0,1
Área urbana	0,15
Tierra, lodo, grama ó cultivos	0,2
Arena	0,3
Hielo	0,4 a 0,6
Nieve	0,6 a 0,8

Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°144 Octubre de 1992

Tabla 7. Factor de corrección de la radiación solar directa por efecto de la altura geográfica

Factor de corrección	Altura sobre el nivel del mar
0,7 a 1,3	$0 < H \leq 1000$ m
1,3 a 2,2	$1000 < H \leq 2000$ m
2,2	> 2000 m

Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°144 Octubre de 1992

Calentamiento por efecto corona. Al igual que el calentamiento por efecto magnético, el calentamiento por efecto corona sólo es considerado teóricamente. Se sabe que el fenómeno de ionización ocurrido en la frontera donde se encuentra el aire y la superficie del conductor, genera un incremento en la temperatura del mismo. Sin embargo, debido a que el efecto corona se origina durante precipitaciones fuertes, que están acompañadas de vientos de alta intensidad, dicho calentamiento es minimizado. Con base en lo anterior, el CIGRÉ considera que su aporte térmico es despreciable y omite este tipo de calentamiento en la aplicación de la metodología.

Refrigeración por convección. La refrigeración por convección es uno de los procesos de transferencia térmica más significativo, esto se debe a que generalmente aporta el mayor factor de refrigeración a la ecuación de equilibrio térmico.

Cuando la superficie del conductor está caliente, la temperatura del aire circundante aumenta, y esto hace que disminuya su densidad. El aire menos denso gana altura, permitiendo que aire fresco entre en contacto con el conductor. Si el fenómeno se da en presencia del viento, este ciclo se realiza a mayor velocidad.

La ecuación (30), presenta el modelo matemático para el cálculo de la transferencia térmica por convección:

$$P_c = \pi \times \lambda_f \times (T_s - T_a) \times N_u \quad (30)$$

donde:

λ_f , conductividad térmica del aire. Se calcula utilizando la ecuación (31).

$$\lambda_f = 2,42 \times 10^{-2} + 7,2 \times 10^{-5} \times T_{AV} \quad (31)$$

T_s , temperatura de la superficie del conductor.

T_a , temperatura ambiente.

$T_{AV} = \frac{(T_a + T_s)}{2}$, promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura

superficial del conductor.

N_u , número de Nusselt.

El CIGRÉ caracteriza el número de Nusselt para dos condiciones específicas, la primera se da cuando la refrigeración es natural (*la velocidad del viento igual a cero, $v = 0$*), y la segunda cuando la refrigeración es forzada (*la velocidad del viento es diferente de cero, $v \neq 0$*).

- Número de Nusselt para la refrigeración natural:

El número de Nusselt para la refrigeración natural depende del producto de dos nuevos parámetros, el número Grashof y el número de Prandtl.

La ecuación para obtener el número de Grashof es la siguiente:

$$Gr = \frac{D^3 \times (T_s - T_a) \times g}{(T_{AV} + 273) \times v^2} \quad (32)$$

donde:

D , diámetro externo del conductor.

g , aceleración de la gravedad, $g = 9,807 \frac{m}{s^2}$

T_s , temperatura de la superficie del conductor.

T_a , temperatura ambiente.

$$T_{AV} = \frac{(T_a + T_s)}{2}, \text{ promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura}$$

superficial del conductor.

La ecuación del número de Prandtl es:

$$\text{Pr} = \frac{c\mu}{\lambda_f} = 0,715 - 2,5 \times 10^{-4} \times T_{AV} \quad (33)$$

donde:

c , calor específico del aire a presión constante.

μ , viscosidad dinámica del aire.

λ_f , conductividad térmica del aire. Se calcula utilizando la ecuación (31).

$$T_{AV} = \frac{(T_a + T_s)}{2}, \text{ promedio entre la temperatura ambiente y la temperatura}$$

superficial del conductor.

La ecuación (34) presenta el modelo matemático para obtener el número de Nusselt bajo esta condición de refrigeración.

$$N_u = A_2 \times (Gr \times \text{Pr})^{m_2} \quad (34)$$

Los valores de A_2 y m_2 son los establecidos en la tabla 8.

Tabla 8. Constantes para el Cálculo del Número de Nusselt en la Refrigeración Natural

$Gr \times Pr$		A_2	m_2
Desde	Hasta		
10^2	10^4	0,850	0,188
10^4	10^6	0,480	0,250

Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°144 Octubre de 1992

- Número de Nusselt para la Refrigeración Forzada:

Para este tipo de refrigeración, el número de Nusselt se obtiene mediante el siguiente modelo matemático:

$$N_u = B_1 \times R_e^n \quad (35.1)$$

donde:

R_e , número de Reynolds.

B_1 y n constantes que dependen del número de Reynolds R_e y del coeficiente de rugosidad de la superficie del conductor R_f .

$$N_{u\text{cor}} = 0,55 \times N_{u\delta=90} \quad (35.2)$$

donde:

$N_{u\text{cor}}$ número de Nusselt corregido para la refrigeración forzada, se utiliza cuando la velocidad del viento es menor de 0,5 m/s

$N_{u\delta=90}$ número de Nusselt para un ángulo de 90°

El número de Reynolds se obtiene como:

$$R_e = \frac{\rho_r v D}{\nu} \quad (36)$$

donde:

R_e número de Reynolds

ρ_r , densidad relativa del aire, que empíricamente puede ser calculada cómo $e^{-1.16 \cdot 10^{-4} y}$, considerando “y” como la altura sobre el nivel del mar en metros.

v , velocidad del viento.

D , diámetro externo del conductor.

ν , viscosidad cinemática del aire $1,32 \times 10^{-5} + 9,5 \times 10^{-8} \times T_{AV}$.

El coeficiente de rugosidad de la superficie del conductor es igual a:

$$R_f = \frac{d}{[2 \times (D - 2 \times d)]} \quad (37)$$

donde:

R_f coeficiente de rugosidad de la superficie del conductor

d , diámetro de uno de los hilos de la capa externa.

D , diámetro externo del conductor.

La tabla 9 presenta los valores de B_1 y n con base en R_e y R_f .

Al igual que el Std IEEE 738, el CIGRÉ considera un factor de corrección para el ángulo de incidencia del viento, este debe multiplicar al número de Nusselt cuando el ángulo de incidencia sea menor de 90°. La ecuación (38) muestra el modelo matemático utilizado.

$$\text{Factor de Corrección} = \left[A_1 + B_2 \times (\text{Sin } \delta)^{m1} \right] \quad (38)$$

donde:

δ ángulo de incidencia del viento

$A_1 = 0,42$, $B_2 = 0,68$ y $m1 = 1,08$ para $0 < \delta < 24^\circ$.

$A_1 = 0,42$, $B_2 = 0,58$ y $m1 = 0,9$ para $24^\circ < \delta < 90^\circ$.

Tabla 9. Constantes para el Cálculo del Número de Nusselt en la Refrigeración Forzada

Tipo de Superficie	Desde R_e	Hasta	B_1	n
Toda Superficie	10^2	$2,65 \times 10^3$	0,641	0,471
$R_f \leq 0,05$	$> 2,65 \times 10^3$	5×10^4	0,178	0,633
$R_f > 0,05$	$> 2,65 \times 10^3$	5×10^4	0,048	0,8

Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°144 Octubre de 1992

Refrigeración por radiación. La refrigeración por radiación se basa en la capacidad que posee el conductor de emitir el calor absorbido hacia el medio circundante.

El modelo matemático utilizado para su cálculo se presenta en la ecuación (39):

$$P_r = \pi \times D \times \varepsilon \times \sigma_B \times \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (39)$$

donde:

σ_B , constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$.

D diámetro del conductor

T_s , temperatura de la superficie del conductor.

T_a , temperatura ambiente.

ε , coeficiente de emisividad propio del conductor. El CIGRÉ propone utilizar 0,27 para conductores nuevos, 0,95 para conductores viejos y en aquellos casos donde este parámetro es desconocido 0,5.

Refrigeración por evaporación. La refrigeración por evaporación, se asocia con el efecto refrigerante que producen las gotas de lluvia sobre el conductor. El fenómeno se centra en la transferencia térmica que ocurre entre la superficie del conductor y el agua acumulada sobre él, de tal forma que esta adquiere la energía térmica suficiente para alcanzar su punto de ebullición. En la metodología del CIGRÉ este fenómeno solo se considera teóricamente, pues, no se desarrolla un modelo matemático que permita estimar dicho aporte a la ecuación de equilibrio térmico.

1.2.2 Cálculo de la ampacidad en estado dinámico [7] (variación de carga).

La metodología desarrollada por el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en estado dinámico (1997) utiliza como base los fundamentos teóricos de la metodología desarrollada para la condición de estado estable (1992). La ecuación (40) presenta el modelo matemático de la condición de equilibrio térmico en estado dinámico⁶.

$$mC_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_j + P_s + P_m - P_r - P_c \quad (40)$$

donde:

m masa del conductor por unidad de longitud (kg/m)

⁶ La descripción teórica de los fenómenos de refrigeración y calentamiento se presentan en el anexo A

C_p capacidad de calor específico del conductor ($J/(kg K)$)

$\frac{dT_{AV}}{dt}$ variación de la temperatura del conductor con respecto al tiempo (K/s)

P_j calentamiento por efecto joule (W/m)

P_s calentamiento por insolación (W/m)

P_m calentamiento por efecto magnético (W/m)

P_r refrigeración por radiación (W/m)

P_c refrigeración por convección (W/m)

Cuando el conductor utilizado es no homogéneo el producto de la masa y la capacidad de calor debe ser calculado utilizando la siguiente expresión:

$$mC_p = m_a C_{pa} + m_s C_{ps} \quad (41)$$

donde:

m masa del conductor por unidad de longitud (kg/m)

C_p capacidad de calor específico del conductor ($J/(kg K)$)

m_a masa por unidad de longitud del núcleo del conductor (kg/m)

C_{pa} capacidad de calor específico del núcleo del conductor ($J/(kg K)$)

m_s masa por unidad de longitud de la sección que rodea al núcleo del conductor (kg/m)

C_{ps} capacidad de calor específico de la sección que rodea al núcleo del conductor ($J/(kg K)$)

La capacidad de calor específico de los materiales varía linealmente con la temperatura, a partir del siguiente modelo matemático.

$$C_p(T) = C_{po} [1 + \beta(T - 20)] \quad (42)$$

donde:

C_p capacidad de calor específico del material a la temperatura T

C_{po} capacidad de calor específico del material a 20°

β factor de temperatura (1/ K)

T temperatura a la cual se desea conocer la capacidad de calor específico del material (°C)

Tabla 10. Densidad de masa y capacidad de calor específico de algunos metales

Metal	Temperatura (°C)	ρ (kg/m ³)	Cpo (J/kg K)	β (1/K) 10 ⁻⁴
Aluminio	20	2703	897	3,8
Aleación de aluminio	20	2703	909	4,5
Cobre	20	8890	383	3,35
Acero	20	7780	481	1
Aluminio con alma de acero	20	Ecuación 43	Ecuación 44	1,4

Fuente: [7][8][9][10][11]

La densidad de masa total del conductor se obtiene como:

$$\gamma = \frac{\gamma_a A_a + \gamma_s A_s}{A_a + A_s} \quad (43)$$

donde:

γ densidad de masa total del conductor (kg / m³)

γ_a densidad de masa del núcleo del conductor (kg / m³)

A_a área de la sección del núcleo del conductor (m^2)

γ_s densidad de masa de la sección que rodea al núcleo del conductor (kg / m^3)

A_s área de la sección que rodea al núcleo del conductor (m^2)

La ecuación para evaluar de calor específico del conductor es la siguiente:

$$C_p = \frac{C_{pa} \gamma_a A_a + C_{ps} \gamma_s A_s}{\gamma_a A_a + \gamma_s A_s} \quad (44)$$

donde:

C_p capacidad de calor específico del conductor ($J / (kg K)$)

C_{pa} capacidad de calor específico del núcleo del conductor

γ_a densidad de masa del núcleo del conductor (kg / m^3)

A_a área de la sección del núcleo del conductor (m^2)

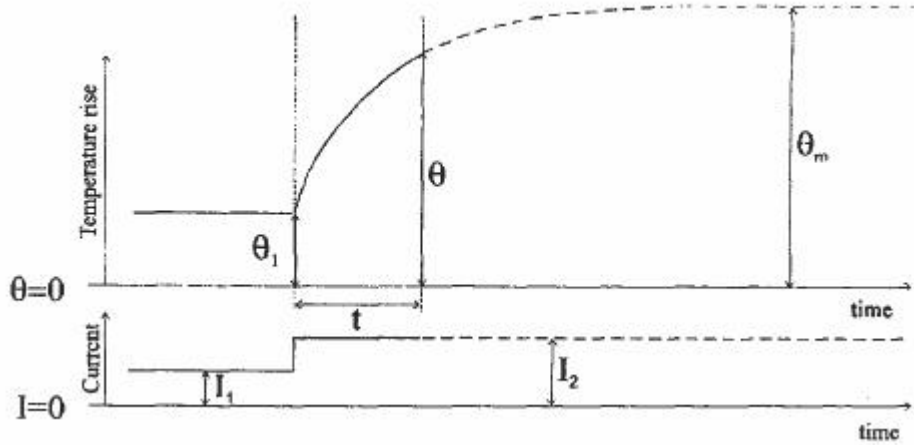
C_{ps} capacidad de calor específico de la sección que rodea al núcleo del conductor

γ_s densidad de masa de la sección que rodea al núcleo del conductor (kg / m^3)

A_s área de la sección que rodea al núcleo del conductor (m^2)

Cuando el conductor es sometido a una variación de carga, el cambio de temperatura en él no es instantáneo, éste se da de forma exponencial creciente ó decreciente, hasta alcanzar la estabilidad a una temperatura final θ_m . La figura 7 muestra este comportamiento para el caso de incremento en la corriente de carga.

Figura 7. Comportamiento de la temperatura del conductor ante la variación de carga



Fuente: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors Electra N°174 Octubre de 1997

El modelo matemático presentado por el CIGRÉ para estimar la variación de temperatura del conductor en función del tiempo es:

$$\theta \cong \theta_m - (\theta_m - \theta_1) \times e^{-\frac{t}{\tau_h}} \quad (45)$$

donde:

θ temperatura del conductor en el instante t

$\theta_1 = T_{AV1} - T_a$ temperatura del conductor antes de experimentar la variación de carga

T_{AV1} temperatura promedio del conductor para la condición de carga inicial

T_a temperatura ambiente

$\theta_m = T_{AVm} - T_a$ temperatura final del conductor al experimentar la variación de carga

T_{AVm} máxima temperatura alcanzada por el conductor para la condición de carga final

τ_h constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor (aumento ó reducción)

Así mismo, el CIGRÉ desarrolla dos conjuntos de modelos matemáticos para el cálculo de la constante térmica τ_h . El primer conjunto es válido en condiciones dinámicas donde se presenta un aumento en la corriente de carga. Éste se subdivide en dos modelos matemáticos, el primero aplicable a conductores homogéneos y el segundo a no homogéneos.

La ecuación para obtener la constante térmica de conductores homogéneos es:

$$\tau_h = \frac{mC_p\theta_m}{I^2R_{ac} + P_s} \quad (46)$$

donde:

τ_h constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor (aumento)

m masa del conductor por unidad de longitud (kg/m)

C_p capacidad de calor específico del material a la temperatura T

$\theta_m = T_{AVm} - T_a$ temperatura final del conductor al experimentar la variación de carga

I corriente de carga final

R_{ac} resistencia eléctrica del conductor a la temperatura T_a

P_s calentamiento por insolación (W/m)

La ecuación para obtener la constante de tiempo en conductores no homogéneos es:

$$\tau_h = \frac{(m_a C_{pa} + m_s C_{ps})\theta_m}{I^2 R_{ac} + P_s} + \frac{m_s C_{ps} Ln(D/D_2)}{2\pi\lambda_a} \quad (47)$$

donde:

τ_h constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor (aumento)

m_a masa por unidad de longitud del núcleo del conductor (kg/m)

C_{pa} capacidad de calor específico del núcleo del conductor

m_s masa por unidad de longitud de la sección que rodea al núcleo del conductor
 C_{ps} capacidad de calor específico de la sección que rodea al núcleo del conductor
 $\theta_m = T_{AVm} - T_a$ temperatura final del conductor al experimentar la variación de carga
 I corriente de carga final
 R_{ac} resistencia eléctrica del conductor a la temperatura T_a
 P_s calentamiento por insolación (W / m)
 λ_a conductividad térmica del alma de acero del conductor
 D diámetro externo del conductor (m).
 D_2 diámetro del alma de acero (m)

El segundo conjunto de modelos matemáticos es válido en condiciones dinámicas donde se presenta una reducción de la corriente de carga. Las siguientes ecuaciones son desarrolladas por el CIGRÉ para el caso de conductores homogéneos y no homogéneos respectivamente.

$$\tau_{co} = \frac{mC_p\theta_{m1}}{P_1} \quad (48)$$

donde:

τ_{co} constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor homogéneo (reducción)

m masa del conductor por unidad de longitud (kg / m)

C_p capacidad de calor específico del material a la temperatura T

$\theta_{m1} = T_{AVm} - T_a$ temperatura inicial del conductor al experimentar la variación de carga

$$P_1 = I_1^2 R_{ac} (1 + \alpha \theta_{m1}) + P_s - \alpha I_2^2 R_{ac} \theta_{m1}$$

I_1 e I_2 corrientes inicial y final

R_{ac} resistencia eléctrica del conductor a la temperatura T_a

α coeficiente de variación térmica del conductor ($1/K$)

P_s calentamiento por efecto solar (W/m)

$$\tau_{co} = \frac{(m_a C_{pa} + m_s C_{ps})\theta_{m1}}{P_1} + \frac{m_s C_{ps} \ln(D/D_2)}{2\pi\lambda_a} \quad (49)$$

donde:

τ_{co} constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor no homogéneo (reducción)

m masa del conductor por unidad de longitud (kg/m)

C_p capacidad de calor específico del material a la temperatura T

$\theta_{m1} = T_{AVm} - T_a$ temperatura inicial del conductor al experimentar la variación de carga

$$P_1 = I_1^2 R_{ac} (1 + \alpha\theta_{m1}) + P_s - \alpha I_2^2 R_{ac} \theta_{m1}$$

I_1 e I_2 corrientes inicial y final respectivamente

R_{ac} resistencia eléctrica del conductor a la temperatura T_a

α coeficiente de variación térmica del conductor ($1/K$)

P_s calentamiento por efecto solar (W/m)

λ_a conductividad térmica del alma de acero del conductor

D diámetro externo del conductor (m).

D_2 diámetro del alma de acero (m)

El modelo matemático desarrollado por el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en condiciones dinámicas, permite obtener a través de procesos iterativos la intensidad de corriente que lleva al conductor a su límite térmico en un intervalo de tiempo definido. Adicionalmente, permite conocer, a través del modelo matemático

presentado en la ecuación (50), el intervalo de tiempo que el conductor puede operar de forma segura ante el aumento de la condición de carga y el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de referencia ante la reducción de la corriente de carga (ver ecuación (51)).

$$t_{12} \cong -\tau_h \operatorname{Ln} \left(\frac{\theta_{m2} - \theta_2}{\theta_{m2} - \theta_{m1}} \right) \quad (50)$$

donde:

t_{12} intervalo de operación válido para la condición de carga dinámica estudiada

τ_h constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor (aumento)

θ_{m1} temperatura del conductor para la corriente de carga inicial

θ_{m2} temperatura del conductor para la corriente de carga final

θ_2 temperatura objetivo

$$t_{12} \cong -\tau_{co} \operatorname{Ln} \left(\frac{P_1 \frac{\theta_2}{\theta_{m1}} - P_2}{P_1 \frac{\theta_1}{\theta_{m1}} - P_2} \right) \quad (51)$$

donde:

t_{12} tiempo que tarda el conductor de pasar de la temperatura inicial a la final

τ_{co} constante de tiempo asociada a la variación térmica del conductor (reducción)

θ_{m1} temperatura del conductor para la corriente de carga inicial

$$P_1 = I_1^2 R_{ac} (1 + \alpha \theta_{m1}) + P_s - \alpha I_2^2 R_{ac} \theta_{m1}$$

$$P_2 = I_2^2 R_{a.c} + P_s$$

I_1 e I_2 corrientes inicial y final

R_{ac} resistencia eléctrica del conductor a la temperatura T_a

α coeficiente de variación térmica del conductor ($1/K$)

P_s calentamiento por efecto solar (W / m)

θ_1 y θ_2 temperaturas inicial y final consideradas en el proceso de refrigeración

1.2.3 Estructura de la metodología propuesta por el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad.

La metodología publicada por el CIGRÉ contiene la información general de los modelos matemáticos propuestos para el análisis del comportamiento térmico de los conductores utilizados en las líneas de transmisión. Haciendo uso de dicha información, se ha complementado la metodología, al construir el conjunto de procesos que desglosan la estructura general del cálculo, permitiendo así, alcanzar un mayor nivel de comprensión en el momento de abordar su aplicación.

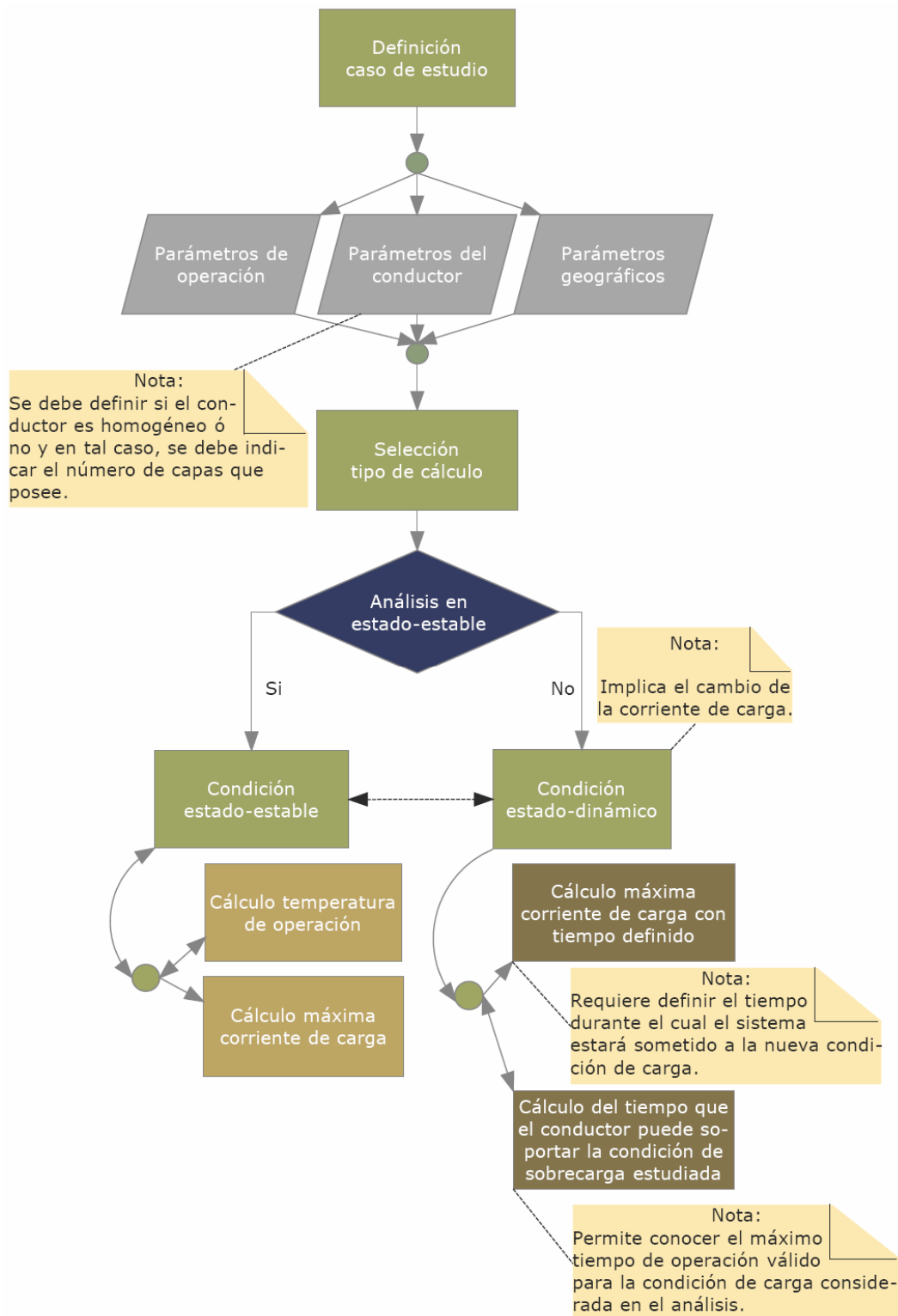
En la figura 8 se presenta la estructura general de la metodología del CIGRÉ. Una vez se aborda el caso de estudio es necesario definir los parámetros de operación de la línea de transmisión (nivel de tensión, potencia a transmitir, corriente de carga en estado estable, número de circuitos y número de conductores por fase), las características del conductor (tipo de conductor, número de capas, coeficientes de emisividad y absorptividad, temperatura límite del conductor, diámetro del conductor, resistencia eléctrica) y las condiciones atmosféricas de la zona geográfica donde se encuentra la línea de transmisión (velocidad del viento, ángulo de incidencia del viento sobre el conductor, altura sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, latitud geográfica y el tipo de terreno).

Una vez definidos los parámetros generales del caso de estudio, la metodología del CIGRÉ permite considerar una de dos condiciones de operación, la primera de ellas es la condición de estado estable, en la cual la corriente de carga permanece invariante en el tiempo. La segunda es la condición de estado dinámico, la cual tiene en cuenta la variación instantánea de la corriente de carga durante un

intervalo de tiempo definido. Se observa que existe una relación bidireccional entre la condición de estado dinámico y la condición de estado estable. Esto se debe a que la condición de estado dinámico requiere abordar algunas etapas del cálculo en estado estable con el fin de obtener las condiciones iniciales de los estados térmicos del conductor, así mismo al interior de la condición de estado dinámico existe una relación bidireccional entre los métodos de cálculo de la corriente máxima y el cálculo del tiempo de operación válido para el caso de estudio.

Finalmente, la estructura general de la metodología del CIGRÉ se compone de dos tipos de cálculo en cada una de las condiciones de operación descritas anteriormente. En el análisis de estado estable, estos se enfocan en la temperatura de operación ante una corriente de carga definida y en la máxima corriente de carga que el conductor es capaz de soportar sin que se produzca el recocimiento de su superficie (pérdida de propiedades mecánicas y eléctricas). Así mismo, en la condición de estado dinámico el enfoque se da al cálculo de la máxima corriente de carga y al tiempo de operación válido para la variación de carga asumida en el estudio.

Figura 8. Estructura general de la metodología del CIGRÉ



Fuente: El Autor

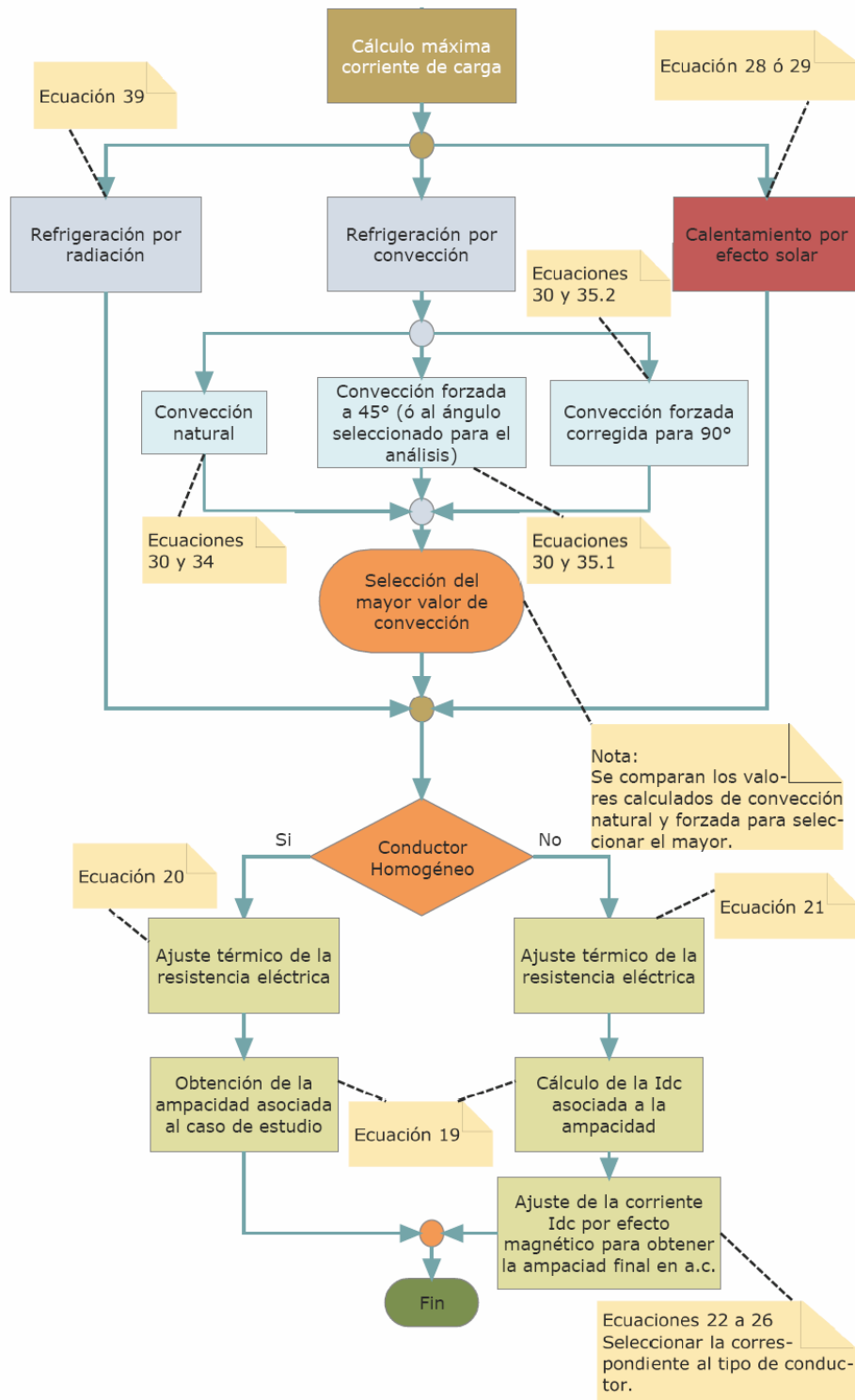
Cálculos en la condición de estado estable. Bajo esta condición de operación el cálculo de la máxima corriente de carga y el cálculo de la temperatura están estructurados conforme se muestra en las figuras 9 y 10 respectivamente. Para el cálculo de la máxima corriente la metodología está constituida de forma unidireccional, ésta inicia con el cálculo de los factores de calentamiento por efecto solar, refrigeración por radiación y refrigeración por convección. En este último es necesario seleccionar el mayor valor entre la convección natural, la convección forzada con ángulo de incidencia definido (en su defecto con 45°) y la convección forzada corregida con ángulo de incidencia de 90° . Una vez se calculan los factores de refrigeración y calentamiento se realiza el ajuste térmico a la resistencia del conductor con base en su caracterización (homogéneo ó no-homogéneo), para finalmente obtener la máxima corriente de carga.

Para el cálculo de la temperatura de operación del conductor en estado estable la metodología está constituida como un ciclo anidado, ya que requiere la realización de un proceso iterativo para su solución numérica. El cálculo inicia con la identificación de la corriente de carga “Iref” asociada al análisis, con base en el tipo de conductor utilizado (homogéneo ó no-homogéneo), y el cálculo del factor de calentamiento por efecto solar. Conociendo estos parámetros se da inicio al proceso iterativo, el cual considera como temperatura de referencia la temperatura ambiente “Ta”. A partir de ella, se calcula la corriente “Id” asociada a dicha temperatura. Con base en este procedimiento se va incrementando la temperatura del conductor hasta que la corriente “Id” asociada a la temperatura de prueba sea igual a la corriente de carga asociada al análisis. Dentro del proceso iterativo se considera el cálculo de los factores de refrigeración por radiación y convección. Esto se debe al alto impacto que genera sobre ellos la variación de la temperatura, mientras que el calentamiento por efecto solar está fuertemente influenciado por las condiciones geográficas de la zona, las cuales permanecen invariantes en el análisis.

Cálculos en la condición de estado dinámico. La estructura de la metodología del CIGRÉ para el cálculo del tiempo de operación del conductor y de la máxima corriente de carga bajo esta condición de operación se presenta en las figuras 11 y 12 respectivamente.

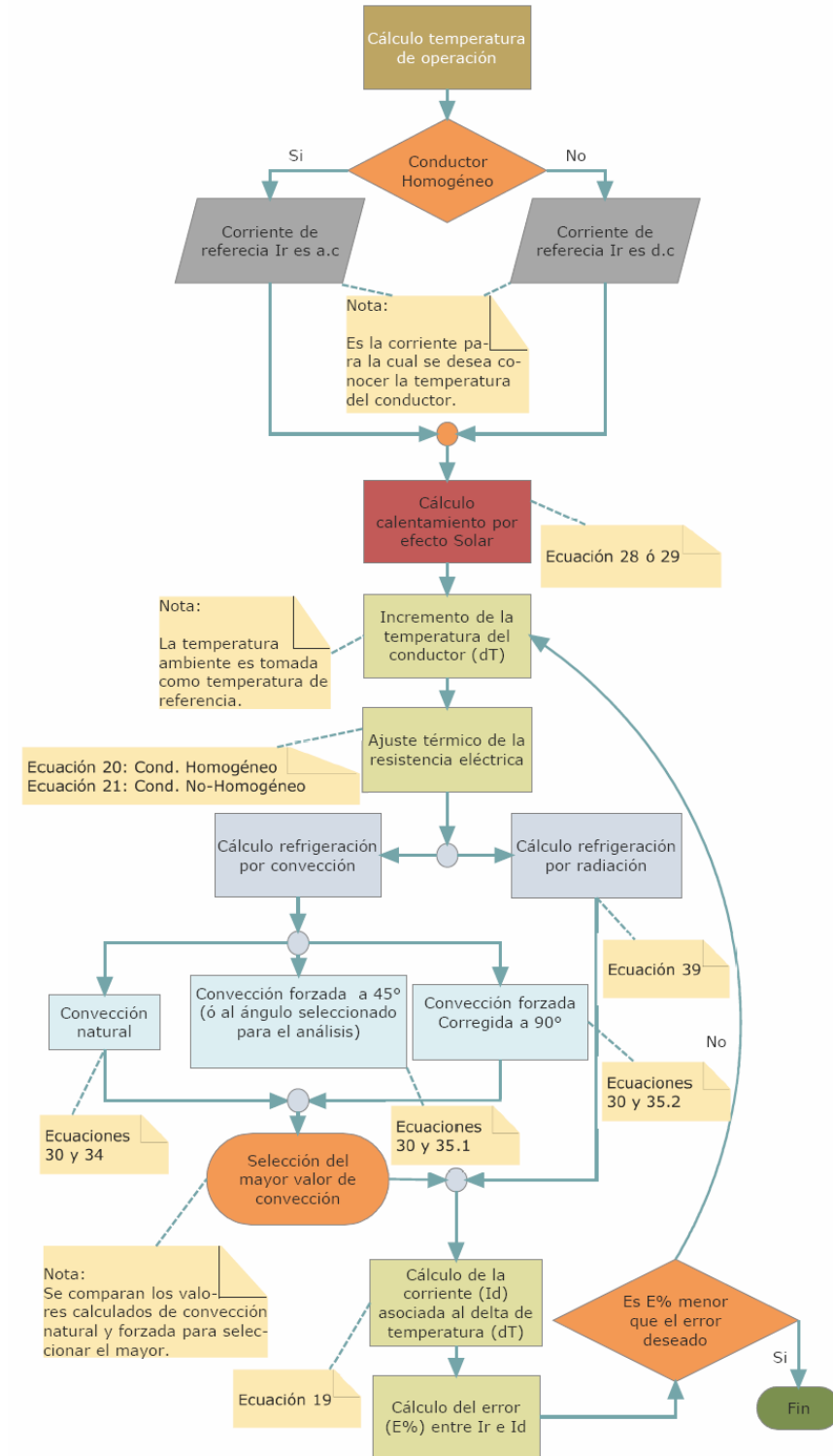
El cálculo del tiempo de operación del conductor en estado dinámico se estructura de forma lineal. Este inicia con el cálculo de la condición inicial de temperatura para el conductor a partir del método de estado estable presentado en la figura 10. El resultado de dicho proceso iterativo junto al factor de calentamiento por efecto solar son los valores de entrada para la segunda etapa del proceso, donde a partir del tipo de conductor utilizado y la relación existente entre las corrientes de carga inicial “ I_i ” y final “ I_f ” se obtiene el tiempo de operación total para el caso de estudio considerando el calentamiento límite del conductor ó la refrigeración deseada para el mismo.

Figura 9. Estructura propuesta para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable con la metodología del CIGRÉ



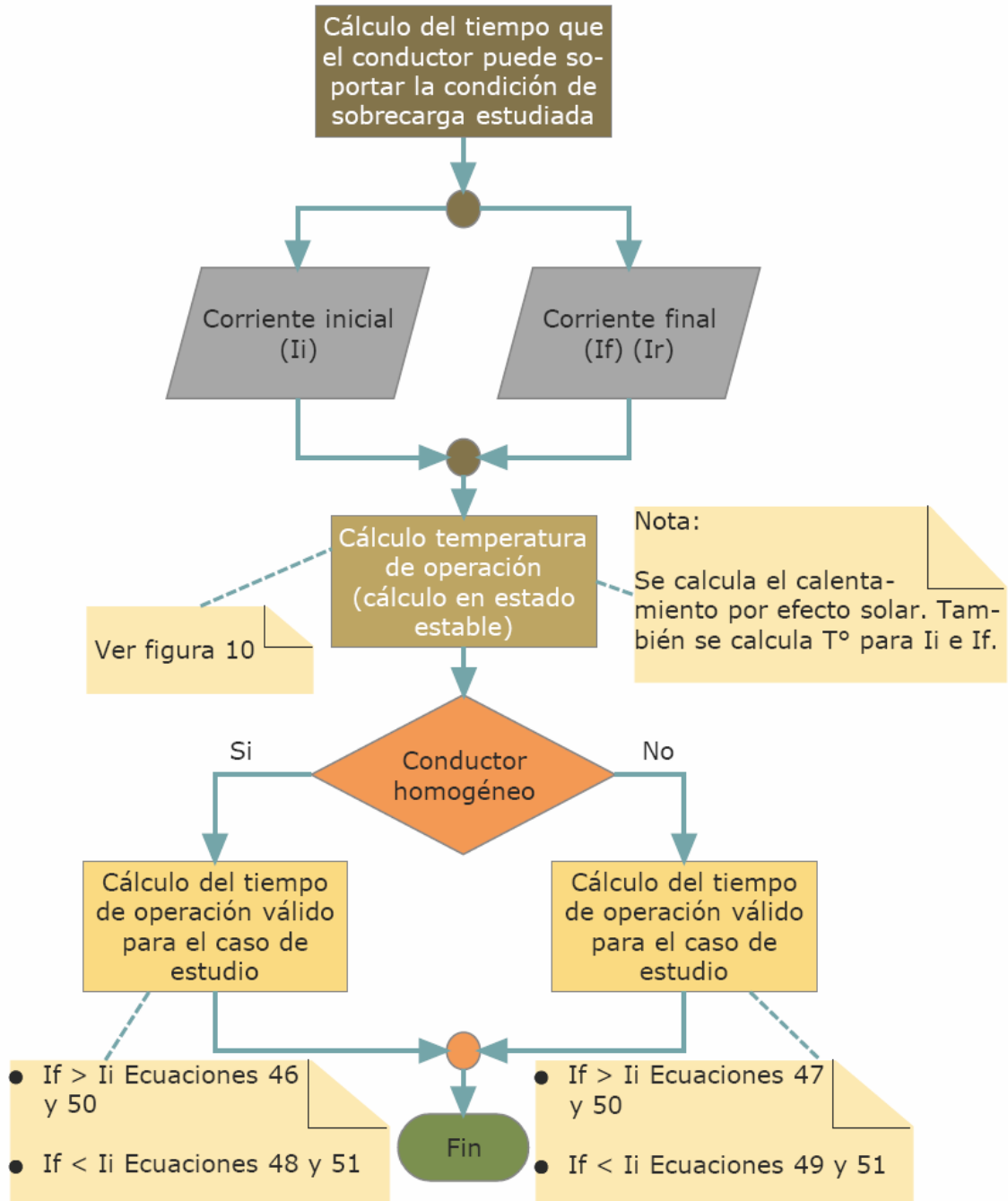
Fuente: El Autor

Figura 10. Estructura propuesta para el cálculo de la temperatura asociada a la corriente de carga en estado estable con la metodología del CIGRÉ



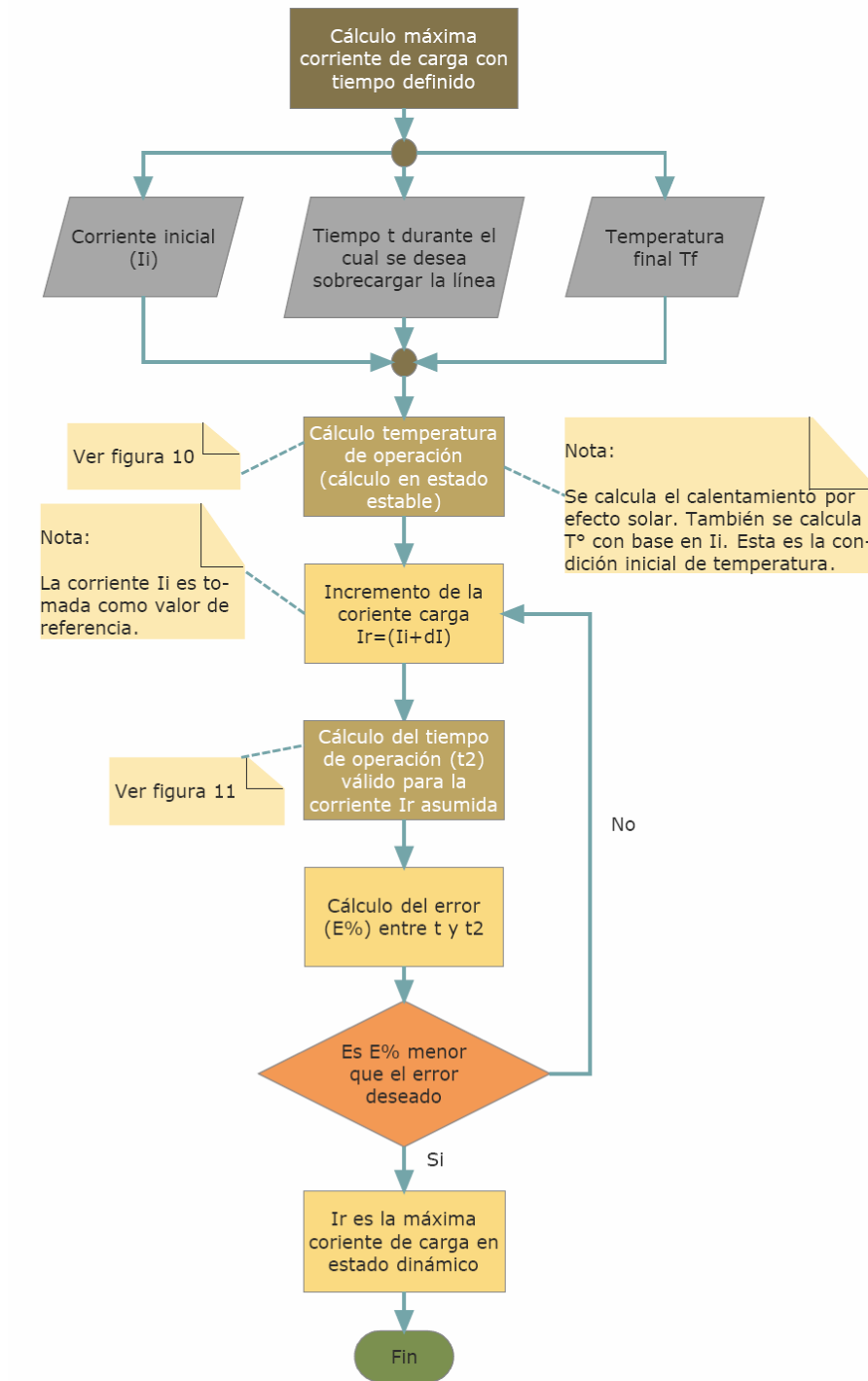
Fuente: El Autor

Figura 11. Estructura propuesta para el cálculo del tiempo de operación en estado dinámico con la metodología del CIGRÉ



Fuente: El Autor

Figura 12. Estructura propuesta para el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico con la metodología del CIGRÉ



Fuente: El Autor

Así mismo, el cálculo de la máxima corriente de carga en estado dinámico se estructura en un ciclo anidado, el cual, contiene dos procesos iterativos. El primero de ellos está asociado con el cálculo de la condición inicial de temperatura para el conductor. En el desarrollo de éste es necesario recurrir al método de cálculo en estado estable presentado en la figura 10, y el resultado del primer proceso iterativo junto al factor de calentamiento por efecto solar son datos de entrada para el segundo proceso iterativo. En éste se realiza un incremento porcentual de la corriente de operación " I_{ref} " con base en la diferencia de tiempos de operación asociados al caso de estudio. Esta nueva corriente de carga es tomada como parámetro de entrada para el cálculo del tiempo de operación válido " t_2 ". Una vez se conoce dicho valor, se calcula la diferencia entre éste y el tiempo definido para el análisis " t ". Si dicho valor no cumple con el grado de exactitud deseado se debe modificar la corriente de carga asumida con base en la diferencia calculada, y repetir el proceso hasta que la diferencia obtenida entre " t_2 " y " t " sea mínima.

Finalmente, es importante resaltar que en los procesos iterativos que se realizan considerando cambios en la temperatura del conductor, debe estar contenido el cálculo de los factores de refrigeración por convección y radiación, así como el ajuste por temperatura de la resistencia eléctrica ya que estos parámetros están fuertemente influenciados por las variaciones térmicas en el conductor.

2. ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS ASOCIADOS CON EL CÁLCULO DE LOS FACTORES DE CALENTAMIENTO Y REFRIGERACIÓN EN LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD

La ecuación de equilibrio térmico aplicada al cálculo de la capacidad de carga de las líneas de transmisión, está constituida por el modelo matemático de cada uno de los fenómenos que contribuyen a la refrigeración y al calentamiento del conductor (ecuaciones (1) y (19)). En este capítulo se realiza el análisis de los modelos matemáticos propios de cada metodología, identificando las variables independientes más importantes en cada uno de ellos y presentando el rango de aplicación válido para cada una de ellas. De igual forma, se presentan los modelos matemáticos desarrollados para el cálculo de la incertidumbre asociada a los factores de calentamiento y refrigeración en cada una de las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ.

Los modelos matemáticos son función de la incertidumbre δx asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros considerados y la cual se define como:

$$\delta x = \frac{\% E_{Equipo}}{100} \times Valor\ medido \quad (52)$$

donde:

δx incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar el mensurando x

$\% E_{Equipo}$ incertidumbre propia del equipo de medición

Las expresiones desarrolladas para el cálculo de la incertidumbre pueden ser utilizadas considerando el aporte de todas las variables que influyen en el fenómeno ó pueden ser enfocadas en los parámetros de mayor interés para el estudio realizado. Cuando se desee omitir el efecto de alguna variable en el cálculo de la incertidumbre, a ésta se le debe asignar un $\delta x = 0$.

2.1 REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN

Para conocer la incertidumbre asociada al cálculo de la refrigeración por convección, es necesario analizar de forma individual los modelos matemáticos presentados por las metodologías IEEE y CIGRÉ. A continuación se presenta el análisis aplicado a cada metodología y los modelos matemáticos obtenidos para predecir la incertidumbre asociada al cálculo de los factores de refrigeración por convección en el cálculo de la ampacidad.

2.1.1 Análisis de los modelos matemáticos presentados en el Std IEEE para el cálculo de la refrigeración por convección.

La metodología desarrollada por el IEEE presenta 3 modelos matemáticos para el cálculo de la refrigeración por convección (ver sección 1.1.1). Estos son función de las propiedades características del aire como la densidad ρ_f , la viscosidad dinámica μ_f y la conductividad térmica k_f . Adicionalmente, dependen de la temperatura ambiente, el ángulo de incidencia del viento sobre el conductor y el diámetro del mismo.

El modelo matemático presentado para el cálculo de la densidad del aire (ver ecuación (6)) es función de la altura sobre el nivel del mar H_e y la temperatura

promedio $T_{film} = \frac{T_c + T_a}{2}$. En éste, el rango de aplicación típico para la temperatura T_{film} es de 0 a 100°C, mientras que para la altura sobre el nivel del mar es de 0 a 4000 metros. Así mismo, la viscosidad dinámica y la conductividad térmica son función directa de la temperatura T_{film} , teniendo el mismo rango de validez descrito para la densidad del aire.

Al aplicar en cada una de las ecuaciones presentadas en el Std IEEE 738 la técnica de propagación de errores para un sistema de varias variables [12], se obtiene el modelo matemático para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por convección natural y forzada.

Las ecuaciones (53) (54) y (55) corresponden a la incertidumbre asociada a la convección natural (ver ecuación (2)), a la convección forzada con viento leve (ver ecuación (3)) y a la convección forzada con viento fuerte (ver ecuación (4)).

$$\varepsilon(q_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_n}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_n}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_n}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (53)$$

$$\varepsilon(q_{c1}) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial V_w} \delta V_w\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial \mu_f} \delta \mu_f\right)^2 + \dots} \quad (54)$$

$$\sqrt{\dots + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial k_f} \delta k_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial k_{angle}} \delta k_{angle}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2}$$

$$\varepsilon(q_{c2}) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial V_w} \delta V_w\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial \mu_f} \delta \mu_f\right)^2 + \dots} \quad (55)$$

$$\sqrt{\dots + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial k_f} \delta k_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial k_{angle}} \delta k_{angle}\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2}$$

donde:

$\varepsilon(q_n)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por convección natural

$\varepsilon(q_{c1})$ y $\varepsilon(q_{c2})$ incertidumbre asociada a la refrigeración por convección forzada

con viento leve y fuerte respectivamente

$$\frac{\partial q_n}{\partial \rho_f} = 0,01025 \rho_f^{-0,5} D^{0,75} (T_c - T_a)^{1,25}$$

$$\frac{\partial q_n}{\partial D} = 0,015375 D^{-0,25} \rho_f^{0,5} (T_c - T_a)^{1,25}$$

$$\frac{\partial q_n}{\partial T_a} = -0,025625 \rho_f^{0,5} D^{0,75} (T_c - T_a)^{0,25}$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial D} = 0,019344 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{\rho_f V_w}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,48}$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial \rho_f} = 0,019344 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D V_w}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,48}$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial V_w} = 0,019344 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,48}$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial \mu_f} = 0,019344 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f^2} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,48}$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial k_f} = k_{angle} (T_c - T_a) \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right]$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial k_{angle}} = k_f (T_c - T_a) \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right]$$

$$\frac{\partial q_{c1}}{\partial T_a} = -k_f k_{angle} \left[1,01 + 0,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52} \right]$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial D} = 0,00714 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{\rho_f V_w}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,4}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial \rho_f} = 0,00714 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D V_w}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,4}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial V_w} = 0,00714 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f}{\mu_f} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,4}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial \mu_f} = 0,00714 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f^2} \right) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{-0,4}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial k_f} = 0,0119 k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial k_{angle}} = 0,0119 k_f (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6}$$

$$\frac{\partial q_{c2}}{\partial T_a} = -0,0119 k_f k_{angle} (T_c - T_a) \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6}$$

$\delta D, \delta \rho_f, \delta V_w, \dots, \delta T_a$ incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros

2.1.2 Análisis del modelo matemático presentado por el CIGRÉ para el cálculo de la refrigeración por convección.

El modelo matemático desarrollado por el CIGRÉ para el cálculo de la refrigeración por convección (ver ecuación (30)) es función de la temperatura ambiente T_a y de la conductividad térmica del aire λ_f , la cual a su vez es función

de $T_{AV} = \frac{(T_a + T_s)}{2}$. Al igual que en la metodología IEEE, el CIGRÉ no presenta

ninguna restricción en el rango de validez de dicha temperatura, presentando como intervalo de valores típicos 0 a 100°C.

A continuación se presenta el modelo matemático desarrollado para el cálculo de la incertidumbre asociada a este factor de refrigeración.

$$\varepsilon(P_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_c}{\partial \lambda_f} \delta \lambda_f\right)^2 + \left(\frac{\partial P_c}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (56)$$

donde:

$\varepsilon(P_c)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por convección

$$\frac{\partial P_c}{\partial \lambda_f} = \pi (T_s - T_a) N_u$$

$$\frac{\partial P_c}{\partial T_a} = -\pi \lambda_f N_u$$

$\delta \lambda_f$ y δT_a incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros

2.2 REFRIGERACIÓN POR RADIACIÓN

Para conocer la incertidumbre asociada a los modelos matemáticos utilizados en el cálculo de la refrigeración por radiación, es necesario analizar de forma individual cada una de las ecuaciones presentadas en las metodologías IEEE y CIGRÉ. A continuación se presenta el análisis aplicado y los modelos matemáticos obtenidos para predecir la incertidumbre asociada al cálculo de la refrigeración por radiación en el cálculo de la ampacidad.

2.2.1 Análisis del modelo matemático presentado por el IEEE para el cálculo de la refrigeración por radiación.

El modelo matemático desarrollado por el IEEE para el cálculo del factor de refrigeración por radiación (ver ecuación (9)) es función del diámetro del conductor D , la temperatura ambiente T_a y la emisividad del conductor ε , la cual solo puede tomar valores entre 0 y 1.

El modelo matemático desarrollado para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación es:

$$\varepsilon(q_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_r}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (57)$$

donde:

$\varepsilon(q_r)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación

$$\frac{\partial q_r}{\partial D} = 0,0178 D \varepsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial \varepsilon} = 0,0178 D \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$\frac{\partial q_r}{\partial T_a} = 0,000712 D \varepsilon \left[\left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^3 \right]$$

$\delta D, \delta \varepsilon$ y δT_a incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros

2.2.2 Análisis del modelo matemático presentado por el CIGRÉ para el cálculo de la refrigeración por radiación.

El modelo matemático desarrollado por el CIGRÉ para el cálculo del factor de refrigeración por radiación (ver ecuación (39)) es, al igual que el modelo propuesto por el IEEE, función del diámetro del conductor D , la temperatura ambiente T_a y la emisividad del conductor ε . Esta última solo puede tomar valores entre 0 y 1.

A continuación se presenta el modelo matemático desarrollado para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación.

$$\varepsilon(P_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_r}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_r}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial P_r}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (58)$$

donde:

$\varepsilon(P_r)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación

$$\frac{\partial P_r}{\partial D} = \pi \sigma_B \varepsilon \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right]$$

$$\frac{\partial P_r}{\partial \varepsilon} = \pi \sigma_B D \left[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right]$$

$$\frac{\partial P_r}{\partial T_a} = -4 \pi D \varepsilon \sigma_B \left[(T_a + 273)^3 \right]$$

δD , $\delta \varepsilon$ y δT_a incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros.

2.3 CALENTAMIENTO POR INSOLACIÓN

Para conocer la incertidumbre asociada al cálculo del calentamiento por insolación, es necesario analizar de forma individual los modelos matemáticos

presentados por las metodologías IEEE y CIGRÉ. A continuación se presenta el análisis aplicado a cada metodología y los modelos matemáticos obtenidos para predecir la incertidumbre asociada al cálculo de los factores de calentamiento por insolación en el cálculo de la ampacidad.

2.3.1 Análisis del modelo matemático presentado por el IEEE para el calentamiento por efecto solar.

El modelo matemático presentado por el IEEE para el cálculo del calentamiento por insolación (ver ecuación (14)) es función de la radiación solar incidente Q_{SE} y del coeficiente de absortividad del conductor α , el cual solo puede tomar valores entre 0 y 1.

El modelo obtenido para el cálculo de la incertidumbre asociada al calentamiento por insolación es:

$$\varepsilon(q_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_s}{\partial \alpha} \delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial Q_{SE}} \delta Q_{SE}\right)^2} \quad (59)$$

donde:

$$\frac{\partial q_s}{\partial \alpha} = Q_{SE} \sin(\theta) A'$$

$$\frac{\partial q_s}{\partial Q_{SE}} = \alpha \sin(\theta) A'$$

$\delta \alpha$ y δQ_{SE} incertidumbre asociada al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros.

2.3.2 Análisis de los modelos matemáticos presentados por el CIGRÉ para el cálculo del calentamiento por insolación

El CIGRÉ presenta dos modelos matemáticos para el cálculo del calentamiento por insolación. El primero de ellos (ver ecuación (28)) es el más utilizado debido a que considera la radiación solar global incidente como un único parámetro, mientras que el segundo modelo matemático (ver ecuación (29)) considera de forma independiente la radiación solar directa y la difusa, trayendo consigo el problema de obtener dichos parámetros de forma confiable, tal como se describió en el capítulo 1 (ver sección 1.2.1).

El primero de los modelos presentados por el CIGRE es función del coeficiente de absorptividad α_s y el diámetro del conductor D , así como de la radiación global incidente S . El rango de valores válidos para el coeficiente de absorptividad es entre 0 y 1.

La incertidumbre asociada a la utilización del primer modelo se calcula a través de la siguiente expresión:

$$\varepsilon(P_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} \delta \alpha_s\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial S} \delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial D} \delta D\right)^2} \quad (60)$$

donde:

$$\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} = SD$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial S} = \alpha_s D$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial D} = \alpha_s S$$

$\delta\alpha_s, \delta S$ y δD incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros

El segundo modelo presentado por el CIGRÉ es función del coeficiente de absortividad α_s , del diámetro del conductor D , de la radiación solar directa I_D y de la radiación solar difusa I_d .

El cálculo de la incertidumbre asociada a la utilización del segundo modelo se realiza a través de la siguiente expresión:

$$\varepsilon(P_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} \delta \alpha_s\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial I_D} \delta I_D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial I_d} \delta I_d\right)^2} \quad (61)$$

donde:

$$\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} = D \left[I_D \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} F \sin(H_s) \right) + \left(I_d \frac{\pi}{2} (1 + F) \right) \right]$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial D} = \alpha_s \left[I_D \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} F \sin(H_s) \right) + \left(I_d \frac{\pi}{2} (1 + F) \right) \right]$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial I_D} = \alpha_s D \left[\left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} F \sin(H_s) \right) \right]$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial I_d} = \alpha_s D \left[\frac{\pi}{2} (1 + F) \right]$$

$\delta\alpha_s, \delta D, \delta I_D$ y δI_d incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros

2.4 INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD UTILIZANDO LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ

Como se describió en el capítulo 1, las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ tienen cuatro tipos de cálculos. Los dos primeros se enfocan en el análisis de estado estable y los restantes en el estado dinámico. De los cuatro cálculos presentados, tres de ellos están estructurados en procesos iterativos. Por lo tanto, el error asociado a su aplicación está definido directamente por el margen de error aceptado en la iteración. El proceso restante es el del cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable, el cual, está estructurado de forma secuencial. Esto permite aplicar directamente la teoría de propagación de errores [12] para obtener el modelo matemático que permita conocer y predecir la incertidumbre presente en el análisis realizado.

Debido a que las metodologías del IEEE y el CIGRÉ consideran el mismo conjunto de factores de calentamiento y refrigeración en la ecuación de equilibrio térmico⁷ (ver ecuación (62)), el modelo matemático desarrollado para estimar la incertidumbre asociada al cálculo de la ampacidad se aplica en ambas. Sin embargo, la incertidumbre asociada a cada uno de los factores de refrigeración y calentamiento se rige por los modelos matemáticos presentados en las secciones 2.1, 2.2 y 2.3.

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R}} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R}} \quad (62)$$

El modelo matemático desarrollado para el cálculo de la incertidumbre es el siguiente:

⁷ El CIGRÉ considera solo de forma teórica los factores de calentamiento por efecto magnético y por fenómeno corona, así como la refrigeración por evaporación.

$$\varepsilon(I) = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial q_c} \varepsilon(q_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial q_r} \varepsilon(q_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial q_s} \varepsilon(q_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} \varepsilon(R)\right)^2} \quad (63)$$

donde:

$\varepsilon(I)$ incertidumbre asociada al cálculo de la ampacidad

$$\frac{\partial I}{\partial q_c} = \frac{\partial I}{\partial P_c} = \frac{1}{2R} \left(\frac{q_c + q_r - q_s}{R} \right)^{-1/2} = \frac{1}{2R} \left(\frac{P_c + P_r - P_s}{R} \right)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial I}{\partial q_r} = \frac{\partial I}{\partial P_r} = \frac{1}{2R} \left(\frac{q_c + q_r - q_s}{R} \right)^{-1/2} = \frac{1}{2R} \left(\frac{P_c + P_r - P_s}{R} \right)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial I}{\partial q_s} = \frac{\partial I}{\partial P_s} = -\frac{1}{2R} \left(\frac{q_c + q_r - q_s}{R} \right)^{-1/2} = -\frac{1}{2R} \left(\frac{P_c + P_r - P_s}{R} \right)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial I}{\partial R} = \frac{(q_c + q_r - q_s)}{2R^2} \left(\frac{q_c + q_r - q_s}{R} \right)^{-1/2} = \frac{(P_c + P_r - P_s)}{2R} \left(\frac{P_c + P_r - P_s}{R} \right)^{-1/2}$$

$\varepsilon(q_c) = \varepsilon(P_c)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por convección (ver sección 2.1)

$\varepsilon(q_r) = \varepsilon(P_r)$ incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación (ver sección 2.2)

$\varepsilon(q_s) = \varepsilon(P_s)$ incertidumbre asociada al calentamiento por efecto solar (ver sección 2.3)

$\varepsilon(R)$ incertidumbre asociada a la resistencia eléctrica del conductor,

Con el ánimo de verificar la validez de los modelos matemáticos desarrollados para la predicción de la incertidumbre asociada con el cálculo de la ampacidad, se aplican las metodologías IEEE y CIGRÉ a 20 casos de estudio a lo largo del territorio nacional. Así mismo, se asume que el error real es la diferencia existente entre el resultado obtenido a través de la metodología IEEE y CIGRÉ. Por otro lado, el error predicho se obtiene a través de la ecuación (63). La tabla 11 presenta las zonas geográficas consideradas, el resultado obtenido con cada

metodología, el error predicho y el real. La información meteorológica utilizada para el análisis fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

Tabla 11. Predicción teórica del error asociado al cálculo de la ampacidad

Nº	ESTACIÓN IDEAM	MUNICIPIO	DEPTO	Ampacidad IEEE (A)	Ampacidad CIGRÉ (A)	Error Real +/- (A)	Error Pred. +/- (A)
1	Villarrosa	Valledupar	Cesar	1381	1365	16	15
2	Hda la Guaira	El paso	Cesar	1141	1152	11	13
3	Socomba	Becerril	Cesar	920	940	20	23
4	Col Pailitas	Pailitas	Cesar	1250	1248	2	2
5	La Llana	San Alberto	Cesar	932	953	18	23
6	Aguas Claras	Aguachica	Cesar	905	925	20	23
7	San Lorenzo	Santa Marta	Magdalena	1199	1204	5	7
8	El Difícil	Ariguani	Magdalena	1203	1209	6	7
9	Carmen de Bolívar	El Carmen de Bolivar	Bolivar	1030	1046	16	19
10	El Guamo	El Guamo	Bolivar	1200	1206	6	7
11	Nueva Florida	Maria la baja	Bolivar	881	903	22	25
12	La Maravilla	San Calixto	N de S	798	799	1	5
13	Teorama	Teorama	N de S	938	958	20	23
14	Convención	Convención	N de S	1203	1209	6	8
15	Tonchala	Cúcuta	N de S	923	943	20	23
16	Risaralda	El Zulia	N de S	1583	1630	47	48
17	Salazar	Salazar	N de S	1389	1372	17	17
18	Gja HJC	Cucutilla	N de S	1137	1148	11	13
19	Pamplona	Pamplona	N de S	874	896	22	25
20	UFPS	Ocaña	N de S	1187	1195	8	9

La validez de los modelos matemáticos desarrollados a partir de la teoría de propagación de errores se evidencia en el hecho de que la diferencia de los errores predichos y los errores reales no supera los 5 Ampere.

2.5 APLICABILIDAD DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS AL TERRITORIO COLOMBIANO

Los modelos matemáticos presentados en las metodologías IEEE y CIGRÉ son función de los parámetros geográficos y eléctricos considerados en el caso de estudio, así como de las características del conductor. La aplicabilidad de dichas metodologías a un territorio específico depende solo de las condiciones geográficas de la zona de ubicación de la línea de transmisión. Entorno a estos parámetros, ambas metodologías no presentan ninguna restricción⁸, pues, son aplicables a cualquier latitud geográfica (norte ó sur), condición climática, altura sobre el nivel del mar y hora del día. Es importante tener en cuenta que la efectividad en la aplicación de las metodologías depende fundamentalmente de las condiciones meteorológicas que se consideren en el estudio [14].

⁸ Las versiones del Std IEEE 738 anteriores al 2006 están restringidas a latitudes norte, de tal forma que no son aplicables a la zona sur del territorio colombiano [13].

3. COMPARACIÓN ENTRE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y RECOMENDACIONES PARA SU APLICACIÓN

Las metodologías desarrolladas por el IEEE y el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad se basan en el principio de equilibrio térmico, según el cual, cantidad de calor ganado por el conductor es igual a la cantidad de calor transferido al medio circundante. Aunque ambas metodologías fueron concebidas con un mismo enfoque teórico, cada una de ellas desarrolla diferentes modelos matemáticos para el cálculo de los factores de calentamiento y refrigeración. Por tal motivo se hace necesario realizar un proceso comparativo, el cual, permita identificar las diferencias existentes entre las metodologías estudiadas. Dicho proceso, se desarrolla tomando como punto central los factores de refrigeración y calentamiento considerados por el IEEE y el CIGRÉ. Lo anterior, permite obtener un paralelo teórico entre los fundamentos presentados en cada uno de los métodos. Así mismo, se hace necesario comparar los resultados obtenidos al aplicar ambas metodologías a un mismo caso base y el porcentaje de error existente entre los resultados ante diferentes condiciones atmosféricas.

El proceso comparativo se desarrolla aplicando las metodologías a 77 zonas geográficas del territorio colombiano, a través de las cuales se interconectan los corredores más importantes del STN, los cuales, son propiedad de ISA. Las tablas 12 y 13 presentan las interconexiones seleccionadas y los departamentos que atraviesan. Así mismo, la tabla 14 presenta la ubicación geográfica de las 77 zonas consideradas y la estación del IDEAM que suministra la información meteorológica.

Tabla 12. Interconexiones de ISA a 500 kV seleccionadas para el análisis⁹

N° Enlace	SUBESTACIÓN		LONGITUD Km	TENSIÓN kV	DEPARTAMENTOS
	Origen	Destino			
Enlace 1 a 500 kV	Bolivar	Copey	167	500	Bolivar, Magdalena, Cesar
	Copey	Ocaña	241	500	Cesar, Norte de Santander
	Ocaña	Primavera	247	500	Norte de Santander, Cesar, Santander
	Primavera	Bacatá	197	500	Santander, Boyaca, Cundinamarca
Enlace 2 a 500 kV	Primavera	San Carlos	82	500	Santander, Antioquia
	San Carlos	Virginia	213	500	Antioquia, Caldas, Risaralda, Valle
	Virginia	San Marcos	167	500	Valle, Centro del Valle
Enlace 3 a 500 kV	San Carlos	Cerro	210	500	Antioquia, Córdoba
	Cerro	Chinú	132	500	Córdoba
	Chinú	Sabanalarga	185	500	Córdoba, Sucre, Bolivar, Atlantico

Tabla 13. Interconexiones de ISA a 230 kV seleccionadas para el análisis ⁹

N° Enlace	SUBESTACIÓN		LONGITUD Km	TENSIÓN kV	DEPARTAMENTOS
	Origen	Destino			
Enlace 1 a 230 kV	San Carlos	Ancón	107	230	Antioquia
	Ancón	Esmeralda	130	230	Antioquia, Caldas
	Esmeralda	La Enea	31	230	Caldas
	La Enea	San Felipe	66	230	Caldas, Tolima
	San Felipe	La Mesa	79	230	Tolima, Cundinamarca
Enlace 2 a 230 kV	Esmeralda	Yumbo	193	230	Caldas, Valle
	Yumbo	San Bernardino	123	230	Valle, Cauca
	San Bernardino	Jamondino	188	230	Cauca, Nariño
	Jamondino	Pomasqui	75	230	Nariño, Ecuador
Enlace 3 a 230 kV	Primavera	Guatiguará	163	230	Santander
	Guatiguará	Tasajero	128	230	Santander, Norte de Santander

⁹ Información suministrada por Interconexión Eléctrica S.A E.S.P.

Tabla 14. Zonas geográficas seleccionadas para el análisis de las metodologías

N°	ESTACIÓN IDEAM	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LONGITUD (°)	LATITUD (°)
1	Villarrosa	Valledupar	Cesar	73,33 W	10,20 N
2	Hda la Guaira	El paso	Cesar	73,48 W	9,62 N
3	Socomba	Becerril	Cesar	73,15 W	9,72 N
4	Col Pailitas	Pailitas	Cesar	73,39 W	8,97 N
5	La Llana	San Alberto	Cesar	73,32 W	7,73 N
6	Aguas Claras	Aguachica	Cesar	73,37 W	8,25 N
7	San Lorenzo	Santa Marta	Magdalena	74,03 W	11,12 N
8	El Dificil	Ariguani	Magdalena	74,15 W	9,85 N
9	Carmen de Bolívar	El Carmen de Bolívar	Bolívar	75,07 W	9,72 N
10	El Guamo	El Guamo	Bolívar	74,59 W	10,03 N
11	Nueva Florida	Maria la baja	Bolívar	75,21 W	9,95 N
12	La Maravilla	San Calixto	N de S	73,13 W	8,40 N
13	Teorama	Teorama	N de S	73,18 W	8,43 N
14	Convención	Convención	N de S	73,20 W	8,47 N
15	Tonchala	Cúcuta	N de S	72,34 W	7,85 N
16	Risaralda	El Zulia	N de S	72,32 W	8,23 N
17	Salazar	Salazar	N de S	72,49 W	7,78 N
18	Gja HJC	Cucutilla	N de S	72,46 W	7,55 N
19	Pamplona	Pamplona	N de S	72,39 W	7,37 N
20	UFPS	Ocaña	N de S	73,20 W	8,22 N
21	El Centro	Barrancabermeja	Santander	73,46 W	6,87 N
22	Hda Las Brisas	Pto Wilches	Santander	73,48 W	7,25 N
23	Hda Tigres	Girón	Santander	73,21 W	7,08 N
24	UIS	Bucaramanga	Santander	73,06 W	7,13 N
25	Hda La Esperanza	Girón	Santander	73,18 W	7,07 N
26	Cachira	Surata	Santander	73 W	7,48 N
27	Carare	Pto Parra	Santander	74,03 W	6,65 N
28	Buenavista	Buenavista	Boyaca	73,56 W	5,53 N

N°	ESTACIÓN IDEAM	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LONGITUD (°)	LATITUD (°)
29	San Cayetano	San Cayetano	Cundinamarca	74,04 W	5,30 N
30	Sabaneta	San Francisco	Cundinamarca	74,18 W	4,90 N
31	La Cabrera	Pacho	Cundinamarca	74,08 W	5,13 N
32	La Pelada	Aguadas	Caldas	75,21 W	5,58 N
33	Fca Tesorito	Manizales	Caldas	75,27 W	5,03 N
34	San Félix	Salamina	Caldas	75,23 W	5,37 N
35	El Nus	San Roque	Antioquia	74,50 W	6,48 N
36	Las Violetas	San Rafael	Antioquia	75,01 W	6,35 N
37	Pto Berrio	Pto Berrio	Antioquia	74,25 W	6,48 N
38	Anori	Anori	Antioquia	75,09 W	7,07 N
39	El Peñol	El Peñol	Antioquia	75,15 W	6,22 N
40	La Selva	Río Negro	Antioquia	75,25 W	6,13 N
41	Hda Túnez	Fredonia	Antioquia	75,39 W	5,80 N
42	La Nación	Tamesis	Antioquia	75,42 W	5,72 N
43	La Salada	Caldas	Antioquia	75,37 W	6,05 N
44	Cacaoteras	Caucasia	Antioquia	75,07 W	7,98 N
45	La Laguna	Sta Rosa de Cabal	Risaralda	75,25 W	4,78 N
46	Jardín Botánico	Marsella	Risaralda	75,44 W	4,93 N
47	La Bohemia	Pereira	Risaralda	75,55 W	4,88 N
48	Argelia	Argelia	Valle	76,07 W	4,73 N
49	Tenerife	El Cerrito	Valle	76,05 W	3,73 N
50	Buga	Buga	Valle	76,18 W	3,92 N
51	Mateguadua	Tulúa	Valle	76,10 W	4,02 N
52	Cenicana	Florida	Valle	76,19 W	3,38 N
53	Gja Expo	Palmira	Valle	76,26 W	3,63 N
54	La Unión	La Unión	Valle	76,03 W	4,53 N
55	Planeta Rica	Planeta Rica	Córdoba	75,36 W	8,40 N
56	El Salado	Ciénaga de Oro	Córdoba	75,35 W	8,92 N
57	Turipana	Cereté	Córdoba	75,49 W	8,85 N
58	La Doctrina	Lorica	Córdoba	75,54 W	9,30 N
59	Chima	Chima	Córdoba	75,37 W	9,15 N
60	Colomboy	Sahagun	Córdoba	7,30 W	8,75 N

N°	ESTACIÓN IDEAM	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LONGITUD (°)	LATITUD (°)
61	Primates	Coloso	Sucre	75,20 W	9,52 N
62	El Limón	Manatí	Atlántico	75,04 W	10,42 N
63	Fuente Bella	Sabanalarga	Atlántico	75,01 W	10,65 N
64	Villa Hermosa	Villa Hermosa	Tolima	75,07 W	5,03 N
65	Armero	Armero	Tolima	74,55 W	5,02 N
66	Hda García	Lérida	Tolima	74,53 W	4,87 N
67	La Esperanza	Honda	Tolima	74,44 W	5,25 N
68	El Salto	Ambalema	Tolima	74,46 W	4,78 N
69	La Salvajina	Suarez	Cauca	76,42 W	2,95 N
70	Hda Carpinterías	El Tambo	Cauca	76,56 W	2,47 N
71	Paispa	Sotará	Cauca	76,37 W	2,27 N
72	La Sierra	La Sierra	Cauca	76,49 W	2,22 N
73	La Citec	Patia	Cauca	77,03 W	2,15 N
74	U Nariño	Mercaderes	Cauca	77,11 W	1,90 N
75	Los Milagros	Bolívar	Cauca	76,53 W	1,77 N
76	Viento Libre	Taminango	Nariño	77,28 W	1,57 N
77	Wilquipamba	Pasto	Nariño	77,27 W	1,17 N

Las 77 zonas seleccionadas se encuentran distribuidas a lo largo de los 17 departamentos que las interconexiones presentadas en las tablas 12 y 13 atraviesan. A su vez, las estaciones del IDEAM que se han seleccionado están ubicadas a lo largo de cada departamento con el fin de dar cobertura a las diversas condiciones atmosféricas presentes en una misma región, permitiendo alcanzar un mayor grado de detalle en el análisis realizado. Las interconexiones seleccionadas y los departamentos considerados se presentan en la figura 13.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del proceso de comparación realizado para cada uno de los términos que componen la ecuación de equilibrio térmico utilizada en las metodologías IEEE y CIGRÉ.

3.1 COMPARACIÓN ENTRE LAS ECUACIONES DE EQUILIBRIO TÉRMICO PRESENTADAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ

Las metodologías para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión IEEE y CIGRÉ modelan el balance térmico a partir de los factores de calentamiento por el efecto solar, calentamiento por efecto Joule, refrigeración por convección y radiación. Sin embargo, el CIGRÉ incluye en su ecuación tres factores más que el IEEE, dos de calentamiento y uno de refrigeración. Estos son el calentamiento por efecto magnético, el calentamiento por efecto corona y la refrigeración por evaporación. Cada uno de ellos está definido dentro de la metodología CIGRÉ, pero son ignorados en el proceso de cálculo porque su influencia en el análisis es mínimo y algunos efectos térmicos se compensan de forma natural, como es el caso del calentamiento por efecto corona, el cual, generalmente ocurre en condiciones de fuertes precipitaciones y bajas temperaturas, lo que anula significativamente su efecto sobre el comportamiento térmico de la línea de transmisión. Así mismo, existe diferencia entre los modelos matemáticos utilizados para el cálculo de los factores de calentamiento y refrigeración, pues, cada metodología se basa en aproximaciones y estudios publicados por diferentes autores.

3.1.1 Calentamiento por efecto solar.

El calentamiento por insolación, es un fenómeno que depende fundamentalmente de la posición del sol con respecto a la línea de transmisión y de la intensidad solar presente.

Posición solar. Este parámetro es función de la altitud y el acimut solar, los cuales, a su vez dependen del día del año para el cual se desea realizar el cálculo. Así mismo, la posición solar está relacionada con el ángulo horario del sol, que

define la hora del día para la cual se desea realizar el cálculo, y la latitud geográfica de la zona donde se encuentra ubicada la línea de transmisión.

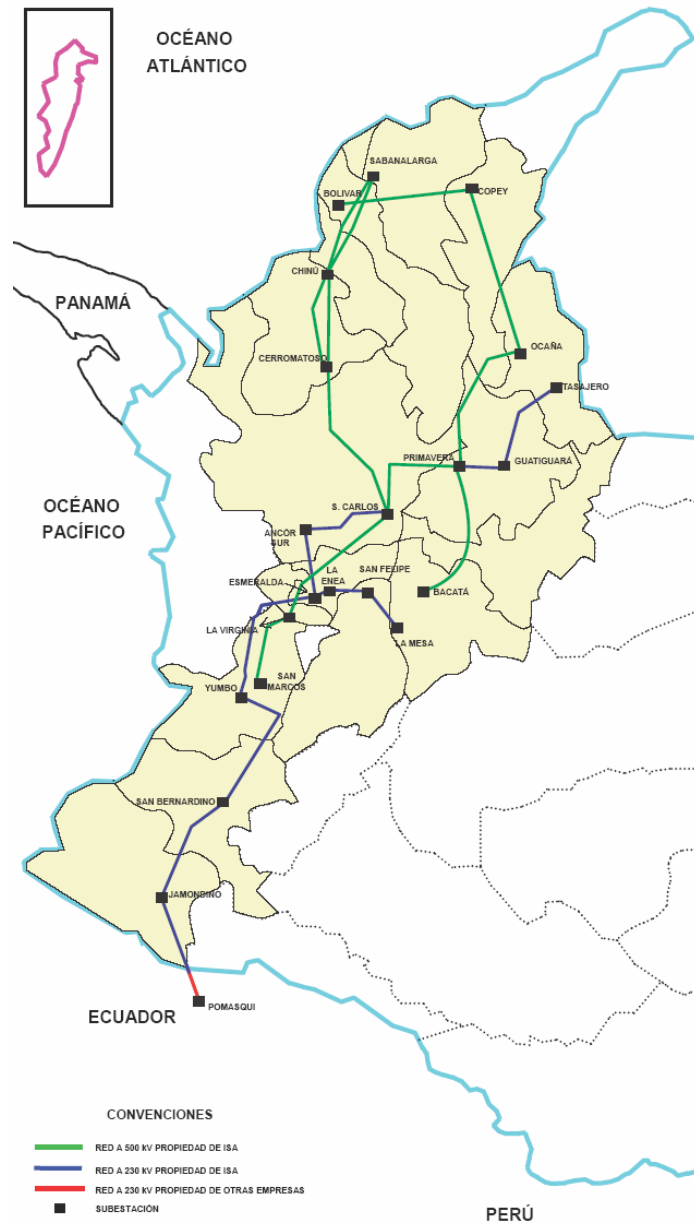
Ambas metodologías desarrollan modelos matemáticos para el cálculo de la altitud y el acimut solar. Estos son válidos para ambos hemisferios terrestres y permiten obtener los parámetros para cualquier día del año. Al aplicar el cálculo de la altitud solar en las zonas geográficas seleccionadas para el análisis se encuentra que la diferencia entre los valores calculados por cada metodología no supera el 1%. En el caso del acimut solar, se observa que entre las metodologías existe una clara diferencia entorno al punto de referencia para el giro angular, de tal forma que el CIGRÉ asume ángulo positivo de Sur a Oeste y el IEEE de Sur a Este.

Intensidad solar. Para el cálculo de este parámetro el CIGRÉ presenta dos métodos, el primero de ellos considera la radiaciones solares directa y difusa y el albedo (reflectancia) del terreno. El segundo se centra, al igual que el método IEEE, en la radiación solar global incidente. La metodología IEEE desarrolla el modelo matemático para el cálculo de la radiación solar global considerando el tipo de atmósfera existente en la zona, mientras que el método CIGRÉ solo presenta el modelo matemático para el cálculo de la radiación solar directa, sin dar guía alguna para el cálculo de las radiaciones difusa y global. Así mismo, el CIGRÉ omite el efecto del tipo de atmósfera y considera el efecto del terreno, presentando algunos valores característicos del albedo para al agua, bosques, áreas urbanas, lodo, pasto, cultivos, arena, hielo y nieve.

Al calcular con ambas metodologías el calentamiento por insolación en las zonas geográficas seleccionadas, se evidencia que los resultados obtenidos con la metodología CIGRÉ (considerando únicamente la radiación solar global) son más altos en un porcentaje cercano al 3% que los resultados generados con la metodología IEEE. Por otro lado, al aplicar el método opcional de radiación solar directa y difusa del CIGRÉ se obtienen valores superiores hasta en un 47% a los

calculados con el IEEE. Esto se debe al alto grado de incertidumbre existente en el cálculo de la radiación solar difusa y a la ausencia de un modelo matemático en la metodología del CIGRÉ que permita estimar de forma segura el efecto que la altura sobre el nivel del mar genera en el cálculo de la radiación solar directa.

Figura 13. Interconexiones de ISA y departamentos seleccionados para el análisis



3.1.2 Refrigeración por convección.

Para realizar este cálculo, ambas metodologías consideran el efecto de la convección natural (viento nulo) y forzada (presencia de viento). De tal forma, que seleccionan el mayor valor obtenido y lo aplican a la ecuación de equilibrio térmico. Cabe resaltar que cada metodología desarrolla sus propios modelos matemáticos para estimar los valores de convección y las propiedades del aire que hacen parte del fenómeno, tales como la densidad, la viscosidad y la conductividad térmica. Sin embargo, es importante aclarar que el CIGRÉ aplica un factor de proporcionalidad constante de 0,42 veces la refrigeración a $\delta = 90^\circ$ cuando el viento viaja paralelo al conductor y uno de 0,55 cuando la velocidad del viento es menor de $0,5 \text{ m/s}$. Así mismo, recomienda un ángulo de incidencia del viento de $\delta = 45^\circ$ para el análisis a bajas velocidades de viento cuando δ es desconocido. Estas dos últimas consideraciones generan un aumento significativo de los factores de refrigeración, tal como se presenta en las figuras 14 y 15.

Figura 14. Convección forzada aplicando la proporcionalidad de 0,55 del CIGRÉ

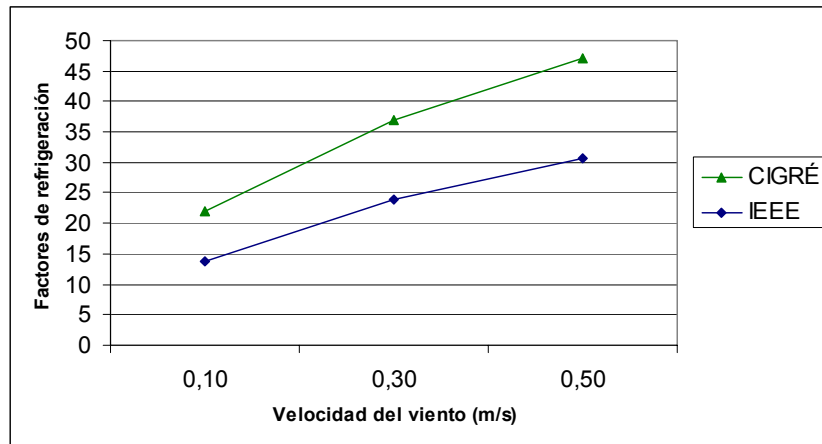
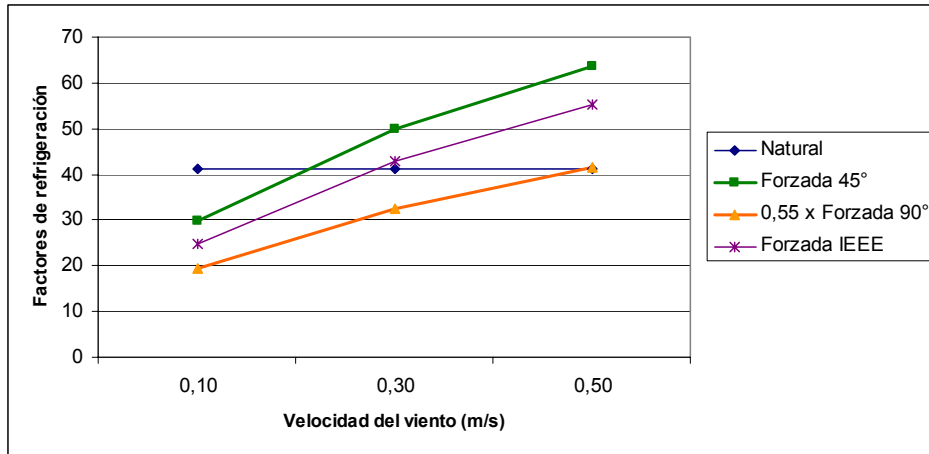
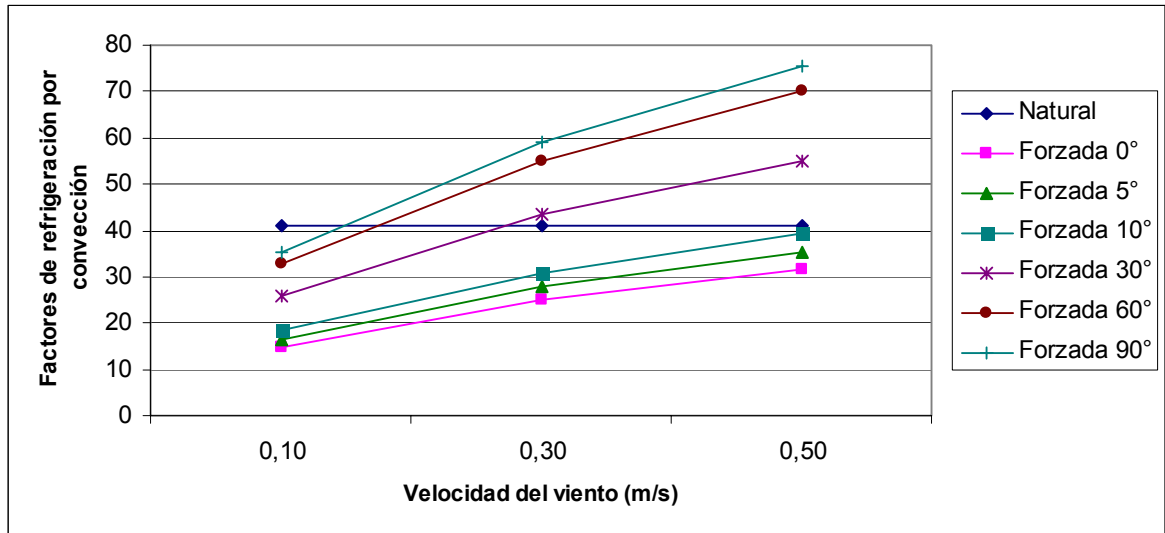


Figura 15. Convección forzada asumiendo $\delta = 45^\circ$ en el método del CIGRÉ



Para establecer el efecto del ángulo δ en la refrigeración natural y forzada para bajas velocidades se realiza el cálculo de los factores de refrigeración por convección considerando $\delta = 0^\circ$, $\delta = 5^\circ$, $\delta = 10^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\delta = 60^\circ$ y $\delta = 90^\circ$. La figura 16 presenta los resultados obtenidos. Se observa que los ángulos menores de 30° dan una posición dominante a la convección natural, mientras que los ángulos mayores de 30° se la dan a la convección forzada. Así mismo, cuando se considera un ángulo de 30° el sistema tiende a darle igual importancia a los dos tipos de refrigeración, lo cual, minimiza el sobredimensionamiento del cálculo realizado.

Figura 16. Comparación entre la convección natural y la forzada para diferentes ángulos



Finalmente, al aplicar ambos métodos en las zonas geográficas seleccionadas, se evidencia una diferencia máxima del 5% para el cálculo de la densidad del aire, 6% para la viscosidad dinámica y menor al 1% para la conductividad térmica. En todos los casos, los valores calculados a través del IEEE superan a los valores obtenidos con la metodología del CIGRÉ. Así mismo, al realizar el análisis de la refrigeración por convección se observa que la diferencia en sus resultados varía con base en la altura sobre el nivel del mar y la velocidad del viento. En términos generales, la metodología del CIGRÉ tiende a considerar factores de refrigeración por convección mucho más altos que los calculados por el IEEE y su diferencia aumenta significativamente con la altura (ver figura 17). Por ejemplo, para zonas geográficas a menos de 1000 m se presenta un error máximo del 5%, mientras que a 4000 éste puede ser hasta del 22%. La tabla 15 resume los máximos errores hallados en la refrigeración por convección como función de la altura sobre el nivel del mar y el ángulo de incidencia del viento. Así mismo, la tabla 16 presenta las velocidades de viento asociadas a dichos errores.

Figura 17. Variación de la refrigeración por convección en función de la altura

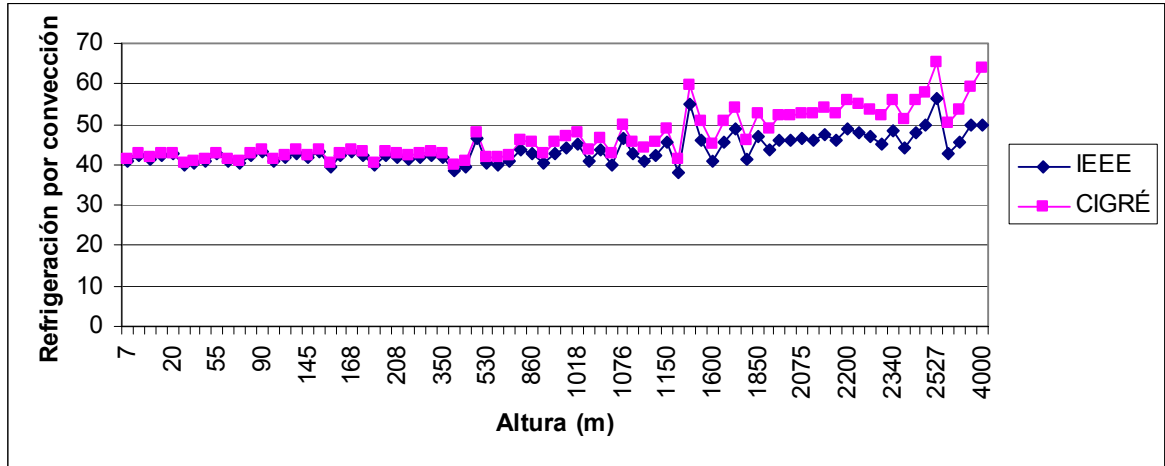


Tabla 15. Máximos errores en el cálculo de la refrigeración por convección

Ángulo de Incidencia δ°	H = Altura sobre el nivel del mar (km)			
	H \leq 1	1 < H \leq 2	2 < H \leq 3	3 < H \leq 4
$\delta = 0^\circ$	10%	11%	15%	22%
$0^\circ < \delta \leq 5^\circ$	5%	11%	15%	22%
$5^\circ < \delta \leq 10^\circ$	5%	11%	15%	22%
$10^\circ < \delta \leq 30^\circ$	5%	11%	15%	22%
$30^\circ < \delta \leq 60^\circ$	5%	11%	15%	22%
$\delta = 90^\circ$	5%	11%	15%	22%

Observe que el máximo error tiende a ser independiente de la variación del ángulo de incidencia. La única excepción se presenta para $\delta = 0^\circ$ y $H \leq 1 \text{ km}$. Esto se debe a que la velocidad del viento asociada al máximo error en dicha zona está en

el rango de $1-2 \text{ m/s}$, lo cual, hace que la convección forzada sea dominante. Lo anterior, unido al hecho de que la metodología del CIGRÉ aplica un índice de proporcionalidad constante de 0,42 veces la refrigeración forzada a $\delta = 90^\circ$ cuando el ángulo de incidencia es $\delta = 0^\circ$, produce un aumento significativo en el factor de refrigeración convectivo calculado.

Tabla 16. Velocidades de viento asociadas al máximo error (m/s)

Ángulo de Incidencia δ°	H = Altura sobre el nivel del mar (km)			
	H \leq 1	1 < H \leq 2	2 < H \leq 3	3 < H \leq 4
$\delta = 0^\circ$	1 a 2	0,1 a 1,3	0,1 a 1,2	0,1 a 1,3
$0^\circ < \delta \leq 5^\circ$	0,1 a 1	0,1 a 0,6	0,1 a 0,9	0,1 a 1
$5^\circ < \delta \leq 10^\circ$	0,1 a 0,6	0,1 a 0,6	0,1 a 0,6	0,1 a 0,6
$10^\circ < \delta \leq 30^\circ$	0,1	0,1 a 0,4	0,1 a 0,4	0,1 a 0,4
$30^\circ < \delta \leq 60^\circ$	0,1 a 0,4	0,1	0,1	0,1
$\delta = 90^\circ$	0,1 a 0,5	0,1	0,1	0,1

3.1.3 Refrigeración por radiación.

El modelo matemático que ambas metodologías utilizan para el cálculo de la refrigeración por radiación es el mismo, no existe diferencia alguna en los resultados obtenidos.

3.1.4 Calentamiento por efecto Joule y magnético.

Ambas metodologías consideran el calentamiento por efecto Joule dentro de sus modelos matemáticos. Sin embargo, la metodología CIGRÉ hace una

diferenciación en sus ecuaciones para conductores homogéneos y no homogéneos. Lo anterior genera una diferencia menor del 2% en los resultados obtenidos.

La tabla 17 presenta el resumen general del paralelo realizado entre la metodología IEEE y CIGRÉ.

Tabla 17. Paralelo entre el estándar del IEEE y el CIGRÉ

IEEE	CIGRÉ
FACTORES DE CALENTAMIENTO	
Solar Joule	Solar Joule Magnético (Teórico) Corona (Teórico)
FACTORES DE REFRIGERACIÓN	
Radiación Convección	Radiación Convección Evaporación (Teórico)
CALENTAMIENTO SOLAR	
Posición Solar	
Diferencia de resultados menor al 1 % Modelo matemático propio para el cálculo de Hs y el Acimut	
Referencia angular positiva de S - E	Referencia angular positiva de S - O
Intensidad Solar	
Diferencia de resultados menor al 3 %	
1 método de cálculo Radiación solar global	2 métodos de cálculo Radiación solar global Radiación solar directa Radiación solar difusa Albedo o reflectancia
Presenta modelo matemático para el cálculo Considera el efecto de la altura sobre el nivel del mar y lo incluye dentro del modelo matemático Considera el efecto de la atmósfera	Solo presenta modelo matemático para el cálculo de la radiación solar directa Considera el efecto de la altura sobre el nivel del mar de forma cualitativa y no incluye un modelo matemático para su cálculo Considera el efecto del terreno
CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE Y MAGNÉTICO	
Presenta modelo matemático para el cálculo	Diferencia de resultados menor del 2% Presenta modelo para el cálculo con base en el tipo de conductor

IEEE	CIGRÉ
REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN	
Modelos matemáticos propios, claramente definidos	Modelos matemáticos propios, con tendencia a sobredimensionar la refrigeración Recomienda asumir 45° como ángulo de incidencia del viento cuando la velocidad es menor de 0,5 m/s

3.2 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ AL TERRITORIO COLOMBIANO

La compatibilidad de las metodologías IEEE y CIGRÉ está claramente definida para toda zona geográfica, condición meteorológica, nivel de operación y tipo de conductor. Lo anterior hace que no exista limitante alguno para su aplicación en el territorio colombiano. Sin embargo, para garantizar su adecuada utilización es necesario realizar una correcta selección de los parámetros meteorológicos presentes en la zona. A continuación se presentan algunas recomendaciones útiles para la aplicación de las metodologías IEEE y CIGRÉ en el territorio colombiano.

Para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión es necesario definir las condiciones geográficas, meteorológicas y técnicas asociadas al caso de estudio. Una selección rigurosa de los sectores que atraviesa la línea de transmisión es de gran ayuda para definir las diferentes condiciones meteorológicas dominantes. Se recomienda que al utilizar la metodología IEEE, dicha sectorización se realice con base en la altura sobre el nivel del mar, preferiblemente cada 500 ó 1000 metros, ya que en estos rangos los parámetros característicos del aire y la radiación solar no varían radicalmente. En el caso de aplicar la metodología CIGRÉ, se

recomienda realizar la sectorización con un intervalo menor de 500 metros porque la metodología tiende a sobredimensionar los valores de refrigeración por convección obtenidos. Un segundo aspecto de gran importancia es la selección de los criterios aplicados al análisis, tales como los coeficientes de absorptividad y emisividad del conductor, la velocidad y ángulo de incidencia del viento, los niveles de radiación solar, el tipo de atmósfera al aplicar la metodología IEEE y el tipo de terreno cuando se aplica la metodología CIGRÉ.

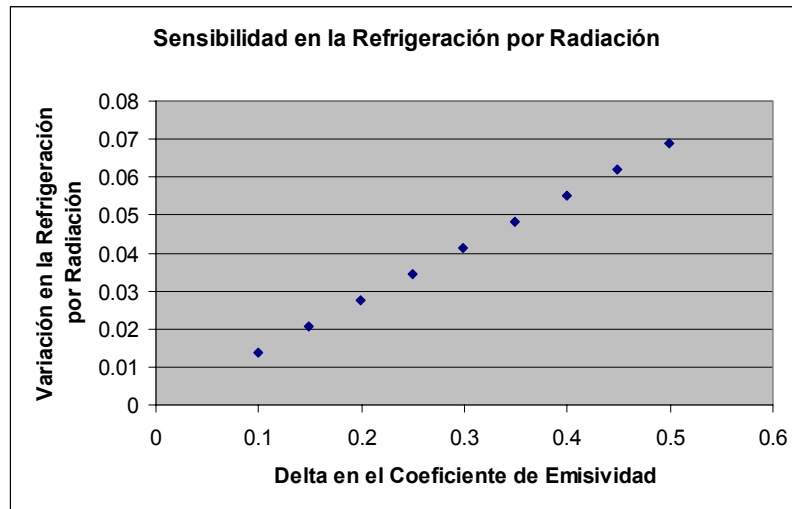
El valor asignado a los coeficientes de emisividad y absorptividad del conductor es típicamente 0,2 ó 0,25 para conductores nuevos (uso menor de 1 año), 0,9 ó 0,95 para conductores viejos (uso mayor de 1 año) y 0,5 cuando su valor es desconocido [4] [5] [15]. Cabe resaltar que el grado de sensibilidad de los modelos matemáticos ante la variación de estos parámetros es mínimo [16] tal como se presenta en las figuras 18 y 19. Por tal motivo, se recomienda utilizar 0,5 como coeficiente de emisividad y absorptividad para realizar un análisis general.

En cuanto a la velocidad del viento se recomienda, para ambas metodologías, realizar el análisis utilizando el menor valor registrado en la zona geográfica y un ángulo de incidencia del viento de 30°. Por lo tanto, se recomienda que al utilizar la metodología del CIGRÉ sea omitido el análisis con un ángulo de incidencia de 45° y el factor de corrección del número de Nusselt para bajas velocidades de viento dado en la metodología (ecuación (35.2)), pues, ambas consideraciones tienden a sobredimensionar los valores de refrigeración por convección utilizados.

Con relación a la radiación solar, se recomienda realizar el análisis en ambas metodologías utilizando la radiación global. Su cálculo teórico se puede realizar a través del modelo matemático propuesto por el IEEE para atmósfera limpia, ya que el CIGRÉ solo presenta un modelo matemático para el cálculo de la radiación solar directa al nivel del mar. Adicionalmente, se recomienda seleccionar como día

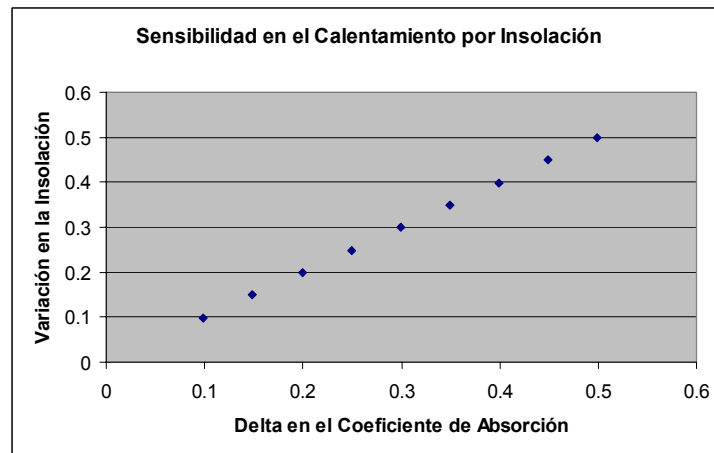
óptimo para el análisis el 21 de Junio para latitudes norte y el 21 de Diciembre para latitudes sur (Solsticios de verano).

Figura 18. Sensibilidad de la refrigeración por radiación ante la variación del coeficiente de emisividad



Fuente: [16]

Figura 19. Sensibilidad del calentamiento por insolación ante la variación del coeficiente de absorción



Fuente: [16]

Finalmente, para seleccionar la ampacidad del estudio realizado (ampacidad restrictiva) se resalta la necesidad de comparar el resultado obtenido en cada uno de los sectores en los que se dividió la línea de transmisión para seleccionar el menor valor.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de grado ha permitido, a partir del análisis de las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ, ampliar y complementar de forma significativa el conocimiento aplicado al cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión. A continuación se presentan los principales logros alcanzados a lo largo de la investigación y las recomendaciones propuestas para futuros desarrollos.

4.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo de grado se basan en los resultados obtenidos a lo largo de la investigación y buscan guiar al usuario en la selección de los criterios de análisis aplicados en las metodologías IEEE y CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión. A continuación se presentan las principales consideraciones, logros y aportes de este trabajo tanto al desarrollo profesional como personal:

- En este trabajo de grado se ha estructurado una propuesta de aplicación para las metodologías del cálculo de la ampacidad basada en procesos secuenciales e iterativos, la cual proporciona al usuario una guía para la correcta ejecución de los métodos IEEE y CIGRÉ en el análisis térmico de las líneas de transmisión.
- Aplicando la teoría de propagación de errores, se han desarrollado y validado modelos matemáticos para la predicción de la incertidumbre asociada a la utilización de los métodos propuestos por el IEEE y el CIGRÉ para el cálculo

de la ampacidad en líneas de transmisión. Estos proporcionan al usuario un mayor grado de conocimiento y comprensión del análisis realizado y de los resultados obtenidos.

- Debido a que las metodologías IEEE y CIGRÉ no proporcionan una clara fundamentación teórica de los fenómenos de refrigeración y calentamiento considerados en el cálculo de la ampacidad se ha desarrollado para el usuario una recopilación teórica con el fin de proporcionar una visión clara de la naturaleza de los fenómenos que hacen parte del balance térmico en las líneas de transmisión.
- Se ha comprobado que la velocidad del viento y su dirección angular ejercen un papel fundamental en el proceso de cálculo de la ampacidad de las líneas de transmisión. Así mismo, se ha comprobado que las recomendaciones dadas por el CIGRÉ entorno a la dirección angular y los factores de proporcionalidad utilizados en el cálculo de los factores de refrigeración por convección aumentan significativamente la ampacidad obtenida en el estudio.
- A partir del análisis realizado sobre el impacto generado por la variación del ángulo de incidencia del viento en el cálculo de la ampacidad, se ha demostrado que utilizar un ángulo de 30° garantiza un balance entre los diferentes tipos de refrigeración por convección, mientras que los valores menores de 30° dan un carácter dominante a la refrigeración natural y los mayores de 30° a la refrigeración forzada.

- Se ha demostrado la existencia de diferencias significativas entre las metodologías para el cálculo de la ampacidad desarrolladas por el IEEE y el CIGRÉ. De igual forma se han identificado y clasificado cada una de ellas con el fin de proporcionar al usuario una visión clara de las fortalezas, debilidades, ventajas y desventajas que cada uno de los métodos posee, permitiendo así, que el análisis se realice con el enfoque que mejor se ajuste a las condiciones y necesidades asociadas al caso de estudio.
- Se ha verificado que las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ no poseen restricción teórica alguna para su aplicación en las condiciones atmosféricas y geográficas del territorio colombiano. Así mismo, se ha comprobado que la efectividad del análisis realizado depende fundamentalmente de los criterios asumidos por el analista eléctrico.
- Se ha demostrado que la metodología para el cálculo de la ampacidad que presenta un mayor grado de claridad y uniformidad en los modelos matemáticos propuestos es la desarrollada por el IEEE. Así mismo, se concluye que la metodología propuesta por el CIGRÉ ofrece consideraciones y recomendaciones que permiten dar al análisis el enfoque y la objetividad deseados.
- Aplicar las metodologías para el cálculo de la ampacidad, seleccionando con criterio envolvente los parámetros meteorológicos de la zona en estudio, evita el sobre y sub dimensionamiento de la capacidad de carga de las líneas de transmisión que hacen parte del STN. Permitiendo así, alcanzar un mayor grado de conocimiento acerca de su comportamiento térmico, confiabilidad y control durante la operación.

- El trabajo realizado ha demostrado la importancia de evaluar con criterio propio la aplicabilidad de las metodologías y recomendaciones que surgen de las investigaciones realizadas a nivel internacional, ya que nuestro país presenta condiciones geográficas, atmosféricas, sociales, políticas y económicas propias, que pueden escapar a las consideraciones asumidas en dichos trabajos.
- El desarrollo de esta investigación ha permitido generar una visión clara y profunda del papel fundamental que desempeña la academia en la visualización de problemas futuros y la búsqueda de soluciones óptimas y eficientes a las necesidades de la industria.
- El proceso de documentación y análisis realizado ha permitido comprender con claridad que la evolución del conocimiento es permanente pero no constante, pues su enfoque, profundidad y aplicación deben estar en continuo crecimiento para garantizar el desarrollo de nuestra sociedad.

4.2 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS DESARROLLOS

Con el ánimo de aumentar la efectividad asociada a la aplicación del método de cálculo de la amplitud en líneas de transmisión, se recomienda desarrollar una técnica probabilística para la selección de los parámetros meteorológicos, que garantice la identificación y posterior utilización de un óptimo criterio envolvente en el análisis.

Así mismo, se propone compilar la metodología IEEE y el método de selección desarrollado para los parámetros meteorológicos, en un módulo computacional que facilite la ejecución y el posterior análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente, se recomienda realizar pruebas (campo y laboratorio) para conocer y evaluar el desempeño del módulo computacional en la predicción de límites térmicos, tiempos límites y temperaturas de operación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. Noviembre 2006.
- [2]. SEPPA, Tapani; E. Cromer y W.F. Withlatch. Summer thermal capabilities of transmission lines in Northern California based on a comprehensive study of wind conditions. IEEE Trans. On Power Delivery. Vol 8. No 3. Julio 1993; p.1551-1561
- [3]. SEPPA, Tapani. Average effective wind angle along a transmission line section. En: CIGRE TF B2-12-6. Slovenia. Abril 20, 2005
- [4]. DOUGLASS, Dale. Conductor Selection and Transmission Line Optimization : Thermal Ratings of Bare Overhead Conductors, Sección 3.1.6. 1995; p. 3.4
- [5]. DOUGLASS, Dale. Conductor Selection and Transmission Line Optimization : Thermal Ratings of Bare Overhead Conductors, Sección 3.1.3. 1995; p. 3.2
- [6]. CIGRÉ The Thermal Behaviour of Overhead Conductors: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and the application thereof. ÉLECTRA No 144 Octubre 1992; p. 107-125
- [7]. CIGRÉ The Thermal Behaviour of Overhead Conductors: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the unsteady state . ÉLECTRA No 174 Octubre 1997; p. 59-69
- [8]. International Standard IEC 104. Aluminium Magnesium Silicon alloy wire for overhead line conductors. 1987

- [9]. International Standard IEC 888. Zinc coated steel wires for stranded conductors. 1987
- [10]. International Standard IEC 889. Hard drawn aluminium wire for overhead line conductors. 1987
- [11]. International Standard IEC 1232. Aluminium clad steel wires for electrical purposes. 1993
- [12]. ZUÑIGA. Juan. Técnicas Experimentales en Física General: Propagación de errores, Sección 3.2. Universidad de Valencia. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. 2003; p. 1-14
- [13]. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. Junio 1993.
- [14]. CIGRÉ, Probabilistic Determination of Conductor Current Ratings, ELECTRA No 164, Febrero 1996, p 103-117
- [15]. MEJIA VILLEGAS. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión: Capítulo 9: Sección 9.4.1.2. 2000, p 331
- [16]. SANÍN R. Iván Alberto. Metodología para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión. Interconexión Eléctrica S.A. Junio 2007, p 28 -29
- [17]. P. Sarma Maruvada. Corona Performance of High Voltage Transmission Lines. 2000, p 91-108
- [18]. Abdel-Salam M. High Voltage Engineering Theory and Practice. 2000, p 151-154

[19]. Std IEEE 539, IEEE Standard Definitions of Terms Related to Corona and Fields Effects of Overhead Power Lines. 2005, p 19-20

[20]. ALUMINUM ASSOCIATION, Aluminum Electrical Conductor Handbook, 1989

ANEXO A

FUNDAMENTOS TEÓRICOS ASOCIADOS A LA REFRIGERACIÓN Y AL CALENTAMIENTO EN LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

A.1 REFRIGERACIÓN POR CONVECCIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La refrigeración por convección, es la transferencia térmica entre una fuente de calor y el medio circundante a través de un líquido o gas en movimiento. En líneas de transmisión la fuente de calor es el conductor de fase y la transferencia térmica se da como resultado del desplazamiento de volúmenes de aire, que al adquirir un delta de temperatura por efecto de la fuente térmica, pierden densidad generando así una corriente de aire ascendente (con mayor temperatura) la cual permite que un nuevo volumen de aire con mayor densidad (con menor temperatura), ocupe su lugar (corriente de aire descendente). Este nuevo volumen absorberá parte del calor emanado por el conductor, permitiendo así, que el ciclo se repita.

La refrigeración por convección puede ser de dos tipos, natural y forzada. La primera de ellas (convección natural) tiene su origen en las variaciones de densidad generadas por el calentamiento del aire que rodea al conductor de fase. Mientras que la segunda (convección forzada) es generada por los vientos que se presentan en la zona geográfica donde se encuentra la línea de transmisión. Dichos vientos, se deben básicamente al mismo principio de convección visto desde una escala mayor, donde el calentamiento se da en el centro de la atmósfera y a partir de allí se desencadena el conjunto de fenómenos meteorológicos que dan origen a la formación de vientos, nubes, vaguadas, etc.

La refrigeración por convección depende principalmente de la velocidad del viento, la densidad del aire, el ángulo con que incide el viento sobre el conductor y la

diferencia de temperatura existente entre ellos (superficie del conductor y el aire circundante).

A.1.1 Viscosidad dinámica y conductividad térmica del aire

La Viscosidad Dinámica y la conductividad térmica son propiedades físicas de aire; la primera de ellas, representa la oposición que sus moléculas ejercen al desplazamiento, dicha oposición es producida por la fricción existente entre los átomos que lo conforman. En el sistema internacional SI, las unidades de la viscosidad dinámica son el Pascal – Segundo ($Pa \cdot s$). Por otro lado, la conductividad térmica representa la capacidad que tiene el aire de conducir el calor. En el sistema internacional SI, sus unidades son el Watt / metro.Kelvin ($W/(m \cdot K)$).

A.2 REFRIGERACIÓN POR RADIACIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

En el cálculo de la Ampacidad, la refrigeración por radiación es la transferencia térmica dada entre los conductores de fase y el medio circundante (aire) por efecto de la emisión electromagnética producida por el movimiento de las cargas eléctricas en el conductor. Dicha transferencia depende de las propiedades superficiales del conductor, específicamente de su coeficiente de emisividad ε .

Para entender el concepto de refrigeración por radiación térmica, es necesario tener en cuenta el concepto de Cuerpo Negro descrito por Gustav Kirchoff en 1860. Según el cual, un Cuerpo Negro es un objeto que posee la propiedad de absorber el 100% de la radiación térmica que incide sobre él, así como de emitir el 100% de la radiación térmica originada por su temperatura interior. La radiación del Cuerpo Negro depende fundamentalmente de la temperatura absoluta que

éste posee, como lo describe la ley de Stefan Boltzmann, según la cual dicha radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, como se presenta en la ecuación (A.2.1).

$$j = \sigma T^4 \quad (\text{A.2.1})$$

donde:

j intensidad de la radiación térmica en W/m^2

$\sigma = 5.670400 \times 10^{-8}$ constante de Stefan Boltzmann, con unidades $J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-4}$

T temperatura absoluta del cuerpo negro en K

La figura A1 presenta la intensidad de la radiación de Cuerpo Negro para diferentes temperaturas según la mecánica cuántica y la mecánica clásica. Cabe resaltar que actualmente el modelo clásico no es considerado, pues, tiene asociado un alto margen de error en la caracterización del fenómeno. Observe que según el modelo cuántico, para $T = 5000 K$ la mayor intensidad se emite en la longitud de onda del azul, mientras que para $T = 4000 K$ y $T = 3000 K$ se emiten en la longitud de onda del verde y el rojo respectivamente. Esto evidencia que al aumentar la temperatura del cuerpo aumenta la energía irradiada, pero a su vez, disminuye la longitud de onda de la señal emitida, en otras palabras, al aumentar la temperatura las ondas electromagnéticas se emiten con una mayor frecuencia (ver tabla A1) debido a que la oscilación de las partículas elementales al interior del conductor aumenta. Un ejemplo claro se da cuando un objeto metálico se calienta y su color cambia (va hacia el rojo y continua hacia el azul).

El comportamiento emisor del conductor de fase se representa a través del coeficiente de emisividad ε , el cual, permite caracterizar la tendencia de éste a emitir la totalidad de la energía térmica almacenada en él. Teóricamente, este coeficiente es la relación entre la energía térmica que emite el conductor y la que éste emitiría si fuese un cuerpo negro. Cuando un objeto posee una característica

de emisión inferior a la de un Cuerpo Negro, se conoce comúnmente como Cuerpo Gris. La ley de Stefan Boltzmann aplicada a los cuerpos grises define la intensidad de radiación térmica que estos emiten en función de su temperatura absoluta y el coeficiente de emisividad que los caracteriza (ver ecuación (A.2.2)).

$$j = \varepsilon \sigma T^4 \quad (\text{A.2.2})$$

donde:

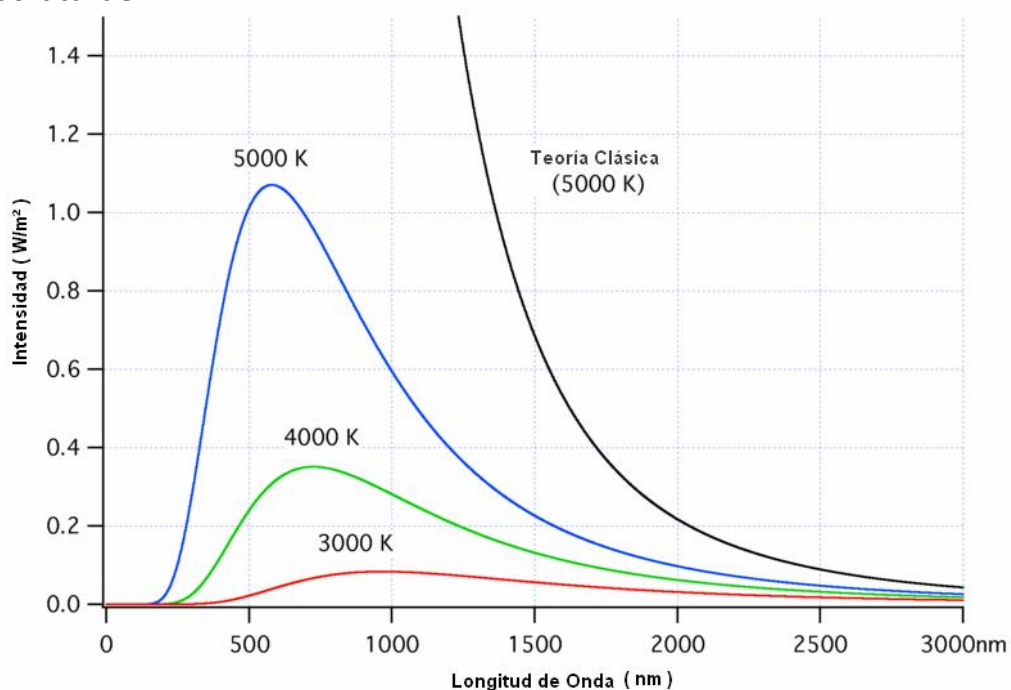
j intensidad de la radiación térmica en W/m^2

$0 < \varepsilon < 1$ coeficiente de emisividad del conductor

$\sigma = 5.670400 \times 10^{-8}$ constante de Stefan Boltzmann, con unidades $J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

T temperatura absoluta del cuerpo negro en K

Figura A 1. Intensidad de radiación de cuerpo negro para diferentes temperaturas



Fuente: www.Drphysics.com

Tabla A 1. Longitud de onda y frecuencia asociada a los colores del rango visible

Color	Longitud de Onda	Frecuencia
Rojo	~ 625 - 740 nm	~ 480 - 405 THz
Naranja	~ 590 - 625 nm	~ 510 - 480 THz
Amarillo	~ 565 - 590 nm	~ 530 - 510 THz
Verde	~ 520 - 565 nm	~ 580 - 530 THz
Azul	~ 450 - 500 nm	~ 670 - 600 THz
Añil	~ 430 - 450 nm	~ 700 - 670 THz
Violeta	~ 380 - 430 nm	~ 790 - 700 THz

Fuente: Fundamentos de transferencia de calor. Incropera Frank P. 1999

La forma como responde el cuerpo a la energía incidente, depende principalmente del estado de su superficie. Por ejemplo, una superficie opaca tiene una capacidad de emisión superior al de una brillante. Los conductores metálicos utilizados en las líneas de transmisión, presentan variación en sus características superficiales con el paso del tiempo. Inicialmente son brillantes y a medida que están expuestos a la intemperie se vuelven opacos, de tal forma, que su coeficiente de emisividad aumenta con el tiempo. Aspecto que se evidenció en las investigaciones desarrolladas por el EPRI¹⁰.

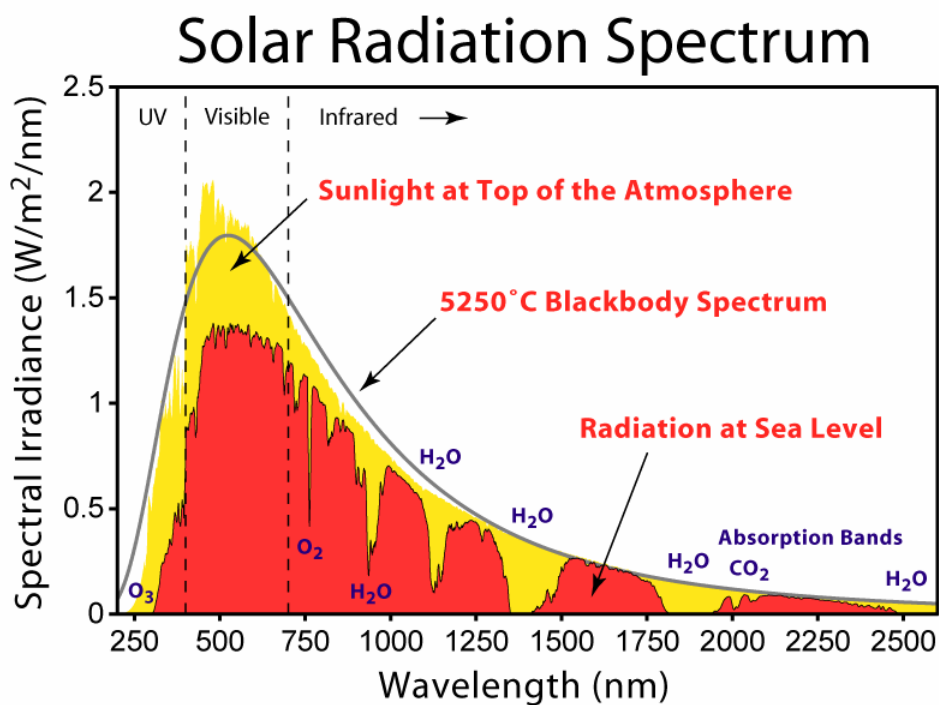
A.3 CALENTAMIENTO POR EFECTO SOLAR

El calentamiento por efecto solar es producido por la radiación solar incidente, la cual, actúa como una fuente térmica para los conductores de fase. Este fenómeno depende principalmente de la radiación solar neta que incide en el conductor, la capacidad de éste para absorberla (coeficiente de absorción), la altura sobre el nivel del mar y la posición solar con respecto a la zona geográfica donde se encuentra ubicada la línea (acimut solar).

¹⁰ Proyecto UHV desarrollado por el EPRI con el patrocinio de General Electric Company- 1982.

La radiación solar es el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el sol, debido a los procesos de fusión nuclear que se realizan en su interior. El perfil de radiación electromagnética del sol, está contenido en el modelo teórico de un cuerpo negro a 5250 °C (ver figura A2).

Figura A 2. Intensidad de la radiación electromagnética emitida por el sol (espectro característico de un cuerpo negro a 5250 °C)

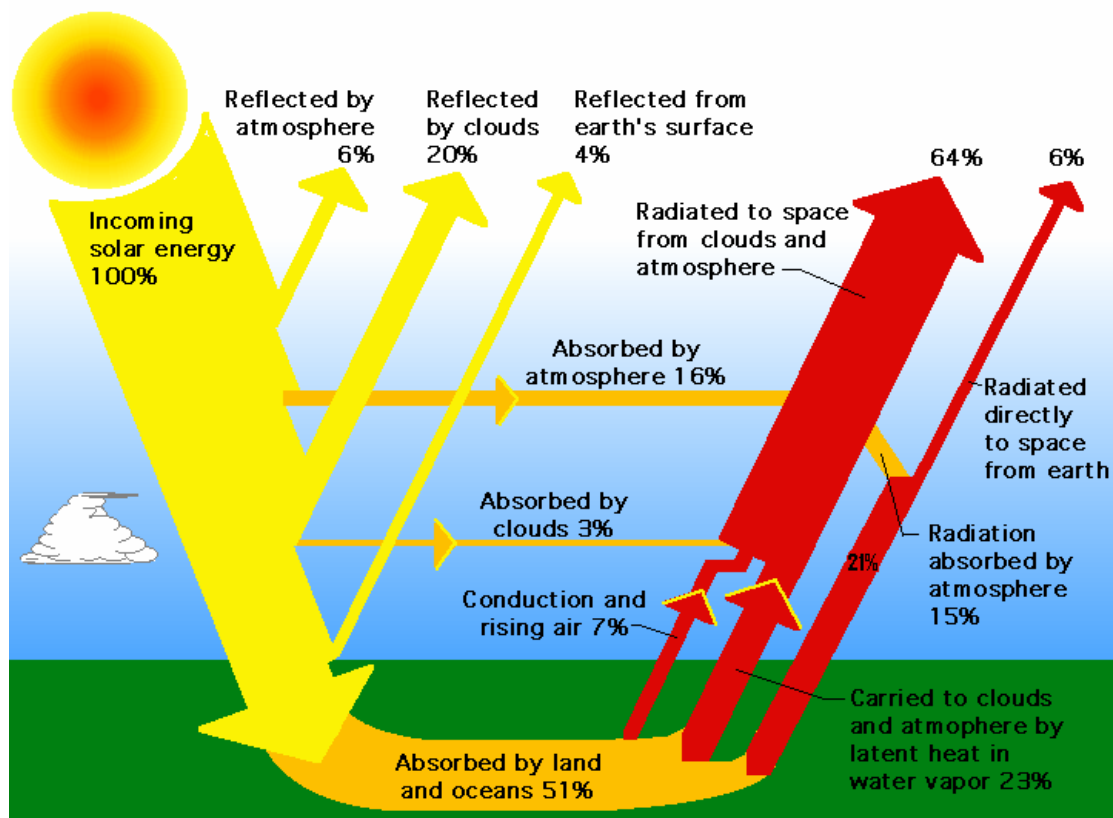


Fuente: Robert A. Rohde, Global Warming Art Project. 2007.

La mitad de la energía irradiada por el sol se encuentra contenida en la banda visible (400 nm a 700 nm), la otra mitad se encuentra distribuida entre la banda infrarroja y la ultravioleta. Aunque la radiación electromagnética puede viajar a través del vacío, algunos arreglos moleculares ejercen un efecto atenuador y reflector en las ondas que la componen. Por ejemplo, la capa de ozono ejerce un efecto atenuador y reflector para la banda ultravioleta. Por otro lado, el agua y el

dióxido de carbono filtran las componentes de la banda infrarroja. Con base en lo anterior, es claro que no toda la radiación electromagnética emitida por el sol incide sobre la superficie terrestre. La figura A3 muestra la distribución de la radiación solar incidente, al entrar en contacto con nuestro planeta.

Figura A 3. Distribución de la radiación solar al interactuar con el planeta tierra.



Fuente: <http://www.suntricity4life.com/>

La distribución presentada en la figura A.3, muestra cómo, del 100% de la radiación solar incidente en nuestro planeta, el 6% es reflejado hacia el exterior por la atmósfera (El ozono filtra gran parte de la banda ultravioleta), el 20% se refleja por efecto de las nubes (el agua y el dióxido de carbono filtra gran parte de

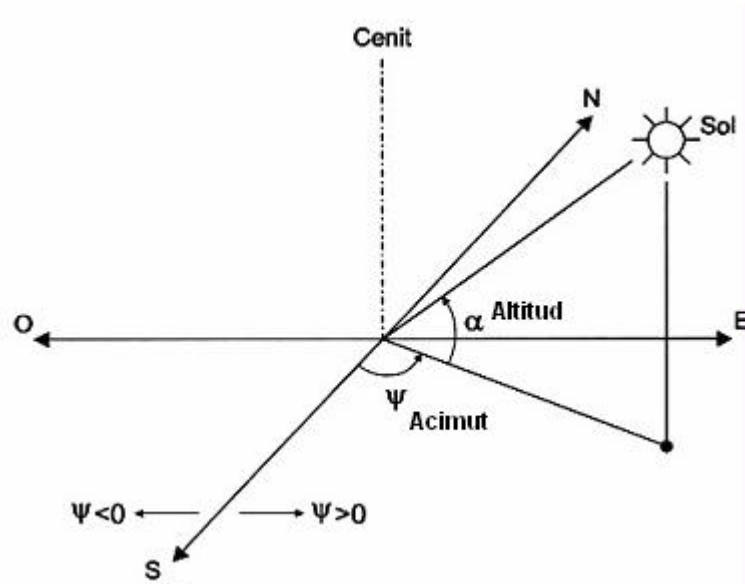
la banda infrarroja), el 4% es reflejado al exterior por la superficie terrestre. El 70% restante es absorbido por la atmósfera, las nubes, la superficie terrestre y el océano (16%, 3% y 51% respectivamente). De la radiación solar absorbida por la superficie terrestre y el océano, el 7% es radiado al exterior por efecto del aire ascendente que llega a las nubes y el 23% por efecto del vapor de agua que forma las nubes. Otro 34% es radiado igualmente al espacio exterior por efecto de la atmósfera y las nubes. El 6% restante es radiado directamente al exterior por la superficie terrestre.

La capacidad de absorción del conductor se representa a través del coeficiente de absorción α , el cual, permite caracterizar la tendencia de éste a absorber la totalidad de la radiación solar que incide en él. Teóricamente, es común considerar que este coeficiente es igual al coeficiente de emisividad del conductor, sin embargo, investigaciones realizadas por el EPRI han demostrado que los valores de absorptividad y emisividad en un mismo conductor de fase difieren y adicionalmente estos varían con el paso del tiempo¹¹.

La posición del sol también juega un papel importante a la hora de calcular el calentamiento por efecto solar, ya que con base en ella se estima la cercanía del sol a la zona geográfica donde se está realizando el análisis. La posición del sol se describe con base en la altitud solar y el acimut solar. El primero es el ángulo existente entre el plano horizontal de la zona geográfica y la línea imaginaria existente entre dicho plano y el sol (ver figura A.4). El segundo es el ángulo existente entre la proyección del sol sobre el plano horizontal y la línea imaginaria que une el norte y el sur (ver figura A.4).

¹¹ Proyecto UHV desarrollado por el EPRI con el patrocinio de General Electric Company- 1982.

Figura A 4. Descripción de la posición del sol por medio de la altitud solar y el acimut solar



Fuente: www.nousol.com

A.4 CALENTAMIENTO POR EFECTO JOULE Y MAGNÉTICO

Estos fenómenos se fundamentan en la estructura cristalina de las moléculas que constituyen el conductor de fase. La corriente circulante, entendida como el desplazamiento de los electrones a través de los niveles de valencia de los átomos del conductor, está acompañada por continuas colisiones que son fuente de energía térmica. Adicionalmente, cuando la corriente alterna circula por el conductor se generan enlaces de flujo magnético variante en el tiempo, los cuales, producen corrientes circulantes hacia el centro del conductor, originando un calentamiento extra.

A.5 CALENTAMIENTO POR EFECTO CORONA

El fenómeno Corona se genera cuando el potencial eléctrico en la superficie de un conductor alcanza niveles superiores a la rigidez dieléctrica del aire que lo rodea. De esta forma se originan procesos de ionización en las vecindades del mismo, lo que facilita la transferencia de energía entre el conductor y el medio circundante. Los iones generados son atraídos y repelidos por el conductor a velocidades muy altas, durante este proceso se generan múltiples colisiones que dan origen al fenómeno de transferencia térmica en la superficie del conductor. El aire ionizado aumenta el diámetro eficaz del conductor de fase y la resistencia eléctrica asociada al mismo, pues, por efecto de la ionización el aire se vuelve un medio conductor de alta resistencia.

A continuación se presentan las principales consecuencias producidas por dicho fenómeno.

A.5.1 Efectos del fenómeno corona

Dentro de las principales consecuencias originadas por el fenómeno corona se encuentran las pérdidas de energía por la ionización del medio circundante, generación de ruido audible e interferencia electromagnética en las bandas de radio y televisión. La ionización produce algunos compuestos químicos como el ozono, y si el grado de humedad en el medio es elevado, puede producir ácido nítrico, el cual es altamente corrosivo. Los efectos descritos anteriormente se asocian a las condiciones atmosféricas de la zona geográfica donde se ubica la línea de transmisión (*temperatura ambiente, presión atmosférica, humedad relativa*) y a los factores de diseño considerados (*diámetro de los conductores, espaciamiento y geometría de las fases*).

El fenómeno corona depende básicamente de la rigidez dieléctrica del aire y del gradiente de potencial presente en la superficie del conductor. Las condiciones ambientales facilitarán en mayor o menor medida la ionización de las capas de aire que rodean al conductor y los factores de diseño definirán principalmente la distribución del campo eléctrico en la superficie del mismo.

A.5.1.1 Descripción de la descarga

El fenómeno corona se caracteriza básicamente por la transferencia de energía entre la superficie del conductor (*medio 1*) y el medio circundante (*medio 2*). Los principales procesos que conforman la creación de portadores de carga (*iones positivos, negativos, electrones*) entre estos dos medios son:

- Ionización Positiva

Se origina por la colisión entre un electrón y un átomo. La energía transferida a este último genera el desprendimiento de un electrón, cargando positivamente al átomo.

- Excitación

Cuando la energía transferida al átomo no es suficiente para generar el desprendimiento de electrones (*ionización positiva*), éste absorbe dicha energía, desplazando sus electrones hacia niveles superiores (*orbitales de mayor energía*).

- Emisión Fotónica

Cuando un átomo se encuentra excitado y no puede mantener la nueva distribución de electrones en sus orbitales, buscará alcanzar la estabilidad

retornando dichos electrones a sus niveles de origen. Para ello, debe liberar la energía almacenada a través de la emisión espontánea de fotones.

- Fotoionización

Se presenta cuando un átomo recibe un fotón con la energía suficiente para generar el desprendimiento de electrones (*ionización positiva*).

- Ionización Negativa o Atrapamiento

Se da cuando un átomo posee vacantes en sus orbitales superiores (*niveles de valencia*), razón por la cual, tiende a capturar electrones libres, convirtiéndose así, en un ión negativo.

- Recombinación

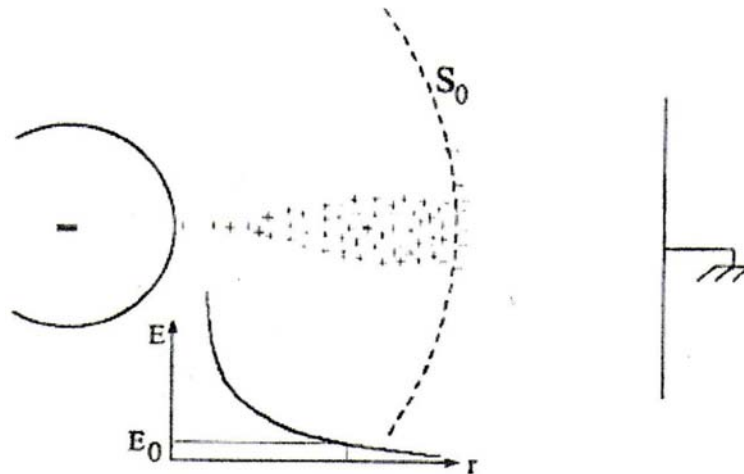
Ocurre cuando iones positivos y electrones se recombinan, generando así, el desprendimiento de fotones.

Con base en la polaridad del voltaje aplicado al conductor, la descarga corona tendrá un comportamiento característico. A continuación, se describen los tipos de descarga existentes y las etapas que componen el desarrollo del fenómeno.

Descarga negativa

Este tipo de descarga se da cuando existe un potencial negativo entre el conductor (cátodo) y el plano de referencia (ánodo). El proceso se inicia en el conductor cilíndrico con una avalancha de electrones sobre el campo eléctrico que decrece hacia el ánodo. La avalancha de electrones se detiene en la superficie S_0 ¹²(ver figura A.5).

Figura A 5. Avalancha de electrones en el cátodo



Fuente: [17]

Como los electrones pueden moverse más rápido que los iones (*pues tienen menor peso*), estos se concentran en el frente de la avalancha y los iones positivos se concentran entre el cátodo y la superficie S_0 . Un poco más adelante de la frontera S_0 los electrones libres chocan con las moléculas de oxígeno, generando así, iones negativos que se acumulan en dicha región. Debido a esto,

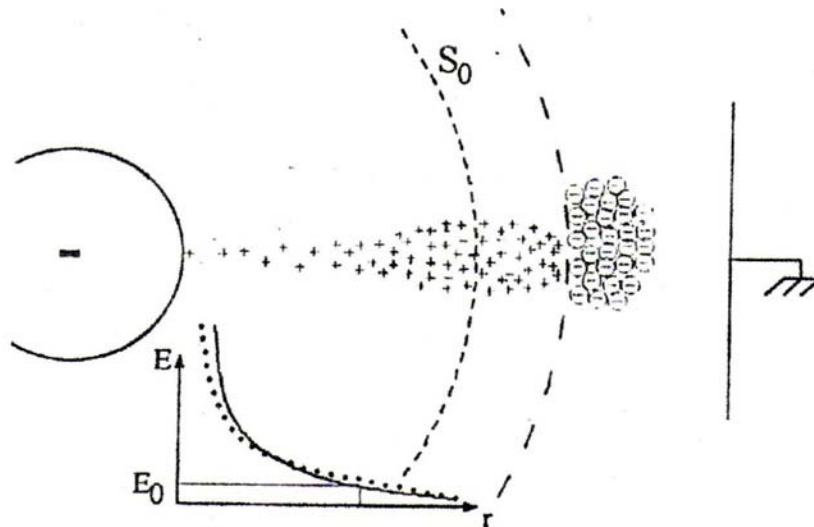
¹² El radio de la superficie S_0 está relacionado con la intensidad del campo eléctrico, a medida que dicha superficie se aleja del conductor la intensidad del campo eléctrico en ella disminuye.

se presenta una capa de iones positivos y otra de iones negativos en cercanías de la superficie S_0 (ver figura A.6).

La presencia de los iones afecta de forma directa la distribución del campo eléctrico. Cerca al cátodo el campo eléctrico presenta una mayor intensidad que cerca al ánodo. Esto evidencia que su intensidad varía inversamente con la distancia.

A medida que aumenta la intensidad de campo (cerca del conductor de fase) se puede generar la descarga negativa de tres modos diferentes:

Figura A 6. Capas de carga espacial generadas después de la primera avalancha



Fuente: [17]

- **Descarga Trichel Streamer**

Esta descarga sigue un patrón pulsatorio basado en un proceso de recombinación que inhibe la ionización durante cortos periodos de tiempo.

Su amplitud es pequeña y se caracteriza por poseer una alta frecuencia de repetición.

- **Descarga negativa pulsada Glow**

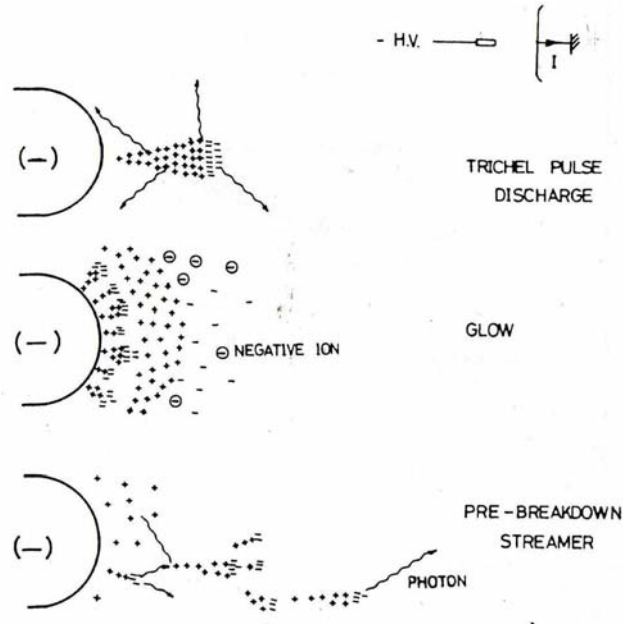
Esta descarga se presenta como pulsos centelleantes, que se originan ante el incremento de la intensidad del campo eléctrico en las cercanías del conductor.

- **Descarga Streamer Negativa**

Este tipo de descarga es repetitiva. Se caracteriza por presentar mayor duración y amplitud que la descarga Trichel, pero su frecuencia de repetición es menor.

La figura A.7 presenta el desarrollo de la avalancha de electrones para la descarga negativa, iniciando con la descarga Trichel, seguida de la Glow hasta alcanzar finalmente el Streamer [18].

Figura A 7. Desarrollo de la avalancha de electrones en la descarga corona negativa



Fuente: [17]

Descarga positiva

Esta descarga se presenta cuando el conductor (ánodo) se polariza positivamente. En ella la avalancha de electrones se inicia en puntos de la superficie S_0 (ver figura A.8) y se desarrolla hacia el ánodo generando un continuo incremento del campo eléctrico. Debido a éste, la mayoría de los electrones libres son absorbidos en el ánodo. Adicionalmente, la presencia de iones positivos cerca del conductor (ánodo) produce un mayor incremento en la intensidad del campo eléctrico en el aire. Por efecto de la primera avalancha algunos átomos desplazan sus electrones a niveles de energía superior (*excitación*). Al no poder conservar el nuevo estado de energía adquirido, los átomos deben volver a un estado de equilibrio (*los electrones deben retornar a sus orbitales de origen*), de tal forma, que la energía ganada anteriormente se libera en forma de fotones, que al ser emitidos

colisionarán con otros átomos, generando una segunda avalancha que promueve la propagación de carga en el aire (ver figura A.8).

A medida que aumenta la intensidad de campo (*cerca del conductor de fase*) se puede generar la descarga positiva de cuatro modos diferentes:

- **Descarga Burst**

Resulta de la actividad de ionización en la superficie del ánodo, los iones positivos de las cercanías suprimen la descarga en forma de pequeños pulsos sobre la periferia del conductor, formando una delicada capa incandescente en la superficie del mismo.

- **Onset Stream**

Se caracteriza por un pulso de corriente de gran amplitud, corta duración (*nanosegundos*) y frecuencia de repetición inferior a 1 kHz.

- **Positive Glow Discharge**

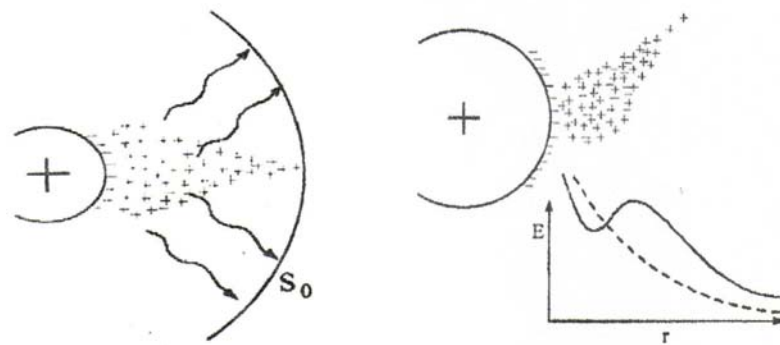
La intensa ionización dada sobre la superficie del conductor genera una capa incandescente de mayor intensidad que la generada en la descarga Burst. En este caso la descarga presenta una alta frecuencia de repetición.

- **Breakdown Streamer**

Se presenta cuando la intensidad del campo eléctrico supera la capacidad dieléctrica del medio circundante, generando una descarga tipo onset que alcanza una mayor distancia de expansión en el aire, lo que implica un mayor consumo de energía.

La figura A.9 presenta el desarrollo de la descarga positiva, iniciando con las primeras avalanchas, seguidas de la descarga Glow hasta alcanzar finalmente el Breakdown Streamer [18].

Figura A 8. Desarrollo de las avalanchas cerca al ánodo y propagación de carga en el aire

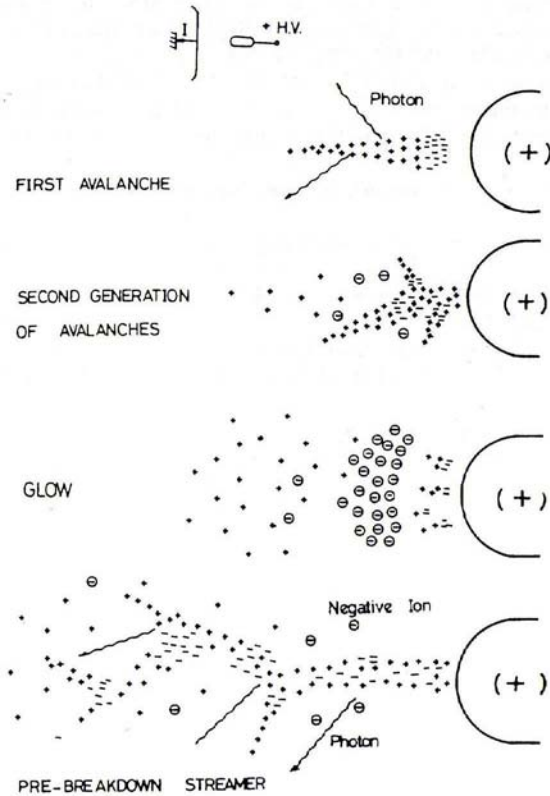


Fuente: [17]

En las líneas de transmisión A.C, el proceso de descarga combina modos positivos y negativos debido a la característica alternante del potencial eléctrico. De tal forma que, durante medio ciclo, la descarga será positiva y durante el siguiente medio ciclo, será negativa. Cuando en un sistema se combinan los dos modos de descarga descritos anteriormente, se presentan los siguientes efectos predominantes.

- El onset streamer de la descarga positiva desaparece por acción de las cargas espaciales creadas en el medio ciclo anterior donde la descarga fue negativa (*ciclo negativo de la señal A.C*).

Figura A 9. Desarrollo de la avalancha de electrones en la descarga corona positiva



Fuente: [17]

- El breakdown streamer se presentará típicamente en algún instante del medio ciclo donde la señal es positiva.

Con base en lo anterior, el efecto corona en líneas de transmisión A.C. estará regido típicamente por la presencia de descargas Trichel durante el ciclo negativo de la señal de tensión y por descargas Burst, Glow y Breakdown durante el ciclo positivo [19] esto hace que exista una transferencia térmica permanente durante la presencia del fenómeno. Sin embargo, la ganancia térmica asociada a él está típicamente compensada con la fuerte refrigeración generada por las condiciones

climáticas en las que se origina la presencia de corona (fuertes precipitaciones, bajas temperaturas).

ANEXO B

TABLAS DE RESISTIVIDADES Y COEFICIENTES DE DILATACIÓN TÉRMICA

Tabla B 1. Valores de resistividad asociados a la fabricación de conductores desnudos

VALORES DE RESISTIVIDAD ASOCIADOS A LA FABRICACIÓN DE CONDUCTORES DESNUDOS	
MATERIAL	RESISTIVIDAD ohm-mm ² /km
Aluminio 1350-H19	28,17
Aleación de aluminio 6201-T81	32,84
Acero recubierto con zinc	191,57
Cobre	17

Fuente: www.centelsa.com.co

Tabla B 2. Coeficientes de dilatación térmica asociados a la fabricación de conductores desnudos

COEFICIENTES DE DILATACIÓN TÉRMICA A 20°C	
MATERIAL	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA (1/°C)
Aluminio 1350-H19	0,00404
Aleación de aluminio 6201-T81	0,00347
Acero recubierto con zinc	0,0032
Cobre	0,00381

Fuente: ALUMINUM ASSOCIATION, Aluminum Electrical Conductor Handbook, 1989

ANEXO C
TABLA DE DATOS Y RESULTADOS DEL ANÁLISIS REALIZADO EN EL
TERRITORIO COLOMBIANO

Tabla C.1 Ubicación de las zonas geográficas seleccionadas para el análisis

ESTACIÓN	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LATITUD	HEMISFERIO	ALTURA
Villarrosa	Valledupar	Cesar	10,20	N	70
Hda la Guaira	El paso	Cesar	9,62	N	50
Socomba	Becerril	Cesar	9,72	N	170
Col Pailitas	Pailitas	Cesar	8,97	N	50
La Llana	San Alberto	Cesar	7,73	N	120
Aguas Claras	Aguachica	Cesar	8,25	N	208
San Lorenzo	Santa Marta	Magdalena	11,12	N	2200
El Dificil	Ariguani	Magdalena	9,85	N	205
Carmen de Bolivar	El Carmen de Bolivar	Bolivar	9,72	N	152
El Guamo	El Guamo	Bolivar	10,03	N	72
Nueva Florida	Maria la baja	Bolivar	9,95	N	13
La Maravilla	San Calixto	N de S	8,40	N	1650
Teorama	Teorama	N de S	8,43	N	1160
Convención	Convención	N de S	8,47	N	1076
Tonchala	Cúcuta	N de S	7,85	N	285
Risaralda	El Zulia	N de S	8,23	N	90
Salazar	Salazar	N de S	7,78	N	860
Gja HJC	Cucutilla	N de S	7,55	N	1380
Pamplona	Pamplona	N de S	7,37	N	2340
UFPS	Ocaña	N de S	8,22	N	1150
El Centro	Bcabermeja	Santander	6,87	N	162
Hda Las Brisas	Pto Wilches	Santander	7,25	N	138

ESTACIÓN	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LATITUD	HEMISFERIO	ALTURA
Hda Tigres	Giron	Santander	7,08	N	400
UIS	Bucaramanga	Santander	7,13	N	1018
Hda La Esperanza	Giron	Santander	7,07	N	520
Cachira	Surata	Santander	7,48	N	1850
Carare	Pto Parra	Santander	6,65	N	168
Buenvista	Buenvista	Boyaca	5,53	N	2200
San Cayetano	San Cayetano	Cundinamarca	5,30	N	2150
Sabaneta	San Francisco	Cundinamarca	4,90	N	2475
La Cabrera	Pacho	Cundinamarca	5,13	N	2000
La Pelada	Aguadas	Caldas	5,58	N	2175
Fca Tesorito	Manizales	Caldas	5,03	N	2200
San Felix	Salamina	Caldas	5,37	N	2765
El Nus	San Roque	Antioquia	6,48	N	835
Las Violetas	San Rafael	Antioquia	6,35	N	1100
Pto Berrio	Pto Berrio	Antioquia	6,48	N	150
Anori	Anori	Antioquia	7,07	N	1610
El Peñol	El Peñol	Antioquia	6,22	N	2075
La Selva	Rio Negro	Antioquia	6,13	N	2090
Hda Tunez	Fredonia	Antioquia	5,80	N	530
La Nación	Tamesis	Antioquia	5,72	N	1140
La Salada	Caldas	Antioquia	6,05	N	1680
Cacaoteras	Caucasia	Antioquia	7,98	N	55
La Laguna	Pepeira	Risaralda	4,78	N	4000
Jardin Botánico	Marsella	Risaralda	4,93	N	1500
La Bohemia	Pereira	Risaralda	4,88	N	1020
Argelia	Argelia	Valle	4,73	N	1600
Tenerife	El Cerrito	Valle	3,73	N	2609
Buga	Buga	Valle	3,92	N	1000
Mateguadua	Tulua	Valle	4,02	N	1025

ESTACIÓN	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	LATITUD	HEMISFERIO	ALTURA
Cenicana	Florida	Valle	3,38	N	1050
Gja Expo	Palmira	Valle	3,63	N	950
La Union	La Unio	Valle	4,53	N	920
Planeta Rica	Planeta Rica	Cordoba	8,40	N	90
El Salado	Cienaga de Oro	Cordoba	8,92	N	40
Turipana	Cerete	Cordoba	8,85	N	20
La Doctrina	Lorica	Cordoba	9,30	N	20
Chima	Chima	Cordoba	9,15	N	20
Colomboy	Sahagun	Cordoba	8,75	N	125
Primates	Coloso	Sucre	9,52	N	200
El Limon	Manati	Atlantico	10,42	N	7
Fuente Bella	Sabanalarga	Atlantico	10,65	N	145
Villa Hermosa	Villa Hermosa	Tolima	5,03	N	2029
Armero	Armero	Tolima	5,02	N	300
Hda Garcia	Lerida	Tolima	4,87	N	350
La Esperanza	Honda	Tolima	5,25	N	222
El Salto	Ambalema	Tolima	4,78	N	450
La Salvajina	Suarez	Cauca	2,95	N	1130
Hda Carpinterias	El Tambo	Cauca	2,47	N	2500
Paispa	Sotara	Cauca	2,27	N	2450
La Sierra	La Sierra	Cauca	2,22	N	1870
La Citec	Patia	Cauca	2,15	N	580
U Nariño	Mercaderes	Cauca	1,90	N	580
Los Milagros	Bolivar	Cauca	1,77	N	2300
Viento Libre	Taminango	Nariño	1,57	N	2733
Wilquipamba	Pasto	Nariño	1,17	N	2527

Tabla C2. Altitud y acimut solar

ESTACIÓN	CIGRÉ		IEEE		%E Hs
	Altitud Solar	Acimut Solar	Altitud Solar	Acimut Solar	
	Hs	γ_s	Hs	Zs	
Villarrosa	70,53	45,45	70,49	314,69	0,05
Hda la Guaira	70,12	44,30	70,08	315,83	0,06
Socomba	70,19	44,50	70,15	315,63	0,05
Col Pailitas	69,65	43,08	69,61	317,05	0,06
La Llana	68,73	40,89	68,68	319,22	0,06
Aguas Claras	69,12	41,79	69,08	318,33	0,06
San Lorenzo	71,16	47,37	71,13	312,78	0,05
El Dificil	70,28	44,75	70,24	315,38	0,05
Carmen de Bolivar	70,19	44,49	70,15	315,64	0,05
El Guamo	70,41	45,11	70,37	315,02	0,05
Nueva Florida	70,35	44,95	70,31	315,18	0,05
La Maravilla	69,23	42,05	69,19	318,07	0,06
Teorama	69,25	42,11	69,21	318,01	0,06
Convención	69,28	42,17	69,24	317,95	0,06
Tonchala	68,82	41,10	68,78	319,02	0,06
Risaralda	69,10	41,76	69,06	318,36	0,06
Salazar	68,77	40,98	68,72	319,13	0,06
Gja HJC	68,59	40,59	68,55	319,52	0,06
Pamplona	68,45	40,29	68,41	319,82	0,06
UFPS	69,09	41,73	69,05	318,39	0,06
El Centro	68,07	39,49	68,02	320,62	0,06
Hda Las Brisas	68,36	40,10	68,32	320,01	0,06
Hda Tigeros	68,23	39,83	68,19	320,28	0,06
UIS	68,27	39,91	68,23	320,20	0,06
Hda La Esperanza	68,22	39,81	68,18	320,30	0,06
Cachira	68,54	40,48	68,50	319,63	0,06
Carare	67,90	39,15	67,86	320,96	0,06

ESTACIÓN	CIGRÉ		IEEE		%E Hs
	Altitud Solar	Acimut Solar	Altitud Solar	Acimut Solar	
	Hs	γ_s	Hs	Zs	
Buenavista	67,02	37,48	66,98	322,62	0,07
San Cayetano	66,84	37,15	66,79	322,95	0,07
Sabaneta	66,52	36,59	66,47	323,50	0,07
La Cabrera	66,70	36,91	66,66	323,18	0,07
La Pelada	67,06	37,55	67,02	322,55	0,07
Fca Tesorito	66,62	36,78	66,58	323,32	0,07
San Felix	66,89	37,24	66,85	322,86	0,07
El Nus	67,77	38,89	67,73	321,21	0,06
Las Violetas	67,67	38,69	67,62	321,42	0,06
Pto Berrio	67,77	38,89	67,73	321,21	0,06
Anori	68,22	39,81	68,18	320,30	0,06
El Peñol	67,56	38,48	67,52	321,62	0,06
La Selva	67,50	38,36	67,45	321,74	0,06
Hda Tunez	67,23	37,87	67,19	322,23	0,06
La Nación	67,17	37,74	67,12	322,35	0,06
La Salada	67,43	38,24	67,39	321,87	0,06
Cacaoteras	68,92	41,32	68,88	318,79	0,06
La Laguna	66,42	36,43	66,38	323,66	0,07
Jardin Botánico	66,54	36,64	66,50	323,46	0,07
La Bohemia	66,50	36,57	66,46	323,53	0,07
Argelia	66,38	36,36	66,34	323,73	0,07
Tenerife	65,57	35,05	65,53	325,03	0,07
Buga	65,72	35,29	65,68	324,80	0,07
Mateguadua	65,80	35,42	65,76	324,67	0,07
Cenicana	65,28	34,62	65,24	325,47	0,07
Gja Expo	65,49	34,93	65,44	325,16	0,07
La Union	66,22	36,09	66,18	324,00	0,07
Planeta Rica	69,23	42,05	69,19	318,07	0,06
El Salado	69,61	42,98	69,57	317,14	0,06
Turipana	69,56	42,86	69,52	317,26	0,06

ESTACIÓN	CIGRÉ		IEEE		%E Hs
	Altitud Solar	Acimut Solar	Altitud Solar	Acimut Solar	
	Hs	γ_s	Hs	Zs	
La Doctrina	69,89	43,69	69,85	316,43	0,06
Chima	69,78	43,41	69,74	316,71	0,06
Colomboy	69,49	42,68	69,45	317,45	0,06
Primates	70,04	44,10	70,00	316,02	0,06
El Limon	70,68	45,89	70,64	314,25	0,05
Fuente Bella	70,84	46,37	70,80	313,77	0,05
Villa Hermosa	66,62	36,78	66,58	323,32	0,07
Armero	66,61	36,75	66,57	323,34	0,07
Hda Garcia	66,49	36,55	66,45	323,55	0,07
La Esperanza	66,80	37,08	66,75	323,02	0,07
El Salto	66,42	36,43	66,38	323,66	0,07
La Salvajina	64,93	34,09	64,88	325,99	0,07
Hda Carpinterias	64,52	33,52	64,48	326,56	0,07
Paispa	64,36	33,29	64,31	326,79	0,07
La Sierra	64,32	33,23	64,27	326,85	0,07
La Citec	64,26	33,16	64,21	326,92	0,07
U Nariño	64,05	32,88	64,00	327,20	0,07
Los Milagros	63,94	32,73	63,89	327,35	0,07
Viento Libre	63,77	32,51	63,72	327,56	0,07
Wilquipamba	63,43	32,08	63,39	327,99	0,07

Tabla C3. Radiación solar incidente

ESTACIÓN	IDEAM	Brillo Solar	Radiación IDEAM	Radiación	Factor de Corrección	Radiación IEEE	%E Radiación
Villarrosa	6000	6,85	876,00	1022,26	1,007982	1030,41	16,70
Hda la Guaira	6000	6,85	876,00	1021,68	1,005712	1027,52	16,63
Socomba	6000	6,85	876,00	1021,78	1,019196	1041,40	16,64
Col Pailitas	6000	6,85	876,00	1021,01	1,005712	1026,84	16,55
La Llana	6000	6,85	876,00	1019,61	1,013616	1033,49	16,39
Aguas Claras	6000	6,85	876,00	1020,21	1,023399	1044,08	16,46
San Lorenzo	6000	6,85	876,00	1023,10	1,198933	1226,63	16,79
El Dificil	6000	6,85	876,00	1021,91	1,023068	1045,49	16,66
Carmen de Bolivar	6000	6,85	876,00	1021,78	1,017194	1039,35	16,64
El Guamo	6000	6,85	876,00	1022,09	1,008208	1030,48	16,68
Nueva Florida	6000	6,85	876,00	1022,01	1,001491	1023,54	16,67
La Maravilla	5000	5,75	869,05	1020,38	1,159255	1182,88	17,41
Teorama	5000	5,75	869,05	1020,42	1,118259	1141,09	17,42
Convención	5000	5,75	869,05	1020,46	1,110697	1133,42	17,42
Tonchala	5000	5,75	869,05	1019,75	1,031818	1052,19	17,34
Risaralda	5000	5,75	869,05	1020,19	1,010242	1030,64	17,39
Salazar	5000	5,75	869,05	1019,67	1,090533	1111,98	17,33
Gja HJC	5000	5,75	869,05	1019,39	1,137323	1159,38	17,30
Pamplona	5000	5,75	869,05	1019,17	1,207962	1231,11	17,27
UFPS	5000	5,75	869,05	1020,17	1,117367	1139,91	17,39
El Centro	5500	5,75	955,95	1018,54	1,018307	1037,19	6,55
Hda Las Brisas	5500	5,75	955,95	1019,02	1,015631	1034,95	6,60
Hda Tigeros	5500	5,75	955,95	1018,82	1,044147	1063,79	6,58
UIS	5500	5,75	955,95	1018,88	1,105384	1126,25	6,58
Hda La Esperanza	5500	5,75	955,95	1018,79	1,0567	1076,56	6,57
Cachira	5500	5,75	955,95	1019,31	1,174459	1197,14	6,63

ESTACIÓN	IDEAM	Brillo Solar	Radiación IDEAM	Radiación	Factor de Corrección	Radiación IEEE	%E Radiación
Carare	5500	5,75	955,95	1018,26	1,018974	1037,58	6,52
Buenavista	5500	4,66	1180,88	1016,75	1,198933	1219,01	13,90
San Cayetano	5000	4,66	1073,53	1016,41	1,195603	1215,23	5,32
Sabaneta	5000	4,66	1073,53	1015,83	1,216258	1235,51	5,37
La Cabrera	5000	4,66	1073,53	1016,17	1,18528	1204,45	5,34
La Pelada	5000	4,66	1073,53	1016,82	1,197275	1217,41	5,28
Fca Tesorito	5000	4,66	1073,53	1016,03	1,198933	1218,15	5,36
San Felix	5000	4,66	1073,53	1016,51	1,232713	1253,07	5,31
El Nus	5000	4,66	1073,53	1018,04	1,088133	1107,77	5,17
Las Violetas	5000	4,66	1073,53	1017,87	1,112873	1132,76	5,18
Pto Berrio	5000	4,66	1073,53	1018,04	1,016971	1035,32	5,17
Anori	5000	4,66	1073,53	1018,79	1,156108	1177,84	5,10
El Peñol	5000	4,66	1073,53	1017,69	1,190504	1211,56	5,20
La Selva	5000	4,66	1073,53	1017,58	1,191533	1212,48	5,21
Hda Tunez	5000	4,66	1073,53	1017,12	1,057732	1075,84	5,25
La Nación	5000	4,66	1073,53	1017,01	1,116472	1135,46	5,27
La Salada	5000	4,66	1073,53	1017,46	1,161592	1181,88	5,22
Cacaoteras	5000	4,66	1073,53	1019,90	1,00628	1026,31	5,00
La Laguna	5000	4,66	1073,53	1015,66	1,28192	1301,99	5,39
Jardin Botánico	5000	4,66	1073,53	1015,88	1,14727	1165,49	5,37
La Bohemia	5000	4,66	1073,53	1015,81	1,105568	1123,04	5,38
Argelia	5000	4,66	1073,53	1015,58	1,155315	1173,32	5,40
Tenerife	5000	4,66	1073,53	1014,02	1,224093	1241,26	5,54
Buga	5000	4,66	1073,53	1014,32	1,10372	1119,52	5,52
Mateguadua	5000	4,66	1073,53	1014,48	1,106029	1122,04	5,50
Cenicana	5000	4,66	1073,53	1013,45	1,108324	1123,23	5,60
Gja Expo	5000	4,66	1073,53	1013,86	1,09906	1114,30	5,56
La Unión	5000	4,66	1073,53	1015,28	1,096238	1112,99	5,43
Planeta Rica	5500	4,66	1180,88	1020,38	1,010242	1030,83	13,59
El Salado	5500	4,66	1180,88	1020,95	1,004574	1025,62	13,54
Turipana	5500	4,66	1180,88	1020,88	1,002292	1023,22	13,55

ESTACIÓN	IDEAM	Brillo Solar	Radiación IDEAM	Radiación	Factor de Corrección	Radiación IEEE	%E Radiación
La Doctrina	5500	4,66	1180,88	1021,36	1,002292	1023,70	13,51
Chima	5500	4,66	1180,88	1021,20	1,002292	1023,54	13,52
Colomboy	5500	4,66	1180,88	1020,77	1,014177	1035,24	13,56
Primates	5500	6,85	803,00	1021,58	1,022517	1044,58	27,22
El Limon	6000	6,85	876,00	1022,46	1,000803	1023,28	16,72
Fuente Bella	6000	6,85	876,00	1022,68	1,016413	1039,46	16,74
Villa Hermosa	5000	5,75	869,05	1016,03	1,187315	1206,34	16,91
Armero	5000	5,75	869,05	1016,00	1,033443	1049,98	16,91
Hda García	5000	5,75	869,05	1015,78	1,038823	1055,22	16,88
La Esperanza	5000	5,75	869,05	1016,34	1,02494	1041,69	16,95
El Salto	5000	5,75	869,05	1015,66	1,049416	1065,85	16,87
La Salvajina	5000	4,66	1073,53	1012,73	1,115576	1129,77	5,66
Hda Carpinterías	5000	4,66	1073,53	1011,89	1,21775	1232,23	5,74
Paispa	5000	4,66	1073,53	1011,54	1,214752	1228,77	5,77
La Sierra	5000	4,66	1073,53	1011,45	1,17593	1189,39	5,78
La Citec	5000	4,66	1073,53	1011,33	1,062857	1074,90	5,79
U Nariño	5000	4,66	1073,53	1010,88	1,062857	1074,42	5,84
Los Milagros	5000	4,66	1073,53	1010,63	1,205427	1218,24	5,86
Viento Libre	5500	5,75	955,95	1010,27	1,230989	1243,63	5,68
Wilquipamba	4500	4,66	966,18	1009,51	1,219346	1230,94	4,49

Tabla C4. Calentamiento por efecto solar utilizando la radiación calculada a través del IEEE

ESTACIÓN	Uso Radiación IEEE			
	ZI = 90 $\alpha = 0.5$ D = 28.1 mm d = 4.021 mm			
	C. Solar IEEE		C. Solar CIGRÉ	%E qs
θ	qs	Ps		
Villarrosa	1,81	14,06	14,48	2,86
Hda la Guaira	1,81	14,02	14,44	2,86
Socomba	1,81	14,21	14,63	2,86
Col Pailitas	1,81	14,01	14,43	2,86
La Llana	1,81	14,11	14,52	2,86
Aguas Claras	1,81	14,25	14,67	2,86
San Lorenzo	1,81	16,74	17,23	2,86
El Dificil	1,81	14,27	14,69	2,86
Carmen de Bolivar	1,81	14,19	14,60	2,86
El Guamo	1,81	14,06	14,48	2,86
Nueva Florida	1,81	13,97	14,38	2,86
La Maravilla	1,81	16,14	16,62	2,86
Teorama	1,81	15,57	16,03	2,86
Convención	1,81	15,47	15,92	2,86
Tonchala	1,81	14,36	14,78	2,86
Risaralda	1,81	14,07	14,48	2,86
Salazar	1,81	15,18	15,62	2,86
Gja HJC	1,81	15,82	16,29	2,86
Pamplona	1,81	16,80	17,30	2,86
UFPS	1,81	15,56	16,02	2,86
El Centro	1,81	14,16	14,57	2,86
Hda Las Brisas	1,81	14,13	14,54	2,86
Hda Tigres	1,81	14,52	14,95	2,86

ESTACIÓN	Uso Radiación IEEE			
	ZI = 90 $\alpha = 0.5$ D = 28.1 mm d = 4.021 mm			
	C. Solar IEEE		C. Solar CIGRÉ	%E qs
θ	qs	Ps		
UIS	1,81	15,37	15,82	2,86
Hda La Esperanza	1,81	14,69	15,13	2,86
Cachira	1,81	16,34	16,82	2,86
Carare	1,81	14,16	14,58	2,86
Buenavista	1,81	16,64	17,13	2,86
San Cayetano	1,81	16,59	17,07	2,86
Sabaneta	1,81	16,86	17,36	2,86
La Cabrera	1,81	16,44	16,92	2,86
La Pelada	1,81	16,62	17,10	2,86
Fca Tesorito	1,81	16,63	17,11	2,86
San Felix	1,81	17,10	17,61	2,86
El Nus	1,81	15,12	15,56	2,86
Las Violetas	1,81	15,46	15,92	2,86
Pto Berrio	1,81	14,13	14,55	2,86
Anori	1,81	16,08	16,55	2,86
El Peñol	1,81	16,54	17,02	2,86
La Selva	1,81	16,55	17,04	2,86
Hda Tunez	1,81	14,68	15,12	2,86
La Nación	1,81	15,50	15,95	2,86
La Salada	1,81	16,13	16,61	2,86
Cacaoteras	1,81	14,01	14,42	2,86
La Laguna	1,81	17,77	18,29	2,86
Jardin Botánico	1,81	15,91	16,38	2,86
La Bohemia	1,81	15,33	15,78	2,86
Argelia	1,81	16,01	16,49	2,86

ESTACIÓN	Uso Radiación IEEE			
	ZI = 90 $\alpha = 0.5$ D = 28.1 mm d = 4.021 mm			
	C. Solar IEEE		C. Solar CIGRÉ	%E qs
θ	qs	Ps		
Tenerife	1,81	16,94	17,44	2,86
Buga	1,81	15,28	15,73	2,86
Mateguadua	1,81	15,31	15,76	2,86
Cenicana	1,81	15,33	15,78	2,86
Gja Expo	1,81	15,21	15,66	2,86
La Union	1,81	15,19	15,64	2,86
Planeta Rica	1,81	14,07	14,48	2,86
El Salado	1,81	14,00	14,41	2,86
Turipana	1,81	13,97	14,38	2,86
La Doctrina	1,81	13,97	14,38	2,86
Chima	1,81	13,97	14,38	2,86
Colomboy	1,81	14,13	14,55	2,86
Primates	1,81	14,26	14,68	2,86
El Limon	1,81	13,97	14,38	2,86
Fuente Bella	1,81	14,19	14,60	2,86
Villa Hermosa	1,81	16,46	16,95	2,86
Armero	1,81	14,33	14,75	2,86
Hda Garcia	1,81	14,40	14,83	2,86
La Esperanza	1,81	14,22	14,64	2,86
El Salto	1,81	14,55	14,98	2,86
La Salvajina	1,81	15,42	15,87	2,86
Hda Carpinterias	1,81	16,82	17,31	2,86
Paispa	1,81	16,77	17,26	2,86
La Sierra	1,81	16,23	16,71	2,86
La Citec	1,81	14,67	15,10	2,86
U Nariño	1,81	14,66	15,10	2,86

Uso Radiación IEEE				
ZI = 90 $\alpha = 0.5$ D = 28.1 mm d = 4.021 mm				
ESTACIÓN	C. Solar IEEE		C. Solar CIGRÉ	%E qs
	θ	qs	Ps	
Los Milagros	1,81	16,63	17,12	2,86
Viento Libre	1,81	16,97	17,47	2,86
Wilquipamba	1,81	16,80	17,29	2,86

Tabla C5. Calentamiento por insolación con base en la radiación solar difusa

ESTACIÓN	Usa radiación IEEE Albedo F = 0.2				%E qs Ps
	I directa	I difusa	η	Ps	
Villarrosa	960,150116	70,26	1,81	18,96	37
Hda la Guaira	959,531526	67,99	1,81	18,88	37
Socomba	959,640107	81,76	1,81	19,25	38
Col Pailitas	958,806049	68,03	1,81	18,86	37
La Llana	957,326346	76,16	1,81	19,02	37
Aguas Claras	957,962272	86,12	1,81	19,31	38
San Lorenzo	1172,51308	54,12	1,81	22,33	46
El Dificil	959,78006	85,71	1,81	19,36	38
Carmen de Bolivar	959,636501	79,71	1,81	19,19	38
El Guamo	959,975123	70,51	1,81	18,96	37
Nueva Florida	959,886792	63,65	1,81	18,78	36
La Maravilla	1082,69997	100,18	1,81	21,90	46
Teorama	1082,74471	58,35	1,81	20,79	43
Convención	1082,78934	50,63	1,81	20,59	42
Tonchala	957,475086	94,72	1,81	19,52	39
Risaralda	957,942237	72,70	1,81	18,95	37
Salazar	957,3926	154,59	1,81	21,10	44
Gja HJC	1081,52412	77,85	1,81	21,27	44
Pamplona	1167,3798	63,74	1,81	22,41	47
UFPS	1082,45206	57,46	1,81	20,76	43
El Centro	956,220814	80,97	1,81	19,11	32
Hda Las Brisas	956,719394	78,23	1,81	19,05	32
Hda Tigeros	956,504138	107,29	1,81	19,82	34
UIS	1080,92292	45,33	1,81	20,39	36
Hda La Esperanza	956,482485	120,08	1,81	20,15	35

ESTACIÓN	Usa radiación IEEE Albedo F = 0.2				%E qs Ps
	I directa	I difusa	η	Ps	
Cachira	1081,42903	115,71	1,81	22,27	41
Carare	955,933528	81,65	1,81	19,12	32
Buenavista	1164,35516	54,66	1,81	22,07	27
San Cayetano	1163,94501	51,28	1,81	21,97	33
Sabaneta	1163,22844	72,28	1,81	22,50	35
La Cabrera	1163,64851	40,80	1,81	21,68	32
La Pelada	1164,4423	52,97	1,81	22,03	33
Fca Tesorito	1163,46919	54,68	1,81	22,04	34
San Felix	1164,06278	89,00	1,81	22,97	36
El Nus	955,709834	152,06	1,81	20,98	30
Las Violetas	1079,74797	53,01	1,81	20,55	29
Pto Berrio	955,709834	79,61	1,81	19,06	23
Anori	1080,82521	97,01	1,81	21,75	33
El Peñol	1165,52335	46,04	1,81	21,88	33
La Selva	1165,38351	47,09	1,81	21,90	33
Hda Tunez	954,767924	121,07	1,81	20,12	27
La Nación	1078,75486	56,70	1,81	20,61	29
La Salada	1079,28239	102,60	1,81	21,85	33
Cacaoteras	957,638951	68,67	1,81	18,83	22
La Laguna	1163,01623	138,97	1,81	24,26	40
Jardin Botánico	1077,47242	88,02	1,81	21,40	32
La Bohemia	1077,38851	45,65	1,81	20,27	28
Argelia	1077,1353	96,18	1,81	21,60	32
Tenerife	1161,04026	80,22	1,81	22,64	35
Buga	1075,7173	43,81	1,81	20,17	27
Mateguadua	1075,89453	46,15	1,81	20,24	28
Cenicana	1074,75496	48,48	1,81	20,26	28
Gja Expo	951,512969	162,78	1,81	21,12	31

ESTACIÓN	Usa radiación IEEE Albedo F = 0.2				%E qs Ps
	I directa	I difusa	η	Ps	
La Union	952,915222	160,07	1,81	21,09	31
Planeta Rica	958,141564	72,69	1,81	18,96	15
El Salado	958,745001	66,87	1,81	18,82	14
Turipana	958,668364	64,55	1,81	18,76	14
La Doctrina	959,178645	64,52	1,81	18,78	14
Chima	959,01038	64,53	1,81	18,77	14
Colomboy	958,552729	76,69	1,81	19,08	16
Primates	959,418479	85,16	1,81	19,33	43
El Limon	960,374291	62,91	1,81	18,77	36
Fuente Bella	960,61153	78,85	1,81	19,20	38
Villa Hermosa	1163,46919	42,87	1,81	21,73	45
Armero	953,63869	96,34	1,81	19,43	39
Hda Garcia	953,41636	101,80	1,81	19,57	39
La Esperanza	953,980629	87,71	1,81	19,21	38
El Salto	953,291991	112,55	1,81	19,85	40
La Salvajina	1073,95168	55,82	1,81	20,43	28
Hda Carpinterias	1158,49564	73,73	1,81	22,38	35
Paispa	1158,07748	70,69	1,81	22,29	34
La Sierra	1072,54805	116,84	1,81	22,00	33
La Citec	949,042185	125,85	1,81	20,06	27
U Nariño	948,605812	125,81	1,81	20,04	27
Los Milagros	1157,01225	61,23	1,81	22,00	33
Viento Libre	1156,58544	87,04	1,81	22,67	42
Wilquipamba	1155,70362	75,24	1,81	22,33	41

Tabla C6. Propiedades del aire

ESTACIÓN	Ta	Tfilm	Ts = 100 Viscosidad			Ts = 100 Densidad			Ts = 100 Conductividad		
			IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E
Villarrosa	41,60	71	2,05E-05	1,99E-05	2,62	1,02	0,99	2,55	0,03	0,03	0,73
Hda la Guaira	41,80	71	2,05E-05	1,99E-05	2,60	1,02	0,99	2,53	0,03	0,03	0,73
Socomba	39,40	70	2,04E-05	1,98E-05	2,90	1,01	0,98	2,84	0,03	0,03	0,72
Col Pailitas	41,40	71	2,05E-05	1,99E-05	2,65	1,02	0,99	2,58	0,03	0,03	0,72
La Llana	41,20	71	2,05E-05	1,99E-05	2,67	1,01	0,99	2,60	0,03	0,03	0,72
Aguas Claras	40,00	70	2,04E-05	1,99E-05	2,83	1,00	0,98	2,74	0,03	0,03	0,72
San Lorenzo	26,00	63	2,01E-05	1,92E-05	4,63	0,80	0,77	3,49	0,03	0,03	0,68
El Dificil	39,40	70	2,04E-05	1,98E-05	2,90	1,00	0,98	2,83	0,03	0,03	0,72
Carmen de Bolivar	42,60	71	2,05E-05	2,00E-05	2,50	1,01	0,98	2,39	0,03	0,03	0,73
El Guamo	42,00	71	2,05E-05	1,99E-05	2,57	1,02	0,99	2,49	0,03	0,03	0,73
Nueva Florida	40,00	70	2,04E-05	1,99E-05	2,83	1,03	1,00	2,79	0,03	0,03	0,72
La Maravilla	27,60	64	2,02E-05	1,93E-05	4,42	0,86	0,83	3,74	0,03	0,03	0,69
Teorama	41,60	71	2,05E-05	1,99E-05	2,62	0,89	0,87	2,09	0,03	0,03	0,73
Convención	32,40	66	2,03E-05	1,95E-05	3,80	0,91	0,88	3,45	0,03	0,03	0,70
Tonchala	39,60	70	2,04E-05	1,98E-05	2,88	1,00	0,97	2,78	0,03	0,03	0,72
Risaralda	39,80	70	2,04E-05	1,98E-05	2,85	1,02	0,99	2,80	0,03	0,03	0,72
Salazar	37,00	69	2,04E-05	1,97E-05	3,21	0,93	0,91	2,91	0,03	0,03	0,71
Gja HJC	21,80	61	2,00E-05	1,90E-05	5,18	0,89	0,85	4,77	0,03	0,03	0,67
Pamplona	26,00	63	2,01E-05	1,92E-05	4,63	0,79	0,76	3,35	0,03	0,03	0,68
UFPS	33,20	67	2,03E-05	1,95E-05	3,70	0,90	0,88	3,29	0,03	0,03	0,70
El Centro	39,80	70	2,04E-05	1,98E-05	2,85	1,01	0,98	2,78	0,03	0,03	0,72
Hda Las Brisas	39,00	70	2,04E-05	1,98E-05	2,95	1,01	0,98	2,90	0,03	0,03	0,72
Hda Tigreiros	43,20	72	2,05E-05	2,00E-05	2,42	0,98	0,95	2,23	0,03	0,03	0,73
UIS	34,20	67	2,03E-05	1,96E-05	3,57	0,92	0,89	3,23	0,03	0,03	0,70
Hda La Esperanza	34,10	67	2,03E-05	1,96E-05	3,58	0,98	0,94	3,48	0,03	0,03	0,70
Cachira	29,40	65	2,02E-05	1,93E-05	4,19	0,83	0,81	3,32	0,03	0,03	0,69
Carare	38,80	69	2,04E-05	1,98E-05	2,98	1,01	0,98	2,93	0,03	0,03	0,72
Buenavista	26,60	63	2,01E-05	1,92E-05	4,55	0,80	0,77	3,40	0,03	0,03	0,68
San Cayetano	27,60	64	2,02E-05	1,93E-05	4,42	0,81	0,78	3,31	0,03	0,03	0,69
Sabaneta	26,00	63	2,01E-05	1,92E-05	4,63	0,78	0,75	3,22	0,03	0,03	0,68

ESTACIÓN	Ta	Tfilm	Ts = 100 Viscosidad			Ts = 100 Densidad			Ts = 100 Conductividad		
			IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E
La Cabrera	29,80	65	2,02E-05	1,94E-05	4,14	0,82	0,79	3,13	0,03	0,03	0,69
La Pelada	29,40	65	2,02E-05	1,93E-05	4,19	0,80	0,78	3,02	0,03	0,03	0,69
Fca Tesorito	28,00	64	2,02E-05	1,93E-05	4,37	0,80	0,77	3,20	0,03	0,03	0,69
San Felix	22,60	61	2,00E-05	1,90E-05	5,07	0,75	0,73	3,40	0,03	0,03	0,67
El Nus	36,00	68	2,03E-05	1,97E-05	3,34	0,94	0,91	3,07	0,03	0,03	0,71
Las Violetas	36,60	68	2,04E-05	1,97E-05	3,26	0,91	0,88	2,84	0,03	0,03	0,71
Pto Berrio	38,60	69	2,04E-05	1,98E-05	3,01	1,01	0,98	2,96	0,03	0,03	0,72
Anori	31,40	66	2,02E-05	1,94E-05	3,93	0,86	0,83	3,23	0,03	0,03	0,70
El Peñol	29,20	65	2,02E-05	1,93E-05	4,21	0,81	0,79	3,15	0,03	0,03	0,69
La Selva	29,20	65	2,02E-05	1,93E-05	4,21	0,81	0,78	3,13	0,03	0,03	0,69
Hda Tunez	41,00	71	2,04E-05	1,99E-05	2,70	0,96	0,94	2,49	0,03	0,03	0,72
La Nación	36,80	68	2,04E-05	1,97E-05	3,24	0,90	0,88	2,78	0,03	0,03	0,71
La Salada	36,30	68	2,03E-05	1,97E-05	3,30	0,84	0,82	2,47	0,03	0,03	0,71
Cacaoteras	39,60	70	2,04E-05	1,98E-05	2,88	1,02	0,99	2,84	0,03	0,03	0,72
La Laguna	17,50	59	1,99E-05	1,88E-05	5,74	0,65	0,63	2,64	0,03	0,03	0,66
Jardín											
Botánico	31,20	66	2,02E-05	1,94E-05	3,95	0,87	0,84	3,34	0,03	0,03	0,70
La Bohemia	39,00	70	2,04E-05	1,98E-05	2,95	0,91	0,89	2,54	0,03	0,03	0,72
Argelia	37,20	69	2,04E-05	1,97E-05	3,18	0,85	0,83	2,40	0,03	0,03	0,71
Tenerife	31,60	66	2,02E-05	1,95E-05	3,90	0,76	0,74	2,27	0,03	0,03	0,70
Buga	35,00	68	2,03E-05	1,96E-05	3,47	0,92	0,89	3,12	0,03	0,03	0,71
Mateguadua	35,60	68	2,03E-05	1,96E-05	3,39	0,92	0,89	3,02	0,03	0,03	0,71
Cenicana	39,80	70	2,04E-05	1,98E-05	2,85	0,91	0,89	2,41	0,03	0,03	0,72
Gja Expo	37,00	69	2,04E-05	1,97E-05	3,21	0,92	0,90	2,87	0,03	0,03	0,71
La Union	39,60	70	2,04E-05	1,98E-05	2,88	0,92	0,90	2,51	0,03	0,03	0,72
Planeta Rica	38,80	69	2,04E-05	1,98E-05	2,98	1,02	0,99	2,94	0,03	0,03	0,72
El Salado	42,60	71	2,05E-05	2,00E-05	2,50	1,02	1,00	2,42	0,03	0,03	0,73
Turipana	41,00	71	2,04E-05	1,99E-05	2,70	1,02	1,00	2,65	0,03	0,03	0,72
La Doctrina	39,80	70	2,04E-05	1,98E-05	2,85	1,03	1,00	2,82	0,03	0,03	0,72
Chima	39,60	70	2,04E-05	1,98E-05	2,88	1,03	1,00	2,84	0,03	0,03	0,72
Colomboy	40,40	70	2,04E-05	1,99E-05	2,78	1,01	0,99	2,71	0,03	0,03	0,72
Primates	42,40	71	2,05E-05	2,00E-05	2,52	1,00	0,98	2,41	0,03	0,03	0,73
El Limon	41,40	71	2,05E-05	1,99E-05	2,65	1,03	1,00	2,59	0,03	0,03	0,72
Fuente Bella	40,20	70	2,04E-05	1,99E-05	2,80	1,01	0,98	2,73	0,03	0,03	0,72
Villa Hermosa	29,80	65	2,02E-05	1,94E-05	4,14	0,82	0,79	3,10	0,03	0,03	0,69

ESTACIÓN	Ta	Tfilm	Ts = 100 Viscosidad			Ts = 100 Densidad			Ts = 100 Conductividad		
			IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E	IEEE	CIGRÉ	%E
Armero	39,30	70	2,04E-05	1,98E-05	2,92	0,99	0,97	2,82	0,03	0,03	0,72
Hda Garcia	39,80	70	2,04E-05	1,98E-05	2,85	0,99	0,96	2,73	0,03	0,03	0,72
La Esperanza	40,60	70	2,04E-05	1,99E-05	2,75	1,00	0,97	2,66	0,03	0,03	0,72
El Salto	42,00	71	2,05E-05	1,99E-05	2,57	0,97	0,95	2,38	0,03	0,03	0,73
La Salvajina	38,40	69	2,04E-05	1,98E-05	3,03	0,90	0,88	2,56	0,03	0,03	0,72
Hda Carpinterias	23,80	62	2,01E-05	1,91E-05	4,91	0,78	0,75	3,51	0,03	0,03	0,67
Paispa	30,60	65	2,02E-05	1,94E-05	4,03	0,77	0,75	2,58	0,03	0,03	0,69
La Sierra	33,00	67	2,03E-05	1,95E-05	3,72	0,83	0,80	2,78	0,03	0,03	0,70
La Citec	41,00	71	2,04E-05	1,99E-05	2,70	0,96	0,93	2,47	0,03	0,03	0,72
U Nariño	40,20	70	2,04E-05	1,99E-05	2,80	0,96	0,93	2,59	0,03	0,03	0,72
Los Milagros	29,60	65	2,02E-05	1,94E-05	4,16	0,79	0,77	2,87	0,03	0,03	0,69
Viento Libre	28,00	64	2,02E-05	1,93E-05	4,37	0,75	0,73	2,65	0,03	0,03	0,69
Wilquipamba	16,00	58	1,99E-05	1,87E-05	5,94	0,78	0,75	4,60	0,03	0,03	0,65

Tabla C7. Constantes numéricas para el cálculo de la refrigeración por convección – CIGRÉ

ESTACIÓN	Rf = 0,10023432								
	Constantes numéricas CIGRÉ								
	Vw	Re	B1	n	Gr	Pr	Gr.Pr	A2	m2
Villarrosa	1,20	1678,58	0,641	0,471	93094,04	0,70	64914,47	0,48	0,25
Hda la Guaira	1,20	1681,67	0,641	0,471	92659,87	0,70	64609,41	0,48	0,25
Socomba	1,20	1667,96	0,641	0,471	97935,61	0,70	68317,43	0,48	0,25
Col Pailitas	1,20	1683,28	0,641	0,471	93529,19	0,70	65220,24	0,48	0,25
La Llana	1,20	1670,46	0,641	0,471	93965,34	0,70	65526,73	0,48	0,25
Aguas Claras	1,20	1658,24	0,641	0,471	96603,14	0,70	67380,69	0,48	0,25
San Lorenzo	1,00	1134,78	0,641	0,471	130203,89	0,70	91045,07	0,48	0,25
El Dificil	1,00	1384,34	0,641	0,471	97935,61	0,70	68317,43	0,48	0,25
Carmen de Bolivar	0,30	414,68	0,641	0,471	90933,03	0,70	63396,23	0,48	0,25
El Guamo	0,30	419,15	0,641	0,471	92226,69	0,70	64305,06	0,48	0,25
Nueva Florida	0,90	1272,14	0,641	0,471	96603,14	0,70	67380,69	0,48	0,25
La Maravilla	0,10	120,48	0,641	0,471	126085,15	0,70	88139,83	0,48	0,25
Teorama	0,10	123,27	0,641	0,471	93094,04	0,70	64914,47	0,48	0,25
Convención	1,70	2163,51	0,641	0,471	114173,91	0,70	79744,77	0,48	0,25
Tonchala	0,10	137,09	0,641	0,471	97490,44	0,70	68004,46	0,48	0,25
Risaralda	0,10	140,16	0,641	0,471	97046,29	0,70	67692,21	0,48	0,25
Salazar	0,10	129,05	0,641	0,471	103357,48	0,70	72130,60	0,48	0,25
Gja HJC	0,10	126,11	0,641	0,471	141384,37	0,70	98937,25	0,48	0,25
Pamplona	0,10	111,65	0,641	0,471	130203,89	0,70	91045,07	0,48	0,25
UFPS	0,10	125,93	0,641	0,471	112251,68	0,70	78390,96	0,48	0,25
El Centro	1,10	1528,92	0,641	0,471	97046,29	0,70	67692,21	0,48	0,25
Hda Las Brisas	3,10	4329,08	0,048	0,800	98828,99	0,70	68945,57	0,48	0,25
Hda Tigres	1,30	1743,51	0,641	0,471	89648,15	0,70	62493,73	0,48	0,25
UIS	1,10	1403,21	0,641	0,471	109873,52	0,70	76716,44	0,48	0,25
Hda La Esperanza	1,30	1757,39	0,641	0,471	110110,11	0,70	76883,01	0,48	0,25
Cachira	1,10	1289,13	0,641	0,471	121541,32	0,70	84936,12	0,48	0,25
Carare	1,10	1531,52	0,641	0,471	99277,21	0,70	69260,74	0,48	0,25

ESTACIÓN	Rf = 0,10023432								
	Constantes numéricas CIGRÉ								
	Vw	Re	B1	n	Gr	Pr	Gr.Pr	A2	m2
Buenavista	0,50	566,55	0,641	0,471	128650,46	0,70	89949,19	0,48	0,25
San Cayetano	1,00	1136,88	0,641	0,471	126085,15	0,70	88139,83	0,48	0,25
Sabaneta	1,00	1099,15	0,641	0,471	130203,89	0,70	91045,07	0,48	0,25
La Cabrera	1,00	1150,59	0,641	0,471	120544,29	0,70	84233,33	0,48	0,25
La Pelada	1,00	1128,58	0,641	0,471	121541,32	0,70	84936,12	0,48	0,25
Fca Tesorito	1,00	1129,19	0,641	0,471	125067,27	0,70	87422,02	0,48	0,25
San Felix	2,10	2250,81	0,641	0,471	139212,71	0,70	97403,65	0,48	0,25
El Nus	0,90	1167,61	0,641	0,471	105660,75	0,70	73751,21	0,48	0,25
Las Violetas	0,20	251,25	0,641	0,471	104275,64	0,70	72776,57	0,48	0,25
Pto Berrio	0,90	1256,29	0,641	0,471	99726,45	0,70	69576,65	0,48	0,25
Anori	0,90	1079,22	0,641	0,471	116601,60	0,70	81454,96	0,48	0,25
El Peñol	0,90	1028,08	0,641	0,471	122041,56	0,70	85288,75	0,48	0,25
La Selva	0,90	1026,29	0,641	0,471	122041,56	0,70	85288,75	0,48	0,25
Hda Tunez	0,80	1062,42	0,641	0,471	94402,47	0,70	65833,93	0,48	0,25
La Nación	0,90	1124,85	0,641	0,471	103816,03	0,70	72453,21	0,48	0,25
La Salada	1,00	1175,37	0,641	0,471	104967,01	0,70	73263,04	0,48	0,25
Cacaoteras	0,60	844,78	0,641	0,471	97490,44	0,70	68004,46	0,48	0,25
La Laguna	1,00	940,74	0,641	0,471	153408,41	0,70	107433,83	0,48	0,25
Jardin Botánico	1,00	1215,13	0,641	0,471	117090,49	0,70	81799,41	0,48	0,25
La Bohemia	1,00	1260,67	0,641	0,471	98828,99	0,70	68945,57	0,48	0,25
Argelia	1,00	1183,75	0,641	0,471	102899,97	0,70	71808,74	0,48	0,25
Tenerife	1,00	1067,40	0,641	0,471	116113,83	0,70	81111,32	0,48	0,25
Buga	1,00	1275,84	0,641	0,471	107990,48	0,70	75390,85	0,48	0,25
Mateguadua	1,00	1270,30	0,641	0,471	106589,45	0,70	74404,77	0,48	0,25
Cenicana	1,40	1755,43	0,641	0,471	97046,29	0,70	67692,21	0,48	0,25
Gja Expo	0,40	510,83	0,641	0,471	103357,48	0,70	72130,60	0,48	0,25
La Union	0,40	509,42	0,641	0,471	97490,44	0,70	68004,46	0,48	0,25
Planeta Rica	0,40	561,98	0,641	0,471	99277,21	0,70	69260,74	0,48	0,25
El Salado	0,40	560,14	0,641	0,471	90933,03	0,70	63396,23	0,48	0,25
Turipana	0,40	563,59	0,641	0,471	94402,47	0,70	65833,93	0,48	0,25
La Doctrina	1,40	1978,22	0,641	0,471	97046,29	0,70	67692,21	0,48	0,25

ESTACIÓN	Rf = 0,10023432								
	Constantes numéricas CIGRÉ								
	Vw	Re	B1	n	Gr	Pr	Gr.Pr	A2	m2
Chima	0,40	565,48	0,641	0,471	97490,44	0,70	68004,46	0,48	0,25
Colomboy	0,40	557,56	0,641	0,471	95719,87	0,70	66759,82	0,48	0,25
Primates	0,60	825,15	0,641	0,471	91363,27	0,70	63698,47	0,48	0,25
El Limon	2,00	2819,49	0,048	0,800	93529,19	0,70	65220,24	0,48	0,25
Fuente Bella	2,00	2782,68	0,048	0,800	96161,00	0,70	67069,89	0,48	0,25
Villa Hermosa	1,00	1146,73	0,641	0,471	120544,29	0,70	84233,33	0,48	0,25
Armero	1,00	1369,49	0,641	0,471	98158,57	0,70	68474,19	0,48	0,25
Hda Garcia	1,00	1359,95	0,641	0,471	97046,29	0,70	67692,21	0,48	0,25
La Esperanza	1,00	1377,65	0,641	0,471	95279,74	0,70	66450,47	0,48	0,25
El Salto	1,70	2273,27	0,641	0,471	92226,69	0,70	64305,06	0,48	0,25
La Salvajina	1,00	1246,48	0,641	0,471	100176,71	0,70	69893,29	0,48	0,25
Hda Carpinterias	1,00	1101,97	0,641	0,471	135992,66	0,70	95130,26	0,48	0,25
Paispa	1,00	1089,93	0,641	0,471	118563,89	0,70	82837,63	0,48	0,25
La Sierra	1,00	1158,98	0,641	0,471	112730,59	0,70	78728,23	0,48	0,25
La Citec	1,00	1320,35	0,641	0,471	94402,47	0,70	65833,93	0,48	0,25
U Nariño	1,80	2381,17	0,641	0,471	96161,00	0,70	67069,89	0,48	0,25
Los Milagros	1,00	1111,79	0,641	0,471	121042,23	0,70	84584,31	0,48	0,25
Viento Libre	2,00	2122,98	0,641	0,471	125067,27	0,70	87422,02	0,48	0,25
Wilquipamba	2,00	2240,56	0,641	0,471	157746,18	0,70	110501,20	0,48	0,25

Tabla C8. Refrigeración por convección con viento a 0°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					□ %E 0°	
	K= 0,39				A1	B2	m1				
	∠ 0°				No	No	No				
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max		
Villarrosa	40,75	43,59	43,21	43,59	21,17	41,18	47,80	No	47,80	8,82	
Hda la Guaira	40,62	43,49	43,12	43,49	21,19	41,00	47,69	No	47,69	8,81	
Socomba	42,50	44,96	44,54	44,96	21,11	43,17	49,32	No	49,32	8,84	
Col Pailitas	40,98	43,79	43,42	43,79	21,20	41,36	48,02	No	48,02	8,80	
La Llana	40,99	43,75	43,35	43,75	21,13	41,54	48,00	No	48,00	8,84	
Aguas Claras	41,86	44,41	43,98	44,41	21,05	42,62	48,73	No	48,73	8,87	
San Lorenzo	48,65	44,08	42,16	48,65	17,61	55,70	49,41	No	55,70	12,65	
El Dificil	42,41	40,87	39,83	42,41	19,34	43,17	45,18	No	45,18	6,13	
Carmen de Bolivar	39,66	21,07	18,37	39,66	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	19,00	
El Guamo	40,39	21,39	18,67	40,39	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	18,72	
Nueva Florida	42,34	38,79	37,52	42,34	18,58	42,62	43,02	No	43,02	1,56	
La Maravilla	48,94	14,06	10,79	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65	
Teorama	38,16	11,69	8,99	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33	
Convención	46,37	56,71	57,47	57,47	23,86	49,62	61,65	No	61,65	6,79	
Tonchala	42,03	12,73	9,91	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23	
Risaralda	42,33	12,83	10,02	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10	
Salazar	42,88	12,83	9,93	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47	
Gja HJC	55,03	15,44	11,91	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94	
Pamplona	48,23	13,78	10,48	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42	
UFPS	45,45	13,37	10,32	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00	
El Centro	42,15	42,74	42,02	42,74	20,26	42,80	47,05	No	47,05	9,17	
Hda Las Brisas	42,94	73,83	79,43	79,43	38,94	43,53	91,52	No	91,52	13,21	
Hda Tigreros	38,55	43,29	43,05	43,29	21,56	39,75	47,42	No	47,42	8,73	
UIS	44,93	44,33	43,24	44,93	19,46	47,94	49,05	No	49,05	8,40	
Hda La Esperanza	46,40	49,87	49,64	49,87	21,64	48,03	54,61	No	54,61	8,68	
Cachira	46,78	45,14	43,68	46,78	18,70	52,45	50,27	No	52,45	10,82	
Carare	43,05	43,43	42,71	43,43	20,28	43,71	47,81	No	47,81	9,16	
Buenavista	48,14	30,74	27,58	48,14	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	32,29	
San Cayetano	47,44	43,26	41,38	47,44	17,62	54,16	48,48	No	54,16	12,42	
Sabaneta	47,82	43,30	41,29	47,82	17,35	55,70	48,67	No	55,70	14,16	

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					□ %E 0°	
	K= 0,39				A1	B2	m1				
					No	No	No				
	∠ 0°				∠ 0°						
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max		
La Cabrera	46,00	42,35	40,56	46,00	17,72	52,07	47,40	No	52,07	11,66	
La Pelada	45,83	42,11	40,26	45,83	17,56	52,45	47,21	No	52,45	12,62	
Fca Tesorito	46,95	42,88	40,99	46,95	17,57	53,78	48,08	No	53,78	12,71	
San Felix	49,78	64,98	65,99	65,99	24,31	59,00	71,04	No	71,04	7,12	
El Nus	43,83	39,36	37,77	43,83	17,85	46,28	43,85	No	46,28	5,29	
Las Violetas	42,60	17,94	14,88	42,60	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	6,82	
Pto Berrio	43,27	39,37	38,04	43,27	18,47	43,89	43,68	No	43,89	1,41	
Anori	45,74	40,20	38,29	45,74	17,20	50,56	45,03	No	50,56	9,54	
El Peñol	46,29	40,28	38,19	46,29	16,81	52,64	45,30	No	52,64	12,06	
La Selva	46,25	40,24	38,14	46,25	16,79	52,64	45,26	No	52,64	12,14	
Hda Tunez	40,18	34,81	33,12	40,18	17,07	41,72	38,91	No	41,72	3,70	
La Nación	42,32	38,14	36,47	42,32	17,54	45,54	42,59	No	45,54	7,06	
La Salada	41,36	39,21	37,63	41,36	17,90	46,00	43,80	No	46,00	10,09	
Cacaoteras	42,60	31,68	29,53	42,60	15,32	42,99	35,69	No	42,99	0,89	
La Laguna	49,99	43,72	41,03	49,99	16,12	64,03	49,89	No	64,03	21,93	
Jardin Botánico	46,22	42,84	41,24	46,22	18,19	50,75	47,75	No	50,75	8,92	
La Bohemia	40,72	39,13	37,80	40,72	18,50	43,53	43,49	No	43,53	6,45	
Argelia	40,81	38,85	37,31	40,81	17,96	45,17	43,37	No	45,17	9,67	
Tenerife	42,79	39,67	37,72	42,79	17,11	50,37	44,68	No	50,37	15,05	
Buga	44,27	41,75	40,38	44,27	18,61	47,20	46,38	No	47,20	6,20	
Mateguadua	43,68	41,30	39,93	43,68	18,57	46,64	45,89	No	46,64	6,36	
Cenicana	39,96	45,78	45,54	45,78	21,63	42,80	50,21	No	50,21	8,83	
Gja Expo	42,64	25,48	22,66	42,64	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	27,58	
La Union	40,45	24,47	21,76	40,45	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	28,48	
Planeta Rica	43,25	26,08	23,41	43,25	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	27,87	
El Salado	39,92	24,53	22,01	39,92	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	29,23	
Turipana	41,42	25,24	22,66	41,42	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	28,64	
La Doctrina	42,51	48,77	49,05	49,05	22,88	42,80	53,12	No	53,12	7,66	
Chima	42,69	25,84	23,21	42,69	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	28,14	
Colomboy	41,70	25,34	22,73	41,70	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	28,46	
Primates	39,72	29,95	27,85	39,72	15,15	40,47	33,78	No	40,47	1,83	
El Limon	41,08	57,06	59,17	59,17	27,63	41,36	62,57	No	62,57	5,44	

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					□ %E 0°	
	K= 0,39				A1	B2	m1				
					No	No	No				
	∠ 0°				∠ 0°						
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max		
Fuente Bella	41,83	57,74	59,81	59,81	27,34	42,44	63,10	No	63,10	5,20	
Villa Hermosa	45,91	42,27	40,47	45,91	17,70	52,07	47,32	No	52,07	11,82	
Armero	42,26	40,70	39,63	42,26	19,24	43,26	45,02	No	45,02	6,13	
Hda Garcia	41,68	40,24	39,15	41,68	19,18	42,80	44,53	No	44,53	6,38	
La Esperanza	41,28	40,02	38,98	41,28	19,29	42,08	44,25	No	44,25	6,70	
El Salto	39,49	50,56	51,46	51,46	24,43	40,82	54,79	No	54,79	6,07	
La Salvajina	40,97	39,25	37,88	40,97	18,40	44,08	43,65	No	44,08	7,05	
Hda Carpinterias	49,60	44,52	42,46	49,60	17,37	57,83	50,04	No	57,83	14,23	
Paispa	44,05	40,67	38,74	44,05	17,28	51,31	45,73	No	51,31	14,16	
La Sierra	43,64	40,75	39,05	43,64	17,78	49,06	45,58	No	49,06	11,04	
La Citec	40,06	38,89	37,73	40,06	18,91	41,72	43,10	No	43,10	7,06	
U Nariño	40,76	53,26	54,43	54,43	24,96	42,44	57,61	No	57,61	5,53	
Los Milagros	45,30	41,66	39,76	45,30	17,44	52,26	46,76	No	52,26	13,31	
Viento Libre	45,39	59,06	59,67	59,67	23,65	53,78	64,73	No	64,73	7,82	
Wilquipamba	56,26	69,88	70,96	70,96	24,26	65,53	76,30	No	76,30	7,00	

Tabla C9. Refrigeración por convección con viento a 5°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 5°
	K= 0,457969981				A1	B2	m1			
	∠ 5°				∠ 5°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Villarrosa	40,75	51,45	51,00	51,45	21,17	41,18	53,35	No	53,35	3,57
Hda la Guaira	40,62	51,33	50,89	51,33	21,19	41,00	53,23	No	53,23	3,56
Socomba	42,50	53,07	52,58	53,07	21,11	43,17	55,05	No	55,05	3,59
Col Pailitas	40,98	51,69	51,25	51,69	21,20	41,36	53,59	No	53,59	3,55
La Llana	40,99	51,64	51,17	51,64	21,13	41,54	53,57	No	53,57	3,59
Aguas Claras	41,86	52,42	51,91	52,42	21,05	42,62	54,39	No	54,39	3,63
San Lorenzo	48,65	52,03	49,76	52,03	17,61	55,70	55,14	No	55,70	6,60
El Dificil	42,41	48,24	47,01	48,24	19,34	43,17	50,42	No	50,42	4,32
Carmen de Bolivar	39,66	24,87	21,69	39,66	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	19,00
El Guamo	40,39	25,25	22,04	40,39	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	18,72
Nueva Florida	42,34	45,79	44,29	45,79	18,58	42,62	48,01	No	48,01	4,63
La Maravilla	48,94	16,60	12,74	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65
Teorama	38,16	13,79	10,61	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33
Convención	46,37	66,94	67,83	67,83	23,86	49,62	68,81	No	68,81	1,43
Tonchala	42,03	15,02	11,70	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23
Risaralda	42,33	15,15	11,83	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10
Salazar	42,88	15,15	11,72	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47
Gja HJC	55,03	18,22	14,06	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94
Pamplona	48,23	16,26	12,37	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42
UFPS	45,45	15,78	12,18	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00
El Centro	42,15	50,45	49,60	50,45	20,26	42,80	52,51	No	52,51	3,94
Hda Las Brisas	42,94	87,15	93,75	93,75	38,94	43,53	102,15	No	102,15	8,22
Hda Tigreros	38,55	51,09	50,81	51,09	21,56	39,75	52,93	No	52,93	3,47
UIS	44,93	52,32	51,04	52,32	19,46	47,94	54,74	No	54,74	4,42
Hda La Esperanza	46,40	58,87	58,59	58,87	21,64	48,03	60,95	No	60,95	3,42
Cachira	46,78	53,28	51,56	53,28	18,70	52,45	56,10	No	56,10	5,03
Carare	43,05	51,27	50,41	51,27	20,28	43,71	53,36	No	53,36	3,93
Buenavista	48,14	36,28	32,56	48,14	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	32,29
San Cayetano	47,44	51,06	48,84	51,06	17,62	54,16	54,10	No	54,16	5,73
Sabaneta	47,82	51,11	48,73	51,11	17,35	55,70	54,32	No	55,70	8,24

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 5°
	K= 0,457969981				A1	B2	m1			
					0,42	0,68	1,08			
	∠ 5°				∠ 5°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
La Cabrera	46,00	49,98	47,87	49,98	17,72	52,07	52,90	No	52,90	5,52
La Pelada	45,83	49,71	47,52	49,71	17,56	52,45	52,70	No	52,70	5,67
Fca Tesorito	46,95	50,62	48,39	50,62	17,57	53,78	53,66	No	53,78	5,89
San Felix	49,78	76,69	77,89	77,89	24,31	59,00	79,29	No	79,29	1,77
El Nus	43,83	46,46	44,58	46,46	17,85	46,28	48,94	No	48,94	5,08
Las Violetas	42,60	21,17	17,57	42,60	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	6,82
Pto Berrio	43,27	46,47	44,90	46,47	18,47	43,89	48,76	No	48,76	4,68
Anori	45,74	47,45	45,19	47,45	17,20	50,56	50,26	No	50,56	6,15
El Peñol	46,29	47,55	45,07	47,55	16,81	52,64	50,56	No	52,64	9,68
La Selva	46,25	47,50	45,02	47,50	16,79	52,64	50,52	No	52,64	9,76
Hda Tunez	40,18	41,09	39,10	41,09	17,07	41,72	43,42	No	43,42	5,38
La Nación	42,32	45,01	43,04	45,01	17,54	45,54	47,53	No	47,53	5,30
La Salada	41,36	46,28	44,41	46,28	17,90	46,00	48,88	No	48,88	5,33
Cacaoteras	42,60	37,39	34,85	42,60	15,32	42,99	39,83	No	42,99	0,89
La Laguna	49,99	51,60	48,43	51,60	16,12	64,03	55,68	No	64,03	19,42
Jardin Botánico	46,22	50,56	48,68	50,56	18,19	50,75	53,29	No	53,29	5,12
La Bohemia	40,72	46,19	44,62	46,19	18,50	43,53	48,54	No	48,54	4,85
Argelia	40,81	45,85	44,03	45,85	17,96	45,17	48,41	No	48,41	5,28
Tenerife	42,79	46,83	44,52	46,83	17,11	50,37	49,87	No	50,37	7,04
Buga	44,27	49,28	47,67	49,28	18,61	47,20	51,76	No	51,76	4,78
Mateguadua	43,68	48,75	47,13	48,75	18,57	46,64	51,22	No	51,22	4,81
Cenicana	39,96	54,04	53,76	54,04	21,63	42,80	56,04	No	56,04	3,58
Gja Expo	42,64	30,08	26,74	42,64	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	27,58
La Union	40,45	28,89	25,68	40,45	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	28,48
Planeta Rica	43,25	30,78	27,63	43,25	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	27,87
El Salado	39,92	28,95	25,98	39,92	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	29,23
Turipana	41,42	29,80	26,75	41,42	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	28,64
La Doctrina	42,51	57,57	57,90	57,90	22,88	42,80	59,29	No	59,29	2,35
Chima	42,69	30,50	27,40	42,69	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	28,14
Colomboy	41,70	29,91	26,83	41,70	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	28,46
Primates	39,72	35,35	32,87	39,72	15,15	40,47	37,70	No	40,47	1,83
El Limon	41,08	67,34	69,84	69,84	27,63	41,36	69,84	No	69,84	0,00

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 5°
	K= 0,457969981				A1	B2	m1			
					0,42	0,68	1,08			
	∠ 5°				∠ 5°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Fuente Bella	41,83	68,15	70,60	70,60	27,34	42,44	70,42	No	70,42	-0,26
Villa Hermosa	45,91	49,89	47,76	49,89	17,70	52,07	52,82	No	52,82	5,54
Armero	42,26	48,04	46,77	48,04	19,24	43,26	50,24	No	50,24	4,38
Hda Garcia	41,68	47,50	46,21	47,50	19,18	42,80	49,69	No	49,69	4,42
La Esperanza	41,28	47,23	46,01	47,23	19,29	42,08	49,38	No	49,38	4,35
El Salto	39,49	59,68	60,74	60,74	24,43	40,82	61,15	No	61,15	0,67
La Salvajina	40,97	46,32	44,71	46,32	18,40	44,08	48,72	No	48,72	4,92
Hda Carpinterias	49,60	52,55	50,12	52,55	17,37	57,83	55,85	No	57,83	9,13
Paispa	44,05	48,00	45,73	48,00	17,28	51,31	51,03	No	51,31	6,45
La Sierra	43,64	48,10	46,09	48,10	17,78	49,06	50,87	No	50,87	5,45
La Citec	40,06	45,90	44,54	45,90	18,91	41,72	48,10	No	48,10	4,58
U Nariño	40,76	62,87	64,24	64,24	24,96	42,44	64,30	No	64,30	0,09
Los Milagros	45,30	49,17	46,93	49,17	17,44	52,26	52,19	No	52,26	5,91
Viento Libre	45,39	69,71	70,43	70,43	23,65	53,78	72,24	No	72,24	2,51
Wilquipamba	56,26	82,48	83,75	83,75	24,26	65,53	85,15	No	85,15	1,65

Tabla C10. Refrigeración por convección con viento a 10°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 10°
	K= 0,527616632				A1	B2	m1		0,522649	
	∠ 10°				∠ 10°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Villarrosa	40,75	59,27	58,75	59,27	21,17	41,18	59,49	No	59,49	0,36
Hda la Guaira	40,62	59,14	58,63	59,14	21,19	41,00	59,35	No	59,35	0,35
Socomba	42,50	61,14	60,57	61,14	21,11	43,17	61,38	No	61,38	0,39
Col Pailitas	40,98	59,55	59,04	59,55	21,20	41,36	59,75	No	59,75	0,34
La Llana	40,99	59,50	58,95	59,50	21,13	41,54	59,73	No	59,73	0,38
Aguas Claras	41,86	60,39	59,80	60,39	21,05	42,62	60,65	No	60,65	0,42
San Lorenzo	48,65	59,94	57,32	59,94	17,61	55,70	61,48	No	61,48	2,51
El Dificil	42,41	55,58	54,16	55,58	19,34	43,17	56,22	No	56,22	1,14
Carmen de Bolivar	39,66	28,65	24,98	39,66	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	19,00
El Guamo	40,39	29,09	25,39	40,39	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	18,72
Nueva Florida	42,34	52,75	51,02	52,75	18,58	42,62	53,53	No	53,53	1,45
La Maravilla	48,94	19,12	14,67	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65
Teorama	38,16	15,89	12,23	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33
Convención	46,37	77,12	78,15	78,15	23,86	49,62	76,72	No	76,72	-1,86
Tonchala	42,03	17,31	13,48	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23
Risaralda	42,33	17,45	13,62	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10
Salazar	42,88	17,45	13,50	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47
Gja HJC	55,03	20,99	16,20	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94
Pamplona	48,23	18,74	14,25	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42
UFPS	45,45	18,18	14,03	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00
El Centro	42,15	58,12	57,14	58,12	20,26	42,80	58,55	No	58,55	0,74
Hda Las Brisas	42,94	100,40	108,01	108,01	38,94	43,53	113,89	No	113,89	5,16
Hda Tigreros	38,55	58,86	58,54	58,86	21,56	39,75	59,01	No	59,01	0,26
UIS	44,93	60,28	58,80	60,28	19,46	47,94	61,04	No	61,04	1,24
Hda La Esperanza	46,40	67,82	67,50	67,82	21,64	48,03	67,96	No	67,96	0,21
Cachira	46,78	61,39	59,40	61,39	18,70	52,45	62,55	No	62,55	1,87
Carare	43,05	59,06	58,08	59,06	20,28	43,71	59,50	No	59,50	0,73
Buenavista	48,14	41,80	37,51	48,14	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	32,29
San Cayetano	47,44	58,83	56,27	58,83	17,62	54,16	60,32	No	60,32	2,48
Sabaneta	47,82	58,89	56,14	58,89	17,35	55,70	60,56	No	60,56	2,77

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 10°
	K= 0,527616632				A1	B2	m1		0,522649	
	∠ 10°				∠ 10°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
La Cabrera	46,00	57,58	55,15	57,58	17,72	52,07	58,98	No	58,98	2,37
La Pelada	45,83	57,27	54,74	57,27	17,56	52,45	58,75	No	58,75	2,53
Fca Tesorito	46,95	58,31	55,74	58,31	17,57	53,78	59,83	No	59,83	2,53
San Felix	49,78	88,36	89,73	89,73	24,31	59,00	88,41	No	88,41	-1,50
El Nus	43,83	53,52	51,36	53,52	17,85	46,28	54,57	No	54,57	1,92
Las Violetas	42,60	24,39	20,24	42,60	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	6,82
Pto Berrio	43,27	53,54	51,73	53,54	18,47	43,89	54,36	No	54,36	1,51
Anori	45,74	54,66	52,07	54,66	17,20	50,56	56,04	No	56,04	2,46
El Peñol	46,29	54,78	51,93	54,78	16,81	52,64	56,37	No	56,37	2,83
La Selva	46,25	54,72	51,87	54,72	16,79	52,64	56,33	No	56,33	2,85
Hda Tunez	40,18	47,33	45,04	47,33	17,07	41,72	48,41	No	48,41	2,23
La Nación	42,32	51,86	49,59	51,86	17,54	45,54	53,00	No	53,00	2,15
La Salada	41,36	53,31	51,16	53,31	17,90	46,00	54,50	No	54,50	2,18
Cacaoteras	42,60	43,08	40,15	43,08	15,32	42,99	44,41	No	44,41	3,00
La Laguna	49,99	59,45	55,80	59,45	16,12	64,03	62,08	No	64,03	7,16
Jardin Botánico	46,22	58,25	56,08	58,25	18,19	50,75	59,42	No	59,42	1,96
La Bohemia	40,72	53,21	51,41	53,21	18,50	43,53	54,12	No	54,12	1,69
Argelia	40,81	52,82	50,73	52,82	17,96	45,17	53,97	No	53,97	2,12
Tenerife	42,79	53,95	51,29	53,95	17,11	50,37	55,60	No	55,60	2,97
Buga	44,27	56,78	54,92	56,78	18,61	47,20	57,71	No	57,71	1,61
Mateguadua	43,68	56,17	54,30	56,17	18,57	46,64	57,10	No	57,10	1,64
Cenicana	39,96	62,25	61,93	62,25	21,63	42,80	62,49	No	62,49	0,37
Gja Expo	42,64	34,65	30,81	42,64	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	27,58
La Union	40,45	33,28	29,58	40,45	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	28,48
Planeta Rica	43,25	35,46	31,83	43,25	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	27,87
El Salado	39,92	33,36	29,93	39,92	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	29,23
Turipana	41,42	34,33	30,82	41,42	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	28,64
La Doctrina	42,51	66,32	66,70	66,70	22,88	42,80	66,10	No	66,10	-0,90
Chima	42,69	35,14	31,56	42,69	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	28,14
Colomboy	41,70	34,46	30,91	41,70	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	28,46
Primates	39,72	40,72	37,87	40,72	15,15	40,47	42,03	No	42,03	3,12
El Limon	41,08	77,59	80,46	80,46	27,63	41,36	77,87	No	77,87	-3,33

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 10°
	K= 0,527616632				A1	B2	m1		0,522649	
	∠ 10°				∠ 10°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Fuente Bella	41,83	78,52	81,34	81,34	27,34	42,44	78,52	No	78,52	-3,59
Villa Hermosa	45,91	57,48	55,03	57,48	17,70	52,07	58,89	No	58,89	2,40
Armero	42,26	55,35	53,88	55,35	19,24	43,26	56,02	No	56,02	1,20
Hda Garcia	41,68	54,72	53,24	54,72	19,18	42,80	55,41	No	55,41	1,24
La Esperanza	41,28	54,42	53,01	54,42	19,29	42,08	55,06	No	55,06	1,17
El Salto	39,49	68,76	69,98	69,98	24,43	40,82	68,18	No	68,18	-2,64
La Salvajina	40,97	53,37	51,50	53,37	18,40	44,08	54,32	No	54,32	1,76
Hda Carpinterias	49,60	60,54	57,74	60,54	17,37	57,83	62,27	No	62,27	2,77
Paispa	44,05	55,30	52,69	55,30	17,28	51,31	56,90	No	56,90	2,81
La Sierra	43,64	55,41	53,10	55,41	17,78	49,06	56,71	No	56,71	2,30
La Citec	40,06	52,88	51,31	52,88	18,91	41,72	53,63	No	53,63	1,40
U Nariño	40,76	72,43	74,01	74,01	24,96	42,44	71,69	No	71,69	-3,23
Los Milagros	45,30	56,65	54,07	56,65	17,44	52,26	58,19	No	58,19	2,65
Viento Libre	45,39	80,31	81,14	81,14	23,65	53,78	80,55	No	80,55	-0,73
Wilquipamba	56,26	95,02	96,49	96,49	24,26	65,53	94,94	No	94,94	-1,63

Tabla C11. Refrigeración por convección con viento a 30°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 30°
	K= 0,769652707				A1	B2	m1			
					0,42	0,58	0,9			
	∠ 30°				∠ 30°					
					Nus					
	qn	qc1	qc2	qmax	90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Villarrosa	40,75	86,46	85,71	86,46	21,17	41,18	83,18	No	83,18	-3,95
Hda la Guaira	40,62	86,27	85,53	86,27	21,19	41,00	82,99	No	82,99	-3,96
Socomba	42,50	89,19	88,36	89,19	21,11	43,17	85,82	No	85,82	-3,92
Col Pailitas	40,98	86,86	86,13	86,86	21,20	41,36	83,55	No	83,55	-3,96
La Llana	40,99	86,79	86,00	86,79	21,13	41,54	83,52	No	83,52	-3,92
Aguas Claras	41,86	88,10	87,23	88,10	21,05	42,62	84,80	No	84,80	-3,89
San Lorenzo	48,65	87,43	83,62	87,43	17,61	55,70	85,97	No	85,97	-1,71
El Dificil	42,41	81,07	79,00	81,07	19,34	43,17	78,61	No	78,61	-3,13
Carmen de Bolivar	39,66	41,80	36,44	41,80	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	14,63
El Guamo	40,39	42,44	37,04	42,44	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	14,59
Nueva Florida	42,34	76,95	74,43	76,95	18,58	42,62	74,85	No	74,85	-2,81
La Maravilla	48,94	27,89	21,41	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65
Teorama	38,16	23,18	17,84	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33
Convención	46,37	112,50	113,99	113,99	23,86	49,62	107,28	No	107,28	-6,26
Tonchala	42,03	25,25	19,67	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23
Risaralda	42,33	25,45	19,87	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10
Salazar	42,88	25,46	19,69	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47
Gja HJC	55,03	30,62	23,63	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94
Pamplona	48,23	27,33	20,78	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42
UFPS	45,45	26,53	20,46	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00
El Centro	42,15	84,78	83,35	84,78	20,26	42,80	81,87	No	81,87	-3,55
Hda Las Brisas	42,94	146,45	157,56	157,56	38,94	43,53	159,25	No	159,25	1,06
Hda Tigueros	38,55	85,86	85,39	85,86	21,56	39,75	82,52	No	82,52	-4,05
UIS	44,93	87,93	85,77	87,93	19,46	47,94	85,35	No	85,35	-3,03
Hda La Esperanza	46,40	98,93	98,46	98,93	21,64	48,03	95,03	No	95,03	-4,11
Cachira	46,78	89,55	86,65	89,55	18,70	52,45	87,47	No	87,47	-2,38
Carare	43,05	86,16	84,72	86,16	20,28	43,71	83,19	No	83,19	-3,56
Buenavista	48,14	60,98	54,71	60,98	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	14,24

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 30°
	K= 0,769652707				A1	B2	m1			
	∠ 30°				0,42	0,58	0,9			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
San Cayetano	47,44	85,81	82,09	85,81	17,62	54,16	84,35	No	84,35	-1,73
Sabaneta	47,82	85,90	81,90	85,90	17,35	55,70	84,69	No	84,69	-1,43
La Cabrera	46,00	84,00	80,45	84,00	17,72	52,07	82,48	No	82,48	-1,85
La Pelada	45,83	83,54	79,86	83,54	17,56	52,45	82,16	No	82,16	-1,68
Fca Tesorito	46,95	85,06	81,32	85,06	17,57	53,78	83,66	No	83,66	-1,68
San Felix	49,78	128,89	130,90	130,90	24,31	59,00	123,62	No	123,62	-5,89
El Nus	43,83	78,07	74,92	78,07	17,85	46,28	76,30	No	76,30	-2,32
Las Violetas	42,60	35,58	29,52	42,60	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	6,82
Pto Berrio	43,27	78,10	75,46	78,10	18,47	43,89	76,01	No	76,01	-2,75
Anori	45,74	79,74	75,95	79,74	17,20	50,56	78,36	No	78,36	-1,76
El Peñol	46,29	79,90	75,75	79,90	16,81	52,64	78,83	No	78,83	-1,37
La Selva	46,25	79,83	75,66	79,83	16,79	52,64	78,76	No	78,76	-1,35
Hda Tunez	40,18	69,05	65,70	69,05	17,07	41,72	67,70	No	67,70	-2,00
La Nación	42,32	75,65	72,34	75,65	17,54	45,54	74,11	No	74,11	-2,08
La Salada	41,36	77,77	74,64	77,77	17,90	46,00	76,21	No	76,21	-2,05
Cacaoteras	42,60	62,84	58,58	62,84	15,32	42,99	62,10	No	62,10	-1,19
La Laguna	49,99	86,72	81,39	86,72	16,12	64,03	86,81	No	86,81	0,10
Jardin Botánico	46,22	84,98	81,81	84,98	18,19	50,75	83,08	No	83,08	-2,28
La Bohemia	40,72	77,62	74,99	77,62	18,50	43,53	75,68	No	75,68	-2,56
Argelia	40,81	77,06	74,00	77,06	17,96	45,17	75,47	No	75,47	-2,11
Tenerife	42,79	78,69	74,82	78,69	17,11	50,37	77,75	No	77,75	-1,22
Buga	44,27	82,83	80,11	82,83	18,61	47,20	80,70	No	80,70	-2,64
Mateguadua	43,68	81,93	79,21	81,93	18,57	46,64	79,85	No	79,85	-2,61
Cenicana	39,96	90,81	90,34	90,81	21,63	42,80	87,37	No	87,37	-3,93
Gja Expo	42,64	50,55	44,95	50,55	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	14,15
La Union	40,45	48,55	43,16	48,55	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	14,17
Planeta Rica	43,25	51,73	46,43	51,73	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	13,73
El Salado	39,92	48,66	43,66	48,66	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	13,75
Turipana	41,42	50,07	44,96	50,07	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	13,72
La Doctrina	42,51	96,75	97,30	97,30	22,88	42,80	92,43	No	92,43	-5,27
Chima	42,69	51,27	46,04	51,27	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	13,71

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 30°
	K= 0,769652707				A1	B2	m1			
	∠ 30°				0,42	0,58	0,9			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Colomboy	41,70	50,27	45,08	50,27	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	13,76
Primates	39,72	59,40	55,25	59,40	15,15	40,47	58,77	No	58,77	-1,07
El Limon	41,08	113,18	117,37	117,37	27,63	41,36	108,88	No	108,88	-7,80
Fuente Bella	41,83	114,54	118,65	118,65	27,34	42,44	109,79	No	109,79	-8,07
Villa Hermosa	45,91	83,84	80,27	83,84	17,70	52,07	82,35	No	82,35	-1,82
Armero	42,26	80,74	78,60	80,74	19,24	43,26	78,33	No	78,33	-3,07
Hda Garcia	41,68	79,83	77,67	79,83	19,18	42,80	77,48	No	77,48	-3,03
La Esperanza	41,28	79,38	77,32	79,38	19,29	42,08	76,99	No	76,99	-3,10
El Salto	39,49	100,30	102,09	102,09	24,43	40,82	95,34	No	95,34	-7,08
La Salvajina	40,97	77,85	75,13	77,85	18,40	44,08	75,96	No	75,96	-2,49
Hda Carpinterias	49,60	88,32	84,22	88,32	17,37	57,83	87,07	No	87,07	-1,44
Paispa	44,05	80,67	76,85	80,67	17,28	51,31	79,56	No	79,56	-1,40
La Sierra	43,64	80,83	77,47	80,83	17,78	49,06	79,30	No	79,30	-1,92
La Citec	40,06	77,14	74,85	77,14	18,91	41,72	74,99	No	74,99	-2,86
U Nariño	40,76	105,65	107,96	107,96	24,96	42,44	100,25	No	100,25	-7,70
Los Milagros	45,30	82,63	78,88	82,63	17,44	52,26	81,37	No	81,37	-1,56
Viento Libre	45,39	117,15	118,36	118,36	23,65	53,78	112,63	No	112,63	-5,09
Wilquipamba	56,26	138,61	140,75	140,75	24,26	65,53	132,76	No	132,76	-6,02

Tabla C12. Refrigeración por convección con viento a 60°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 60°
	K= 0,941678111				A1	B2	m1			
	∠ 60°				0,42	0,58	0,9			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Villarrosa	40,75	105,79	104,86	105,79	21,17	41,18	105,80	No	105,80	0,01
Hda la Guaira	40,62	105,55	104,65	105,55	21,19	41,00	105,55	No	105,55	0,00
Socomba	42,50	109,12	108,11	109,12	21,11	43,17	109,16	No	109,16	0,04
Col Pailitas	40,98	106,28	105,38	106,28	21,20	41,36	106,28	No	106,28	0,00
La Llana	40,99	106,19	105,22	106,19	21,13	41,54	106,23	No	106,23	0,04
Aguas Claras	41,86	107,79	106,73	107,79	21,05	42,62	107,86	No	107,86	0,07
San Lorenzo	48,65	106,98	102,31	106,98	17,61	55,70	109,35	No	109,35	2,17
El Dificil	42,41	99,19	96,66	99,19	19,34	43,17	99,99	No	99,99	0,80
Carmen de Bolivar	39,66	51,14	44,59	51,14	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	-4,45
El Guamo	40,39	51,92	45,32	51,92	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	-4,50
Nueva Florida	42,34	94,15	91,06	94,15	18,58	42,62	95,20	No	95,20	1,11
La Maravilla	48,94	34,13	26,19	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65
Teorama	38,16	28,36	21,82	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33
Convención	46,37	137,64	139,47	139,47	23,86	49,62	136,46	No	136,46	-2,21
Tonchala	42,03	30,89	24,06	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23
Risaralda	42,33	31,14	24,32	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10
Salazar	42,88	31,15	24,09	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47
Gja HJC	55,03	37,47	28,91	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94
Pamplona	48,23	33,44	25,43	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42
UFPS	45,45	32,46	25,04	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00
El Centro	42,15	103,73	101,98	103,73	20,26	42,80	104,14	No	104,14	0,39
Hda Las Brisas	42,94	179,19	192,78	192,78	38,94	43,53	202,56	No	202,56	4,83
Hda Tigreros	38,55	105,05	104,47	105,05	21,56	39,75	104,96	No	104,96	-0,09
UIS	44,93	107,59	104,94	107,59	19,46	47,94	108,56	No	108,56	0,90
Hda La Esperanza	46,40	121,04	120,47	121,04	21,64	48,03	120,87	No	120,87	-0,14
Cachira	46,78	109,56	106,01	109,56	18,70	52,45	111,25	No	111,25	1,52
Carare	43,05	105,42	103,65	105,42	20,28	43,71	105,82	No	105,82	0,38
Buenavista	48,14	74,61	66,94	74,61	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	-4,93
San Cayetano	47,44	104,99	100,43	104,99	17,62	54,16	107,29	No	107,29	2,14
Sabaneta	47,82	105,10	100,20	105,10	17,35	55,70	107,72	No	107,72	2,43

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 60°
	K= 0,941678111				A1	B2	m1			
	∠ 60°				0,42	0,58	0,9			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
La Cabrera	46,00	102,77	98,43	102,77	17,72	52,07	104,91	No	104,91	2,03
La Pelada	45,83	102,21	97,70	102,21	17,56	52,45	104,50	No	104,50	2,19
Fca Tesorito	46,95	104,08	99,49	104,08	17,57	53,78	106,41	No	106,41	2,19
San Felix	49,78	157,70	160,15	160,15	24,31	59,00	157,24	No	157,24	-1,85
El Nus	43,83	95,52	91,67	95,52	17,85	46,28	97,05	No	97,05	1,58
Las Violetas	42,60	43,54	36,12	43,54	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	4,78
Pto Berrio	43,27	95,56	92,32	95,56	18,47	43,89	96,68	No	96,68	1,17
Anori	45,74	97,56	92,92	97,56	17,20	50,56	99,67	No	99,67	2,12
El Peñol	46,29	97,76	92,68	97,76	16,81	52,64	100,27	No	100,27	2,49
La Selva	46,25	97,67	92,57	97,67	16,79	52,64	100,18	No	100,18	2,51
Hda Tunez	40,18	84,48	80,39	84,48	17,07	41,72	86,11	No	86,11	1,89
La Nación	42,32	92,55	88,51	92,55	17,54	45,54	94,26	No	94,26	1,81
La Salada	41,36	95,15	91,32	95,15	17,90	46,00	96,93	No	96,93	1,84
Cacaoteras	42,60	76,89	71,67	76,89	15,32	42,99	78,99	No	78,99	2,67
La Laguna	49,99	106,10	99,58	106,10	16,12	64,03	110,41	No	110,41	3,91
Jardin Botánico	46,22	103,97	100,10	103,97	18,19	50,75	105,68	No	105,68	1,62
La Bohemia	40,72	94,97	91,75	94,97	18,50	43,53	96,26	No	96,26	1,34
Argelia	40,81	94,28	90,54	94,28	17,96	45,17	95,99	No	95,99	1,78
Tenerife	42,79	96,28	91,54	96,28	17,11	50,37	98,89	No	98,89	2,64
Buga	44,27	101,34	98,01	101,34	18,61	47,20	102,64	No	102,64	1,27
Mateguadua	43,68	100,24	96,92	100,24	18,57	46,64	101,56	No	101,56	1,30
Cenicana	39,96	111,11	110,54	111,11	21,63	42,80	111,14	No	111,14	0,03
Gja Expo	42,64	61,84	54,99	61,84	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	-5,03
La Union	40,45	59,40	52,80	59,40	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	-5,02
Planeta Rica	43,25	63,29	56,81	63,29	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	-5,56
El Salado	39,92	59,53	53,41	59,53	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	-5,53
Turipana	41,42	61,27	55,00	61,27	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	-5,56
La Doctrina	42,51	118,37	119,05	119,05	22,88	42,80	117,57	No	117,57	-1,26
Chima	42,69	62,72	56,33	62,72	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	-5,58
Colomboy	41,70	61,50	55,16	61,50	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	-5,51
Primates	39,72	72,68	67,59	72,68	15,15	40,47	74,76	No	74,76	2,78
El Limon	41,08	138,47	143,61	143,61	27,63	41,36	138,49	No	138,49	-3,69

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 60°
	K= 0,941678111				A1	B2	m1		Pc max	
	∠ 60°				0,42	0,58	0,9			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb		
Fuente Bella	41,83	140,14	145,17	145,17	27,34	42,44	139,65	No	139,65	-3,95
Villa Hermosa	45,91	102,58	98,21	102,58	17,70	52,07	104,74	No	104,74	2,06
Armero	42,26	98,78	96,17	98,78	19,24	43,26	99,63	No	99,63	0,85
Hda Garcia	41,68	97,67	95,03	97,67	19,18	42,80	98,55	No	98,55	0,89
La Esperanza	41,28	97,12	94,60	97,12	19,29	42,08	97,93	No	97,93	0,82
El Salto	39,49	122,72	124,90	124,90	24,43	40,82	121,27	No	121,27	-3,00
La Salvajina	40,97	95,25	91,92	95,25	18,40	44,08	96,62	No	96,62	1,42
Hda Carpinterias	49,60	108,06	103,05	108,06	17,37	57,83	110,75	No	110,75	2,43
Paispa	44,05	98,70	94,03	98,70	17,28	51,31	101,20	No	101,20	2,47
La Sierra	43,64	98,89	94,78	98,89	17,78	49,06	100,87	No	100,87	1,96
La Citec	40,06	94,38	91,57	94,38	18,91	41,72	95,39	No	95,39	1,06
U Nariño	40,76	129,26	132,09	132,09	24,96	42,44	127,51	No	127,51	-3,59
Los Milagros	45,30	101,10	96,50	101,10	17,44	52,26	103,50	No	103,50	2,31
Viento Libre	45,39	143,33	144,82	144,82	23,65	53,78	143,26	No	143,26	-1,09
Wilquipamba	56,26	169,59	172,21	172,21	24,26	65,53	168,86	No	168,86	-1,98

Tabla C13. Refrigeración por convección con viento a 90°

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 90°
	K= 1				A1	B2	m1			
	∠ 90°				No	No	No			
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Villarrosa	40,75	112,34	111,36	112,34	21,17	41,18	113,82	No	113,82	1,30
Hda la Guaira	40,62	112,09	111,13	112,09	21,19	41,00	113,55	No	113,55	1,29
Socomba	42,50	115,88	114,80	115,88	21,11	43,17	117,43	No	117,43	1,32
Col Pailitas	40,98	112,86	111,90	112,86	21,20	41,36	114,33	No	114,33	1,28
La Llana	40,99	112,77	111,74	112,77	21,13	41,54	114,28	No	114,28	1,32
Aguas Claras	41,86	114,46	113,34	114,46	21,05	42,62	116,04	No	116,04	1,36
San Lorenzo	48,65	113,60	108,65	113,60	17,61	55,70	117,63	No	117,63	3,43
El Dificil	42,41	105,33	102,65	105,33	19,34	43,17	107,56	No	107,56	2,07
Carmen de Bolivar	39,66	54,31	47,35	54,31	10,96	40,29	48,96	31,89	48,96	-10,92
El Guamo	40,39	55,14	48,13	55,14	11,02	40,82	49,69	32,36	49,69	-10,97
Nueva Florida	42,34	99,98	96,70	99,98	18,58	42,62	102,42	No	102,42	2,38
La Maravilla	48,94	36,24	27,81	48,94	6,12	54,16	33,87	22,06	54,16	9,65
Teorama	38,16	30,12	23,18	38,16	6,19	41,18	28,10	18,30	41,18	7,33
Convención	46,37	146,17	148,11	148,11	23,86	49,62	146,79	No	146,79	-0,90
Tonchala	42,03	32,81	25,55	42,03	6,51	42,99	30,48	19,85	42,99	2,23
Risaralda	42,33	33,07	25,82	42,33	6,58	42,80	30,70	19,99	42,80	1,10
Salazar	42,88	33,07	25,59	42,88	6,32	45,36	30,80	20,06	45,36	5,47
Gja HJC	55,03	39,79	30,70	55,03	6,26	59,78	37,11	24,16	59,78	7,94
Pamplona	48,23	35,51	27,00	48,23	5,91	55,70	33,33	21,71	55,70	13,42
UFPS	45,45	34,47	26,59	45,45	6,25	48,87	32,13	20,92	48,87	7,00
El Centro	42,15	110,15	108,29	110,15	20,26	42,80	112,03	No	112,03	1,67
Hda Las Brisas	42,94	190,29	204,72	204,72	38,94	43,53	217,91	No	217,91	6,06
Hda Tigreros	38,55	111,56	110,94	111,56	21,56	39,75	112,92	No	112,92	1,20
UIS	44,93	114,25	111,44	114,25	19,46	47,94	116,79	No	116,79	2,17
Hda La Esperanza	46,40	128,54	127,93	128,54	21,64	48,03	130,03	No	130,03	1,15
Cachira	46,78	116,34	112,58	116,34	18,70	52,45	119,68	No	119,68	2,79
Carare	43,05	111,94	110,07	111,94	20,28	43,71	113,84	No	113,84	1,66
Buenavista	48,14	79,23	71,09	79,23	12,70	55,12	71,10	46,30	71,10	-11,43
San Cayetano	47,44	111,50	106,65	111,50	17,62	54,16	115,42	No	115,42	3,40
Sabaneta	47,82	111,61	106,41	111,61	17,35	55,70	115,88	No	115,88	3,69

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 90°
	K= 1				A1	B2	m1			
					No	No	No			
	∠ 90°				∠ 90°					
qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max		
La Cabrera	46,00	109,14	104,52	109,14	17,72	52,07	112,86	No	112,86	3,29
La Pelada	45,83	108,54	103,75	108,54	17,56	52,45	112,42	No	112,42	3,45
Fca Tesorito	46,95	110,52	105,65	110,52	17,57	53,78	114,47	No	114,47	3,45
San Felix	49,78	167,47	170,07	170,07	24,31	59,00	169,15	No	169,15	-0,54
El Nus	43,83	101,44	97,34	101,44	17,85	46,28	104,40	No	104,40	2,84
Las Violetas	42,60	46,23	38,35	46,23	8,66	45,72	42,40	27,61	45,72	-1,12
Pto Berrio	43,27	101,47	98,04	101,47	18,47	43,89	104,01	No	104,01	2,44
Anori	45,74	103,60	98,68	103,60	17,20	50,56	107,22	No	107,22	3,37
El Peñol	46,29	103,82	98,42	103,82	16,81	52,64	107,86	No	107,86	3,75
La Selva	46,25	103,72	98,31	103,72	16,79	52,64	107,77	No	107,77	3,76
Hda Tunez	40,18	89,71	85,37	89,71	17,07	41,72	92,63	No	92,63	3,15
La Nación	42,32	98,29	93,99	98,29	17,54	45,54	101,40	No	101,40	3,07
La Salada	41,36	101,05	96,97	101,05	17,90	46,00	104,28	No	104,28	3,10
Cacaoteras	42,60	81,65	76,11	81,65	15,32	42,99	84,98	No	84,98	3,92
La Laguna	49,99	112,67	105,75	112,67	16,12	64,03	118,78	No	118,78	5,14
Jardin Botánico	46,22	110,41	106,30	110,41	18,19	50,75	113,68	No	113,68	2,88
La Bohemia	40,72	100,85	97,43	100,85	18,50	43,53	103,55	No	103,55	2,61
Argelia	40,81	100,12	96,15	100,12	17,96	45,17	103,26	No	103,26	3,05
Tenerife	42,79	102,25	97,21	102,25	17,11	50,37	106,38	No	106,38	3,89
Buga	44,27	107,61	104,09	107,61	18,61	47,20	110,42	No	110,42	2,54
Mateguadua	43,68	106,45	102,92	106,45	18,57	46,64	109,26	No	109,26	2,57
Cenicana	39,96	117,99	117,38	117,99	21,63	42,80	119,56	No	119,56	1,31
Gja Expo	42,64	65,67	58,40	65,67	12,09	45,36	58,88	38,34	58,88	-11,54
La Union	40,45	63,07	56,07	63,07	12,08	42,99	56,56	36,83	56,56	-11,52
Planeta Rica	43,25	67,21	60,32	67,21	12,65	43,71	59,96	39,05	59,96	-12,09
El Salado	39,92	63,22	56,72	63,22	12,63	40,29	56,41	36,74	56,41	-12,07
Turipana	41,42	65,06	58,41	65,06	12,66	41,72	58,04	37,80	58,04	-12,10
La Doctrina	42,51	125,71	126,42	126,42	22,88	42,80	126,48	No	126,48	0,05
Chima	42,69	66,61	59,82	66,61	12,68	42,99	59,41	38,69	59,41	-12,12
Colomboy	41,70	65,31	58,58	65,31	12,60	42,26	58,29	37,96	58,29	-12,05
Primates	39,72	77,18	71,78	77,18	15,15	40,47	80,42	No	80,42	4,03
El Limon	41,08	147,05	152,50	152,50	27,63	41,36	148,99	No	148,99	-2,36

ESTACIÓN	IEEE				CIGRÉ					%E 90°
	K= 1				A1	B2	m1			
					No	No	No			
	∠ 90°				∠ 90°					
	qn	qc1	qc2	qmax	Nus 90	Pn	Pfa	Pfb	Pc max	
Fuente Bella	41,83	148,82	154,16	154,16	27,34	42,44	150,23	No	150,23	-2,62
Villa Hermosa	45,91	108,94	104,30	108,94	17,70	52,07	112,68	No	112,68	3,32
Armero	42,26	104,90	102,13	104,90	19,24	43,26	107,18	No	107,18	2,13
Hda Garcia	41,68	103,72	100,91	103,72	19,18	42,80	106,01	No	106,01	2,17
La Esperanza	41,28	103,14	100,46	103,14	19,29	42,08	105,35	No	105,35	2,10
El Salto	39,49	130,32	132,64	132,64	24,43	40,82	130,46	No	130,46	-1,67
La Salvajina	40,97	101,15	97,62	101,15	18,40	44,08	103,94	No	103,94	2,69
Hda Carpinterias	49,60	114,75	109,43	114,75	17,37	57,83	119,14	No	119,14	3,68
Paispa	44,05	104,82	99,86	104,82	17,28	51,31	108,87	No	108,87	3,72
La Sierra	43,64	105,02	100,65	105,02	17,78	49,06	108,51	No	108,51	3,22
La Citec	40,06	100,23	97,25	100,23	18,91	41,72	102,62	No	102,62	2,33
U Nariño	40,76	137,27	140,27	140,27	24,96	42,44	137,17	No	137,17	-2,26
Los Milagros	45,30	107,37	102,48	107,37	17,44	52,26	111,34	No	111,34	3,57
Viento Libre	45,39	152,21	153,78	153,78	23,65	53,78	154,12	No	154,12	0,21
Wilquipamba	56,26	180,09	182,87	182,87	24,26	65,53	181,66	No	181,66	-0,67

Tabla C14. Refrigeración por radiación

ESTACIÓN	CIGRÉ		
	IEEE	Pr	%E
Villarrosa	23,91	23,93	0,07
Hda la Guaira	23,85	23,87	0,07
Socomba	24,59	24,61	0,07
Col Pailitas	23,97	23,99	0,07
La Llana	24,04	24,05	0,07
Aguas Claras	24,41	24,42	0,07
San Lorenzo	28,42	28,44	0,07
El Dificil	24,59	24,61	0,07
Carmen de Bolivar	23,60	23,61	0,07
El Guamo	23,79	23,80	0,07
Nueva Florida	24,41	24,42	0,07
La Maravilla	27,99	28,01	0,07
Teorama	23,91	23,93	0,07
Convención	26,65	26,67	0,07
Tonchala	24,53	24,55	0,07
Risaralda	24,47	24,48	0,07
Salazar	25,31	25,33	0,07
Gja HJC	29,52	29,54	0,07
Pamplona	28,42	28,44	0,07
UFPS	26,43	26,44	0,07
El Centro	24,47	24,48	0,07
Hda Las Brisas	24,71	24,73	0,07
Hda Tigreiros	23,41	23,43	0,07
UIS	26,14	26,15	0,07
Hda La Esperanza	26,17	26,18	0,07
Cachira	27,50	27,51	0,07
Carare	24,77	24,79	0,07
Buenavista	28,26	28,28	0,07
San Cayetano	27,99	28,01	0,07
Sabaneta	28,42	28,44	0,07
La Cabrera	27,39	27,40	0,07
La Pelada	27,50	27,51	0,07
Fca Tesorito	27,88	27,90	0,07
San Felix	29,31	29,33	0,07

ESTACIÓN	IEEE CIGRÉ		
	qr	Pr	%E
El Nus	25,61	25,63	0,07
Las Violetas	25,43	25,45	0,07
Pto Berrio	24,83	24,85	0,07
Anori	26,94	26,96	0,07
El Peñol	27,55	27,57	0,07
La Selva	27,55	27,57	0,07
Hda Tunez	24,10	24,11	0,07
La Nación	25,37	25,39	0,07
La Salada	25,52	25,54	0,07
Cacaoteras	24,53	24,55	0,07
La Laguna	30,60	30,62	0,07
Jardin Botánico	26,99	27,01	0,07
La Bohemia	24,71	24,73	0,07
Argelia	25,25	25,27	0,07
Tenerife	26,88	26,90	0,07
Buga	25,90	25,92	0,07
Mateguadua	25,73	25,74	0,07
Cenicana	24,47	24,48	0,07
Gja Expo	25,31	25,33	0,07
La Union	24,53	24,55	0,07
Planeta Rica	24,77	24,79	0,07
El Salado	23,60	23,61	0,07
Turipana	24,10	24,11	0,07
La Doctrina	24,47	24,48	0,07
Chima	24,53	24,55	0,07
Colomboy	24,28	24,30	0,07
Primates	23,66	23,68	0,07
El Limon	23,97	23,99	0,07
Fuente Bella	24,34	24,36	0,07
Villa Hermosa	27,39	27,40	0,07
Armero	24,62	24,64	0,07
Hda Garcia	24,47	24,48	0,07
La Esperanza	24,22	24,24	0,07
El Salto	23,79	23,80	0,07
La Salvajina	24,89	24,91	0,07
Hda Carpinterias	29,00	29,02	0,07

ESTACIÓN	IEEE	CIGRÉ	
	qr	Pr	%E
Paispa	27,16	27,18	0,07
La Sierra	26,48	26,50	0,07
La Citec	24,10	24,11	0,07
U Nariño	24,34	24,36	0,07
Los Milagros	27,44	27,46	0,07
Viento Libre	27,88	27,90	0,07
Wilquipamba	30,96	30,98	0,07

Tabla C15. Ampacidad con viento a 0°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 0°				
	Rac a 25°C	Rdc a 20°C			
	Ω/m	Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C				
Ω/m	Global	Directa			
0,000086260	Amp CIGRÉ				
Amp IEEE 0°	0°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 0°	%E Amp Direc	
Villarrosa	802,25	829,98	3,34	782,14	-2,57
Hda la Guaira	801,10	828,77	3,34	781,46	-2,51
Socomba	816,93	845,19	3,34	796,18	-2,61
Col Pailitas	804,16	831,92	3,34	784,97	-2,44
La Llana	804,35	832,20	3,35	784,06	-2,59
Aguas Claras	811,72	839,89	3,35	790,12	-2,73
San Lorenzo	868,66	912,55	4,81	846,47	-2,62
El Dificil	798,62	816,27	2,16	764,57	-4,45
Carmen de Bolivar	771,01	835,88	7,76	786,69	1,99
El Guamo	777,86	842,20	7,64	795,09	2,17
Nueva Florida	796,82	799,44	0,33	751,08	-6,09
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	915,04	939,36	2,59	886,15	-3,26
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	792,19	820,72	3,48	779,58	-1,62
Hda Las Brisas	1027,40	1091,78	5,90	1061,50	3,21
Hda Tigeros	788,44	815,87	3,36	769,16	-2,51
UIS	819,94	846,24	3,11	797,19	-2,85
Hda La Esperanza	854,34	883,71	3,32	838,44	-1,90
Cachira	842,28	878,24	4,09	817,85	-2,99
Carare	799,48	828,22	3,47	787,41	-1,53
Buenavista	835,78	979,67	14,69	946,70	11,72

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 0°				
	Rac a 25°C	Rdc a 20°C			
	Ω/m	Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C	Global		Directa	
Ω/m	Amp CIGRÉ				
0,000086260	Amp IEEE 0°	0°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 0°	%E Amp Direc
San Cayetano	839,17	881,91	4,85	835,44	-0,45
Sabaneta	844,76	894,75	5,59	845,34	0,07
La Cabrera	824,95	863,99	4,52	818,53	-0,78
La Pelada	824,57	867,27	4,92	819,53	-0,61
Fca Tesorito	835,03	878,68	4,97	831,51	-0,42
San Felix	966,71	994,39	2,78	947,30	-2,05
El Nus	796,76	811,60	1,83	768,36	-3,70
Las Violetas	786,49	806,37	2,46	766,07	-2,67
Pto Berrio	787,03	788,72	0,21	758,95	-3,70
Anori	819,95	850,74	3,62	804,03	-1,98
El Peñol	828,18	868,91	4,69	822,30	-0,71
La Selva	827,87	868,91	4,72	822,14	-0,70
Hda Tunez	758,30	767,06	1,14	727,97	-4,17
La Nación	784,01	804,62	2,56	763,74	-2,65
La Salada	777,94	808,99	3,84	758,98	-2,50
Cacaoteras	779,82	779,76	-0,01	751,37	-3,79
La Laguna	874,11	960,44	8,99	903,37	3,24
Jardin Botánico	823,78	852,41	3,36	808,31	-1,91
La Bohemia	767,10	785,14	2,30	745,83	-2,85
Argelia	771,80	801,11	3,66	752,45	-2,57
Tenerife	798,47	849,07	5,96	795,84	-0,33
Buga	802,11	820,25	2,21	783,48	-2,38
Mateguadua	796,51	815,07	2,28	777,55	-2,44
Cenicana	802,63	831,33	3,45	794,40	-1,04
Gja Expo	785,91	895,19	12,21	855,22	8,10
La Union	763,66	874,84	12,71	834,06	8,44
Planeta Rica	775,50	888,89	12,76	873,33	11,20
El Salado	741,15	857,55	13,57	842,34	12,01
Turipana	756,56	871,80	13,22	857,27	11,75

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 0°				
	Rac a 25°C	Rdc a 20°C			
	Ω/m	Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C	Global		Directa	
Ω/m	Amp CIGRÉ				
Amp IEEE 0°	0°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 0°	%E Amp Direc	
La Doctrina	815,56	841,03	3,03	825,84	1,24
Chima	769,52	883,69	12,92	869,28	11,48
Colomboy	760,16	874,70	13,09	858,08	11,41
Primates	779,42	782,83	0,44	720,78	-8,14
El Limon	908,24	927,82	2,11	886,50	-2,45
Fuente Bella	914,68	933,37	2,00	889,51	-2,83
Villa Hermosa	843,75	883,05	4,45	818,19	-3,12
Armero	798,45	816,04	2,16	763,03	-4,64
Hda Garcia	793,16	811,46	2,26	757,08	-4,76
La Esperanza	788,41	807,70	2,39	755,77	-4,32
El Salto	857,04	877,26	2,30	825,25	-3,85
La Salvajina	770,31	790,50	2,55	750,27	-2,67
Hda Carpinterias	860,85	912,15	5,62	864,53	0,43
Paispa	809,56	857,39	5,58	807,22	-0,29
La Sierra	801,74	837,31	4,25	787,98	-1,75
La Citec	757,38	777,39	2,57	739,36	-2,44
U Nariño	861,97	880,59	2,12	847,31	-1,73
Los Milagros	820,47	865,63	5,22	818,00	-0,30
Viento Libre	929,14	958,18	3,03	900,56	-3,17
Wilquipamba	1014,00	1042,27	2,71	992,39	-2,18

Tabla C16. Ampacidad calculada con viento a 5°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 5°				
	Rac a 25°C Ω/m		Rdc a 20°C Ω/m		
	0,000066510		0.0000644		
	Rac a 100°C Ω/m		Global		
0,000086260		Directa			
	Amp IEEE 5°	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Direc
Villarrosa	857,14	867,87	1,24	822,24	-4,24
Hda la Guaira	855,94	866,63	1,23	821,50	-4,19
Socomba	872,54	883,59	1,25	836,82	-4,27
Col Pailitas	859,17	869,89	1,23	825,11	-4,13
La Llana	859,31	870,15	1,25	824,22	-4,26
Aguas Claras	867,00	878,07	1,26	830,59	-4,38
San Lorenzo	890,87	912,55	2,38	846,47	-5,24
El Dificil	839,87	852,70	1,50	803,35	-4,55
Carmen de Bolivar	771,01	835,88	7,76	786,69	1,99
El Guamo	777,86	842,20	7,64	795,09	2,17
Nueva Florida	821,48	834,87	1,60	788,67	-4,16
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	978,46	982,53	0,41	931,79	-5,01
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	846,68	858,43	1,37	819,19	-3,36
Hda Las Brisas	1105,23	1146,80	3,62	1118,01	1,14
Hda Tigeros	843,86	854,09	1,20	809,59	-4,23
UIS	870,61	884,39	1,56	837,57	-3,95
Hda La Esperanza	913,30	924,35	1,20	881,18	-3,64
Cachira	885,91	902,03	1,79	843,34	-5,05
Carare	854,36	866,19	1,37	827,26	-3,28
Buenavista	835,78	979,67	14,69	946,70	11,72

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 5°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
0,000086260	Amp IEEE 5°	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Direc
San Cayetano	863,84	881,91	2,05	835,44	-3,40
Sabaneta	867,08	894,75	3,09	845,34	-2,57
La Cabrera	852,48	869,55	1,96	824,41	-3,41
La Pelada	851,37	868,91	2,02	821,27	-3,66
Fca Tesorito	860,12	878,68	2,11	831,51	-3,44
San Felix	1035,58	1041,35	0,55	996,48	-3,92
El Nus	815,65	830,42	1,78	788,21	-3,48
Las Violetas	786,49	806,37	2,46	766,07	-2,67
Pto Berrio	810,22	823,67	1,63	795,21	-1,89
Anori	831,96	850,74	2,21	804,03	-3,47
El Peñol	836,91	868,91	3,68	822,30	-1,78
La Selva	836,59	868,91	3,72	822,14	-1,76
Hda Tunez	765,20	779,79	1,87	741,38	-3,21
La Nación	803,62	818,86	1,86	778,73	-3,20
La Salada	813,74	829,38	1,89	780,68	-4,23
Cacaoteras	779,82	779,76	-0,01	751,37	-3,79
La Laguna	884,70	960,44	7,89	903,37	2,07
Jardín Botánico	853,77	869,52	1,81	826,35	-3,32
La Bohemia	807,31	821,31	1,70	783,81	-3,00
Argelia	808,80	824,17	1,87	776,96	-4,10
Tenerife	827,23	849,07	2,57	795,84	-3,94
Buga	837,53	851,87	1,68	816,53	-2,57
Mateguadua	832,62	846,95	1,69	810,91	-2,68
Cenicana	860,16	871,03	1,25	835,85	-2,91
Gja Expo	785,91	895,19	12,21	855,22	8,10
La Union	763,66	874,84	12,71	834,06	8,44
Planeta Rica	775,50	888,89	12,76	873,33	11,20
El Salado	741,15	857,55	13,57	842,34	12,01
Turipana	756,56	871,80	13,22	857,27	11,75
La Doctrina	876,15	882,50	0,72	868,04	-0,93

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 5°					
	Rac a 25°C Ω/m		Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510		0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m		Global Directa			
0,000086260		Amp IEEE 5°	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 5°	%E Amp Direc
Chima	769,52	883,69	12,92	869,28	11,48	
Colomboy	760,16	874,70	13,09	858,08	11,41	
Primates	779,42	782,83	0,44	720,78	-8,14	
El Limon	973,93	972,14	-0,18	932,79	-4,41	
Fuente Bella	980,63	977,80	-0,29	936,03	-4,76	
Villa Hermosa	870,63	887,95	1,95	823,47	-5,73	
Armero	839,36	852,35	1,52	801,75	-4,69	
Hda Garcia	834,56	847,58	1,54	795,67	-4,89	
La Esperanza	830,99	843,75	1,51	794,19	-4,63	
El Salto	917,64	918,32	0,07	868,78	-5,62	
La Salvajina	809,59	823,86	1,73	785,34	-3,09	
Hda Carpinterias	880,48	912,15	3,47	864,53	-1,85	
Paispa	837,38	857,39	2,33	807,22	-3,74	
La Sierra	833,30	849,73	1,93	801,16	-4,01	
La Citec	800,83	813,84	1,60	777,59	-2,99	
U Nariño	925,59	923,57	-0,22	891,89	-3,78	
Los Milagros	847,32	865,63	2,11	818,00	-3,58	
Viento Libre	993,97	1002,61	0,86	947,69	-4,88	
Wilquipamba	1084,65	1090,41	0,53	1042,84	-4,01	

Tabla C17. Ampacidad calculada con viento a 10°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 10°				
	Rac a 25°C Ω/m		Rdc a 20°C Ω/m		
	0,000066510		0.0000644		
	Rac a 100°C Ω/m		Global		
	0,000086260		Directa		
Amp IEEE 10°	Amp CIGRÉ 10°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 10°	%E Amp Direc	
Villarrosa	908,49	907,92	-0,06	864,40	-5,10
Hda la Guaira	907,25	906,64	-0,07	863,60	-5,05
Socomba	924,57	924,17	-0,04	879,57	-5,12
Col Pailitas	910,64	910,02	-0,07	867,31	-5,00
La Llana	910,72	910,25	-0,05	866,45	-5,11
Aguas Claras	918,73	918,42	-0,03	873,14	-5,22
San Lorenzo	940,92	948,56	0,81	885,17	-6,30
El Dificil	889,04	891,23	0,25	844,14	-5,32
Carmen de Bolivar	771,01	835,88	7,76	786,69	1,99
El Guamo	777,86	842,20	7,64	795,09	2,17
Nueva Florida	869,20	872,35	0,36	828,25	-4,94
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	1037,75	1028,14	-0,93	979,77	-5,92
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	897,65	898,28	0,07	860,85	-4,27
Hda Las Brisas	1177,60	1204,69	2,25	1177,32	-0,02
Hda Tigreiros	895,62	894,43	-0,13	852,04	-5,11
UIS	922,05	924,72	0,29	880,05	-4,77
Hda La Esperanza	968,43	967,30	-0,12	926,13	-4,57
Cachira	937,41	942,57	0,55	886,57	-5,73
Carare	905,68	906,32	0,07	869,18	-4,20
Buenavista	835,78	979,67	14,69	946,70	11,72
San Cayetano	914,44	921,51	0,77	877,14	-4,25

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 10°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
	0,000086260	Amp IEEE 10°	Amp CIGRÉ 10°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 10°
Sabaneta	917,55	925,72	0,88	878,05	-4,50
La Cabrera	902,67	909,19	0,72	866,11	-4,22
La Pelada	901,35	908,43	0,78	862,97	-4,45
Fca Tesorito	910,49	917,70	0,79	872,65	-4,34
San Felix	1099,85	1090,91	-0,82	1048,17	-4,93
El Nus	864,38	868,80	0,51	828,56	-4,32
Las Violetas	786,49	806,37	2,46	766,07	-2,67
Pto Berrio	859,28	862,21	0,34	835,07	-2,90
Anori	880,78	887,29	0,73	842,61	-4,53
El Peñol	885,55	893,47	0,89	848,22	-4,40
La Selva	885,21	893,17	0,89	847,75	-4,42
Hda Tunez	811,13	816,06	0,60	779,43	-4,07
La Nación	851,55	856,67	0,60	818,40	-4,05
La Salada	862,39	867,77	0,62	821,35	-5,00
Cacaoteras	783,34	790,30	0,88	762,30	-2,76
La Laguna	934,68	960,44	2,68	903,37	-3,47
Jardin Botánico	904,45	909,45	0,55	868,26	-4,17
La Bohemia	856,23	859,79	0,41	824,05	-3,91
Argelia	857,30	862,43	0,59	817,42	-4,88
Tenerife	875,68	884,05	0,95	833,06	-5,12
Buga	887,86	891,44	0,40	857,73	-3,51
Mateguadua	882,70	886,34	0,41	851,96	-3,61
Cenicana	913,83	912,90	-0,10	879,40	-3,92
Gja Expo	785,91	895,19	12,21	855,22	8,10
La Union	763,66	874,84	12,71	834,06	8,44
Planeta Rica	775,50	888,89	12,76	873,33	11,20
El Salado	741,15	857,55	13,57	842,34	12,01
Turipana	756,56	871,80	13,22	857,27	11,75
La Doctrina	932,56	926,19	-0,69	912,42	-2,21
Chima	769,52	883,69	12,92	869,28	11,48

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 10°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
Amp IEEE 10°	Amp CIGRÉ 10°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 10°	%E Amp Direc	
Colomboy	760,16	874,70	13,09	858,08	11,41
Primates	786,79	794,34	0,95	733,26	-7,30
El Limon	1035,19	1018,89	-1,60	981,42	-5,48
Fuente Bella	1042,13	1024,67	-1,70	984,89	-5,81
Villa Hermosa	919,73	926,74	0,76	865,16	-6,31
Armero	888,36	890,77	0,27	842,48	-5,45
Hda Garcia	883,28	885,79	0,28	836,26	-5,62
La Esperanza	879,65	881,89	0,25	834,60	-5,40
El Salto	974,22	961,68	-1,30	914,48	-6,53
La Salvajina	858,52	862,37	0,45	825,65	-3,98
Hda Carpinterias	931,59	939,92	0,89	893,79	-4,23
Paispa	886,45	894,36	0,88	846,39	-4,73
La Sierra	882,69	888,73	0,68	842,41	-4,78
La Citec	849,83	852,32	0,29	817,78	-3,92
U Nariño	984,85	968,85	-1,65	938,71	-4,92
Los Milagros	897,00	904,47	0,83	858,99	-4,42
Viento Libre	1054,56	1049,53	-0,48	997,20	-5,75
Wilquipamba	1150,67	1141,27	-0,82	1095,91	-5,00

Tabla C18. Ampacidad calculada con viento a 30°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 30°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
	0,000086260	Amp IEEE 30°	Amp CIGRÉ 30°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 30°
Villarrosa	1067,90	1048,32	-1,87	1010,86	-5,64
Hda la Guaira	1066,52	1046,91	-1,87	1009,87	-5,61
Socomba	1086,20	1066,53	-1,84	1028,12	-5,65
Col Pailitas	1070,42	1050,73	-1,87	1013,97	-5,57
La Llana	1070,37	1050,87	-1,86	1013,17	-5,65
Aguas Claras	1079,39	1059,96	-1,83	1020,98	-5,72
San Lorenzo	1097,24	1087,95	-0,85	1033,15	-6,20
El Dificil	1042,02	1026,58	-1,50	985,98	-5,68
Carmen de Bolivar	786,93	835,88	5,86	786,69	-0,03
El Guamo	793,00	842,20	5,84	795,09	0,26
Nueva Florida	1017,80	1004,06	-1,37	966,00	-5,36
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	1221,60	1187,99	-2,83	1146,38	-6,56
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	1055,79	1037,90	-1,72	1005,69	-4,98
Hda Las Brisas	1400,31	1406,11	0,41	1382,74	-1,27
Hda Tigeros	1055,94	1035,62	-1,96	999,24	-5,67
UIS	1081,94	1066,27	-1,47	1027,77	-5,27
Hda La Esperanza	1139,45	1117,79	-1,94	1082,36	-5,27
Cachira	1097,74	1085,01	-1,17	1036,74	-5,88
Carare	1065,00	1046,96	-1,72	1014,99	-4,93
Buenavista	920,48	979,67	6,04	946,70	2,77
San Cayetano	1071,87	1061,94	-0,94	1023,67	-4,71

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 30°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
	0,000086260	Amp IEEE 30°	Amp CIGRÉ 30°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 30°
Sabaneta	1074,67	1066,11	-0,80	1025,00	-4,85
La Cabrera	1058,73	1048,32	-0,99	1011,19	-4,70
La Pelada	1056,80	1047,15	-0,92	1007,97	-4,84
Fca Tesorito	1067,22	1057,56	-0,91	1018,71	-4,76
San Felix	1298,71	1264,24	-2,73	1227,54	-5,80
El Nus	1015,70	1003,38	-1,23	968,74	-4,85
Las Violetas	786,49	806,37	2,46	766,07	-2,67
Pto Berrio	1011,41	997,20	-1,42	973,83	-3,86
Anori	1032,63	1022,76	-0,97	984,25	-4,92
El Peñol	1037,00	1028,88	-0,79	989,84	-4,76
La Selva	1036,57	1028,51	-0,78	989,32	-4,78
Hda Tunez	953,70	943,13	-1,12	911,62	-4,62
La Nación	1000,39	989,24	-1,13	956,29	-4,61
La Salada	1013,46	1002,33	-1,11	962,43	-5,30
Cacaoteras	917,94	910,85	-0,78	886,66	-3,53
La Laguna	1090,70	1089,24	-0,13	1039,26	-4,95
Jardin Botánico	1061,92	1049,50	-1,18	1014,01	-4,72
La Bohemia	1007,95	994,55	-1,35	963,82	-4,58
Argelia	1007,85	996,48	-1,14	957,80	-5,23
Tenerife	1026,44	1018,96	-0,73	975,04	-5,27
Buga	1044,09	1030,12	-1,36	1001,08	-4,30
Mateguadua	1038,13	1024,33	-1,35	994,73	-4,36
Cenicana	1079,82	1059,20	-1,95	1030,47	-4,79
Gja Expo	842,16	895,19	5,92	855,22	1,53
La Union	822,78	874,84	5,95	834,06	1,35
Planeta Rica	836,48	888,89	5,90	873,33	4,22
El Salado	806,54	857,55	5,95	842,34	4,25
Turipana	820,20	871,80	5,92	857,27	4,32
La Doctrina	1106,45	1078,45	-2,60	1066,65	-3,73
Chima	831,57	883,69	5,90	869,28	4,34

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 30°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
Amp IEEE 30°	Amp CIGRÉ 30°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 30°	%E Amp Direc	
Colomboy	822,87	874,70	5,93	858,08	4,10
Primates	914,05	908,32	-0,63	855,42	-6,85
El Limon	1224,47	1182,24	-3,57	1150,10	-6,47
Fuente Bella	1232,23	1188,48	-3,68	1154,36	-6,75
Villa Hermosa	1073,05	1063,38	-0,91	1010,16	-6,23
Armero	1040,86	1025,73	-1,48	984,08	-5,77
Hda Garcia	1034,93	1020,03	-1,46	977,33	-5,89
La Esperanza	1031,04	1015,86	-1,49	975,08	-5,74
El Salto	1149,39	1113,39	-3,23	1072,89	-7,13
La Salvajina	1010,32	997,25	-1,31	965,68	-4,62
Hda Carpinterias	1090,73	1082,11	-0,80	1042,29	-4,65
Paispa	1039,12	1030,83	-0,80	989,50	-5,01
La Sierra	1036,18	1025,52	-1,04	985,66	-5,13
La Citec	1001,65	986,96	-1,49	957,29	-4,63
U Nariño	1167,62	1126,81	-3,62	1101,00	-6,05
Los Milagros	1051,53	1042,47	-0,87	1003,27	-4,81
Viento Libre	1242,33	1213,85	-2,35	1168,90	-6,28
Wilquipamba	1355,33	1319,43	-2,72	1280,39	-5,85

Tabla C19. Ampacidad calculada con viento a 60°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 60°				
	Rac a 25°C Ω/m		Rdc a 20°C Ω/m		
	0,000066510		0.0000644		
	Rac a 100°C Ω/m		Global		
	0,000086260		Directa		
Amp IEEE 60°	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Direc	
Villarrosa	1168,05	1166,71	-0,11	1133,18	-3,08
Hda la Guaira	1166,57	1165,19	-0,12	1132,02	-3,05
Socomba	1187,77	1186,62	-0,10	1152,22	-3,09
Col Pailitas	1170,80	1169,39	-0,12	1136,47	-3,02
La Llana	1170,67	1169,46	-0,10	1135,71	-3,08
Aguas Claras	1180,36	1179,36	-0,08	1144,45	-3,14
San Lorenzo	1195,99	1206,10	0,84	1156,91	-3,38
El Dificil	1138,32	1140,93	0,23	1104,53	-3,06
Carmen de Bolivar	852,95	835,88	-2,04	786,69	-8,42
El Guamo	859,51	842,20	-2,06	795,09	-8,10
Nueva Florida	1111,39	1115,41	0,36	1081,27	-2,79
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	1336,99	1322,71	-1,08	1285,47	-4,01
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	1155,10	1155,58	0,04	1126,74	-2,52
Hda Las Brisas	1539,14	1574,57	2,25	1553,73	0,94
Hda Tigeros	1156,45	1154,42	-0,18	1121,89	-3,08
UIS	1182,51	1185,76	0,27	1151,27	-2,71
Hda La Esperanza	1246,82	1244,61	-0,18	1212,90	-2,80
Cachira	1198,73	1205,42	0,55	1162,15	-3,15
Carare	1165,06	1165,52	0,04	1136,88	-2,48
Buenavista	1002,61	979,67	-2,34	946,70	-5,91
San Cayetano	1170,96	1180,53	0,81	1146,23	-2,16

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 60°				
	Rac a 25°C		Rdc a 20°C Ω/m		
	Ω/m				
	0,000066510		0.0000644		
	Rac a 100°C				
Ω/m					
0,000086260		Global		Directa	
Amp IEEE 60°	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Direc	
Sabaneta	1173,62	1184,74	0,94	1147,88	-2,24
La Cabrera	1156,92	1165,77	0,76	1132,50	-2,16
La Pelada	1154,64	1164,28	0,83	1129,17	-2,26
Fca Tesorito	1165,88	1175,67	0,83	1140,85	-2,19
San Felix	1423,26	1409,98	-0,94	1377,18	-3,35
El Nus	1110,78	1116,84	0,54	1085,83	-2,30
Las Violetas	793,35	806,37	1,61	766,07	-3,56
Pto Berrio	1106,90	1110,89	0,36	1089,96	-1,55
Anori	1128,21	1137,14	0,79	1102,63	-2,32
El Peñol	1132,39	1143,29	0,95	1108,29	-2,17
La Selva	1131,91	1142,88	0,96	1107,74	-2,18
Hda Tunez	1043,25	1050,20	0,66	1022,01	-2,08
La Nación	1093,94	1101,02	0,64	1071,51	-2,09
La Salada	1108,39	1115,77	0,66	1080,07	-2,62
Cacaoteras	1002,68	1012,64	0,98	990,95	-1,18
La Laguna	1189,21	1208,36	1,58	1163,51	-2,21
Jardin Botánico	1160,93	1167,64	0,57	1135,86	-2,21
La Bohemia	1103,18	1108,03	0,44	1080,53	-2,10
Argelia	1102,42	1109,47	0,64	1074,86	-2,56
Tenerife	1121,34	1132,87	1,02	1093,54	-2,54
Buga	1142,20	1146,98	0,42	1120,98	-1,89
Mateguadua	1135,74	1140,62	0,43	1114,11	-1,94
Cenicana	1183,72	1182,11	-0,14	1156,44	-2,36
Gja Expo	916,59	895,19	-2,39	855,22	-7,18
La Union	895,93	874,84	-2,41	834,06	-7,42
Planeta Rica	913,05	888,89	-2,72	873,33	-4,55
El Salado	881,20	857,55	-2,76	842,34	-4,61
Turipana	895,77	871,80	-2,75	857,27	-4,49
La Doctrina	1215,00	1206,02	-0,74	1195,48	-1,63
Chima	907,90	883,69	-2,74	869,28	-4,44

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 60°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
Amp IEEE 60°	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 60°	%E Amp Direc	
Colomboy	898,50	874,70	-2,72	858,08	-4,71
Primates	994,66	1005,17	1,05	957,63	-3,87
El Limon	1342,88	1319,46	-1,77	1290,74	-4,04
Fuente Bella	1351,18	1326,13	-1,89	1295,64	-4,29
Villa Hermosa	1169,87	1179,15	0,79	1131,39	-3,40
Armero	1136,88	1139,78	0,25	1102,44	-3,12
Hda Garcia	1130,41	1133,46	0,27	1095,19	-3,22
La Esperanza	1126,34	1129,03	0,24	1092,48	-3,10
El Salto	1259,16	1241,06	-1,46	1204,86	-4,51
La Salvajina	1105,60	1110,86	0,47	1082,60	-2,12
Hda Carpinterias	1190,98	1202,28	0,94	1166,57	-2,09
Paispa	1135,21	1146,06	0,95	1109,03	-2,36
La Sierra	1132,70	1140,93	0,72	1105,24	-2,48
La Citec	1096,85	1100,24	0,31	1073,70	-2,16
U Nariño	1281,78	1259,27	-1,79	1236,23	-3,68
Los Milagros	1148,80	1159,00	0,88	1123,87	-2,22
Viento Libre	1360,12	1352,23	-0,58	1312,03	-3,67
Wilquipamba	1483,73	1469,51	-0,97	1434,56	-3,43

Tabla C20. Ampacidad calculada con viento a 90°

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 90°				
	Rac a 25°C Ω/m		Rdc a 20°C Ω/m		
	0,000066510		0.0000644		
	Rac a 100°C Ω/m				
	0,000086260		Global		Directa
Amp IEEE 90°	Amp CIGRÉ 90°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 90°	%E Amp Direc	
Villarrosa	1200,11	1205,88	0,48	1173,47	-2,27
Hda la Guaira	1198,60	1204,31	0,47	1172,26	-2,25
Socomba	1220,29	1226,36	0,49	1193,10	-2,28
Col Pailitas	1202,93	1208,64	0,47	1176,82	-2,22
La Llana	1202,78	1208,70	0,49	1176,07	-2,27
Aguas Claras	1212,68	1218,86	0,51	1185,12	-2,33
San Lorenzo	1227,66	1245,28	1,41	1197,70	-2,50
El Dificil	1169,17	1178,78	0,82	1143,60	-2,24
Carmen de Bolivar	874,20	835,88	-4,58	786,69	-11,12
El Guamo	880,92	842,20	-4,60	795,09	-10,80
Nueva Florida	1141,39	1152,28	0,95	1119,27	-1,98
La Maravilla	868,33	900,60	3,58	835,92	-3,88
Teorama	762,80	783,12	2,59	716,79	-6,42
Convención	1373,91	1367,27	-0,49	1331,27	-3,20
Tonchala	796,09	800,83	0,59	746,07	-6,71
Risaralda	797,88	799,07	0,15	748,59	-6,58
Salazar	807,90	823,35	1,88	758,18	-6,56
Gja HJC	917,79	945,49	2,93	888,23	-3,33
Pamplona	866,44	913,17	5,12	845,93	-2,42
UFPS	833,93	855,31	2,50	795,28	-4,86
El Centro	1186,89	1194,50	0,64	1166,62	-1,74
Hda Las Brisas	1583,44	1630,09	2,86	1609,96	1,65
Hda Tigreiros	1188,60	1193,68	0,43	1162,26	-2,27
UIS	1214,72	1225,31	0,86	1191,96	-1,91
Hda La Esperanza	1281,18	1286,56	0,42	1255,90	-2,01
Cachira	1231,09	1245,29	1,14	1203,46	-2,30
Carare	1197,09	1204,73	0,63	1177,05	-1,70
Buenavista	1028,96	979,67	-5,03	946,70	-8,69
San Cayetano	1202,71	1219,79	1,40	1186,63	-1,35

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 90°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
	0,000086260	Amp IEEE 90°	Amp CIGRÉ 90°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 90°
Sabaneta	1205,32	1224,02	1,53	1188,38	-1,43
La Cabrera	1188,36	1204,64	1,35	1172,47	-1,36
La Pelada	1185,98	1203,05	1,42	1169,11	-1,44
Fca Tesorito	1197,48	1214,77	1,42	1181,10	-1,39
San Felix	1463,08	1458,13	-0,34	1426,43	-2,57
El Nus	1141,23	1154,37	1,14	1124,40	-1,50
Las Violetas	812,81	806,37	-0,80	766,07	-6,10
Pto Berrio	1137,45	1148,47	0,96	1128,24	-0,82
Anori	1158,82	1175,01	1,38	1141,64	-1,50
El Peñol	1162,96	1181,18	1,54	1147,33	-1,36
La Selva	1162,47	1180,75	1,55	1146,77	-1,37
Hda Tunez	1071,91	1085,61	1,26	1058,36	-1,28
La Nación	1123,89	1138,00	1,24	1109,47	-1,30
La Salada	1138,78	1153,29	1,26	1118,79	-1,79
Cacaoteras	1029,83	1046,34	1,58	1025,36	-0,44
La Laguna	1220,80	1247,84	2,17	1204,47	-1,36
Jardin Botánico	1192,63	1206,74	1,17	1176,00	-1,41
La Bohemia	1133,65	1145,55	1,04	1118,97	-1,31
Argelia	1132,69	1146,84	1,23	1113,39	-1,73
Tenerife	1151,73	1170,58	1,61	1132,56	-1,69
Buga	1173,61	1185,63	1,01	1160,50	-1,13
Mateguadua	1166,98	1179,07	1,03	1153,45	-1,17
Cenicana	1216,94	1222,70	0,47	1197,90	-1,59
Gja Expo	940,49	895,19	-5,06	855,22	-9,97
La Union	919,41	874,84	-5,10	834,06	-10,23
Planeta Rica	937,60	888,89	-5,48	873,33	-7,36
El Salado	905,12	857,55	-5,55	842,34	-7,45
Turipana	919,99	871,80	-5,53	857,27	-7,32
La Doctrina	1249,67	1248,10	-0,13	1237,92	-0,95
Chima	932,36	883,69	-5,51	869,28	-7,26

ESTACIÓN	Ampacidad con viento a 90°				
	Rac a 25°C Ω/m	Rdc a 20°C Ω/m			
	0,000066510	0.0000644			
	Rac a 100°C Ω/m	Global		Directa	
	0,000086260	Amp IEEE 90°	Amp CIGRÉ 90°	%E Amp Globa	Amp CIGRÉ 90°
Colomboy	922,73	874,70	-5,49	858,08	-7,54
Primates	1020,54	1037,31	1,62	991,32	-2,95
El Limon	1380,72	1364,78	-1,17	1337,04	-3,27
Fuente Bella	1389,20	1371,60	-1,28	1342,14	-3,51
Villa Hermosa	1200,92	1217,54	1,36	1171,35	-2,52
Armero	1167,64	1177,54	0,84	1141,44	-2,30
Hda Garcia	1161,00	1171,02	0,86	1134,02	-2,38
La Esperanza	1156,86	1166,50	0,83	1131,17	-2,27
El Salto	1294,27	1283,26	-0,86	1248,28	-3,68
La Salvajina	1136,10	1148,42	1,07	1121,11	-1,34
Hda Carpinterias	1223,10	1242,08	1,53	1207,54	-1,29
Paispa	1166,00	1184,21	1,54	1148,41	-1,53
La Sierra	1163,61	1179,12	1,32	1144,62	-1,66
La Citec	1127,31	1137,68	0,91	1112,04	-1,37
U Nariño	1318,24	1302,98	-1,17	1280,72	-2,93
Los Milagros	1179,96	1197,57	1,47	1163,61	-1,40
Viento Libre	1397,81	1397,99	0,01	1359,14	-2,85
Wilquipamba	1524,81	1519,14	-0,37	1485,36	-2,66

ANEXO D

CÁLCULOS TIPO EN LAS METODOLOGÍAS IEEE Y CIGRÉ

A continuación se presenta dos ejemplos de aplicación de las metodologías IEEE y CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en estado estable. Los parámetros de entrada del caso base son los siguientes:

Municipio: Valledupar

Departamento: Cesar

Latitud: 10,20° Norte

Altura sobre el nivel del mar: 70 m

Día: 21 de Junio (N=173 Solsticio de verano)

Hora del día: 12 m

Ángulo horario: 0°

Diámetro del conductor: 28,1 mm

Diámetro hilos capa externa: 4,021 mm

Temperatura: 41,6°

Temperatura límite: 100° C

Tfilm: $0,5 \cdot (100 + 41,6) = 71^\circ\text{C}$

Velocidad del viento: 1,2 m/s

Ángulo de incidencia del viento: 30°

Resistencia a.c. a 100° C: 0,00008626 (Ω/m)

Cálculo de la máxima corriente de carga utilizando la metodología del IEEE

Viscosidad del aire:

$(0,000001458 \cdot (71 + 273)^{1,5}) / (383,4 + 71) = 2,05\text{E-}5$

Densidad del aire:

$$(1,293-0,0001525*70+0,000000006379*70^2)/(1+0,00367*71) = 1,018$$

Conductividad térmica del aire:

$$0,02424+0,00007477*71-0,000000004407*71^2 = 0,0295$$

Refrigeración por radiación: Ecuación (9)

$$0,0178*28,1*0,5*((100+273)/100)^4 -((41,6+273)/100)^4) = 23,91 \text{ (W/m)}$$

Calentamiento por efecto solar: Ecuación (14)

$$0,5*876*\text{SENO}(1,8105)*0,0281 = 11,96 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección natural: Ecuación (2)

$$0,0205*1,018^{0,5}*28,1^{0,75}*(100-41,6)^{1,25} = 40,75 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección forzada viento leve: Ecuación (4)

$$(1,01+0,0372*((28,1*1,018^{1,2})/(2,05E-5))^{0,52})^{0,0295}*(100-41,6)^{0,76965271} = 86,46 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección forzada viento fuerte: Ecuación (3)

$$0,0119*(28,1*1,018^{1,2}/2,05E-5)^{0,6}^{0,0295}^{0,76965271}*(100-41,6) = 85,71 \text{ (W/m)}$$

Factor de refrigeración por convección seleccionado: 86,46 (W/m)

Ampacidad: Ecuación (1)

$$((23,91+86,46-11,96)/0,0000863)^{0,5} = 1067,9 \text{ (A)}$$

Cálculo de la máxima corriente de carga utilizando la metodología del CIGRÉ

Viscosidad del aire:

$$0,0000132+0,000000095*71 = 1,99E-5$$

Densidad del aire:

$$\text{EXP}(-0,000116*70) = 0,9919$$

Conductividad térmica del aire:

$$0,0242+0,000072*71 = 0,02929$$

Factor de rugosidad:

$$4,021/(2*(28,1-2*4,021)) = 0,10023$$

Número de Reynolds:

$$0,9919*1,2*0,0281/1,99E-5 = 1678,58$$

Número de Grashof:

$$0,0281^3*(100-41,6)*9,807/((71+273)*1,99E-5^2) = 93094,04$$

Número de Prandtl:

$$0,715-0,00025*71 = 0,7$$

Refrigeración por radiación: Ecuación (39)

$$3,1416*0,0281*0,5*0,000000056697*((100+273)^4-(41,6+273)^4) = 23,93 \text{ (W/m)}$$

Calentamiento por efecto solar: Ecuación (28)

$$0,5*876*0,0281 = 12,31 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección natural: Ecuaciones (30) y (34)

$$3,1416 \cdot 0,02929 \cdot (100 - 41,6) \cdot 0,48 \cdot 64914,47^{0,25} = 41,18 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección forzada a 30°: Ecuaciones (30) y (35.1)

$$3,1416 \cdot 0,02929 \cdot (100 - 41,6) \cdot 0,730814304135 \cdot 21,17 = 83,18 \text{ (W/m)}$$

Refrigeración por convección seleccionada: 83,18 (W/m)

Ampacidad: Ecuación (19)

$$((83,18 + 23,93 - 12,31) / 0,00008626)^{0,5} = 1048,32 \text{ (A)}$$