

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**CÁLCULO Y ACTUALIZACIÓN DEL LÍMITE TÉRMICO  
DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN EL SISTEMA DE  
POTENCIA DE CADAFE**

Prof. Guía: Ing. Luis Cesín  
Tutor Industrial: Ing. Oswaldo Paredes

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Ruiz R., Ilwin A.  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2007

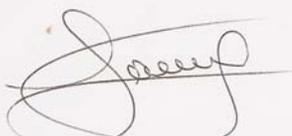
## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 26 de noviembre de 2007

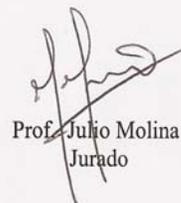
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Ilwin A., Ruíz R., titulado:

### “CALCULO Y ACTUALIZACIÓN DEL LÍMITE TÉRMICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN EL SISTEMA DE POTENCIA DE CADAFE”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la mención de Potencia, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Francisco Marchena  
Jurado



Prof. Julio Molina  
Jurado



Prof. Luis S. Cestín  
Prof. Guía

## **DEDICATORIA**

*A las mujeres más importantes en mi vida, mi abuela, mi madre y mis hermanas, por el apoyo y amor que me han brindado en todo momento, sin su ayuda y dedicación no hubiera podido cumplir las metas que he conseguido hasta ahora, espero siempre contar con ellas. Gracias.*

*Ilwin Antonio Ruiz Ramirez*

## **RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS**

A mi profesor guía Ing. Luis Cesín y a mi tutor Ing. Oswaldo Paredes por darme la orientación necesaria para desarrollar el Trabajo Especial de Grado.

Al Ing. Francisco Marchena por su ayuda en la culminación del Trabajo Especial de Grado y defensa del mismo.

A los compañeros del Grupo de Operaciones de Ingeniería de Operaciones por su ayuda.

A los ingenieros Osman Tovar, Darihelen Montilla, Andrés De Andrade y Johenny Guerra, por darme toda la ayuda posible para cumplir el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

A los amigos que han estado conmigo durante toda la carrera, Galeno, Julide, Michael, Jean Michel, Benancio, William, Denis, Romero, Marcel, Colmenares, Oswaldo, Ibarra, Izquierdo, Stiven, Tulio, Chachi, Miguel, Galarraga, Victor, Erika, Perú, Raúl, Tuto, Antonio, Lobo, Dickxon's, Jesús, Freddy, que ya forman parte de mi familia.

Y a los nuevos amigos Cristian, Andrés, Victor, Fragachan, Alex, Alexis, Leo, Nohelys, Héctor, Chema, Félix, Aliño, Paulkemon, Deniter, Tostón, Moronta.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	III
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS .....	IV
ÍNDICE GENERAL .....	V
LISTA DE TABLAS .....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE GRÁFICAS .....	XII
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	XIII
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	XIV
MAPAS.....	XV
RESUMEN .....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.1 Descripción general .....	4
1.2 Objetivo general.....	5
1.3 Objetivos específicos .....	5
1.4 Metodología .....	6
1.4.1 Análisis de problemas de transferencia de calor.....	6
1.4.2 Etapas desarrolladas durante el trabajo.....	7
1.5 Sistema de transmisión de CADAFE.....	8
1.6 Universo de estudio.....	10
CAPÍTULO II.....	13
MARCO TEÓRICO.....	13

FUNDAMENTOS DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR .....	13
2.1 Descripción general .....	13
2.2 Mecanismos de transferencia de calor .....	13
2.3 Conducción .....	14
2.4 Convección .....	15
2.5 Radiación .....	18
2.6 Equilibrio térmico .....	21
2.6.1 Balance de energía en una superficie.....	23
CAPÍTULO III.....	25
EQUILIBRIO TÉRMICO Y LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN .....	25
3.1 Las líneas de transmisión y la conservación de la energía.....	25
3.2 Pérdidas por convección .....	26
3.3 Pérdidas por radiación.....	29
3.4 Ganancia solar.....	29
3.5 Ganancia por efecto Joule.....	31
3.6 Expresiones para las propiedades del aire, ángulo solar y radiación solar.....	32
3.6.1 Propiedades del aire .....	32
3.6.2 Ángulo solar.....	34
3.6.3 Radiación .....	36
CAPÍTULO IV.....	38
CLIMA Y FACTORES METEOROLÓGICOS.....	38
4.1 Descripción general. ....	38
4.2 Tiempo y clima. ....	38
4.3 Factores geográficos que influyen en la variación del clima.....	39
4.4 Características del clima en Venezuela.....	40

4.4.1 Descripción general .....	40
4.4.2 Estaciones meteorológicas .....	42
4.4.2.1 Instrumentos de medición .....	42
4.4.2.2 Ubicación de estaciones meteorológicas en Venezuela.....	43
4.4.3 Datos meteorológicos.....	45
4.4.3.1 Temperatura .....	46
4.4.3.2 Viento.....	49
4.4.3.3 Radiación .....	51
4.4.3.4 Densidad del aire.....	52
CAPÍTULO V.....	53
CONDUCTORES ELÉCTRICOS.....	53
5.1 Descripción general .....	53
5.2 Capacidad térmica del conductor.....	53
5.3 Especificaciones técnicas.....	54
5.3.1 Características según el tipo de conductor.....	54
5.3.1.1 Conductores de cobre desnudo .....	54
5.3.1.2 Conductores AAC.....	55
5.3.1.3 Conductores AAAC.....	56
5.3.1.4 Conductores ACAR.....	57
5.3.1.5 Conductores ACSR.....	58
5.3.2 Resistencia de los conductores.....	59
5.3.2.1 Resistencia dc.....	59
5.3.2.2 Resistencia ac.....	60
5.3.2.3 Resistencia y temperatura .....	62
5.3.3 Factor de absorción solar y emisividad.....	62
5.4 Condiciones del cálculo térmico de los conductores .....	65

5.4.1 Condiciones de operación .....	65
5.5 Condiciones de operación .....	68
5.6 Criterios de cálculo .....	69
CAPÍTULO VI.....	70
PROGRAMA DE CÁLCULO.....	70
6.1 Descripción general .....	70
6.2 Características del programa.....	70
6.3 Muestra del programa .....	71
CAPÍTULO VII .....	76
RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	76
7.1 Resultados del cálculo del límite térmico .....	76
7.2 Flujo de carga.....	89
7.3 Estudio de flujo de carga en el sistema.....	90
CONCLUSIONES .....	92
RECOMENDACIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍA .....	95
GLOSARIO .....	96
ANEXOS .....	99

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla donde se expresa la constante solar del azimut	36
Tabla 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en Venezuela	43
Tabla 3. Datos de la ubicación de la estación meteorológica de muestra	46
Tabla 4. Temperatura máxima medida por la estación meteorológica tomada como muestra (Cumaná)	46
Tabla 5. Temperatura mínima registrada por la estación de muestra (Cumaná)	47
Tabla 6. Temperatura máxima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y la probabilidad de ocurrencia de este valor	47
Tabla 7. Temperatura mínima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y la probabilidad de ocurrencia de este valor	47
Tabla 8. Temperatura promedio calculada para la estación muestra (Cumaná) con su probabilidad de ocurrencia	48
Tabla 9. Resumen de las temperaturas calculadas para la estación muestra (Cumaná)	48
Tabla 10. Radiación solar máxima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y su probabilidad de ocurrencia	51
Tabla 11. Radiación solar mínima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y su probabilidad de ocurrencia	51
Tabla 12. Insolación y radiación solar máxima para la estación muestra (Cumaná) en 10 años	52
Tabla 13. Valor de la densidad relativa del aire para la temperatura promedio en la estación muestra (Cumaná)	52
Tabla 14. Características físicas de los conductores tipo ACSR	59
Tabla 15. Características eléctricas de los conductores tipo ACSR (2)	59

Tabla 16. Temperatura máxima de operación de los conductores en condición de emergencia	68
Tabla 17. Resultado del cálculo de límite térmico comparados con los valores anteriores	76
Tabla 18. Resultado del cálculo del límite térmico para la línea Barinas Sipororo, conductor nuevo, condición de operación normal	85
Tabla 19. Resultados del cálculo de límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor viejo, condición de operación normal	86
Tabla 20. Cálculo del límite térmico para la línea Barinas Sipororo en condición de operación de emergencia	86
Tabla 21. Cálculo del límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor nuevo, variación de la temperatura ambiente	87
Tabla 22. Cálculo del límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor viejo, variación de la temperatura ambiente	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representación de los valores de velocidades de vientos promedios en todo el país para cada uno de los meses del año .....	50
Figura 2 Representación de los alambres AAC .....	56
Figura 3. Alambres de aleación de aluminio trenzados concéntricamente tipo AAAC .....	57
Figura 4 Diversas configuraciones para los conductores tipo ACAR .....	58
Figura 5. Diversas configuraciones para los conductores tipo ACSR .....	58
Figura 6. Factor de absorción solar y emisividad medida para varios conductores con el paso de los años.....	64
Figura 7 Curva de horas-temperatura en función del porcentaje de pérdida de rigidez mecánica para conductores de aluminio. ....	67

**LISTA DE GRÁFICAS**

Gráfica 1. Representación de los datos medidos para la temperatura después de calcular el valor promedio por año.....49

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Primera pantalla del programa de cálculo: nombre de la línea. .....	72
Ilustración 2. Segunda pantalla del programa: selección de estado.....	73
Ilustración 3 Tercera pantalla del programa: datos del medio ambiente .....	73
Ilustración 4. Cuarta pantalla del programa: selección del conductor .....	74
Ilustración 5. Quinta pantalla del programa: datos de operación del conductor.....	74
Ilustración 6. Sexta pantalla del programa: exposición de los resultados.....	75

## **SIGLAS Y ABREVIATURAS**

a.c. corriente alterna.

AAAC: All Aluminium Alloy Conductors.

AAC: All Aluminium Conductor.

Abs. Absoluto.

ACAR: Aluminium Conductor Alloy Reinforced.

ACSR: Aluminium Conductor Steel Reinforced.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

c.a. corriente alterna.

c.c. corriente continúa.

CADAFE: Compañía Anónima de Administración y Fomento Eléctrico.

d.c. corriente continua

IACS: International Annealed Copper Standard.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Máx. Máximo.

MCM: Mil Circular Mil.

Mín. Mínimo.

PJM: Pennsylvania New Jersey Maryland.

## MAPAS

Mapa 1. Mapa de las regiones de Venezuela que conforman el sistema de CADAFE.....	10
Mapa 2. Mapa de la distribución y ubicación de las líneas de CADAFE en Venezuela.....	12
Mapa 3. Ubicación de algunas estaciones meteorológicas .....	45

**Ruiz R., Ilwin A.**

**CÁLCULO Y ACTUALIZACIÓN DEL LÍMITE TÉRMICO DE LAS  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA DE  
CADAFFE.**

**Prof. Guía: Ing. Luis Cesín. Tutor Industrial: Ing. Oswaldo Paredes. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Institución: CADAFFE. 2007. 99 h. + Anexos.**

**Palabras claves:** línea de transmisión, equilibrio térmico, capacidad de conducción.

**Resumen.** Este trabajo tiene como finalidad realizar la actualización de la base de datos del sistema de potencia de CADAFFE, en esta etapa como parte del desarrollo de una base de datos renovada, surge la necesidad de determinar la capacidad térmica de los conductores de las líneas, basándose en condiciones ambientales y operativas actuales las cuales difieren a cuando las líneas entraron en servicio. Los objetivos del trabajo fueron recopilar la información de las características ambientales para así determinar sus efectos sobre las líneas de transmisión, también se consideró el cambio de las características externas del conductor debido al paso de los años. Se analizó la información de las características eléctricas de los conductores. El trabajo se basa principalmente en el método de la IEEE 738 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, para realizar el cálculo del límite térmico y en su adaptación a las condiciones de los estados de Venezuela donde se encuentran ubicadas y las características del Sistema de CADAFFE. Se realizó un programa de cálculo el cual permitió un fácil manejo de los datos recopilados para todos los casos de estudios establecidos en la ejecución del trabajo. Los resultados obtenidos se compararon con los datos previos manejados por la empresa para así establecer los valores más adecuados. Se creó una nueva base de datos, especificando las condiciones ambientales donde se encontraba la línea y las condiciones de los conductores. Con la nueva base de datos se realizaron varios estudios de flujo de carga para constatar el comportamiento del sistema con la nueva información y poder comparar los resultados que se obtuvieron empleando la información de la base de datos anterior. Se creó una base de datos única de la capacidad térmica de los conductores.

## INTRODUCCIÓN

En este estudio se analizará la capacidad de conducción de corriente de los conductores de las líneas que conforman el sistema de transmisión de CADAFE, en función de los parámetros ambientales.

Los diversos fabricantes de conductores entregan una serie de datos de sus productos, donde se incluye una capacidad de corriente dada para ciertas condiciones, las cuales son dadas por las pruebas que estos realizan en sus laboratorios. Estas condiciones solo se obtienen en el laboratorio de pruebas y el hecho que el medio ambiente es muy variable de un sitio a otro o con el simple hecho de cambiar la altura, hace difícil entregar una base de datos acorde a todas las combinaciones posibles de casos.

Por lo tanto, es necesario el desarrollo de una metodología para el cálculo de la capacidad en los conductores bajo cualquier condición meteorológica y de operación, lo cual permitirá realizar un verdadero estudio de la capacidad de transporte del conductor para las condiciones de diseño impuestas según el ambiente existente en el lugar donde se ubica el sistema de transmisión.

Esta metodología está basada en el concepto de equilibrio térmico, concepto desarrollado en los temas de termodinámica y transferencia de calor. Donde se entiende como transferencia de calor a la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura. Este estudio es complejo dado que intervienen una gran cantidad de variables en el proceso de transferencia de calor entre el conductor y el medio ambiente.

Entre los elementos a considerar en la transferencia de calor se tiene el concepto de número de Reynolds, el efecto pelicular entre otros.

Todo esto trae como resultado una optimización en el empleo de los conductores en las líneas del sistema, dado que se va a poder determinar en qué condiciones se puede poner a trabajar al sistema en función de la temperatura de operación la cual es dependiente del ciclo de carga, a fin de no perder propiedades mecánicas y disminuir las fallas en el sistema.

Los datos ambientales serán recopilados y procesados para obtener los valores a emplearse en el cálculo de la capacidad térmica de los conductores, igual se procede con los datos del conductor.

Como objetivo principal se tiene el de calcular y actualizar el límite térmico de las líneas de transmisión de CADAFE para los niveles de tensión de 115kV, 230kV y 400kV.

En el CAPÍTULO I se presenta el planteamiento del problema, el objetivo principal y los objetivos específicos. Se plantea la metodología desarrollada durante la realización del trabajo. Se especifica el universo de estudio y se da una descripción del sistema de transmisión de CADAFE, es decir, se enumeran y describen las líneas que se van a analizar, se da su ubicación y características principales.

En el CAPÍTULO II incluye los aspectos teóricos que sustentaron la ejecución del cálculo térmico en las líneas de transmisión.

El CAPÍTULO III presenta las ecuaciones de equilibrio térmico aplicado a las líneas de transmisión y los datos necesarios para el cálculo.

El CAPÍTULO IV muestra la información relacionada con el análisis de los datos del medio ambiente indispensables para el desarrollo del trabajo.

El CAPÍTULO V se presenta la información técnica de los conductores eléctricos empleados en las líneas de transmisión de CADAFE y su análisis. También se incluyen las premisas y condiciones generales establecidas para la realización de los cálculos para todas las líneas del sistema.

En el CAPÍTULO VI se presenta el programa de cálculo desarrollado, se realiza una muestra de ejecución para compararlo con los resultados dados por la norma IEEE Std 738.

El CAPÍTULO VII muestra los resultados obtenidos, y los datos considerados en cada uno de ellos empleando el programa desarrollado a todo el universo de estudio planteado. De igual forma se presenta la aplicación de la base de datos creada a partir del cálculo térmico, con estos datos se realiza el flujo de carga en todo el sistema comparando estos con los que se manejaban anteriormente.

Se presenta por último las conclusiones y las recomendaciones derivadas del desarrollo del trabajo.

En los anexos se muestra información de los datos empleados para el cálculo tanto del medio ambiente, como de las líneas de transmisión, se muestran también los resultados completos, la base de datos creada y el resultado del flujo de carga con los datos previos de las líneas y con los nuevos datos obtenidos con este trabajo.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción general

El sistema eléctrico de transmisión de CADAFE presenta un total de 360 líneas, distribuidas en 25 tipos de conductores a lo largo de 19 estados del país, convirtiéndolo en uno de los principales proveedores de electricidad, por lo cual es de vital importancia que preste un servicio continuo y de calidad en las diferentes áreas de influencia. Para poder lograr esto se hace necesario contar con datos que permitan determinar el adecuado funcionamiento de sus equipos para así poder detectar las posibles fallas que perturben el sistema.

CADAFE debido a que se encuentra a lo largo del todo el país, distribuye las responsabilidades de operación del sistema de transmisión en tres despachos de carga, Despacho de Carga Oriental, Central y Occidental, cada uno de ellos considera datos asociados al límite térmico de las líneas de transmisión de acuerdo a la información suministrada por los fabricantes, relación actual de transformadores de corriente y condiciones operativas especiales, pero en ninguno de los casos se toma en cuenta variables relevantes que afectan de forma directa el límite térmico de las líneas de transmisión, como lo son la temperatura ambiente, la velocidad de viento, la altura de la línea entre otros.

El Grupo de Trabajo de Ingeniería de Operaciones tiene entre sus funciones, prestar apoyo a los diferentes Despachos de Carga, en lo referente a propuestas para la adecuada operación del Sistema de Transmisión o algún área determinada, es por ello que se requiere realizar un estudio detallado para el cálculo del límite térmico de

las líneas de transmisión de CADAPE, considerando las condiciones especiales para cada conductor, a fin de verificar si actualmente se están subutilizando o sobreutilizando los conductores de las líneas de transmisión.

CADAPE cuenta como herramienta de simulación de sistemas de potencia el DIGSILENT POWER FACTORY, en el cual se encuentran cargados los datos de las líneas, transformadores, generadores, entre otros, y con el cual se realizan estudios de flujo de carga, cortocircuitos y estabilidad, por lo cual es de vital importancia cargar el sistema con datos confiables.

## **1.2 Objetivo general**

En el diseño y análisis de un sistema de transmisión es necesario conocer las características físicas de los conductores empleados en la construcción de las líneas aéreas. La capacidad térmica de un conductor está relacionada con la corriente eléctrica que puede transportar en función de su temperatura. Por lo tanto para la realización de este trabajo el objetivo principal es el de calcular el límite térmico de las líneas de transmisión de CADAPE en los niveles de tensión de 115kV, 230kV y 400kV. Con la realización de este cálculo es posible entonces crear una base de datos actualizada.

## **1.3 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos cumplidos en este Trabajo Especial de Grado fueron los siguientes:

- Verificar los datos de las diferentes líneas de transmisión en los niveles de tensión de 115kV, 230kV y 400kV del sistema eléctrico de CADAFE.
- Realizar el programa para el cálculo de la capacidad térmica de las líneas de transmisión.
- Determinar la capacidad térmica de los conductores del sistema de CADAFE
- Actualizar la base de datos del DIGSILENT POWER FACTORY con los parámetros calculados.
- Realizar flujos de carga con el uso del DIGSILENT POWER FACTORY.

## **1.4 Metodología**

### **1.4.1 Análisis de problemas de transferencia de calor**

A fin de resolver el problema de la transferencia de calor en una línea de transmisión, es necesario un procedimiento sistemático, el cual consta de los siguientes pasos:

1. Conocimiento: después de leer cuidadosamente el problema, se establece lo que se conoce explícitamente de éste.
2. Planteamiento: se establecen de forma breve y concisa lo que se quiere encontrar.
3. Especificación; se desarrolla un diagrama del sistema físico, se representan la superficie de control y se identifican los procesos de transferencia de calor relevantes.

4. Consideración: se hace una lista de suposiciones que simplifiquen el problema.
5. Compilación: se reúnen los valores de las características necesarias para los cálculos siguientes y se identifica la fuente de la que se obtienen.
6. Resolución: se comienza el análisis aplicando las leyes de la conservación apropiadas y se introducen las ecuaciones de flujo necesarias. Se desarrolla el análisis lo más completo posible antes de sustituir valores numéricos. Se ejecutan los cálculos necesarios para obtener los resultados deseados.
7. Comparación: se analizan los resultados, donde se incluye un resumen de conclusiones, se realiza un análisis de las suposiciones originales y una inferencia de las tendencias obtenidas.

#### **1.4.2 Etapas desarrolladas durante el trabajo**

El presente trabajo se realizó en varias etapas, las cuales se indican a continuación:

- 1°. Etapa: consistió en la recopilación de la información, entre ella se incluye la data de las estaciones meteorológicas ubicadas en el país y la información de las líneas del sistema de CADAFE.
- 2°. Etapa: después de recopilar la información se procedió a realizar un análisis de los datos obtenidos, con la finalidad de establecer la información relevante para realizar el cálculo de límite térmico.
- 3°. Etapa: se desarrolló el programa de cálculo para la simplificación en el manejo de la información.

- 4°. Etapa: se realizó el cálculo del límite térmico, previa verificación de los resultados que se obtienen.
- 5°. Etapa: se analizaron los resultados obtenidos para todas las condiciones establecidas en el cálculo.
- 6°. Etapa: se creó la base de datos definitiva que va a manejar la empresa, comparándola con la base de datos anterior al desarrollo del trabajo.
- 7°. Etapa: se realizó el flujo de carga con ambas bases de datos con la finalidad de comprobar los cambios que ocurren en el sistema.
- 8°. Etapa: se realizó el informe donde se reportaron los resultados obtenidos

### **1.5 Sistema de transmisión de CADAFE**

CADAFE atiende al 93% del territorio nacional, a través de nueve regiones. La regionalización del sistema busca dar una mayor flexibilidad y eficiencia operativa, es decir, se pretende dar respuestas más rápidas a los problemas de servicio que se puedan presentar y organizar mejor el desarrollo del sistema.

Las nueve regiones son las siguientes:

- Región 1: su área de cobertura geográfica comprende los estados Anzoátegui y Sucre, con una superficie de 55.100 km<sup>2</sup>. Tiene su sede en Cumaná.
- Región 2: fue creada en octubre de 1998. Cubre el área geográfica de 69.100 km<sup>2</sup>, en los estados Monagas y Delta Amacuro. Su sede se ubica en Maturín.

- Región 3: es responsable de distribuir y comercializar la energía en los estados Guárico y Apure, los cuales tienen una superficie conjunta de 141.486 km<sup>2</sup>, con sede en San Fernando de Apure.
- Región 4: cubre el área geográfica de 14.964 km<sup>2</sup>, en los estados Aragua y Miranda. Su sede se ubica en Maracay.
- Región 5: esta región comprende los estados Barinas, Portuguesa y Cojedes con una superficie de 65.200 km<sup>2</sup>, su sede está en Acarigua.
- Región 6: esta región comprende los estados Carabobo y Yaracuy con una superficie de 11.750 km<sup>2</sup>.
- Región 7: esta región incluye los estados Táchira, Trujillo y Mérida con una superficie de 29.800 km<sup>2</sup>, su sede se encuentra en San Cristóbal.
- Región 8: esta región comprende los estados Bolívar y Amazonas con una superficie de 418.145 km<sup>2</sup>
- Región 9: esta región comprende al estado Falcón con una superficie de 24.800 km<sup>2</sup>.

En la mapa (1) se muestran las nueve regiones de CADAPE.



El universo de estudio está conformado por 326 líneas de transmisión, las cuales según el tipo de conductor se distribuyen de la siguiente manera:

- ACAR: 4/0 una sola línea la cual representa 0.3% del total
- ACAR 350 MCM forma parte de 115 líneas y representa el 35.5%
- ACAR 500 MCM forma parte de 70 líneas y representa el 21.5%
- ACAR 1000 MCM forma parte de 2 líneas y representa 0.6%
- ACAR 1100 MCM forma parte de 33 líneas y representa el 10.1%
- ACSR: 4/0 6/1 es parte de una sola línea representa el 0.3%
- ACSR 266.8 MCM forma parte de 14 líneas y representa el 4.3%
- ACSR 336.4 MCM forma parte de 54 líneas y representa el 16.6%
- ACSR 795 MCM forma parte de 11 líneas y representa el 3.4%
- AAAC: 4/0 forma parte de 4 líneas y representa el 1.2%
- AAAC 336.4 MCM forma parte de 4 líneas y representa el 1.2%
- AAAC 350 MCM forma parte de una sola línea representa el 0.3%
- AAAC 500 MCM forma parte de 3 líneas y representa el 0.9%
- AAAC 636 MCM forma parte de 4 líneas y representa el 1.2%
- AAAC 954 MCM. forma parte de una línea y representa el 0.3%
- Cobre: 4/0 forma parte de una línea y representa el 0.3%
- Cobre 350 MCM. forma parte de una línea y representa el 0.3%

Se observa que los conductores ACAR se emplean en más del 60% de las líneas.

Las líneas de transmisión del sistema de CADAFE se distribuyen como se muestra en el mapa (2) a continuación:



## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **FUNDAMENTOS DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR**

##### **2.1 Descripción general**

Del estudio de la termodinámica se tiene que el calor es energía en tránsito que tiene lugar como resultado de las interacciones de un sistema y sus alrededores, debido a una diferencia de temperatura. La termodinámica trata con sistemas en equilibrio, de modo que puede predecir la cantidad de energía requerida para que un sistema dado cambie de un estado de equilibrio a otro, también proporciona información acerca de la naturaleza de las interacciones entre sistema y medio y de la velocidad con la que dichas interacciones se producen.

##### **2.2 Mecanismos de transferencia de calor**

Se acepta de manera general que el calor se transmite de tres modos diferentes, que se designan como conducción, convección y radiación. Estas tres formas de transferencia son las más sencillas que se pueden considerar aisladamente, si bien lo normal es que se produzcan simultáneamente, con lo que los fenómenos resultan más complejos de estudiar.

La transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquiera de los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso.

## 2.3 Conducción

La conducción es un mecanismo de cesión de energía entre partículas contiguas. La energía de las partículas aumenta al elevarse la temperatura. Esta energía puede pasar de una molécula a otra ya sea por choques entre partículas, en los fluidos o por vibraciones reticulares en los sólidos.

La conducción en los sólidos tiene un soporte material, que son las moléculas del propio cuerpo, las cuales vibran en posiciones fijas sin desplazarse, por lo tanto la transferencia de energía por conducción, macroscópicamente no involucra transporte de materia. El razonamiento es válido tanto para la transferencia de energía dentro de un sólido, como para sólidos en contacto.

En los fluidos, la conducción se explica gracias al intercambio de energía cinética de sus moléculas, que se produce como consecuencia de choques entre las mismas. La transmisión de calor por conducción se produce en lo que se define como la capa límite y tiene poca importancia en el resto de la masa.

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de ecuaciones o modelos apropiados. Para la conducción de calor, la ecuación (2.1) se conoce como Ley de Fourier.

$$q_{cond} = -k * \nabla T \quad (2.1)$$

Donde

$q_{cond}$  representa la cantidad de calor transferida por unidad de área se expresa en  $W/ft^2$

T es la temperatura en grados Kelvin

k conductividad térmica y se expresa en vatios por unidad de longitud y grados kelvin W/ft.K

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área, es la velocidad con que se transfiere el calor por unidad de área perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de la temperatura.

La conductividad térmica es una propiedad de transporte propia de los materiales. El signo menos es una consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

## **2.4 Convección**

La convección en contraposición con la conducción, implica transporte de energía y materia, por lo tanto, esta forma de transmisión de calor es posible solamente en los fluidos.

De forma más general, podemos explicar que el modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Esto es la transferencia de calor se debe a una superposición de dos transportes de energía, uno por el movimiento aleatorio de las moléculas y el otro por el movimiento global del fluido. Se utiliza el término convección haciendo referencia a este transporte acumulado.

Una consecuencia de la transferencia de calor por convección que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante, cuando estos tienen diferentes temperaturas, es el desarrollo de una región en el fluido en el cual la velocidad varía de cero en la superficie a un valor finito, asociado con el fluido, esta se conoce como capa límite de velocidad.

Cuando la temperatura de la superficie y el fluido difiere, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varía de un valor finito en la superficie hasta el valor correspondiente en el fluido, esta región se denomina capa límite térmica.

La ecuación (2.2) describe el proceso de transferencia de calor por convección:

$$q_{conv} = h * (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

Donde

$q_{conv}$  es el flujo de calor por convección medido en  $W/ft^2$

$T_1$  Temperatura en grados Kelvin (K) de la superficie

$T_2$  Temperatura en grados Kelvin (K) del fluido.

$h$  es el coeficiente de calor por convección  $W/ft^2.K$

El flujo de calor por convección, es proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie y el fluido, esta expresión se conoce como la Ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de calor por convección. Este depende de las condiciones de la capa límite, en las que influyen la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades del fluido. Cualquier estudio de convección, se reduce finalmente a un estudio de los medios por lo que es posible determinar  $h$ .

La transferencia de calor por convección, se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo. Se tiene convección forzada cuando el flujo es causado por medios externos, es decir en presencia del viento. En la convección libre o natural, el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de

densidades ocasionadas por variaciones de temperaturas del fluido. Es decir, las moléculas del fluido al calentarse se dilatan, pierden densidad y tienden a subir, dejando en su lugar a otras de mayor densidad, se originan así corrientes de convección que producen la mezcla de las distintas capas del fluido y el aumento de la energía de sus moléculas.

Además, un flujo, ya sea forzado o natural, puede ser laminar o turbulento, el flujo laminar es más común cuando las densidades son bajas, las dimensiones son pequeñas y los fluidos son más viscosos, el fluido se mueve en capas y cada partícula de este sigue una trayectoria uniforme y continua, es decir, las partículas del fluido en cada capa conservan una secuencia ordenada sin pasarse unas a otras.

En contraste al movimiento ordenado del flujo laminar, el movimiento de las partículas en un flujo turbulento es irregular. Para determinar si un flujo es turbulento o laminar se debe calcular el número de Reynolds.

El número de Reynolds es utilizado en mecánica de fluidos y en fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Es un número adimensional proveniente de un cociente o comparación, es decir, es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de roce) que gobiernan el movimiento de los fluidos.

El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar de un fluido.

En base a los experimentos realizados por Reynolds, este determinó que las fuerzas inerciales son función de la densidad, el diámetro de la tubería y de la

velocidad promedio, las fuerzas viscosas o de roce dependen de la viscosidad del fluido. El número de Reynolds (NR) queda expresado en la ecuación (2.4):

$$NR = \frac{d * V * \rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde

NR es el número de Reynolds (adimensional).

d diámetro del conductor en pulgadas.

V velocidad del fluido medido en ft/hr.

$\rho$  densidad del fluido medido en lb/ft<sup>3</sup>.

$\mu$  es la viscosidad del aire media en lb-ft-hr

La viscosidad es la propiedad de un fluido de resistir la velocidad a la cual toma lugar la deformación, cuando el fluido es sometido a esfuerzos de corte.

## 2.5 Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura dada.

En la radiación térmica, el calor se transmite mediante ondas electromagnéticas, al igual que la luz, pero de distintas longitudes de ondas. La energía radiante depende de las características de la superficie y de la temperatura del cuerpo emisor. Al incidir sobre un receptor, parte de la energía pasa a este otro cuerpo, dependiendo de las características del mismo y de su poder de absorción, esta energía se traduce en un aumento de la temperatura del segundo cuerpo. La

transferencia de calor por radiación involucra únicamente el transporte de energía, no necesita de un soporte material, efectuándose incluso en el vacío.

La radiación que emite un cuerpo se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y a la velocidad a la que libera energía por unidad de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) se denomina la potencia emisiva superficial E. Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecido por la Ley de Stefan – Boltzmann dado por la ecuación (2.5):

$$E = \sigma * T^4 \quad (2.5)$$

Donde

E es la potencia emitida se expresa en  $\text{W}/\text{ft}^2$

T temperatura del cuerpo emisor expresada en K (grados Kelvin)

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann expresada  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{ft}^2\text{K}^4$

Donde T, es la temperatura absoluta de la superficie y  $\sigma$  es la constante de Stefan – Boltzmann. Dicha superficie se conoce como radiador perfecto.

La energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a la que se encuentra y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto emite una cantidad de energía radiante de su superficie q, dada por la ecuación (2.6):

$$q = \sigma * A * T^4 \quad (2.6)$$

Donde

- q es el flujo de calor por unidad de área  $W/ft^2$   
T temperatura en grados kelvin (K)  
 $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 \times 10^{-8} W/ft^2 K^4$   
A Área del cuerpo emisor  $ft^2$

La ecuación (2.6) expresa que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Aunque la emisión es independiente de las condiciones de su entorno, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio. Si un cuerpo negro a una temperatura dada, irradia calor a un recinto que le rodea completamente y cuya superficie es también negra a una temperatura finita distinta a la del primer cuerpo negro, es decir, absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, la transferencia de energía radiante viene dada por la ecuación (2.7):

$$q = \sigma * A * (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.7)$$

Donde

- q es flujo de calor por unidad de área  $W/ft^2$   
 $T_1$  temperatura del cuerpo negro emisor en grados kelvin (K)  
 $T_2$  temperatura del recinto que rodea al emisor en grados kelvin (K)  
 $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 \times 10^{-8} W/ft^2 K^4$   
A área del cuerpo emisor  $ft^2$

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación con un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emiten una fracción constante de la energía que emitirían considerados como cuerpo negro, para cada longitud de onda, se llaman cuerpos grises.

Un cuerpo gris emite radiación según la ecuación (2.8):

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.8)$$

Donde

- q es el flujo de calor por unidad de área  $W/ft^2$
- T temperatura en grados Kelvin (K)
- $\sigma$  constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 \times 10^{-8} W/ft^2 K^4$
- A área del cuerpo emisor  $ft^2$
- $\varepsilon$  emisividad (adimensional)

Donde  $\varepsilon$  es una propiedad de la superficie denominada emisividad, con valores en el rango  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro ideal.

## 2.6 Equilibrio térmico

Se dice que los cuerpos en contacto térmico se encuentran en equilibrio térmico cuando no existe flujo de calor entre ellos. Esta definición requiere además que las propiedades físicas del sistema, que varían con la temperatura, no cambien

con el tiempo. Algunas de las propiedades afectadas por la temperatura son el volumen, la densidad y la presión.

El parámetro termodinámico que caracteriza el equilibrio térmico es la temperatura. Cuando dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico, estos cuerpos tienen la misma temperatura.

Para los problemas de transferencia de calor resulta esencial aplicar la primera ley de la termodinámica o ley de conservación de la energía. En general para aplicar la primera ley, es necesario identificar primero el volumen de control, una región de espacio limitada por una superficie a través de la cual puede pasar la energía y la materia.

Si el flujo entrante y la generación de energía igualan al flujo de salida, debe prevalecer una condición de estado estable en la que no habrá cambio de la cantidad de energía almacenada en el volumen de control, esta relación de estado estable viene dada por la ecuación (2.9)

$$E_{ent} + E_g - E_{sal} = E_{alm} \quad (2.9)$$

Donde

$E_{ent}$  Energía que entra en la superficie de control expresada en W

$E_g$  Energía generada dentro de la superficie de control debido a la conversión de otro tipo de energía medida en W

$E_{sal}$  Energía saliente de la superficie de control medida en W

$E_{alm}$  Energía almacenada en la superficie de control medida en W

El término generación de energía se asocia con la conversión de una forma de energía (química, eléctrica, electromagnética o nuclear) a energía térmica. Una fuente de energía térmica es la conversión de energía eléctrica que ocurre debido al calentamiento de la resistencia cuando se hace pasar una corriente eléctrica por un conductor. Es decir, si una corriente eléctrica  $I$  pasa a través de una resistencia  $R$  en el volumen de control, se disipa energía eléctrica a una razón de  $I^2R$ , que corresponde a la velocidad a la que se genera energía térmica dentro del volumen.

### 2.6.1 Balance de energía en una superficie

En este caso es necesario aplicar la ley de conservación de la energía a la superficie de un medio. Es decir la superficie de control no incluye masa o volumen. Entonces el término de almacenamiento ya no es relevante y el término de generación pasa a formar parte de la ganancia. La expresión resultante viene dada por la ecuación (2.10):

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = 0 \quad (2.10)$$

Donde

$E_{\text{ent}}$  Energía que entra en la superficie de control expresada en W

$E_{\text{sal}}$  Energía saliente de la superficie de control medida en W

Donde se establece el equilibrio térmico para una superficie, es decir, se muestra la relación entre el flujo de entrada y el flujo de salida de la superficie de control.

Con los modelos de transporte de energía, la aplicación del balance térmico se simplifica si se siguen las reglas básicas:

1. Se define el volumen de control apropiado con la superficie de control.
2. Se especifica una base de tiempo apropiada.
3. Tienen que identificarse los procesos de energía relevantes, cada proceso debe ser especificado.
4. Se determina la expresión de conservación, a partir de las expresiones del flujo adecuadas.

Con el marco teórico expuesto se busca dar una visión de los conocimientos básicos para la comprensión del trabajo realizado.

## CAPÍTULO III

### EQUILIBRIO TÉRMICO Y LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

#### 3.1 Las líneas de transmisión y la conservación de la energía

Partiendo de la ley de conservación de energía aplicada a una superficie y considerando la radiación solar ( $q_s$ ) como flujo de entrada, a la radiación ( $q_r$ ) desde la superficie al fluido externo (aire) y la convección ( $q_c$ ) desde la superficie como flujo de salida, así como la conversión de energía térmica a partir de energía eléctrica la expresión de balance de energía toma la ecuación (3.1):

$$q_s + q_I - q_c - q_r = 0 \quad (3.1)$$

Donde

- $q_c$       representa la potencia disipada por convección medida en  $W/ft^2$
- $q_r$       representa la potencia disipada por radiación medida en  $W/ft^2$
- $q_s$       representa la potencia absorbida debido al sol medida en  $W/ft^2$
- $q_I$       representa la potencia absorbida por efecto Joule medida en  $W/ft^2$

La superficie considerada es el conductor empleado en la línea de transmisión, y al ser una línea aérea el fluido que lo rodea es el aire.

### 3.2 Pérdidas por convección

Las pérdidas por convección ( $q_c$ ) en el conductor, representa el flujo de calor desde la superficie del conductor hacia el aire a su alrededor, lo cual provoca una disminución de la temperatura en el conductor, es decir, representa una pérdida de calor de la superficie de control, es un flujo de salida en la ecuación de balance térmico.

La convección se clasifica a su vez en forzada o natural, según que la mezcla se realice o no por medios mecánicos, en este caso se considerara al viento como elemento externo.

La convección forzada tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior proviene del viento.

En la convección natural, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

La velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Para representar estas pérdidas en la ecuación de balance térmico se tiene que:

- Para las pérdidas por convección forzada, cuando el valor del número de Reynolds se ubica entre  $0.1 \leq NR \leq 1000$ , la convección forzada viene dada por la ecuación (3.2)

$$q_c = \left( 1.01 + 0.0372 * \left( \frac{d * V * \rho}{\mu} \right)^{0.52} \right) * k_f * k_{ang} * (t_c - t_a) \quad (3.2)$$

Donde

- $q_c$  es el flujo de calor medido en  $W/ft^2$
- $d$  diámetro del conductor medido en ft
- $V$  velocidad del viento medido en ft/hr
- $\rho$  densidad del aire medida en  $lb/ft^3$
- $\mu$  viscosidad del aire medida en  $lb/ft-hr$
- $k_f$  conductividad térmica del aire viene medida en  $W/ft-^{\circ}C$
- $t_c$  temperatura del conductor medida en  $^{\circ}C$
- $t_a$  temperatura ambiente medida en  $^{\circ}C$
- $k_{ang}$  factor por efecto de la dirección del viento (adimensional)

- Cuando el número de Reynolds se encuentra entre  $1000 \leq NR \leq 18000$  se tiene la ecuación (3.3)

$$q_c = \left( 0.0119 * \left( \frac{d * V * \rho}{\mu} \right)^{0.6} \right) * k_f * k_{ang} * (t_c - t_a) \quad (3.3)$$

Donde

- $q_c$  es el flujo de calor medido en  $W/ft^2$

d	diámetro del conductor medido en ft
V	velocidad del viento medido en ft/hr
$\rho$	densidad del aire medida en lb/ft <sup>3</sup>
$\mu$	viscosidad del aire medida en lb/ft-hr
$k_f$	conductividad térmica del aire viene medida en W/ft-°C
$t_c$	temperatura del conductor medida en °C
$t_a$	temperatura del aire medida en °C
$k_{ang}$	factor por efecto de la dirección del viento (adimensional)

Donde el factor  $k_{ang}$  es función del ángulo formado por la dirección del viento y la línea, la expresión para este factor es la ecuación (3.4):

$$K_{ang} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 * \cos(2\phi) + 0.368 * \sin(2\phi) \quad (3.4)$$

Donde

$k_{ang}$	factor por efecto de la dirección del viento (adimensional)
$\phi$	Ángulo entre la dirección del viento y el eje de la línea en grados °

Para las pérdidas por convección natural se expresa con la ecuación (3.5):

$$q_c = 0.0205 * \rho^{0.5} * d^{0.75} * (t_c - t_a)^{1.25} \quad (3.5)$$

Donde

$q_c$	es el flujo de calor medido en W/ft <sup>2</sup>
d	diámetro del conductor medido en ft
$\rho$	densidad del aire medida en lb/ft <sup>3</sup>

- $t_c$  temperatura del conductor medida en °C
- $t_a$  temperatura del aire medida en °C

### 3.3 Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación ( $q_r$ ) es la transferencia de calor debido a la energía emitida por el conductor en forma de onda electromagnética, esto provoca una disminución de la temperatura del conductor, por lo tanto en la ecuación de balance térmico se ve reflejado como un flujo de salida.

El modelo con que se representa las pérdidas por radiación en la ecuación de balance térmico para la línea de transmisión es la ecuación (3.6):

$$q_r = 0.0178 * d * \varepsilon * \left( \frac{(t_c + 273)^4}{100} - \frac{(t_a + 273)^4}{100} \right) \quad (3.6)$$

Donde los parámetros involucrados son los siguientes:

- $q_r$  es el flujo de calor medido en W/ft<sup>2</sup>
- $d$  diámetro del conductor medido en ft
- $\varepsilon$  emisividad (adimensional)
- $t_c$  temperatura del conductor medida en °C
- $t_a$  temperatura del aire medida en °C

### 3.4 Ganancia solar

La ganancia solar es la transferencia de calor debida a la radiación proveniente del sol, donde la condición de la superficie del conductor determina la

cantidad de energía que este puede absorber. Esto provoca un aumento en la temperatura del conductor, por lo tanto en el modelo de balance térmico se refleja como un flujo de entrada.

La expresión para representar la ganancia solar es la ecuación (3.7):

$$q_s = \alpha * Q_s * \sin\theta * A \quad (3.7)$$

Donde los parámetros que intervienen en esta ecuación son los siguientes:

- $q_s$  es el flujo de calor medido en  $W/ft^2$
- $A$  área proyectada del conductor  $ft^2/ft$
- $Q_s$  flujo total solar irradiado  $W/ft^2$
- $\alpha$  factor de absorción solar (adimensional)
- $\theta$  ángulo de incidencia de los rayos solares medido en grados °

La expresión para determinar el valor de  $\theta$  es la ecuación (3.8):

$$\theta = \arccos(\cos(H_c) * \cos(Z_c - Z_L)) \quad (3.8)$$

Donde intervienen los siguientes factores:

- $\theta$  ángulo de incidencia de los rayos solares se mide en grados °
- $H_c$  Altitud del sol medida en grados °
- $Z_c$  Azimut del sol medida en grados °
- $Z_L$  Azimut de la línea medida en grados °

### 3.5 Ganancia por efecto Joule

La ganancia por efecto Joule ( $q_I$ ) es debida a la conversión de energía eléctrica en energía térmica, esto debido al calentamiento que sufre el conductor cuando por él fluye la corriente eléctrica, esto lo coloca como un flujo de entrada en la ecuación de balance térmico.

La corriente eléctrica  $I$  pasa a través de una resistencia  $R$ , que representa al conductor de la línea, se disipa energía eléctrica a una razón de  $I^2R$ , que corresponde a la velocidad a la que se genera energía térmica.

Esta ganancia se representa en la ecuación (3.9):

$$q_I = i^2 * r \quad (3.9)$$

Donde los términos representan

$q_I$  es el flujo de calor medido en  $W/ft^2$

$i$  corriente por el conductor medida en A

$r$  resistencia del conductor medida en  $\Omega/ft$

La resistencia del conductor es función de la temperatura de operación, por lo tanto debe ser referida a la temperatura de operación del conductor, para ello se emplea la ecuación (3.10):

$$R_{(TC)} = \left[ \frac{R(T_H) - R(T_L)}{T_H - T_L} \right] \cdot (T_c - T_L) + R(T_L) \quad (3.10)$$

Donde

$R_{(TC)}$  es la resistencia del conductor medida en  $\Omega/\text{ft}$  a la temperatura de operación de la línea  $T_C$

$R_{(TH)}$  es la resistencia del conductor medida en  $\Omega/\text{ft}$  a la temperatura  $T_H$  (un valor de temperatura alta  $T_{high}$ )

$R_{(TL)}$  es la resistencia del conductor medida en  $\Omega/\text{ft}$  a la temperatura  $T_L$  (un valor de temperatura bajo  $T_{low}$ )

$T_C$  es la temperatura de operación de la línea medida en  $^{\circ}\text{C}$

$T_H$  es uno de los valores de temperatura tomado como referencia para el conductor es un valor alto y se mide en  $^{\circ}\text{C}$

$T_L$  es uno de los valores de temperatura tomado como referencia para el conductor es un valor bajo y se mide en  $^{\circ}\text{C}$

Donde debe ser conocido el valor de resistencia para dos temperaturas distintas, puesto que la resistencia tiene un comportamiento lineal con el cambio de temperatura. Dado por la Norma IEEE 738 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors.

### **3.6 Expresiones para las propiedades del aire, ángulo solar y radiación solar**

Para determinar los términos involucrados en la expresión de balance térmico hacen falta algunas expresiones las cuales se muestran a continuación:

#### **3.6.1 Propiedades del aire**

La viscosidad del aire está dada por la ecuación (3.11):

$$\mu = \frac{1.458 * 10^{-6} * (T_f + 273)^{1.5}}{T_f + 383.4} \quad (3.11)$$

Donde

$\mu$  es la viscosidad del aire media en Pascal por segundo lb/ft-hr

$T_f$  es la temperatura de la capa limite térmica medida en °C

La densidad del aire viene dada por la ecuación (3.12):

$$\rho = \frac{1.293 - 1.525 * 10^{-4} * H + 6.379 * 10^{-9} * H^2}{1 + 0.00367 * T_f} \quad (3.12)$$

Donde

$\rho$  es la densidad del aire medida en lb/ft<sup>3</sup>

H altura medida en ft

$T_f$  es la temperatura de la capa limite térmica medida en °C

La conductividad térmica del aire se expresa en la siguiente ecuación (3.13):

$$k_f = 2.424 * 10^{-2} + 7.477 * 10^{-5} * T_f - 4.407 * 10^{-9} * T_f^2 \quad (3.13)$$

Donde

$k_f$  es la conductividad térmica del aire medida en W/(ft-°C)

$T_f$  es la temperatura de la capa limite térmica medida en °C

La expresión que define la capa de límite térmico ( $T_f$ ) viene dada por la ecuación (3.14):

$$T_f = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (3.14)$$

Donde

$T_f$  es la temperatura de la capa límite térmica medida en °C

$T_c$  es la temperatura del conductor medida en °C

$T_a$  es la temperatura del aire medida en °C

### 3.6.2 Ángulo solar

La altitud solar viene expresada por la ecuación (3.15):

$$H_c = \arcsin(\cos(Lat) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \sin(Lat) * \sin(\delta)) \quad (3.15)$$

Donde

$H_c$  es la altitud solar medida en grados °.

$Lat$  es la latitud de donde se encuentra la línea se mide en grados °.

$\omega$  es la hora del día medida en °, donde cada hora se mide en múltiplos de 15° correspondiendo con las 12 pm al valor 0°, las 11 am el valor de -15° y la 1 pm corresponde al valor de +15°

$\delta$  es la declinación solar y se mide en grados °.

La declinación solar ( $\delta$ ) viene dada por la ecuación (3.16):

$$\delta = 25.4583 * \sin\left(\frac{284 + N}{365} * 360\right) \quad (3.16)$$

Donde

$\delta$  es la declinación solar y se mide en grados °.

N es el día del año siendo el 1° de enero N=1 y el 31 de diciembre N=365

El azimut del sol ( $Z_c$ ) está dado por la ecuación (3.17):

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \quad (3.17)$$

Donde la variable del azimut solar ( $\chi$ ) viene dada por la ecuación (3.18):

$$\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) * \cos(\omega) - \cos(Lat) * \tan(\delta)} \quad (3.18)$$

Donde

Lat es la latitud de donde se encuentra la línea se mide en grados °.

$\omega$  es la hora del día medida en °, donde cada hora se mide en múltiplos de 15° correspondiendo con las 12 pm al valor 0°, las 11 am el valor de -15° y la 1 pm corresponde al valor de +15°

$\delta$  es la declinación solar y se mide en grados °.

El valor de la constante solar del azimut (C) viene dado en la tabla (1) y depende de los valores de  $\omega$  y  $\chi$ .

**Tabla 1. Tabla donde se expresa la constante solar del azimut**

$\Omega$	$\chi \geq 0$	$\chi < 0$
$180 \leq \omega < 0$	$C=0$	$C=180$
$0 \leq \omega \leq 180$	$C=180$	$C=360$

### 3.6.3 Radiación

La radiación se expresa en la ecuación (3.19) para una condición de atmósfera clara y la ecuación (3.20) para una condición de atmósfera industrial o contaminada.

$$Q_S = -42.23 + 63.8H_C - 1.92H_C^2 + 3.46 \cdot 10^{-2}H_C^3 - 3.61 \cdot 10^{-4}H_C^4 + 1.94 \cdot 10^{-6}H_C^5 - 4.07 \cdot 10^{-9}H_C^6 \quad (3.19)$$

Donde

$Q_S$  es la radiación con atmósfera clara se mide en  $W/ft^2$

$H_C$  es la altitud del sol medida en grados  $^\circ$ .

$$Q_S = 53.18 + 14.21H_C + 6.61 \cdot 10^{-1}H_C^2 - 3.16 \cdot 10^{-2}H_C^3 + 5.46 \cdot 10^{-4}H_C^4 - 4.34 \cdot 10^{-6}H_C^5 + 1.32 \cdot 10^{-8}H_C^6 \quad (3.20)$$

Donde

$Q_S$  es la radiación con atmósfera contaminada se mide en  $W/ft^2$

$H_C$  es la altitud del sol medida en grados  $^\circ$ .

Los valores obtenidos por las expresiones anteriores son corregidos por la altura con la ecuación (3.21):

$$K_{SOL} = 1 + 1.148 \cdot 10^{-4} * H - 1.108 \cdot 10^{-8} * H^2 \quad (3.21)$$

Donde

$K_{SOL}$  constante adimensional para corregir la radiación por altura

H altura medida en ft.

Entonces quedaría la ecuación (3.22) para la radiación:

$$Q_{SE} = Q_S * K_{SOL} \quad (3.22)$$

Donde

$Q_{SE}$  es la radiación corregida por la altura se mide en  $W/ft^2$

$K_{SOL}$  constante adimensional para corregir la radiación por altura

$Q_S$  es la radiación con atmósfera clara o contaminada se mide en  $W/ft^2$

De las expresiones dadas por la IEEE 738 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors para las propiedades del aire y radiación solar se emplean solo las que no reportan las estaciones meteorológicas. Entre las expresiones empleadas se encuentran son las de viscosidad del aire (3.11) y la de conductividad térmica (3.13).

## **CAPÍTULO IV**

### **CLIMA Y FACTORES METEOROLÓGICOS**

#### **4.1 Descripción general.**

La atmósfera está formada por gases, es la masa de aire que rodea a la tierra. En la atmósfera tienen lugar muchos fenómenos conocidos como fenómenos atmosféricos. El tiempo en un lugar determinado es el estado momentáneo de la atmósfera que se debe a la temperatura, a la presión atmosférica y a la pluviosidad. Su característica más resaltante es su variabilidad. La ciencia que se dedica al estudio del tiempo es la meteorología.

Puede definirse el clima como la historia del tiempo atmosférico registrada en una región dada.

#### **4.2 Tiempo y clima.**

El tiempo es la condición de la atmósfera en un lugar determinado y en un momento dado. El clima es la sumatoria total de las condiciones atmosféricas.

La meteorología es una ciencia derivada de la geofísica que trata de los fenómenos atmosféricos y las causas que los producen.

### 4.3 Factores geográficos que influyen en la variación del clima.

Para el estudio del clima local hay que analizar los elementos del tiempo: la temperatura, la humedad, la presión, los vientos y las precipitaciones. De ellos, las temperaturas medias mensuales y los datos pluviométricos mensuales son los más importantes y por tanto los más reportados.

Hay una serie de factores que influyen sobre estos elementos: la latitud geográfica, la altitud del lugar, la orientación del relieve con respecto a la incidencia de los rayos solares o a la de los vientos predominantes, las corrientes oceánicas y la distancia al mar.

Los factores que tienen influencia sobre el clima son los siguientes:

**Latitud:** determina el grado de inclinación de los rayos de sol y la diferencia de la duración del día y la noche. Cuanto más directamente incide la radiación solar, mas calor aporta a la tierra. Las variaciones en latitud son causadas, por la inclinación del eje de la tierra. El ángulo de incidencia de los rayos del sol no es igual en el ecuador que en el polo.

**Altitud:** es el factor geográfico que mayor influencia tiene en la formación del clima, puesto que genera la disminución de la temperatura y la presión a medida que aumenta.

Este factor tiene relación directa con:

**Temperatura:** un aumento en de altitud origina una disminución de la temperatura. La principal causa de la baja de la temperatura al aumentar la altura es la

escasa densidad del aire y su relativa pobreza en vapor de agua y CO<sub>2</sub> que disminuye su capacidad de absorción de calor (aumento de la radiación solar y aumento de la insolación).

**Presión:** al ascender se presenta una disminución de la presión. La presión atmosférica es el peso que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la tierra. Un aumento de vapor de agua en la atmósfera altera la presión atmosférica, dado que el vapor de agua es menos denso que los otros componentes del aire.

**Precipitación:** el aumento de las lluvias en las zonas altas se explica por el enfriamiento del aire, su ascenso en pendiente y el contacto con zonas frías. En resumen la altitud actúa sobre la temperatura a consecuencia de fenómenos físicos; el aire al subir se expande y se enfría dependiendo de la latitud, altura del sol durante el año y del aporte de humedad por las masas de aire.

**Vegetación:** la vegetación influye principalmente en la distribución de la precipitación. Cuando existen regiones bien formadas de vegetación estas actúan como barreras naturales que obligan a ascender a los vientos y descargar su humedad.

#### **4.4 Características del clima en Venezuela**

##### **4.4.1 Descripción general**

La ubicación de Venezuela entre el paralelo 0°43' y el 11°46' N al norte de Suramérica esta bajo la influencia de la zona intertropical de bajas presiones ecuatoriales con precipitaciones puntuales, y pisos térmicos variables entre tropical y gélido con temperaturas en un espectro entre 0° y 40° C. Los meses más fríos son enero y febrero, con una segunda mínima en julio. Por su parte los máximos ocurren

en marzo y septiembre. En general, en Venezuela predominan los vientos del este y del noreste; hacia el sur el viento es más variable y calmado.

La nubosidad es máxima en el Amazonas, así como en la región del Catatumbo al occidente del país, donde impera gran nubosidad y formación de tormentas debido a los efectos locales de convergencia de vientos.

La humedad relativa en Venezuela es por lo general muy alta, encontrándose valores mayores al 80% en los Andes, sur del Lago de Maracaibo y río Caura en Bolívar. Los mínimos pueden llegar hasta 2% en localidades como Barcelona y Carora.

La mayor frecuencia de tormentas en el país se registra en el río Catatumbo, y en la región central del estado Amazonas. Las mínimas se suceden en el valle de Carora, estado Lara, y en las montañas de Turimiquire en Sucre. La insolación es mayor, en la región de Anzoátegui, mientras que los máximos de radiación se ubican cerca de los 11° de latitud norte, abarcando el estado Falcón y la isla de Margarita.

En Venezuela, las direcciones prevalecientes del viento, son la norte, nornoroeste y noreste. En las zonas costeras, la dirección prevaleciente es la este, excepto cuando un accidente de la costa modifica la entrada, como en Barcelona. En las zonas montañosas, la dirección prevaleciente del viento depende de la topografía, como lo es el caso de Mérida. Estas direcciones prevalecientes, y así, en la temporada lluviosa, aumenta la frecuencia de vientos con componente sur, especialmente del suroeste.

La velocidad media del viento (correspondiente a la dirección prevaleciente) varía, de unos 2.5 m/s al este a unos 5 m/s al oeste, en el centro del país, las velocidades son del orden de unos 3 m/s aproximadamente.

#### **4.4.2 Estaciones meteorológicas**

Una estación meteorológica es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

##### **4.4.2.1 Instrumentos de medición**

Los instrumentos comunes y variables que se miden en una estación meteorológica incluyen:

- Termómetro: Instrumento para la medición de temperaturas en horarios determinados del día.
- Termómetros de máximos y mínimos.
- Termómetros de subsuelo: para medir a 5, 10, 20, 50 y 100 cm de profundidad.
- Barómetro: Instrumento para la medición de presión atmosférica en superficie.
- Pluviómetro: Instrumento para la medición de la cantidad de precipitación.
- Psicrómetro: Instrumento para la medición de la humedad relativa del aire y la temperatura del punto de rocío.
- Piranómetro: Instrumento para la medición de la insolación solar.
- Heliógrafo: Instrumento para la medición de las horas del sol.

- Anemómetro: Instrumento para la medición de la velocidad del viento y veleta para registrar su dirección

#### 4.4.2.2 Ubicación de estaciones meteorológicas en Venezuela

Las necesidades de información meteorológica para garantizar principalmente seguridad en las operaciones aéreas, motivó la creación del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, el 10 de octubre de 1947. Esta institución militar provee de información y alertas climatológicas en soporte a las actividades de la Fuerza Armada y otras organizaciones que requieren de esta información. Para coleccionar, resumir, procesar y hacer pronósticos, el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea, posee una red de estaciones climatológicas en ubicaciones tanto rural como metropolitana.

Estas estaciones están dotadas con dispositivos para coleccionar datos de temperatura, velocidad de viento, dirección del viento, humedad, precipitación, presión atmosférica, insolación y otras variables climáticas de interés.

En Venezuela se encuentran las siguientes estaciones meteorológicas, actualmente algunas de estas no se encuentran operativas, pero de igual forma se tienen registros de sus datos, se especifica su ubicación mediante la latitud, longitud y altitud en la tabla 2:

**Tabla 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas en Venezuela**

Estación	Latitud (° Nor)	Longitud (° Oest)	Altitud (msnm)
Acarigua	9°55	69°23	226
Barcelona	10°11	64°68	7
Barinas	8°61	70°21	203
Barquisimeto	10°06	69°31	613
Calabozo	8°93	67°41	100
Caracas/La Carlota	10°5	66°88	835

Caracas /Maiquetía	10°6	66°98	43
Ciudad Bolívar	8°15	63°55	43
Coro	11°41	69°68	16
Cumaná	10°45	64°18	2
El Vigía	8°63	71°66	100
Guanare	9°01	69°73	163
Guasdalito	7°23	70°8	130
Guiria	10°58	62°31	13
La Orchila	11°8	66°18	3
Maracaibo	10°56	71°73	66
Maracay	10°25	67°65	436
Margarita	10°91	63°98	23
Maturín	9°75	63°18	65
Mene Grande	9°81	70°93	27
Mérida	8°6	71°18	1479
Puerto Cabello	10°5	68°	2
San Antonio del Táchira	7°85	72°45	377
San Fernando de Apure	7°9	67°41	47
San Juan de los Morros	9°91	67°33	429
Santa Barbará Zulia	8°98	71°95	10
Santa Elena de Uairen	4°6	61°11	907
Santo Domingo	7°58	72°06	327
Temblador	9°01	62°61	30
Tumeremo	7°3	61°45	180
Valencia	10°16	67°93	430
Valera	9°35	70°61	582
Valle de la Pascua	9°21	66°01	125
Biológica	8°53	67°23	86
Bruzual	8°03	69°20	89
Colonia Tovar	10°24	67°17	1970
Cua Tovar	10°9	66°51	240
El Carrizal	9°25	66°55	160
Elorza	7°3	69°30	90
Guanapito	9°55	66°24	422
Guarabao	10°15'	68°46'	300
Hacienda Arañón	6°56'	67°7'	78
La Cabaña	10°55'	72°17'	50
Mantecal	7°34'	69°8'	79
Mayalito	9°32'	66°12'	130
Musinancio	7°42'	64°46'	52
Río Verde	9°33'	67°40'	171
La Cañada	10°31'	71°39'	27
Tucupita	9°5'	62°3'	10
San Carlos del Río Negro	1°56'	67°3'	119

La ubicación de algunas de las estaciones se muestra en el mapa (3):



Ubicación en Venezuela de la red de Estaciones Meteorológicas de la Fuerza Aérea Venezolana.

### **Mapa 3. Ubicación de algunas estaciones meteorológicas**

Estas estaciones entregaron la data correspondiente a las mediciones realizadas en sus respectivas zonas de temperatura máxima, temperatura mínima, velocidad y dirección de viento, radiación solar, insolación diaria, densidad del aire.

Los datos fueron entregados de valores mensuales medidos en un rango entre 8 y 15 años dependiendo de la disponibilidad de la estación meteorológica, es decir, cada estación entrego una data correspondiente a cada mes del año, en un periodo no menor a 8 años. Luego esta data es expresada en valores equivalentes a un año en periodos no menores a 8 años, se calculan los valores promedios de cada medición.

#### **4.4.3 Datos meteorológicos**

Se emplearon los datos del resumen climatológico del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, correspondiente a un período comprendido entre 8 y 15 años, esto dependiendo de la respectiva estación.

#### 4.4.3.1 Temperatura

Los datos suministrados con respecto a la temperatura fueron los siguientes: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, las medidas fueron mensuales, posteriormente se analizaron y procesaron para obtener el valor necesario para el cálculo del límite térmico.

Se presenta a continuación una muestra de la data entregada y la forma en que fue procesada:

En la tabla (3) se observa la información de la estación meteorológica tomada como muestra

**Tabla 3. Datos de la ubicación de la estación meteorológica de muestra**

Estación	Localidad	Estado	Latitud Estación	Longitud Estación	Elevación Estación
14	Cumaná	Sucre	10°26'	64°12'	3

En la tabla (4) se observa el resumen de los valores anuales de la temperatura máxima medida por la estación de muestra, estos datos corresponden al promedio calculado por año dado que los datos originales, eran datos mensuales.

**Tabla 4. Temperatura máxima medida por la estación meteorológica tomada como muestra (Cumaná)**

Temperatura máxima absoluta por año (°C)									
1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
35,2	33,9	33,8	33,1	33,2	34,2	34,2	34,4	34,6	35,8

En la tabla (5) se observa la información del resumen de los valores de la temperatura mínima medida por la estación de muestra, al igual que la anterior corresponde a los valores promedios.

**Tabla 5. Temperatura mínima registrada por la estación de muestra (Cumaná)**

Temperatura mínima absoluta por año (°C)									
1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
19,8	20,1	19,5	19,6	19,5	19,3	19,6	19,7	19,6	19,8

En la tabla (6) se observan los valores máximos de la temperatura en un periodo de 10 años, a demás de la probabilidad de ocurrencia de este valor de temperatura, esta probabilidad se obtuvo al procesar los datos cuando se calculo el valor promedio de los máximos de temperatura.

**Tabla 6. Temperatura máxima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y la probabilidad de ocurrencia de este valor**

Temperatura máxima (°C)		
Máxima historia	Máxima 10 años	Prob máx. (%)
35,8	35,8	5

En la tabla (7) se observan los mínimos de la historia, medidos por la estación muestra y la probabilidad de ocurrencia de este valor.

**Tabla 7. Temperatura mínima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y la probabilidad de ocurrencia de este valor**

Temperatura mínima (°C)		
Mínima historia	Mínima 10 años	Prob min (%)
19,3	19,3	15,83

Al procesar la data completa se tiene que la temperatura promedio para la estación meteorológica es la mostrada en la tabla (8), se indica también la probabilidad de ocurrencia:

**Tabla 8. Temperatura promedio calculada para la estación muestra (Cumaná) con su probabilidad de ocurrencia**

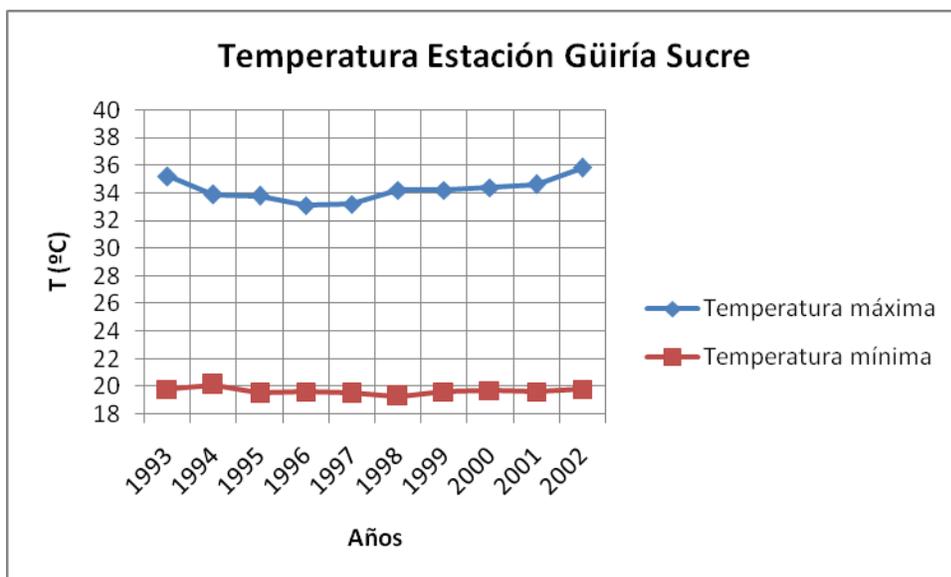
Temperatura promedio (°C)	
Promedio 10 años	Prob prom (%)
26,56	47,5

En la tabla (9) se muestran finalmente los datos de temperatura que se van a emplear para el cálculo del límite térmico para la estación ubicada en el estado Sucre, la estación Güirila.

**Tabla 9. Resumen de las temperaturas calculadas para la estación muestra (Cumaná)**

Resumen de promedios (°C)		
Máxima	Promedio	Mínima
34.2	26,5	19.7

En la gráfica (1) se representan los valores calculados para la estación.



**Gráfica 1. Representación de los datos medidos para la temperatura después de calcular el valor promedio por año**

#### 4.4.3.2 Viento

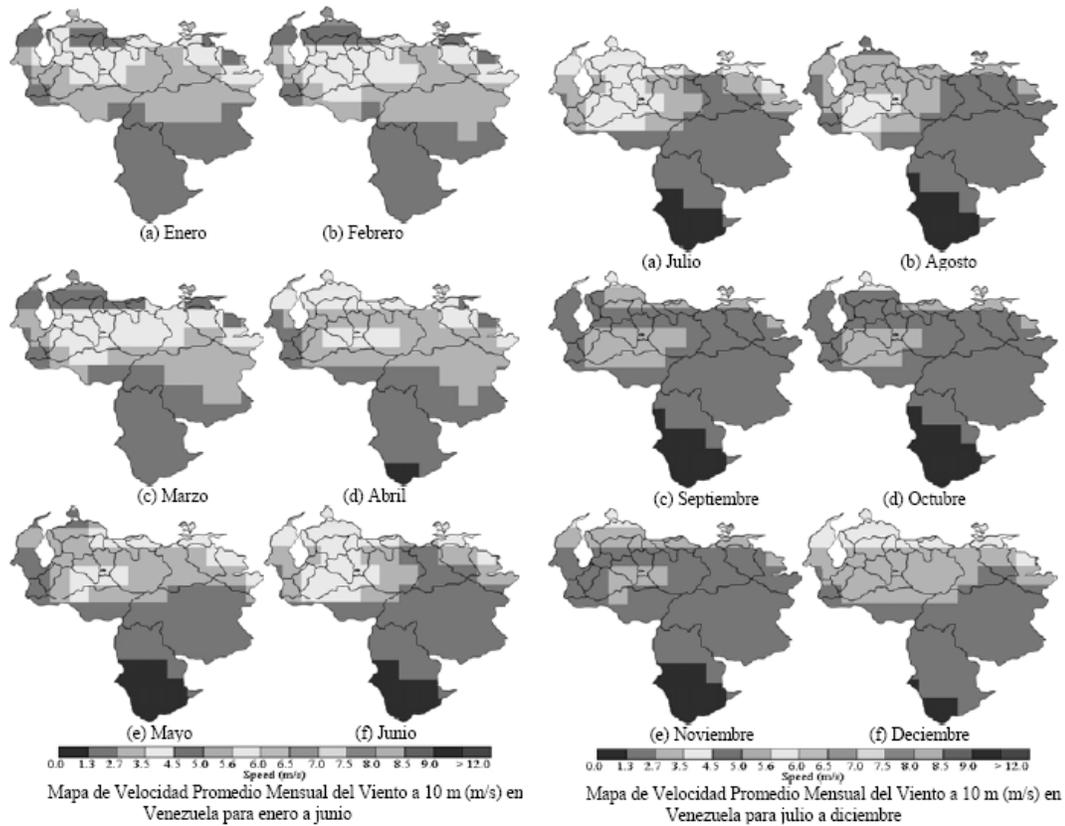
La evaluación de los datos del viento que se realizó en este trabajo es una síntesis de las mediciones efectuadas directamente por las estaciones del Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana.

Los datos del viento medidos corresponden a las velocidades de vientos promedio diarios y mensuales, en algunos se presentaron los valores máximos correspondientes al intervalo de tiempo.

Los valores promedios mensuales están basados en tantos datos horarios como estaban disponibles para cada uno de los meses del año.

El principal parámetro descriptivo de una región con respecto al viento es la velocidad media anual, por esa razón a continuación en la figura (1) se muestra por

mes la velocidad promedio del viento en m/s, con datos desde julio de 1983 hasta junio de 1993.



**Figura 1 Representación de los valores de velocidades de vientos promedios en todo el país para cada uno de los meses del año**

Enero y julio son los meses con promedio de velocidad más alto (ligeramente mayor a 3 m/s), sin embargo hay importantes diferencias en la velocidad promedio mensual entre las medidas en los estados del norte y los del sur del país. El estado Falcón, Zulia y la región de Nueva Esparta, junto con todos los estados costeros exhiben las más altas velocidades promedio del viento (encima de 5 m/s).

Por otra parte, los estados del sur de Venezuela, en el estado Bolívar o Amazonas, tienen las más bajas velocidades promedio del viento (entre 0 y 2.5 m/s)

#### 4.4.3.3 Radiación

En este caso los datos obtenidos fueron la insolación promedio mensual, la radiación y la irradiación.

En la tabla (10) se observa la radiación solar máxima medida por la estación muestra en el intervalo de 10 años, así como también la probabilidad de ocurrencia de este valor.

**Tabla 10. Radiación solar máxima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y su probabilidad de ocurrencia**

Radiación solar cal/cm*cm,dia	
Máxima 10 años	Prob máx. %
627	0,83

En la tabla (11) se muestra la radiación solar mínima y la probabilidad de ocurrencia.

**Tabla 11. Radiación solar mínima medida por la estación muestra (Cumaná) en 10 años y su probabilidad de ocurrencia**

Radiación solar cal/cm*cm,dia	
Mínima 10 años	Prob min %
123	0,83

En la tabla (12) se indica la insolación máxima, la cual permitió calcular la radiación en  $W/m^2$ , este valor fue empleado para la base de datos del programa para calcular el límite térmico de las líneas.

**Tabla 12. Insolación y radiación solar máxima para la estación muestra (Cumaná) en 10 años**

Insolación máx. abs (horas)	Radiación máx. abs (W/m <sup>2</sup> )
12,3	1350,24

#### **4.4.3.4 Densidad del aire**

Estos datos fueron presentados mensualmente por cada estación, y a partir de estos se comparó con la expresión incluida en el programa para realizar el cálculo.

En la tabla (13) se muestra la densidad del aire para el valor de temperatura promedio, con la data suministrada de la estación se entregaron valores a varias temperaturas con lo cual se determinó una expresión para determinar la densidad en función de la temperatura.

**Tabla 13. Valor de la densidad relativa del aire para la temperatura promedio en la estación muestra (Cumaná)**

Temp prom °C	Densidad relativa del aire prom
26,56	0,9939

La información de todas las estaciones meteorológicas recopilada se puede observar en el Anexo N° 2 y en el Anexo N° 3 se muestra la base de datos creada con los datos meteorológicos para el desarrollo del programa de cálculo.

## **CAPÍTULO V**

### **CONDUCTORES ELÉCTRICOS**

#### **5.1 Descripción general**

Todo conductor eléctrico afecta el paso de una corriente eléctrica en mayor o menor grado determinado por su resistencia, el cual está afectado por los factores siguientes: el material del que está formado, grosor y longitud.

En el diseño y análisis de un sistema de transmisión es necesario conocer las características eléctricas y físicas de los conductores empleados en las líneas aéreas, en vista de que representan el medio efectivo de transporte de la energía.

En el sistema de transmisión de CADAFE se emplean de manera exclusiva conductores metálicos desnudos, obtenidos mediante el trenzado de hilos o alambres. Entre los materiales empleados se encuentran el cobre, el aluminio, aleaciones de aluminio y acero.

Conductor: un alambre o una combinación de hilos no aislados los unos de los otros, apropiados para conducir una corriente eléctrica.

#### **5.2 Capacidad térmica del conductor**

La capacidad térmica de un conductor, como ya se ha mencionado en el texto, está relacionada con la corriente eléctrica que puede transportar en función de

su temperatura. En este sentido, existe un límite por encima del cual el conductor pierde sus propiedades y se deteriora.

### **5.3 Especificaciones técnicas**

Los fabricantes de conductores como COALCO, ELECON, ARALVEN, entre otros; al entregar sus productos a la empresa entregan una serie de datos, los cuales corresponden con mediciones de las pruebas realizadas por estos, con el fin de dar las características de operación o permitir que estas puedan ser calculadas. Entre esas características se encuentran el tipo de material, la configuración, el número de hilos, la resistencia, el área, el diámetro del hilo y del conductor entre otras las cuales no influyen en el cálculo del límite térmico.

#### **5.3.1 Características según el tipo de conductor**

##### **5.3.1.1 Conductores de cobre desnudo**

Después de la plata, el cobre es el metal de más alta conductibilidad eléctrica. Debido a su gran ductibilidad, puede usarse fácilmente para fabricar alambres y cables. Resiste la oxidación y corrosión.

El alambre de cobre desnudo, suave, semiduro o duro se usa en líneas de distribución. El cable concéntrico de cobre suave, semiduro o duro se usa en líneas aéreas de distribución, subtransmisión y transmisión.

La conductividad del cobre, medida en %IACS (International Annealed Copper Standard), es de 100% para temple suave, 96.66% para temple semiduro y 96.16% para temple duro.

### 5.3.1.2 Conductores AAC

El aluminio es muy dúctil y maleable y puede estirarse, forjarse y doblarse fácilmente. Es altamente resistente a la corrosión atmosférica, pero el hecho de que se forma rápidamente una delgada capa de óxido resistente y adherente, causa a veces problemas en los contactos eléctricos.

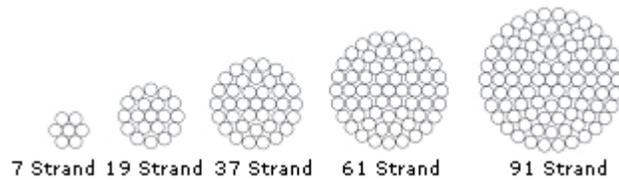
Los conductores AAC (All Aluminium Conductor) se componen de varias capas de aluminio de aleación 1350. Presentan una conductividad de 61 o 62% IACS.

Las aleaciones 1350, son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99.9%, siendo sus principales impurezas el hierro y el silicio como elemento aleante. Se les aporta un 0.12% de cobre para aumentar su resistencia. Estas aleaciones son forjadas sin tratamiento térmico, solo pueden trabajarse en frío para aumentar su resistencia.

Los conductores de aluminio 1350 se clasifican de la siguiente forma:

- Clase AA: conductores normalmente usados en líneas de transmisión aéreas.
- Clase A: conductores a ser recubiertos por materiales resistentes al clima y conductores desnudos con alta flexibilidad.
- Clase B: conductores a ser aislados con diversos materiales y conductores que requieren mayor flexibilidad.
- Clase C: conductores con la más alta flexibilidad.

Las clases están relacionadas con el cableado y son un indicativo de la flexibilidad relativa del conductor, siendo AA la menos flexible y C la de mayor flexibilidad.



**Figura 2 Representación de los alambres AAC**

### **5.3.1.3 Conductores AAAC**

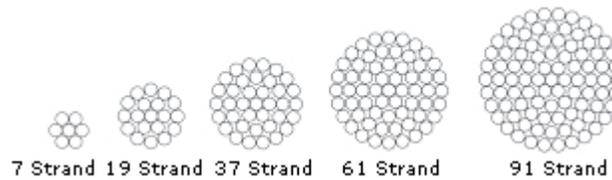
Los conductores AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) son conductores formados exclusivamente por alambres de aleación de aluminio 6201-T81 cableados concéntricamente. Tienen una conductividad del 52.5% IACS.

Las aleaciones 6201-T81 son aleaciones de aluminio forjado con tratamiento térmico en un proceso de precipitación. Los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio.

Son fabricados usando aleación de aluminio de alta fortaleza propiciando así una alta relación resistencia – peso.

La aleación de aluminio del cable AAAC ofrece mayor resistencia a la corrosión que el cable ACSR.

Los conductores de aluminio fabricados según el estándar 6201-T81 son similares a otros conductores conocidos comercialmente como Arvidal, Aldrey o Almelec. Están desarrollados para cubrir la necesidad de un conductor económico para líneas de transmisión que requieren una fortaleza mayor que la proporcionada por los conductores de aluminio 1350, pero sin contener un núcleo de acero.



**Figura 3. Alambres de aleación de aluminio trenzados concéntricamente tipo AAAC**

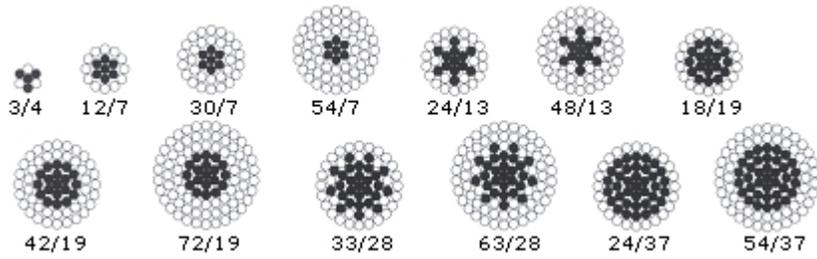
#### **5.3.1.4 Conductores ACAR**

Los conductores ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced) son conductores de cableado concéntrico que se componen de alambres 1350 (H19), reforzados por un núcleo de alambres de aleación de aluminio 6201 (T81).

Los conductores multifilares son más seguros que los simples, puesto que la rotura de uno de los alambres influye poco en la resistencia mecánica total del conductor. A demás, se oponen mejor a la vibración y también poseen flexibilidad más alta que los conductores simples de la misma sección transversal.

Se utilizan en líneas de transmisión largas. La resistencia a la corrosión los hace adecuado para el servicio en ambientes industriales y salitrosos muy severos.

Una buena relación resistencia peso hacen del ACAR un cable recomendable en aplicaciones en las que tanto la corriente máxima que puede soportar el cable como su fortaleza son consideraciones de importancia en el diseño de las líneas de transmisión. Los conductores ACAR ofrecen mayor fortaleza y conducción que los conductores ACSR.

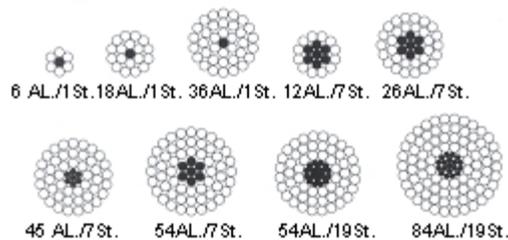


**Figura 4 Diversas configuraciones para los conductores tipo ACAR**

### 5.3.1.5 Conductores ACSR

Los conductores de aluminio desnudo reforzados con acero tipo ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced) son conductores cableados concéntricos, tienen el alma de alambres de acero con gran resistencia mecánica, alrededor de la cual se trenzan capas de alambres de aluminio 1350 de temple duro (H19) de buena conductibilidad.

Gracias a las innumerables combinaciones de alambres de aluminio y de acero que son posibles, se pueden variar las proporciones entre los mismos de modo que se obtenga la mejor relación entre capacidad de transporte de corriente eléctrica y resistencia mecánica para cada tipo de aplicación. Las combinaciones más usuales se muestran en la figura (5):



**Figura 5. Diversas configuraciones para los conductores tipo ACSR**

En las tablas (14) y (15) se observa una de las muestras de las características de los conductores: los ACSR que se emplearon para crear la base de datos del programa para el cálculo del límite térmico el resto se presenta en el Anexo N° 9:

**Tabla 14. Características físicas de los conductores tipo ACSR**

Nombre	MCM	D(in) Al	D(in) St	D(in)	Núcleo	Peso total	Peso Al	Peso St	% Peso Al	% Peso St
PENGUIN	40	6 x 0.1878	1 x 0.1878	0,563	0,187	291	197,6	93,4	67,9	32,1
PARTRIDGE	266,8	26 x 0.1013	7 x 0.0788	0,642	0,236	366	250,4	115,6	68,6	31,4
LINNET	336,4	26 x 0.1137	7 x 0.0884	0,721	0,265	462	316,5	145,5	68,6	31,4
DRAKE	795	26 x 0.1749	7 x 0.1360	1,108	0,408	1093	749	344	68,6	31,4

**Tabla 15. Características eléctricas de los conductores tipo ACSR (2)**

Nombre	MCM	Config	Rdc ( $\Omega/\text{kft}$ )@20°C	Rac 60Hz ( $\Omega/\text{kft}$ )@25°C	Rac 60Hz ( $\Omega/\text{kft}$ )@25°C	Rac 60Hz ( $\Omega/\text{kft}$ )@25°C	Capacitive (M $\Omega/\text{kft}$ )
PENGUIN	40	6\1	0,0795	0,0822	0,1066	0,1157	0,5966
PARTRIDGE	266,8	26\7	0,0637	0,0652	0,0714	0,0778	0,565
LINNET	336,4	26\7	0,0506	0,0517	0,0568	0,0619	0,549
DRAKE	795	26\7	0,0214	0,0222	0,0242	0,0263	0,482

Algunos de los conductores no presentaban los valores de resistencia en corriente alterna por lo tanto tuvieron que ser calculados, a partir de los datos de la resistencia dc y del tipo de material que lo constituye.

### 5.3.2 Resistencia de los conductores

#### 5.3.2.1 Resistencia dc

La resistencia de corriente directa dc, se caracteriza por tener una densidad de corriente distribuida uniformemente en toda la sección transversal del conductor, la cual puede calcularse mediante la ecuación (5.1):

$$R_{dc} = \frac{\rho * l}{A} \quad (5.1)$$

Donde:

$R_{dc}$  es la resistencia del conductor medida en  $\Omega$

$\rho$  resistividad del material conductor medida en  $\Omega\cdot m$

$l$  longitud del conductor medida en m

$A$  área efectiva de la sección transversal del conductor medida en  $m^2$

### 5.3.2.2 Resistencia ac

Una densidad uniforme de corriente ocurre solamente cuando la frecuencia de la corriente es cero (corriente directa). Cuando la corriente se incrementa desde cero, la densidad de corriente se incrementa cerca de la superficie del conductor y disminuye en el centro del mismo.

Este fenómeno se conoce como efecto pelicular, efecto piel o efecto Kelvin. Este fenómeno hace que la resistencia efectiva o de corriente alterna, sea mayor que la resistencia dc.

Por lo tanto partiendo de la resistencia dc del conductor se puede obtener la resistencia ac, incluyendo un factor de corrección como se muestra en la ecuación (5.2):

$$R_{ac} = k * R_{dc} \quad (5.2)$$

Donde

$R_{ac}$  es la resistencia en corriente alterna del conductor medida en  $\Omega/m$

- $R_{dc}$  es la resistencia en corriente directa del conductor medida en  $\Omega/m$
- $k$  factor de corrección por el cambio de corriente continúa a alterna (adimensional)

Este factor  $k$  de corrección o de proporcionalidad se calcula con la ecuación (5.3):

$$k = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{m * r}{2} * \frac{ber(m * r) * bei'(m * r) - bei(m * r) * ber'(m * r)}{(ber'(m * r))^2 + (bei'(m * r))^2} \quad (5.3)$$

Donde

$r$  radio del conductor medido en mm

y el parámetro  $m$  constante que depende del material y de la frecuencia de operación se determina con la ecuación (5.4):

$$m = \sqrt{\frac{\omega * \mu}{\rho}} \quad (5.4)$$

Donde

$\omega$  frecuencia del sistema se mide en radianes por segundo (rad/s)

$\mu$  es la permeabilidad del conductor se mide en H/m

$\rho$  resistividad del material del conductor se mide en  $\Omega\text{-mm}^2/m$

Las expresiones de Bessel usadas para determinar el valor de  $k$  en la expresión (5.3) se pueden aproximar empleando las ecuaciones (5.5), (5.6), (5.7) y (5.8) para las series de potencia:

$$ber(mr) = 1 - \frac{mr^4}{2^2 * 4^2} + \frac{mr^8}{2^2 * 4^2 * 6^2 * 8^2} + \dots \quad (5.5)$$

$$ber(mr) = \frac{mr^2}{2^2} - \frac{mr^8}{2^2 * 4^2 * 6^2} + \dots \quad (5.6)$$

$$ber'(mr) = \frac{d}{d(mr)} ber(mr) \quad (5.7)$$

$$bei'(mr) = \frac{d}{d(mr)} bei(mr) \quad (5.8)$$

Donde

r      radio del conductor medido en mm

m      constante que depende de las características del material

### 5.3.2.3 Resistencia y temperatura

La temperatura es el otro factor que afecta el valor de la resistencia, al aumentar la temperatura de operación del conductor aumenta la resistencia del mismo, el cambio en el rango de operación considerado para la temperatura en las líneas de transmisión es lineal y el cambio en la resistencia viene dado por la ecuación (3.10).

### 5.3.3 Factor de absorción solar y emisividad

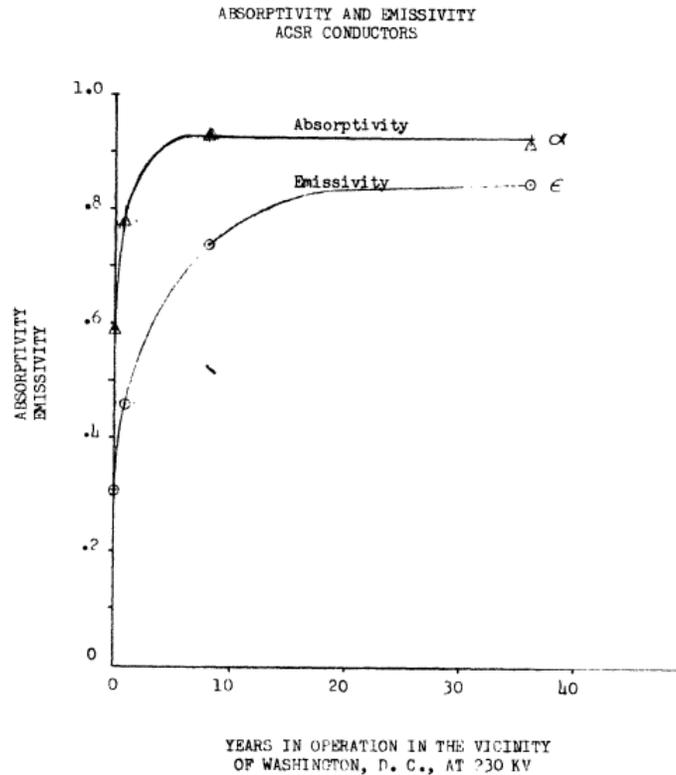
La capacidad de un conductor de absorber y emitir calor es indispensable para determinar la capacidad de transporte de corriente de un conductor.

Se han realizado varios estudios con respecto a la emisividad lo contrario ocurre con el factor de absorción solar que ha sido poco estudiado, la mayoría de las

veces son asumidas que tiene la misma variación. Pero un estudio detallado revela que estos fenómenos no pueden ser iguales por lo menos en el caso de conductores de líneas aéreas.

Un resumen del estudio para tener el comportamiento del factor de absorción y emisividad se muestra a continuación:

- Se tomaron cuatro muestras de conductores operando en un área cercana: (a) la primera muestra es un conductor nuevo (ACSR 795 MCM 24/7), (b) la segunda es una muestra de un conductor (ACSR 1033.5 MCM 45/7) con diez meses de operación en un nivel de tensión de 230kV, (c) la tercera es la de un conductor (ACSR 795 MCM 24/7) operando en un nivel de tensión de 230kV por un periodo de 8 años, (d) la última muestra es de un conductor (ACSR 795 MCM 30/19) operando durante 36 años al mismo nivel de tensión que las anteriores.
- Posteriormente se realizaron pruebas para medir el factor de absorción solar y emisividad de las muestras llegando a obtener la siguiente variación de estos parámetros con el paso de los años, se muestra en la figura (6)



**Figura 6. Factor de absorción solar y emisividad medida para varios conductores con el paso de los años.**

- Una relación matemática directa no es evidente para determinar la emisividad y el factor de absorción solar.
- Los factores que se encontraron que influyen en el cambio de estas características fueran la oxidación del material en la superficie del conductor y de la formación de depósitos de partículas ionizadas debidas a la contaminación ambiental.
- En este estudio se concluyó que los valores óptimos que se deben asignar a la emisividad es de 0.7 y al factor de absorción solar 0.9 para cuando una línea lleva operando varios años, estos valores son el resultado de promediar las mediciones de varios conductores con características similares, y cuando se va a considerar una línea nueva

estos valores se pueden asumir iguales a 0.5, este valor es el resultado de calcular el promedio de las mediciones de conductores con las mismas características; según el estudio realizado estos resultados se pueden generalizar para todos los tipos de conductores desnudos empleados en la construcción de líneas aéreas..

#### **5.4 Condiciones del cálculo térmico de los conductores**

La finalidad de este estudio es determinar la capacidad de transmisión de las líneas. En ese sentido, según la norma CADAFE NL-AV y las condiciones particulares de la zona, se consideraron las siguientes características:

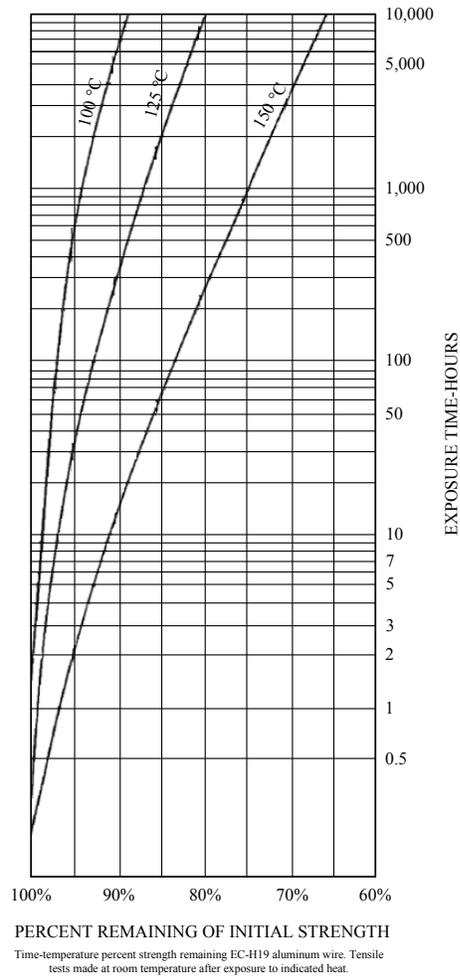
- Altitud promedio de la línea.
- Ángulo de ataque del viento sobre el conductor de 90°.
- Latitud promedio de la zona.
- Azimut promedio de la línea.
- Coeficiente de emisividad 0,5 y 0,7.
- Factor de absorción solar de 0,5 y 0.9.
- Temperatura ambiente media máxima de la zona.
- Temperatura ambiente máxima absoluta de la zona.
- Radiación solar de la zona.

##### **5.4.1 Condiciones de operación**

En condiciones normales de operación, un conductor debe transmitir la potencia normal sin exceder los 75°C, valor que se encuentra dentro del rango máximo de operación para un conductor (70°C – 80°C).

El punto VI.1.3.2 de la norma CADAPE NL-AV establece que para la transmisión de potencia de emergencia no se permitirá, durante la vida útil de la línea, una pérdida de rigidez mecánica mayor al 10% de su valor original, considerando la ocurrencia de esta condición durante 10 horas al año, esto es, si se estima en 30 años la vida útil de la línea, la condición de emergencia ocurrirá durante 300 horas. Ahora bien, la figura 7 presentada por The Aluminum Association, muestra la curva tiempo-rigidez mecánica correspondiente a tres temperaturas de operación para alambres de aluminio. Podemos notar que para no superar una pérdida de rigidez del 5 %, se permite que el conductor trabaje a 100°C durante 500 horas máximo. Para temperaturas menores se infiere del gráfico que el tiempo permisible bajo las condiciones indicadas es aún mayor. Por tanto, se decidió fijar la temperatura de operación para la transmisión de potencia de emergencia en 90°C para los conductores AAAC.

De esta manera, se cumple con la restricción que establece el punto VI.1.3.1 de la norma CADAPE NL-AV, de que la temperatura de operación del conductor no debe exceder los 100°C por más de 600 horas al año durante la vida útil de la línea.



**Figura 7 Curva de horas-temperatura en función del porcentaje de pérdida de rigidez mecánica para conductores de aluminio.**

Para los conductores empleados en las diversas líneas tenemos el siguiente resumen en la tabla (16) donde se indica la temperatura máxima permitida para tener limitada las pérdidas de rigidez mecánicas a un valor menor al 10% del valor original:

**Tabla 16. Temperatura máxima de operación de los conductores en condición de emergencia**

Máxima temperatura para la operación de los conductores	
Tipo	Temperatura
ACSR	100° C
AAAC	90° C
AAC	85° C
ACAR	100° C
Cobre duro	80° C
Cobre alta temp	100° C

### **5.5 Condiciones de operación**

La corriente a ser transmitida por el conductor estará acotada entre los valores máximos y mínimos que resulten de las siguientes hipótesis, basadas en las expuestas en el punto VI.1.3.2 de la norma CADAFE NL-AV:

Para realizar el cálculo del límite térmico se fijaron las siguientes condiciones de operación para las líneas de transmisión:

Se definieron las siguientes variables para operación normal:

- Temperatura ambiente igual a la temperatura promedio de la zona donde se encuentra ubicada la línea de transmisión.
- Velocidad de viento igual a cero.
- Temperatura de operación máxima para el conductor igual a 75°C en régimen estacionario.

Para la condición de emergencia se definieron las siguientes variables:

- Temperatura ambiente igual a la temperatura promedio de la zona donde se encuentra la línea.

- Velocidad de viento igual a 0.6 m/s.
- Temperatura máxima de operación depende del tipo de conductor de la línea.

Es preciso destacar, que la velocidad del viento para la hipótesis de emergencia dada por la norma CADAPE NL-AV es 3,192 km/h. Sin embargo, se asumió la velocidad promedio de la zona por ser un caso más desfavorable.

## **5.6 Criterios de cálculo**

Para el cálculo del límite térmico se tomaron los siguientes criterios:

- Conductor nuevo: se consideró que los valores de emisividad y el factor de absorción solar para los conductores nuevos toman un valor de 0.5. Tomados del estudio presentado en el punto 5.3.3.
- Conductor viejo: se consideró que un conductor viejo tiene un valor de emisividad de 0.7 y el factor de absorción solar de 0.9, tomado del estudio presentado en el punto 5.3.3.
- El valor de radiación solar se asumió como el valor reportado por la estación meteorológica, el cual es el valor promedio.
- La variación de la resistencia con respecto a la temperatura es lineal según recomendación de la norma IEEE Std 738 punto 3.4.7, para el rango de operación considerado.
- La temperatura máxima de operación normal para los conductores es de 75°C y para la condición de operación de emergencia la temperatura máxima del conductor es la indicada en la tabla (17).
- El viento mínimo que incide sobre una línea de transmisión es de 0.6 m/s y con un ángulo de ataque igual a 90°.

# CAPÍTULO VI

## PROGRAMA DE CÁLCULO

### 6.1 Descripción general

El objetivo fundamental del programa es realizar los cálculos de la capacidad de corriente de las líneas aéreas de transmisión de una forma sencilla sin la necesidad de manejar directamente las expresiones de balance térmico y flujo de calor. Esto para cualquier tipo de conductor, condición ambiental y condiciones del sistema de potencia.

### 6.2 Características del programa

MATLAB es un lenguaje de programación que integra la potencia del cálculo, la visualización de resultados y la sencillez de programación.

Es un sistema interactivo cuyo elemento básico es una matriz que no requiere dimensionamiento previo. La sencillez de este planteamiento facilita la resolución de problemas que en otros entornos de trabajo resultan más complejos.

El entorno de trabajo consta de cinco partes:

- El entorno de desarrollo
- La librería de funciones
- El lenguaje de programación
- El manejo de gráficos.

- La interfaz de programas de aplicación

El programa para el cálculo del límite térmico fue realizado bajo el lenguaje de MATLAB.

El programa realizado para el cálculo de la capacidad de corriente a partir de las ecuaciones del flujo de calor, presenta una gran versatilidad a la hora de mostrar los resultados, puede presentar una tabla de valores para distintas condiciones ambientales o de funcionamiento del sistema de potencia o puede mostrar un único valor correspondiente a la operación en condiciones normales, todo esto con la manipulación de algunas líneas del código del programa.

En el programa se pueden cargar los datos del conductor empleado y de las condiciones del ambiente, o pueden tomarse de una base de datos cargada previamente por el programador con la finalidad de simplificar aun más su manejo.

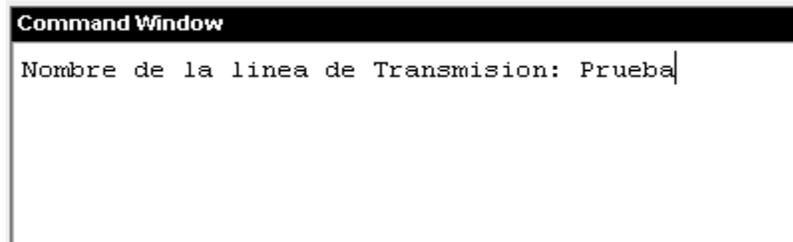
### **6.3 Muestra del programa**

A continuación se muestra la ejecución del programa, para determinar la corriente que circula por el conductor “Drake” 26/7 ACSR 795 MCM, bajo una serie de condiciones que se muestran a continuación con el fin de comparar los resultados del programa con los de la norma IEEE Std 738. Las condiciones son las siguientes:

- Velocidad de viento ( $V$ ) 0.6 m/s perpendicular al conductor.
- Emisividad ( $\epsilon$ ) 0.5.
- El factor de absorción solar ( $\alpha$ ) 0.5.
- Temperatura ambiente del aire ( $T_a$ ) 40°C.
- Temperatura de operación del conductor ( $T_c$ ) 100°C.

- Diámetro del conductor (d) 28.1 mm.
- Resistencia en ac del conductor:  $R (25^{\circ}\text{C}) = 7.283 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$ ,  
 $R (75^{\circ}\text{C}) = 8.688 \cdot 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .
- Azimut de la línea ( $Z_L$ )  $90^{\circ}$
- Latitud  $30^{\circ}$  N
- Atmósfera clara
- Altitud solar ( $H_c$ ) 10 de junio a las 11am.
- Altura del conductor 100m.

La primera pantalla se muestra en la ilustración (1), la cual solicita el nombre de la línea.



**Ilustración 1. Primera pantalla del programa de cálculo: nombre de la línea.**

Después que es ingresado el nombre se pide indicar la ubicación de la línea, es decir, el estado donde se encuentra ubicada, como este caso es una prueba bajo condiciones específicas esta se omite, se muestra en la ilustración (2):

```
Command Window
Nombre de la linea de Transmision: Prueba
0 Amazonas
1 Anzoategui
2 Apure
3 Aragua
4 Barinas
5 Bolivar
6 Carabobo
7 Cojedes
8 D_Capital
9 D_Amacuro
10 Falcon
11 Guarico
12 Lara
13 Merida
14 Miranda
15 Monagas
16 N_Esparta
17 Portuguesa
18 Sucre
19 Tachira
20 Trujillo
21 Vargas
22 Yaracuy
23 Zulia
Selecciona el estado 0
```

**Ilustración 2. Segunda pantalla del programa: selección de estado**

En la siguiente pantalla se solicitan la altura promedio de la línea, la temperatura ambiente, la radiación, el factor de absorción solar, velocidad de viento y el ángulo entre la dirección del viento y el eje de la línea, como se muestra en la ilustración (3):

```
Command Window
Introduzca la altura promedio del terreno (m)= 100
Introduzca el valor de la temperatura ambiente Ta (°C)= 40
Introduzca la radiacion (W/m^2)= 1023
Introduzca el factor de absorcion solar = 0.5
Introduzca la Velocidad del Viento (m/s)=0.61
Introduzca el angulo entre el viento y la linea (°)= 90
```

**Ilustración 3 Tercera pantalla del programa: datos del medio ambiente**

La siguiente pantalla muestra la lista de conductores disponibles, en la base de datos del programa, en el se encuentra el conductor empleado para la prueba, con los mismos datos que las condiciones iniciales. A continuación se muestra la lista, en la ilustración (4):

```
Command Window
0 AAAC 336.4 MCM 19 HILOS
1 AAAC 4/O 19 HILOS
2 AAAC 350 mcm 37 hilos
3 AAAC 500 mcm 19 hilos
4 AAAC 927.2 mcm 37 hilos
5 AAAC 954 mcm 61 hilos
6 ACAR 4/O 6/1
7 ACAR 350 mcm 12/7
8 ACAR 500 mcm 18/19
9 ACAR 1000 mcm 18/19
10 ACAR 1100 mcm 18/19
11 ACSR 4/O 6/1
12 ACSR 266.8 26/7
13 ACSR 336.4 mcm 26/7
14 ACSR 795 mcm 26/7
15 ARVIDAL 336.4 mcm 19 hilos
16 ARVIDAL 636 mcm 37 hilos
17 COBRE 350 mcm 37 hilos
18 COPPERWELD 4/O
Seleccione el conductor de la lista mostrada: 14
```

**Ilustración 4. Cuarta pantalla del programa: selección del conductor**

En la pantalla siguiente se solicitan las condiciones de operación del conductor, es decir, la temperatura de operación y la emisividad consideradas, se muestran en la ilustración (5):

```
Command Window
Introduzca el valor de temperatura de operacion del conductor Tc= 100
Introduzca la emisividad a considerar del conductor = 0.5
```

**Ilustración 5. Quinta pantalla del programa: datos de operación del conductor**

Por último se muestran los resultados obtenidos en la ilustración (6), donde se indican los valores que se emplean en la ecuación de balance térmico para calcular finalmente la corriente que circula por el conductor.

Tc	Qc	Qs	Qr	I
100.00,	81.6150,	14.3885,	24.4322,	991.8245,

**Ilustración 6. Sexta pantalla del programa: exposición de los resultados**

Los resultados dados por la norma IEEE Std 738 son los siguientes:

$$Q_c = 82.3 \text{ W/m}$$

$$Q_s = 14.1 \text{ W/m}$$

$$Q_r = 24.44 \text{ W/m}$$

$$I = 993.5 \text{ A}$$

Al comparar los resultados vemos que el error cometido por el programa es menor al 1%. Por lo tanto los resultados son confiables.

El código fuente del programa se encuentra especificado en el Anexo N° 5.

Con el programa elaborado por el autor se realizaron todos los cálculos necesarios para el límite térmico, una muestra de los resultados se indica en el siguiente capítulo y el resto se encuentra en el Anexo N° 6.

## CAPÍTULO VII

### RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 7.1 Resultados del cálculo del límite térmico

Los resultados del cálculo del límite térmico para de las líneas de transmisión del sistema de transmisión de CADAFE para los niveles de tensión de 115 kV, 230 kV y 400 kV, se observan en el Anexo N° 5.

A continuación en la tabla (17) donde se indican los resultados obtenidos para las líneas que conforman el universo del estudio; se comparan los resultados obtenidos con los datos cargados en el programa por el Power Factory DigSilent empleado para realizar las simulaciones.

En la tabla (17) se muestra la variación porcentual de la corriente nominal con los cálculos obtenidos con la realización del trabajo con respecto a los datos previos. Los valores con signo negativo representan las líneas donde la capacidad de corriente aumentó.

**Tabla 17. Resultado del cálculo de límite térmico comparados con los valores anteriores**

Nombre línea	Inom(kA) Anterior	Inom(kA) Calculado	Cambio %
Altagracia - Valle de la Pascua	0,426	0,222	47,89
Alvarenga – Charallave	0,451	0,347	23,06
Aragua – Cagua	0,401	0,257	35,91
Aragua – Corinsa	0,451	0,348	22,84
Aragua - Palo Negro	0,451	0,348	22,84
Aragua - Soco L1	0,401	0,257	35,91
Aragua - Soco L2	0,401	0,257	35,91
Aragua - V. de Cura II	0,451	0,348	22,84
Cabruta - Los Pijiguaos L1	0,6	0,6	0,00

Cabruta - Los Pijiguaos L2	0,6	0,6	0,00
Calabozo - San Fernando L1	0,559	0,362	35,24
Calabozo - San Fernando L2	0,559	0,362	35,24
<b>Camatagua – Hidrocapital</b>	<b>0,401</b>	<b>0,573</b>	<b>-42,89</b>
Camatagua - S.J. de los Morros	0,4	0,257	35,75
Caucagua – Higuero	0,5	0,5	0,00
Caucagua – Tacarigua	0,6	0,6	0,00
Caña de Azúcar – Centro	0,451	0,348	22,84
Caña de Azúcar - El Limón	0,451	0,348	22,84
Charallave - Ocumare L1	0,451	0,347	23,06
Charallave - Ocumare L2	0,451	0,347	23,06
Corinsa - V. de Cura II	0,451	0,348	22,84
Diego Losada - Alvarenga	0,301	0,301	0,00
Diego Losada – Ocumare	0,301	0,301	0,00
Diego Lozada - Santa Lucía	0,5	0,5	0,00
Diego Lozada – Yare	0,6	0,6	0,00
El Macaro - La Morita L1	0,451	0,348	22,84
El Macaro - La Morita L2	0,451	0,348	22,84
El Macaro - San Jacinto L1	0,451	0,348	22,84
El Macaro - San Jacinto L2	0,451	0,348	22,84
El Sombrero II - Calabozo L1	0,451	0,337	25,28
El Sombrero II - Calabozo L2	0,451	0,337	25,28
El Sombrero II - El Sombrero I	0,4	0,4	0,00
El Sombrero II - S.J. de los Morros	0,451	0,373	17,29
La Cabrera - Caña de Azúcar	0,902	0,696	22,84
La Cabrera - El Limón	0,6	0,6	0,00
La Cabrera - San Ignacio L1	0,401	0,257	35,91
La Cabrera - San Ignacio L2	0,401	0,257	35,91
<b>La Cabrera - San Vicente</b>	<b>0,3</b>	<b>0,348</b>	<b>-16,00</b>
La Mariposa - La Victoria	0,3	0,301	-0,33
La Mariposa – Tejerías	0,4	0,373	6,75
La Morita - San Jacinto	0,451	0,348	22,84
<b>La Morita - San Vicente</b>	<b>0,3</b>	<b>0,348</b>	<b>-16,00</b>
La Victoria – Soco	0,301	0,301	0,00
Las Delicias – Centro	0,451	0,348	22,84
Los Pijiguaos - El Jobal	0,559	0,444	20,57
Los Pijiguaos - P. Ayacucho L1	0,6	0,6	0,00
Los Pijiguaos - Pto Nuevo	0,6	0,6	0,00
Mariposa - Inos Panamericanos	0,802	0,538	32,92
Ocumare – FNC	0,451	0,347	23,06
P.ayacucho - Pto Nuevo	0,6	0,6	0,00
Río Chico – Higuero	0,5	0,5	0,00
Río Chico II - Río Chico I L1	0,451	0,307	31,93
Río Chico II - Río Chico I L2	0,451	0,307	31,93
S. J. de los Morros - Conceca	0,401	0,275	31,42
SOCO – CONDUVEN	0,559	0,42	24,87

San Fernando – Gorrín	0,4	0,307	23,25
San Gerónimo - Cabruta L1	0,908	0,625	31,17
San Gerónimo - Cabruta L2	0,908	0,625	31,17
San Gerónimo - El Sombrero II	0,559	0,43	23,08
San Gerónimo – Zaraza	0,451	0,355	21,29
<b>San Jacinto - Las Delicias</b>	<b>0,3</b>	<b>0,348</b>	<b>-16,00</b>
Santa Lucía – Charallave	0,451	0,347	23,06
Santa Teresa – Altagracia	0,316	0,201	36,39
Santa Teresa – Camatagua	0,464	0,279	39,87
Santa Teresa - Caucagua L1	0,5	0,5	0,00
Santa Teresa - Caucagua L2	0,49	0,49	0,00
Santa Teresa - La Mariposa L1	0,4	0,268	33,00
Santa Teresa - La Mariposa L2	0,4	0,268	33,00
Santa Teresa - Taguacita L1	0,5	0,5	0,00
Soco - Aragua L1(Cagua TR3-Aragua)	0,375	0,375	0,00
Tacarigua - Río Chico	0,301	0,301	0,00
Tejerías – Soco	0,301	0,301	0,00
Toff Caicara – Caicara	0,559	0,444	20,57
Toff Ivic - IVIC L1	0,3	0,3	0,00
Toff Ivic - IVIC L2	0,3	0,3	0,00
V. de Cura II - V. de Cura I L1	0,451	0,348	22,84
V. de Cura II - V. de Cura I L2	0,451	0,348	22,84
V. de Cura II - S.J. de los Morros L1	0,559	0,42	24,87
V. de Cura II - S.J. de los Morros L2	0,559	0,42	24,87
Valle de la Pascua - San Gerónimo	0,4	0,4	0,00
Yare – Ocumare	0,301	0,301	0,00
Acarigua I - Acarigua II	0,451	0,329	27,05
Acarigua I – Guanare	0,6	0,6	0,00
Acarigua II - Acarigua I	0,451	0,329	27,05
Acarigua II – Araure	0,6	0,6	0,00
Acarigua II – Turen	0,15	0,15	0,00
Araure – Guanare	0,6	0,6	0,00
Arenosa - Yaguara L1 y L2	1,118	0,772	30,95
Aroa - A. Grande	0,464	0,283	39,01
Cabudare - Acarigua I	0,45	0,45	0,00
Caley B - San Felipe	0,15	0,15	0,00
Carabobo - Flor Amarillo	0,902	0,642	28,82
Carbonero - Caley A	0,301	0,301	0,00
Carbonero - Palma Sola	0,15	0,15	0,00
Carbonero - San Felipe	0,301	0,301	0,00
Chivacoa – Nirgua	0,301	0,301	0,00
El Isiro - C.Caribe	0,451	0,316	29,93
El Isiro - Coro I	0,25	0,25	0,00
El Isiro - Coro II	0,25	0,25	0,00
El Isiro - Punto Fijo 2	0,584	0,584	0,00
El Isiro - Urumaco L1 y L2	0,902	0,632	29,93

Guacara - Guacara II	0,464	0,276	40,52
Guacara I - Carabobo I1 y L2	0,902	0,642	28,82
Guacara I - San Diego	0,464	0,276	40,52
Guacara II - San Diego	0,559	0,386	30,95
Judibana - Los Taques	0,451	0,316	29,93
Morón - Carbonero	0,6	0,6	0,00
Morón - Tucacas	1,2	1,2	0,00
P.Este - Valencia	0,5	0,5	0,00
Palma Sola - Aroa	0,2	0,2	0,00
Pedro Camejo - Carabobo L1 y L2	1,834	0,772	57,91
Pedro Camejo - P.Este	0,5	0,5	0,00
Pedro Camejo - Valencia	0,5	0,5	0,00
Planta Centro - Carbonero	0,6	0,6	0,00
Planta Centro - Guaparo	0,301	0,301	0,00
Planta Centro - Morón L1 y L2	0,928	0,552	40,52
Planta Centro - Petroquímica L1 y L2	0,928	0,552	40,52
Planta Centro - Valle Seco	0,301	0,301	0,00
Punto Fijo 2 - Judibana	0,451	0,316	29,93
Punto Fijo2 - Punto Fijo 1 L1 y L2	0,902	0,632	29,93
San Diego - Bárbula	0,451	0,321	28,82
San Diego - Guaparo	0,464	0,276	40,52
San Diego - Inos S. Diego	0,3	0,3	0,00
San Diego - Los Guayos	1,118	0,772	30,95
San Diego - Pedro Camejo L1 y L2	0,928	0,552	40,52
San Felipe - Chivacoa	0,301	0,301	0,00
Santa Clara - Caña de Azúcar L1	0,464	0,276	40,52
Santa Clara - Caña de Azúcar L2	0,464	0,276	40,52
Santa Clara - Guacara L1	0,3	0,297	1,00
Santa Clara - Guacara L2	0,301	0,301	0,00
Tinaquillo - San Carlos	0,464	0,291	37,28
Toff Chichiriviche - Chichiriviche	0,464	0,271	41,59
Toff Polar	0,3	0,3	0,00
Tucacas - Yaracal	0,277	0,277	0,00
Valencia - Florida	0,464	0,276	40,52
Valencia - Inos Valencia L1 y L2	0,602	0,602	0,00
Valle Seco - Bárbula	0,301	0,301	0,00
Yaguara - Bejuma	0,464	0,276	40,52
Yaguara - Tinaquillo L1	0,464	0,276	40,52
Yaguara - Tinaquillo L2	0,464	0,276	40,52
Yaritagua - Cabudare	0,928	0,566	39,01
Yaritagua - Chivacoa	0,6	0,6	0,00
Yaritagua - San Carlos	0,451	0,329	27,05
Castillito (ELEVAl) - Los Guayos	0,502	0,502	0,00
Castillito - Pta. Castillito	0,502	0,502	0,00
P. Este (ELEVAl) - Castillito	0,502	0,502	0,00
Pta. Este (ELEVAl) - Pta. Castillito	0,502	0,502	0,00

Aragua - La Arenosa DT	1,584	1,166	26,39
Aragua - La Horqueta DT	1,584	1,166	26,39
Arenosa - Cabudare	0,629	0,425	32,43
Arenosa - Hidrocentro	1,584	1,09	31,19
Arenosa - San Diego	1,118	0,772	30,95
Barquisimeto - Yaracuy	1,2	0,425	64,58
Cabudare - Barquisimeto	0,753	0,753	0,00
Cabudare - Yaracuy	1,2	0,425	64,58
Caña de Azúcar - El Macaro	0,857	0,609	28,94
Ciudad Lozada - Inos Camatuy 1 y 2	1,756	1,756	0,00
Diego Lozada - La Horqueta	0,792	0,583	26,39
Diego Lozada - Tiara	0,792	0,525	33,71
Horqueta - El Macaro	1,714	1,146	33,14
Horqueta-Calabozo L1	1,816	1,176	35,24
La Arenosa - Valencia	1,584	0,964	39,14
Planta Centro - El Isiro L1	0,794	0,473	40,43
Planta Centro - El Isiro L2	0,908	0,542	40,31
San Diego - Caña de Azúcar	0,753	0,386	48,74
San Diego - El Macaro	0,857	0,553	35,47
Santa Teresa - Aragua	0,794	0,489	38,41
Santa Teresa - Diego Lozada	1,584	1,05	33,71
Santa Teresa - Río Chico II	0,792	0,792	0,00
Tiara - La Horqueta	0,792	0,482	39,14
Yaracuy - Acarigua II DT	1,714	1,068	37,69
Yaracuy - Las Morochas DT	1,258	0,85	32,43
La Arenosa - Yaracuy	0,908	0,276	69,60
La Horqueta - La Arenosa L1	0,908	0,276	69,60
La Horqueta - La Arenosa L2	0,908	0,276	69,60
Planta Centro - La Arenosa L1	0,908	0,276	69,60
Planta Centro - La Arenosa L2	0,908	0,276	69,60
Planta Centro - La Arenosa L3	0,908	0,276	69,60
Planta Centro - Yaracuy	0,908	0,276	69,60
Santa Teresa - D.de Lozada	0,908	0,302	66,74
Yaracuy - El Tablazo L1	0,908	0,284	68,72
Yaracuy - El Tablazo L2	0,908	0,284	68,72
Yaracuy - El Tablazo L3	0,908	0,284	68,72
Barinas - El Toreño	0,316	0,195	38,29
Barinas - Planta Páez L1	0,451	0,344	23,73
Barinas - Planta Páez L2	0,451	0,344	23,73
Barinas - Socopo	0,316	0,195	38,29
Barinas I - Sipororo	0,451	0,329	27,05
Barinas I- Barinas III	0,301	0,301	0,00
Barinas II- Barinas III	0,301	0,301	0,00
Barinas IV - Barinas I	0,301	0,301	0,00
Barinas IV - Barinas II	0,301	0,301	0,00
Buena Vista - Caja Seca	0,301	0,301	0,00

Buena Vista - Trujillo	0,5	0,5	0,00
Buena Vista - Valera II	0,451	0,322	28,60
Corozo - La Concordia L1 L2	0,902	0,594	34,15
Corozo - San Antonio	0,451	0,297	34,15
Corozo - San Cristóbal	0,301	0,301	0,00
Corozo - San Cristóbal II	0,4	0,4	0,00
Ejido -Tovar	0,3	0,3	0,00
Fría II- San Antonio	0,451	0,297	34,15
Fría II- Táchira L1 L2	0,902	0,516	42,79
Guanare - Peña Larga	0,451	0,329	27,05
La Grita - El Corozo	0,301	0,301	0,00
La Grita - San Cristóbal	0,301	0,301	0,00
La Grita - Táchira L1 L2	0,928	0,44	52,59
La Grita - Tovar L1	0,464	0,22	52,59
La Grita - Tovar L2	0,559	0,22	60,64
Las Flores - Guanare	0,451	0,329	27,05
Las Flores - Sipororo	0,451	0,329	27,05
Monay - C. Andinos	0,451	0,322	28,60
Mérida II - Mérida I	0,301	0,301	0,00
Mérida II-Ejido	0,464	0,319	31,25
P PÁEZ - MÉRIDA II	0,556	0,448	19,42
P. Grande - P. Táchira	0,301	0,301	0,00
Palo Grande - Corozo	0,3	0,3	0,00
Peña Larga - Barinas	0,6	0,6	0,00
Planta Páez - Mérida II L1	0,559	0,449	19,68
Planta Páez - Valera L1 L2	0,902	0,644	28,60
S.Cristóbal II- Táchira	0,5	0,5	0,00
Sta Barbará - Guasualito	0,301	0,301	0,00
T OFF MUCUBAJÍ	0,6	0,6	0,00
TOff - La Pedrera	0,301	0,301	0,00
Toreño - Libertad	0,316	0,195	38,29
Uribante - Guasualito	0,297	0,297	0,00
Uribante - Sta Barbará	0,5	0,5	0,00
Valera I- Buena vista	0,559	0,387	30,77
Valera II - Trujillo	0,301	0,301	0,00
Valera II - Valera I	0,451	0,322	28,60
Valera II-Monay	0,451	0,322	28,60
Vigía I - Vigía II	0,464	0,319	31,25
Vigía I - Fría II	0,451	0,297	34,15
Vigía I - Mérida II	0,451	0,449	0,44
Vigía I - Tovar	0,464	0,319	31,25
Vigía II - San Carlos del Zulia	0,301	0,301	0,00
Acarigua II - Barinas IV	0,908	0,415	54,30
Acarigua II - Las Flores	0,908	0,566	37,67
Barinas IV - Planta Páez	1,816	1,816	0,00
Buena Vista - Planta Páez	0,794	0,484	39,04

Buena Vista - Vigía II	0,908	0,555	38,88
Corozo - San Mateo	1,816	0,996	45,15
El Corozo - Uribante L1	1,816	0,996	45,15
Las Flores - Barinas IV	0,908	0,415	54,30
Las Morochas - Buena Vista	0,794	0,484	39,04
Uribante - El Vigía II	0,908	0,498	45,15
Uribante - San Agatón I N°1	0,908	0,498	45,15
Uribante - San Agatón II N°2	0,908	0,498	45,15
C. Bolívar - Farallones L1	1,118	0,852	23,79
Caroní - Cocuy	0,5	0,5	0,00
Caroní - Los Olivos	0,6	0,6	0,00
Caroní - O. Aeropuerto	0,5	0,5	0,00
Caroní - S. Aeropuerto	0,6	0,6	0,00
Chirica - San Félix	0,575	0,575	0,00
Guaiparo - Pto Ordaz	0,6	0,6	0,00
Los Olivos - S. Aeropuerto	0,6	0,6	0,00
Macagua - Upata	0,464	0,291	37,28
Macagua I Nva - Vista al Sol	0,6	0,6	0,00
Macagua I Nva- Chirica	0,6	0,6	0,00
Macagua I Nva- San Félix	0,6	0,6	0,00
O. Aeropuerto - Cocuy (NA)	0,5	0,5	0,00
O. Aeropuerto - Unare	0,502	0,502	0,00
Orinoco - Guaiparo	0,6	0,6	0,00
Orinoco - Puerto Ordaz	0,6	0,6	0,00
S. Aeropuerto - Unare	0,502	0,502	0,00
Upata - Villa Lola	0,464	0,291	37,28
Villa Lola - Callao II	0,475	0,475	0,00
Vista al Sol - Chirica	0,575	0,575	0,00
Anaco - El Roble	0,559	0,432	22,72
Anaco - El Tigre	0,451	0,317	29,71
Anaco - El Tigre III	0,451	0,317	29,71
Anaco - Rebombeo II	0,559	0,432	22,72
El Roble - Los Pilones	0,464	0,307	33,84
El Tigre - El Tigre II	0,4	0,4	0,00
El Tigre - El Tigre III	0,451	0,317	29,71
El Tigre II- Santa Bárbara	0,451	0,317	29,71
Jose - Bitor	0,501	0,501	0,00
Jose - Santa Rosa	0,501	0,501	0,00
Jose - Taej	0,501	0,501	0,00
Rebombeo I - Rebombeo II	0,559	0,432	22,72
Rebombeo II - Bitor	0,559	0,432	22,72
Rebombeo II - Santa Rosa	0,559	0,432	22,72
Santa Bárbara - Travieso	0,541	0,402	25,69
Taej - Bitor	0,501	0,501	0,00
Tigre I - El Esfuerzo	0,4	0,4	0,00
Tigre II - El Esfuerzo	0,4	0,4	0,00

Travieso - Amana	0,541	0,402	25,69
Travieso - Rebombeo I	0,559	0,432	22,72
Travieso - Tejero	0,422	0,309	26,78
BOULEVARD - QUIRIQUIRE	0,4	0,4	0,00
Furrial - Amana	0,8	0,8	0,00
Furrial - Jusepín	0,8	0,8	0,00
Furrial - Pirital L1	0,8	0,8	0,00
Furrial - Pirital L2	0,8	0,8	0,00
Jusepín - Amana	0,8	0,8	0,00
Jusepín PDVSA - Jusepín PDVSA2	0,501	0,501	0,00
Maturín - Boulevard	0,4	0,4	0,00
Barbacoa - Curaguaro	0,4	0,4	0,00
Barbacoa - Isleta	0,451	0,317	29,71
Barcelona - Barbacoa	0,6	0,6	0,00
Barcelona - Cuartel	0,5	0,317	36,60
Barcelona - Parchita	0,6	0,6	0,00
Chuparín - Barbacoa	0,464	0,307	33,84
Chuparín - Guanta II L1	0,451	0,317	29,71
Chuparín - Guanta II L2	0,5	0,5	0,00
Chuparín - Paraiso	0,451	0,317	29,71
Cuartel - Lecherías	0,451	0,317	29,71
Cumana II - Guanta L1	0,388	0,242	37,63
Cumana II - TOFF Sta Fe	0,5	0,5	0,00
Cumana II - Tres Picos I1 y L2	1,004	1,004	0,00
Curaguaro - Guaraguao	0,451	0,317	29,71
Guanta - Guanta II L1	0,5	0,5	0,00
Guanta - Guanta II L2	0,5	0,5	0,00
Guanta - Guaraguao	0,5	0,5	0,00
Guanta II - Barcelona	0,4	0,317	20,75
Guanta II - TOFF Sta Fe	0,5	0,5	0,00
Isleta - Clarines	0,451	0,317	29,71
Jose - CR Jose	0,301	0,301	0,00
Parchita - Barbacoa	0,563	0,432	23,27
Toff - Santa Fé	0,451	0,337	25,28
Cariaco - Cumaná II	0,464	0,29	37,50
Carupano - Irapa	0,451	0,337	25,28
Casanay - Cariaco	0,316	0,196	37,97
Casanay - Carupano L1	0,327	0,206	37,00
Casanay - CarúpanoL2	0,451	0,337	25,28
Casanay - Chacopata L1 y L2	1,118	0,814	27,19
Casanay - Cumaná II	0,451	0,337	25,28
Cumana II - Manzanares	0,301	0,301	0,00
Cumana III- Manzanares	0,301	0,301	0,00
Cumaná II- Cumaná III	0,5	0,5	0,00
Irapa - Güiría	0,451	0,337	25,28
Barbacoa - Barbacoa II	1,816	1,256	30,84

Barbacoa - El Tigre L1 y L2	1,584	1,09	31,19
Barbacoa - Río Chico II	0,792	0,792	0,00
Barbacoa - Santa Teresa	0,792	0,457	42,30
Barbacoa II - Guanta II	1,816	1,256	30,84
El Tigre - Cdad. Bolívar	1,816	1,24	31,72
Guayana - Bolívar	1,584	1,076	32,07
Indio - Casanay	1,816	1,318	27,42
Tigre - Indio	1,816	1,318	27,42
El Tigre - Barbacoa II	0,808	0,296	63,37
Amana - Muscar	0,5	0,5	0,00
El Indio - Jusepín	0,301	0,301	0,00
El Indio - La Paz L1	0,451	0,372	17,52
El Indio - Maturín L1	0,451	0,372	17,52
<b>El Indio - Maturín L2</b>	<b>0,301</b>	<b>0,372</b>	<b>-23,59</b>
El Indio - Temblador	0,902	0,744	17,52
El Indio Trf - La Paz Trf L2	0,451	0,372	17,52
Maturín - Jusepín	0,301	0,301	0,00
Maturín - Quiriquire	0,4	0,4	0,00
Muscar - Indio	0,422	0,318	24,64
Tejero - Muscar	0,422	0,309	26,78
Temblador - Tucupita	0,316	0,21	33,54

Los resultados en esta tabla están dados para condiciones normales de operación, las cuales se definieron de la siguiente manera:

- Temperatura ambiente promedio la cual está dada por la ubicación de la línea, según la estación meteorológica más cercana.
- Velocidad de viento nula (0 m/s)
- Radiación promedio dada por la estación meteorológica.
- Factor de absorción solar igual a 0.9
- Emisividad 0.7

Se tomó una muestra de los resultados obtenidos para poder realizar un análisis de los mismos. Se seleccionó la línea Barinas – Sipororo ubicada en el estado Barinas, tiene una longitud de 56 km y opera en un nivel de tensión de 115 kV.

En la tabla (18) se muestran los resultados del cálculo del límite térmico para la línea Barinas – Sipororo, se tiene una temperatura de operación fija del conductor en 75 °C (el cual es el valor máximo permitido en condición de operación normal); se considera el conductor nuevo, es decir, se toma la emisividad y el factor de absorción solar con un valor de 0.5; se toma en cuenta solo dos valores de temperatura del aire, las cuales corresponden al valor promedio y al valor máximo promedio; para la velocidad de viento se considera el valor mínimo promedio, el valor de 0.6 m/s y sin viento, esto para poder comparar con los valores suministrados por los fabricantes. La última consideración mostrada es la presencia o no del sol.

**Tabla 18. Resultado del cálculo del límite térmico para la línea Barinas-Sipororo, conductor nuevo, condición de operación normal**

ACAR 350 MCM (12/7)		Barinas Sipororo					Condiciones <sup>1</sup>
Tc (°C)	I (A)	Ta (°C)	Qc (W/m)	Qs (W/m)	Qr (W/m)	V (m/s)	
75,00	703,14	26,40	72,40	11,20	10,17	1,20	CSCV
75,00	756,33	26,40	72,40	0,00	10,17	1,20	SSCV
75,00	587,80	26,40	50,90	11,20	10,17	0,60	CSCV
75,00	650,48	26,40	50,90	0,00	10,17	0,60	SSCV
75,00	389,78	26,40	22,96	11,20	10,17	0,00	CSSV
75,00	479,11	26,40	22,96	0,00	10,17	0,00	SSSV
75,00	596,48	38,40	54,49	11,20	8,07	1,20	CSCV
75,00	658,34	38,40	54,49	0,00	8,07	1,20	SSCV
75,00	493,72	38,40	38,31	11,20	8,07	0,60	CSCV
75,00	566,90	38,40	38,31	0,00	8,07	0,60	SSCV
75,00	298,14	38,40	15,96	11,20	8,07	0,00	CSSV
75,00	408,06	38,40	15,96	0,00	8,07	0,00	SSSV

<sup>1</sup> $\Phi$  (°) = 90°, e = 0.5, a = 0.5, QS (W/m<sup>2</sup>) = 1300, H (m) = 200,00

CSCV con sol con viento; SSCV sin sol con viento; CSSV con sol sin viento; SSSV sin sol sin viento

La tabla (19) presenta las mismas consideraciones que la tabla (18), salvo la diferencia que en esta el conductor se considera viejo, es decir, la emisividad toma un valor de 0.7 y para el factor de absorción solar toma un valor de 0.9; el resto permanece igual.

**Tabla 19. Resultados del cálculo de límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor viejo, condición de operación normal**

ACAR 350 MCM (12/7)		Barinas Sipororo					Condiciones <sup>1</sup>
Tc (°C)	I (A)	Ta (°C)	Qc (W/m)	Qs (W/m)	Qr (W/m)	V (m/s)	
75,00	678,60	26,40	72,40	20,17	14,24	1,20	CSCV
75,00	774,74	26,40	72,40	0,00	14,24	1,20	SSCV
75,00	558,21	26,40	50,90	20,17	14,24	0,60	CSCV
75,00	671,80	26,40	50,90	0,00	14,24	0,60	SSCV
75,00	343,53	26,40	22,96	20,17	14,24	0,00	CSSV
75,00	507,68	26,40	22,96	0,00	14,24	0,00	SSSV
75,00	562,19	38,40	54,49	20,17	11,30	1,20	CSCV
75,00	675,12	38,40	54,49	0,00	11,30	1,20	SSCV
75,00	451,70	38,40	38,31	20,17	11,30	0,60	CSCV
75,00	586,31	38,40	38,31	0,00	11,30	0,60	SSCV
75,00	221,73	38,40	15,96	20,17	11,30	0,00	CSSV
75,00	434,61	38,40	15,96	0,00	11,30	0,00	SSSV

<sup>1</sup> $\Phi$  (°) = 90°, e = 0.7, a = 0.9, QS (W/m<sup>2</sup>) = 1300, H (m) = 200,00

CSCV con sol con viento; SSCV sin sol con viento; CSSV con sol sin viento; SSSV sin sol sin viento

La tabla (20) considera una temperatura de operación ubicada en el rango de 75°C y 100°C, la temperatura del aire permanece constante para todos los cálculos con un valor igual al promedio de la estación, al igual que la velocidad del viento, la emisividad se tomo con valor de 0.7 y el factor de absorción solar con un valor de 0.9. En la última columna se muestran las condiciones con respecto a la presencia o no de la luz solar.

**Tabla 20. Cálculo del límite térmico para la línea Barinas Sipororo en condición de operación de emergencia**

ACAR 350 MCM (12/7)		Barinas Sipororo					Condiciones <sup>1</sup>
Tc (°C)	I (A)	Ta (°C)	Qc (W/m)	Qs (W/m)	Qr (W/m)	V (m/s)	
75,00	678,61	26,40	72,40	20,17	14,24	1,20	CSCV
75,00	774,75	26,40	72,40	0,00	14,24	1,20	SSCV
80,00	719,10	26,40	79,83	20,17	16,09	1,20	CSCV
80,00	809,19	26,40	79,83	0,00	16,09	1,20	SSCV
85,00	756,70	26,40	87,25	20,17	18,02	1,20	CSCV
85,00	841,60	26,40	87,25	0,00	18,02	1,20	SSCV
90,00	791,85	26,40	94,67	20,17	20,03	1,20	CSCV
90,00	872,24	26,40	94,67	0,00	20,03	1,20	SSCV
95,00	824,92	26,40	102,09	20,17	22,13	1,20	CSCV
95,00	901,33	26,40	102,09	0,00	22,13	1,20	SSCV

100,00	856,17	26,40	109,51	20,17	24,31	1,20	CSCV
100,00	929,03	26,40	109,51	0,00	24,31	1,20	SSCV

<sup>1</sup> $\Phi$  (°) = 90°, e = 0.7, a = 0.9, QS (W/m<sup>2</sup>) = 1300, H (m) = 200,00

CSCV con sol con viento; SSCV sin sol con viento

En la tabla (21) se consideró la variación de la temperatura ambiente en un rango entre 24°C y 40°C, el viento toma los valores de 0 m/s, 0.6 m/s y 1.2 m/s; a demás de mostrar la corriente que circula por el conductor se incluye la potencia; se mantiene fija la temperatura de operación del conductor en 75°C, la emisividad y el factor de absorción solar son iguales a 0.5, en todos los casos se asume la presencia de luz solar.

**Tabla 21. Cálculo del límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor nuevo, variación de la temperatura ambiente**

ACAR 350 MCM 18/19			Barinas Sipororo	
Ta(°C)	V(m/s)	I(A)	Potencia (MVA)	Condiciones <sup>1</sup>
24,00	0,00	405,99	80,87	CSSV
24,00	0,60	604,71	120,45	CSCV
24,00	1,20	722,47	143,91	CSCV
26,00	0,00	392,52	78,18	CSSV
26,00	0,60	590,66	117,65	CSCV
26,00	1,20	706,41	140,71	CSCV
28,00	0,00	378,66	75,42	CSSV
28,00	0,60	576,23	114,78	CSCV
28,00	1,20	689,94	137,43	CSCV
30,00	0,00	364,36	72,57	CSSV
30,00	0,60	561,38	111,82	CSCV
30,00	1,20	673,04	134,06	CSCV
32,00	0,00	349,57	69,63	CSSV
32,00	0,60	546,10	108,78	CSCV
32,00	1,20	655,68	130,60	CSCV
34,00	0,00	334,23	66,57	CSSV
34,00	0,60	530,34	105,64	CSCV
34,00	1,20	637,81	127,04	CSCV
36,00	0,00	318,27	63,39	CSSV
36,00	0,60	514,04	102,39	CSCV
36,00	1,20	619,38	123,37	CSCV
38,00	0,00	301,58	60,07	CSSV
38,00	0,60	497,17	99,03	CSCV
38,00	1,20	600,36	119,58	CSCV

40,00	0,00	284,05	56,58	CSSV
40,00	0,60	479,66	95,54	CSCV
40,00	1,20	580,68	115,66	CSCV

<sup>1</sup>Tc (°C)=75; V (kV)= 115; e= 0.5; a= 0.5

CSSV con sol sin viento; CSCV con sol con viento

La tabla (22) presenta las mismas condiciones que la anterior la única diferencia son los valores de emisividad y el factor de absorción solar, que son 0.7 y 0.9 respectivamente.

**Tabla 22. Cálculo del límite térmico: línea Barinas Sipororo, conductor viejo, variación de la temperatura ambiente**

ACAR 350 MCM 18/19			Barinas Sipororo	
Ta(°C)	V(m/s)	I(A)	Potencia (MVA)	Condiciones <sup>1</sup>
24,00	0,00	363,32	72,37	CSSV
24,00	0,60	576,93	114,92	CSCV
24,00	1,20	699,38	139,31	CSCV
26,00	0,00	346,91	69,10	CSSV
26,00	0,60	561,38	111,82	CSCV
26,00	1,20	682,12	135,87	CSCV
28,00	0,00	329,75	65,68	CSSV
28,00	0,60	545,33	108,62	CSCV
28,00	1,20	664,36	132,33	CSCV
30,00	0,00	311,73	62,09	CSSV
30,00	0,60	528,74	105,32	CSCV
30,00	1,20	646,07	128,69	CSCV
32,00	0,00	292,68	58,30	CSSV
32,00	0,60	511,55	101,89	CSCV
32,00	1,20	627,19	124,93	CSCV
34,00	0,00	272,39	54,26	CSSV
34,00	0,60	493,70	98,34	CSCV
34,00	1,20	607,69	121,04	CSCV
36,00	0,00	250,57	49,91	CSSV
36,00	0,60	475,11	94,64	CSCV
36,00	1,20	587,4783	117,02	CSCV
38,00	0,00	226,7858	45,17	CSSV
38,00	0,60	455,6957	90,77	CSCV
38,00	1,20	566,494	112,84	CSCV
40,00	0,00	200,3336	39,90	CSSV
40,00	0,60	435,3363	86,71	CSCV
40,00	1,20	544,643	108,49	CSCV

<sup>1</sup>Tc (°C)=75; V (kV)= 115; e= 0.7; a= 0.9, CSSV con sol sin viento; CSCV con sol con viento

Después de comparar los resultados obtenidos para todas las condiciones presentadas (con sol y con viento, con sol y sin viento, sin sol y sin viento y por ultimo sin sol y con viento), se llego a la conclusión que el valor obtenido con la condición con sol y sin viento, era la que se establecería como la de operación normal del sistema y la condición con sol y con viento iba a ser la de operación de emergencia, esto con la finalidad de limitar las pérdidas de rigidez mecánica y aprovechar la vida útil del conductor.

## **7.2 Flujo de carga**

El flujo de carga consiste en obtener las condiciones de operación en régimen permanente en un sistema de energía eléctrica bajo condiciones previamente establecidas, es decir, dada la potencia generada y la carga en un sistema, se busca las tensiones y corrientes en cada punto del mencionado sistema.

Un estudio de flujo de carga permite entre otras cosas estudiar lo siguiente:

- Flujo en MW y MVAR en las ramas de una red.
- Voltaje en las barras.
- Efecto de rearrreglo e inclusión de nuevos circuitos en la red.
- Efecto de pérdidas de generación o de transmisión en el sistema.
- Condiciones optimas de operación del sistema y de distribución de cargas.
- Cambio de elementos, como transformadores.
- Influencia del cambio de características de los conductores.

Esta última característica la de cambiar las características de los conductores es la base de estudio en el trabajo.

### **7.3 Estudio de flujo de carga en el sistema**

El estudio de flujo de carga se realizó con el programa POWER FACTORY DIGSILENT 13.2, el cual permite determinar las condiciones de operación por medio de la simulación del sistema completo de CADAFE.

El POWER FACTORY DIGSILENT, es una herramienta integrada de análisis de sistemas de potencia. Combina la capacidad de modelación confiable y flexible del sistema.

Incorpora tecnología de programación avanzada incorporando una base de datos orientada a objetos.

La base de datos del POWER FACTORY integra todos los datos requeridos por definir: casos, escenarios, reportes de salida, unifilares, condiciones de corridas, gráficos, modelos definidos por usuarios, entre otros.

Primero se realizó un flujo de carga con la base de datos existente, esto con la finalidad de determinar en qué condiciones se encuentra operando el sistema antes de incluir los cambios en los conductores.

Luego se creó la nueva base de datos, basado en las características de los conductores que se tenían en la librería del programa con los resultados obtenidos en el cálculo del límite térmico.

Por último se realizó un nuevo flujo de carga con las nuevas características pero con las mismas condiciones para ver sus efectos.

En el Anexo N° 8 se muestran los resultados de ambas simulaciones, se indica la corriente nominal, la corriente que circula por la línea debido a las condiciones impuestas en el sistema y el porcentaje de carga en la línea; tanto para la base de datos previa de los conductores y la nueva base de datos creada con los resultados del cálculo del límite térmico.

De esta tabla donde se comparan los valores de la base de datos del POWER FACTORY DIGSILENT y los valores calculados de donde se extrae lo siguiente:

- En 111 de las líneas que conforman el universo de estudio la capacidad de corriente no cambio.
- En 209 de las líneas se redujo la capacidad de transporte de corriente.
- En 6 de las líneas la capacidad de corriente aumentó.

Con el flujo de carga realizado con la base de datos previa se tiene que:

- En 39 de las líneas de transmisión se presenta un factor de carga mayor al 75%.
- En 61 de las líneas de transmisión se presenta un factor de carga menor al 15%.

Con el flujo de carga realizado con la base de datos obtenida se tiene que:

- En 84 de las líneas de transmisión se presenta un factor de carga mayor al 75%.
- En 44 de las líneas de transmisión se presenta un factor de carga menor al 15%

## CONCLUSIONES

En el trabajo especial de grado se realizó el análisis de las líneas de transmisión de CADAFE para los niveles de tensión de 115kV, 230kV y 400kV en lo que refiere al límite térmico de los conductores que las conforman. Se determinaron las especificaciones técnicas de operación en cuanto a la corriente que se puede transmitir según las condiciones ambientales y aumentar vida útil de los conductores y evitar la salida de las líneas por sobrecarga.

Como resultado de la ingeniería desarrollada se especificó el procedimiento para el análisis y diseño de líneas de transmisión en lo referente al límite térmico de las mismas.

A continuación se indican las conclusiones extraídas del trabajo:

Se debe tener bien especificada la ruta de la línea, para poder evaluar los parámetros ambientales, económicos y de seguridad que afectan a la línea; entre estos se encuentran los accidentes geográficos que se deben salvar, los niveles de contaminación que afectan a la línea, las tensiones mecánicas a los que están sometidos los conductores, los límites de seguridad que se deben respetar, el costo, entre otros.

Se establecieron las nuevas condiciones que se deben cumplir para la selección de un conductor por su capacidad térmica, basado en las condiciones reales de la ruta que sigue la línea de transmisión y no en las dos condiciones de operación que se seguían con anterioridad (una era la de operación normal y la otra era la de operación de emergencia).

Con los estudios de las condiciones nuevas de operación se plantearon diversos escenarios y se logró determinar el límite térmico de las líneas, tal que no se sobrecarguen y fallen o disminuyan su vida útil.

Se creó una base de datos única comparando los datos obtenidos del cálculo de límite térmico, con la base de datos manejada por el Power Factory y con los manejados por los despachos de carga Oriente, Occidente y Centro.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda hacer un estudio más profundo en las líneas mostradas en el Anexo N° 10 tabla (1), a fin de evitar los valores elevados de factor de carga que resten vida útil a los conductores empleados y disminuir los factores de riesgo que puedan provocar fallas en estas líneas.

Se recomienda la realización de estudios para poder determinar procedimientos de medición de temperatura en las líneas operativas y un proceso de monitoreo de las líneas con los valores de más alto factor de carga.

Estudio para mejor uso y redistribución de la potencia en las líneas mostradas en el Anexo N° 10 tabla (2), tal que presentan valores bajos y pueden ser mejor aprovechados.

Se recomienda una unificación de los parámetros de capacidad de corriente obtenidos en este trabajo para ser empleados por los despachos de Carga Central, Occidental, Oriental y el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Operaciones.

Se recomienda realizar estudios para establecer cambios de conductores en las líneas que se presentan elevado factor de carga por otros conductores de mayor calibre.

## BIBLIOGRAFÍA

Avril, C. (1970). *Construcción de líneas aéreas de alta tensión*. Teheran: Ediciones EYROLLES.

Gonzalez, F., Teran, R., Méndez, J., & Hernández, A. (2006). *Evaluación del Recurso Eólico en Venezuela*. Pto. Cabello: I Congreso Petrolero Energético ASME - UNEFA.

Holman, J. (1998). *Transferencia de calor*. México: Mc Graw Hill.

Interconnection, P.-N. J.-M. (1980). *Ambient Adjusted Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors*. Transmission and Substation Design Subcommittee.

PJM Interconnection, L. (2000). *Bare Overhead Transmission Conductor Ratings*. Transmission and Substation Design Subcommittee Conductor Rating Task Force.

Potter, M., Wiggert, D., & Hondzo, M. (1998). *Mecánica de fluidos*. México: Prentice Hall.

Stevenson, W. (1996). *Elementos de análisis de sistemas eléctricos de potencia*. Mc Graw Hill.

Tovar, O. *Cálculo y evaluación de los parámetros eléctricos de las líneas en el sistema de transmisión de CADAPE*. Caracas: Universidad Central de Venezuela.

Warth, K. (1991). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.

Whitaker, J. C. (1999). *AC Power Systems Handbook*. London: CRC Press.

Wright, S. H., & Hall, C. F. (1950). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. Pittsburgh: Westinghouse .

Zaborszky, J., & Rittenhouse, J. W. (1969). *Electric Power Transmission*. New York: Lee-Howard Company.

## GLOSARIO

**Acero:** Una aleación de hierro con menos del 2% de carbono y cantidades más pequeñas de manganeso, silicio, fósforo, azufre y oxígeno. Se utiliza como conductor cuando la tracción mecánica es importante.

**Aire:** Mezcla de gases, agua y varios contaminantes que constituyen la atmósfera. Los principales constituyentes del aire seco y limpio, en volumen, son nitrógeno, 78.08%; oxígeno, 20.95%; argón, 0.93%; dióxido de carbono, 0.03%.

**Aleación de aluminio:** Aluminio aleado con otro metal o metales, principalmente cobre, magnesio, cinc, silicio, manganeso o níquel, para mejorar sus características.

**Alumel:** Una aleación a base de níquel que contiene manganeso, aluminio y silicio.

**Aluminio.** Metal de color blanco azulado, de número atómico 13 y peso atómico 27. El aluminio puro tiene aproximadamente una tercera parte del peso del hierro, del cobre, del cinc o de sus aleaciones. Su conductibilidad eléctrica es alta y sus aleaciones tienen una elevada resistencia a la tracción. Es resistente a la corrosión. Los conductores de aluminio con alma de acero se utilizan ampliamente para líneas largas.

**Cobre:** Metal que tiene una elevada conductibilidad eléctrica y térmica, buenas propiedades generales mecánicas, buena resistencia a la corrosión, fácil y eficiente empalme por varios métodos. El cobre de alta pureza es el conductor de corriente más eficiente que cualquier otro material, excepto la plata. Del cobre recocido, que tiene una resistencia igual a la especificada por la Comisión Electrotécnica Internacional, se dice que tiene una conductibilidad del 100%IACS (International Annealed Copper Standard, patrón internacional de cobre recocido).

**Conductor:** Un material que ofrece una baja resistencia al paso de la corriente eléctrica.

**Conductor de aluminio con alma de acero:** Un material conductor consistente en capas de aluminio que envuelven un núcleo de hilos trenzados y galvanizados de acero.

**Conductor trenzado:** Un conductor compuesto por varios hilos trenzados entre sí. La dirección del trenzado de las capas adyacentes esta invertida.

**Efecto Joule:** La generación de calor mediante una corriente eléctrica que circula por un material proporcionalmente al cuadrado de la densidad de corriente y a la resistividad del material. La potencia calorífica desarrollada en un resistor de valor  $R$  por el que circula una corriente  $I$  es  $I^2R$ .

**Efecto pelicular:** Fenómeno por el que, con corrientes alternas, la corriente que conduce un conductor no se distribuye uniformemente en toda la sección disponible, sino que tiende a concentrarse en la superficie del conductor. Se debe al flujo magnético que envuelve una parte, pero no todo el conductor. Estas partes de sección acopladas magnéticamente tienen una mayor resistencia e inductancia.

**Emisor de cuerpo negro:** Un emisor perfecto ideal de radiación.

**Kelvin:** La unidad SI de temperatura termodinámica (símbolo: K).

**Línea:** Conductor o conductores dispuestos para la transmisión y distribución de energía eléctrica.

**Línea de transmisión:** Un sistema de conductores para la transmisión aérea de energía eléctrica desde una estación generadora o una subestación a otras estaciones o subestaciones.

**Mil:** Unidad inglesa de longitud, equivalente a una milésima de pulgada.

**Circular mil:** Unidad inglesa de superficie, igual al área de un círculo cuyo diámetro es una milésima de pulgada.

**Protección térmica:** Una protección contra daños por sobrecalentamiento. Puede conseguirse con un relé de sobrecarga como un relé de sobrecarga térmica, o con un sencillo relé térmico.

**Temperatura termodinámica:** El nombre adoptado internacionalmente para la temperatura absoluta (símbolo: T). Su unidad SI es el kelvin (símbolo: K). Un cuerpo a una temperatura de t grados Celsius tiene la temperatura termodinámica  $T = (t + 273.16) \text{ K}$ .

**T-Off:** Es una conexión en derivación, la cual intercepta una línea de transmisión existente para alimentar de forma temporal nuevas subestaciones.

## **ANEXOS**