Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Capacidad Térmica Dinámica de las Líneas de Transmisión

Presentado por:
Jaysson Esteban Guerrero Orbe

Trabajo de grado para optar por el título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Bogotá. Junio del 2014

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Capacidad Térmica Dinámica de las Líneas de Transmisión

Presentado por:
Jaysson Esteban Guerrero Orbe

Trabajo de grado para optar por el título de:
Magister en Ingeniería Eléctrica

Sustentado el día 29 del mes 5 del año 2014 frente al jurado:

Asesor: Álvaro Torres Macías, Profesor Titular, Universidad de los Andes.
Co-asesor: Mario Alberto Ríos, Profesor Titular, Universidad de los Andes.
Jurado 1: Gustavo Ramos López, Profesor Asociado, Universidad de los Andes.
Jurado 2: Oscar Gómez Carmona, Estudiante Doctoral, Universidad de los Andes.

Bogotá. Junio del 2014

A mis padres

Agradecimientos

Primero agradezco todo a Dios por permitirme lograr todas las metas que me he propuesto en la vida y sé que gracias a su bendición, he logrado superar los momentos más difíciles de mi vida y estoy seguro de que esto es gracias a su inmenso apoyo.

Agradezco principalmente el apoyo recibido por mis padres a lo largo de mi vida, siempre han estado conmigo y hacen todo lo que pueden por mi bienestar; por eso espero que con todo lo que he logrado ellos se sientan en parte recompensados por su gran trabajo como padres. El esfuerzo de ellos para lograr brindarme todo lo que me han dado es muy grande y por eso espero seguir consiguiendo más logros y así seguirles agradeciendo día a día todo lo que han hecho por mí.

También agradezco a mi hermano por su apoyo, se qué una parte de la persona que soy hoy en día se la debo a él, ya que crecimos juntos y hemos convivido muchas cosas. También agradezco a mi novia por comprender los momentos en los que estuve ocupado para poder lograr cumplir todas mis labores y también agradezco el gran apoyo que me da diariamente para poder cumplir mis metas.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN 1

2. MARCO TEÓRICO 2

2.1 TRANSMISIÓN DE CALOR. 3
2.2 EQUILIBRIO TÉRMICO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN 3
2.2.1 PÉRDIDAS DE CALOR POR CONVECCIÓN 4
2.2.2 PÉRDIDA DE CALOR POR RADIACIÓN 5
2.2.3 GANANCIA DE CALOR POR EFECTO SOLAR 6
2.2.4 GANANCIA DE CALOR POR EFECTO JOULE 6
2.3 PARÁMETROS AMBIENTALES Y OPERACIONALES 7
2.4 MODELO MECÁNICO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN 12
2.4.1 ECUACIÓN DE CAMBIO DE ESTADO. 14
2.4.2 CÁLCULO DE MÁXIMA CORRIENTE PERMITIDA A PARTIR DE LAS DISTANCIAS DE SEGURIDAD. 15

3. METODOLOGÍA DESARROLLADA 15

3.1 CAPACIDAD DE CORRIENTE 15
3.2 TEMPERATURA DEL CONDUCTOR 19
3.3 LONGITUD DEL CABLE Y FLECHA ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA DEL CONDUCTOR 22

4. SIMULACIONES Y RESULTADOS 27

4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CAPACIDAD DE CORRIENTE 27
4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TEMPERATURA DEL CONDUCTOR 31
4.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO TÉRMICO SOBRE EL CONDUCTOR 34

5. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL 36

5.1 CASO DE ESTUDIO 41

6. CONCLUSIONES 45

7. REFERENCIAS 477

1. Introducción

Uno de los elementos más importantes a considerar en los sistemas eléctricos son las líneas de transmisión, dado que son de alguna forma los canales por donde se está transportando la energía eléctrica. Algunas líneas de transmisión llevan varios años en funcionamiento desde su instalación, estas han sido afectadas por las condiciones ambientales y operativas en las que se encuentran expuestas diariamente; es decir que actualmente su capacidad para transportar corriente ya no es la misma que en sus inicios cuando recién fueron instaladas.

Para el diseño mecánico de la línea se tienen en cuenta algunos requerimientos básicos como lo son aspectos relacionados con el clima, velocidad de viendo y temperatura; En general es necesario considerar todos los aspectos que permitan proveer líneas que brinden un servicio satisfactorio incluyendo la seguridad en términos de reducción de fallas del sistema eléctrico y la seguridad de las personas.

El límite de corriente que puede transportarse en la línea es determinado por una serie de parámetros establecidos, entre estos están los equipos conectados a la línea (seccionadores, interruptores, equipos de medida, entre otros) y por la características del conductor como por ejemplo su máxima temperatura permitida; por ende es importante considerar la mayor restricción para poder definir la capacidad límite de la línea y así lograr una adecuada operación. Es decir que se debe determinar la cantidad de corriente eléctrica que se puede transportar a través del conductor, considerando todos los parámetros que puedan influir en el funcionamiento.

Así mismo los cambios climáticos y las condiciones ambientales a las que se enfrenta la línea causan efectos físicos como desgaste y elongación que provocan el incumplimiento de las distancias de seguridad previamente establecidas en el momento de instalación de la línea de transmisión. Por lo tanto es importante evaluar en qué proporción y de qué forma la línea es afectada por este tipo de agentes externos con el fin de garantizar las distancias de seguridad adecuadas.

Una evaluación dinámica sobre la capacidad de la línea permitiría tener un monitoreo constante sobre el comportamiento de la línea, es decir que al estar evaluando parámetros como el tipo y la temperatura del conductor, la temperatura ambiente y la velocidad del viento en tiempo real, se podría tener un centro de control encargado de evaluar la capacidad de la línea en términos de estas variables.

Así mismo, este tipo de análisis se puede realizar con la temperatura del conductor. Este parámetro varía dependiendo de las condiciones operativas y también de las condiciones climáticas sobre las que se encuentre el conductor. Al realizar un análisis en estado estable o en estado transitorio, se puede evaluar los cambios que ocurren en la temperatura al variar los niveles de corriente de operación. Un cambio en la temperatura del conductor, causa una elongación en el conductor, es decir que existe una variación en la longitud del conductor, lo cual causa que la distancia entre el conductor y el suelo o alguna superficie,

varié y en algunos casos esa distancia disminuya tanto que puede sobrepasar las distancias de seguridad exigidas. En consecuencia, este tipo de análisis permitiría evaluar los niveles de corriente permitidos que no afectarían los límites de distancias de seguridad, con base en la elongación que se puede producir por los cambios de temperatura en el conductor.

Por lo tanto, el objetivo principal del proyecto consiste en calcular la capacidad dinámica térmica, relacionada con el amperaje, de las líneas de transmisión. Así mismo, como se mencionó anteriormente, se puede evaluar el nivel de corriente de operación que permite mantener las distancias de seguridad exigidas. Para lo cual se planteó implementar una metodología que permitiera realizar un verdadero estudio de la capacidad dinámica de las líneas bajo diversas condiciones meteorológicas y operacionales. Un adecuado estudio de las líneas de transmisión permite optimizar el estudio de conductores y determinar las condiciones a las que puede estar operando el sistema en función de la temperatura y así disminuir las fallas que se puedan presentar en el sistema.

2. Marco Teórico

Con base en los estudios realizados sobre la capacidad térmica de las líneas, sobresalen el estándar IEEE Std 738-2006, IEEE Standard for Calculating the Current - Temperature of Bare Overhead Conductors, y los estudios presentados por el grupo WG 22.12 del CIGRE (Council on Large Electric Systems), las dos primeras partes publicadas en Electra No.144 en Octubre de 1992, "The Thermal Behavior of Overhead Conductors: Section I and II", y la tercera parte publicada en Electra No. 174 en Octubre de 1997.

La mayor diferencia que se puede detectar entre estos dos estudios y en la mayoría de documentos relacionados con este tema, radica en la modelación de las ecuaciones a tener en cuenta; ya que varios autores intentan agregar o disminuir parámetros en sus modelos de ecuaciones. Sin embargo, en general las metodologías están basadas en el concepto de equilibrio térmico, temas relacionados con transferencia de calor y termodinámica. Por ende es importante primero definir la transferencia de calor como el intercambio de energía causado por una diferencia de temperatura. Como se ha mencionado anteriormente, el estudio de transferencia de calor en las líneas de transmisión puede considerar una gran cantidad de parámetros relacionados con el conductor y el medio ambiente que las rodea. En las siguientes secciones se expone las variables y ecuaciones a tener en cuenta para calcular la capacidad térmica de los conductores, considerando el estándar IEEE Std 738-2006 [1]. Este tipo de planteamiento permite calcular tanto la capacidad de corriente como la temperatura del conductor para un determinado valor de corriente de operación; este tipo de análisis se puede realizar tanto para estado estable como estado transitorio.

Una vez determinados los cambios de temperatura en el conductor ante cambios de corriente de operación de la línea, se puede determinar la distancia vertical que existe entre el punto más bajo del conductor y un eje imaginario horizontal que estaría a la altura de los soportes del conductor (Flecha). En resumen, si se conoce la distancia que existe entre el nivel del suelo y el punto más bajo del conductor, se pueden evaluar las distancias mínimas

de seguridad y determinar cuál es esa corriente máxima de operación que permiten no sobrepasar las distancias de seguridad establecidas. Para esto es plantear y analizar el modelo mecánico de tensionado de las líneas de transmisión. Este tipo de analisis es presentado en las siguientes secciones.

2.1 Transmisión de Calor.

El calor es energía en tránsito que se genera a partir de interacciones de un sistema y su entorno, causado por diferencias de temperatura entre estos. Cuando se estudia los principios de la temperatura y su comportamiento, es importante considerar la cantidad de energía que se requiere para que un sistema cambie de su punto de equilibro a otro estado, con base en la interacción que tiene en el ambiente.

En general, se consideran 3 tipos de transferencia de calor, entre estos se encuentra la conducción, convección y la radiación; Además la transmisión de calor por conducción puede realizarse en cualquier estado de la materia en la que se encuentre, es decir líquido, gaseoso y sólido.

En la conducción, la energía de las partículas aumenta al elevarse la temperatura; este tipo de energía puede pasar entre moléculas a través de choques o vibraciones entre estas. En la convección, la transmisión de calor solo ocurre en los fluidos e implica el transporte de energía y materia. El modo en que se transfiere el calor en este tipo de proceso, contempla el movimiento aleatorio de partículas y el movimiento global del fluido. Es decir que básicamente se produce transferencia de calor entre un fluido en movimiento y una superficie limitante a este tipo de fluido, cuando se encuentren a diferentes temperaturas. La radiación es la energía emitida por la materia que se encuentra a cierta temperatura, en este tipo de proceso, la transferencia de calor se da a través de ondas electromagnéticas. [2]

2.2 Equilibrio Térmico en Líneas de Transmisión

Los conductores que conforman las líneas de transmisión están expuestos básicamente a 4 procesos de transferencia de calor, estos están causados por pérdidas de calor por convección, pérdidas de calor por radiación, el calor absorbido del sol y el calor generado por el efecto Joule causado sobre las líneas por transportar energía eléctrica, más precisamente por el flujo de corriente [1]. Este tipo de procesos se puede apreciar en la siguiente figura:

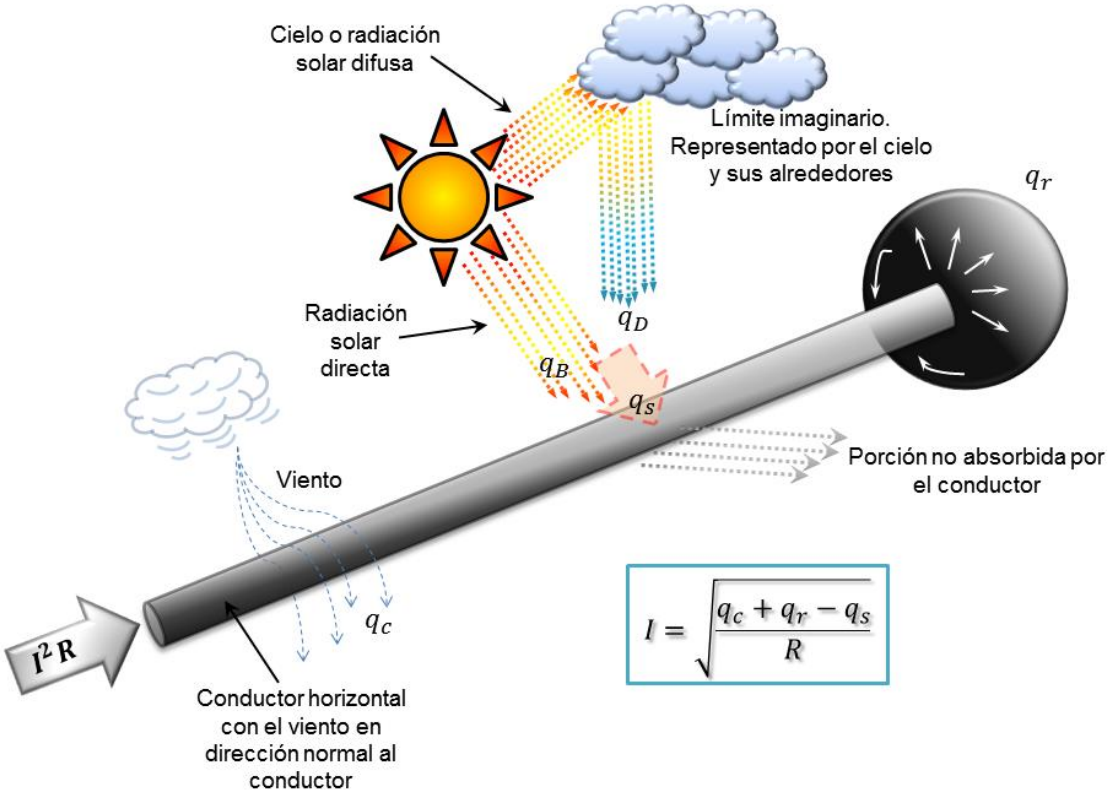

Figura 1. *Diagrama de Equilibrio Térmico en el Conductor.*

2.2.1 Pérdidas de calor por Convección

Las pérdidas por convección en el conductor, representa el flujo de calor desde la superficie del conductor hacia el aire a su alrededor, lo cual genera un tipo de refrigeración sobre este y así que disminuya su temperatura y pérdida de calor.

Para el estudio se considera que puede haber convección forzada o natural, dependiendo de cómo afecta el viento al conductor. Cuando se habla de convección natural, cuando el movimiento del fluido proviene de la variación de densidad causada por el contacto con la superficie a diferente temperatura. Por otro lado, cuando se habla de convección forzada se encuentra que hay una fuerza exterior que mueve el fluido sobre la superficie, que para este caso en específico esa fuerza proviene del viento. Por lo tanto la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural, es decir que se transfiere una mayor cantidad de calor en la convección forzada a una temperatura dada. [1].

Este tipo de transferencia de calor se puede expresar matemáticamente a través de las siguientes ecuaciones:

- *Convección forzada*

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

$$q_{c2} = \left[0{,}119\left(\frac{D\rho_f V_w}{\mu_f}\right)^{0{,}6}\right] k_f K_{angle}(T_c - T_a) \qquad (2)$$

Cuando hay una velocidad de viento baja se utiliza q_{c1}, cuando hay una velocidad de viento alta se utiliza q_{c2}.

- q_{c1}, q_{c2} : Pérdida de calor por convección. [W/m].
- D : Diámetro del conductor. [mm].
- ρ_f : Densidad del aire. [kg/mm^3].
- V_w : Velocidad del viento (corriente de aire) en el conductor. [m/s].
- μ_f : Viscosidad dinámica del aire. [Pa-s].
- k_f : Conductividad Térmica del aire a temperatura promedio entre la del conductor y el ambiente. [W/(m-°C)].
- K_{angle} : Factor de dirección del viento. [-].
- T_c : Temperatura del conductor. [°C].
- T_a : Temperatura ambiente. [°C].

- *Convección Natural*

Es utilizada cuando la velocidad del viento es igual a 0 m/s.

$$q_{cn} = 0{,}0205\rho_f^{0{,}5} D^{0{,}75}(T_c - T_a)^{1{,}25} \qquad (3)$$

- q_{cn} : Pérdida de calor por convección. [W/m].
- D : Diámetro del conductor. [mm].
- ρ_f : Densidad del aire. [kg/mm^3].
- T_c : Temperatura del conductor. [°C].
- T_a : Temperatura ambiente. [°C].

2.2.2 Pérdida de Calor por Radiación

Este tipo de pérdidas, se genera por la transferencia de calor causada por la energía emitida por el conductor en forma de onda electromagnética, esto provoca una disminución de la temperatura del conductor. Las expresiones matemáticas para representar este tipo de transferencia se puede apreciar en las siguientes ecuaciones:

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

- q_r : Pérdida de calor por radiación. [W/m].
- ε : Emisividad (0,23 a 0,91). [-].
- D : Diámetro del conductor. [mm].
- T_c : Temperatura del conductor. [°C].
- T_a : Temperatura ambiente. [°C].

2.2.3 *Ganancia de Calor por efecto Solar*

La transferencia de calor debida a la radiación proveniente del sol, causa una ganancia de calor sobre el conductor, donde depende de la superficie de este y determina la cantidad de energía que se puede absorber. Esto genera un aumento de temperatura en el conductor. Para representar este tipo de transferencia se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$q_s = \alpha Q_{se} \sin(\theta) A' \quad (5)$$

- q_s : Calor absorbido del sol. [W/m].
- α : Capacidad de absorción solar (0,23-0,91). [-].
- Q_{se} : Flujo térmico radiado del sol y del cielo considerando corrección de elevación. [W/m^2].
- θ : Ángulo efectivo de incidencia de los rayos del sol. [Grados].
- A' : Área proyectada del conductor por unidad de longitud. [m^2/m].

2.2.4 *Ganancia de Calor por efecto Joule*

El efecto Joule que se produce en el conductor, se debe al flujo de corriente eléctrica a través de este; esto genera un calentamiento. Es decir que esta ganancia de calor se da debido a la conversión de energía eléctrica en energía térmica. El principio básico de este tipo de proceso consiste en evaluar la potencia disipada considerando la resistencia del conductor y la corriente que fluye por este, es decir $P = I^2 * R$. Ahora considerando que la resistencia del conductor es función de la temperatura de operación, esta expresión debe considerar otros parámetros. Esto se puede representar por las siguientes ecuaciones:

$$q_I = I^2 R(T_c) \quad (6)$$

- q_I : Ganancia de calor por efecto Joule.
- $R(T_c)$: Resistencia AC del conductor a una temperatura Tc. [Ω/m].

- I : Corriente en el conductor. [A].

La resistencia del conductor a diferentes temperaturas se puede expresar de la siguiente forma:

$$R(T_c) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}}\right](T_c - T_{low}) + R(T_{low}) \qquad (7)$$

- $R(T_c)$: Resistencia AC del conductor a temperatura Tc. [Ω/m].
- $R(T_{high})$: Resistencia AC del conductor a temperatura T_{high}.
- $R(T_{low})$: Resistencia AC del conductor a temperatura T_{low}.
- T_{high} : Máxima temperatura para la cual una resistencia AC del conductor es especificada. [°C].
- T_{low} : Mínima temperatura para la cual una resistencia AC del conductor es especificada. [°C].

Con esta información se puede establecer la ecuación de equilibro térmico sobre el conductor:

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c) \qquad (8)$$

- q_c : Pérdidas de calor por convección. [W/m].
- q_r : Pérdidas de calor por radiación. [W/m].
- q_s : Calor absorbido del sol. [W/m].
- $[I^2 R(T_c)]$: Calor absorbido por efecto Joule. [W/m].
- $R(T_c)$: Resistencia AC del conductor a una temperatura Tc. [Ω/m].
- I : Corriente en el conductor. [A].

A partir de la ecuación de equilibrio térmico, se puede determinar la capacidad de corriente que puede atravesar el conductor a partir de calcular I. En la siguiente sección se explica más a fondo los parámetros que se deben considerar para realizar los cálculos.

2.3 Parámetros Ambientales y Operacionales

Para poder determinar todos los términos involucrados en la expresión de equilibrio térmico, es necesario calcular algunos parámetros ambientales y conocer algunos valores operacionales a los que se encuentra expuesto el conductor. A continuación se presenta una breve explicación de los parámetros que deben ser considerados:

- *Viscosidad dinámica del aire*

$$\mu_f = \frac{1.458x10^{-6}(T_{film}+273)^{1.5}}{T_{film}+383.4} \qquad (9)$$

- μ_f: Viscosidad dinámica del aire (Pa·S).
- T_{film}: Temperatura promedio entre temperatura del conductor y temperatura ambiente (°C).

- *Densidad del aire*

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525x10^{-4}H_e + 6.379x10^{-9}H_e^2}{1 + 0.00367T_{film}} \qquad (10)$$

- ρ_f*:* Densidad del aire (kg/m³).
- H_e*:* Elevación sobre nivel del mar (m).
- T_{film}: Temperatura promedio entre temperatura del conductor y temperatura ambiente (°C).

- *Conductividad térmica del aire*

$$k_f = 2.424x10^{-2} + 7.477x10^{-5}T_{film} - 4.407x10^{-9}T_{film}^2 \qquad (11)$$

- k_f: Conductividad térmica del aire (W/m·°C)
- T_{film}: Temperatura promedio entre temperatura del conductor y temperatura ambiente (°C).

Para validar y establecer un tipo de relación entre las variables, a continuación se presenta algunos valores de estos parámetros para diferentes condiciones climáticas:

Tabla 1. *Viscosidad, densidad y conductividad térmica del aire.*

Temperatura T_{film}	**Viscosidad dinámica μ_f**	**Densidad del aire ρ_f (kg/m³)**				**Conductividad térmica del aire k_f**
°C	**(Pa.s)**	**0 m**	**1000 m**	**2000 m**	**4000 m**	**W/(m·°C)**
0	0.0000172	1.293	1.147	1.014	0.785	0.0242
5	0.0000174	1.270	1.126	0.995	0.771	0.0246
10	0.0000176	1.247	1.106	0.978	0.757	0.0250
15	0.0000179	1.226	1.087	0.961	0.744	0.0254
20	0.0000181	1.205	1.068	0.944	0.731	0.0257
25	0.0000184	1.184	1.051	0.928	0.719	0.0261
30	0.0000186	1.165	1.033	0.913	0.707	0.0265
35	0.0000188	1.146	1.016	0.898	0.696	0.0269
40	0.0000191	1.127	1.000	0.884	0.685	0.0272
45	0.0000193	1.110	0.984	0.870	0.674	0.0276
50	0.0000195	1.093	0.969	0.856	0.663	0.0280

Temperatura T_{film}	**Viscosidad dinámica μ_f**	**Densidad del aire ρ_f (kg/m³)**				**Conductividad térmica del aire k_f**
°C	**(Pa.s)**	**0 m**	**1000 m**	**2000 m**	**4000 m**	**W/(m·°C)**
55	0.0000198	1.076	0.954	0.843	0.653	0.0283
60	0.0000200	1.060	0.940	0.831	0.643	0.0287
65	0.0000202	1.044	0.926	0.818	0.634	0.0291
70	0.0000204	1.029	0.912	0.806	0.625	0.0295
75	0.0000207	1.014	0.899	0.795	0.616	0.0298
80	0.0000209	1.000	0.887	0.783	0.607	0.0302
85	0.0000211	0.986	0.874	0.773	0.598	0.0306
90	0.0000213	0.972	0.862	0.762	0.590	0.0309
95	0.0000215	0.959	0.850	0.752	0.582	0.0313
100	0.0000217	0.946	0.839	0.741	0.574	0.0317

- *Altitud del sol*

$$H_c = \arcsin\left[\cos(Lat)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(Lat)\sin(\delta)\right] \qquad (12)$$

  - ω: Ángulo de hora: Número de horas desde el mediodía. Una hora equivale a 15° (Por ejemplo 11 a.m. es -15°, 2 p.m. es + 30°).
  - Lat: Latitud [Grados].
  - δ: Declinación solar [Grados].

- *Declinación Solar*

$$\delta = 23.4583 \sin\left[\frac{284+N}{365}360\right] \qquad (13)$$

  - δ: Declinación solar [Grados].
  - N: Número de día en el año. [-].

Esta ecuación es válida para todas las latitudes sean positivas (hemisferio norte) o negativas (hemisferio sur).

- *Azimut del sol*

$$Z_c = C + \arctan(\chi) \qquad (14)$$

  - Z_c: Azimut del sol (grados)
  - $\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat)\cos(\omega) - \cos(Lat)\tan(\delta)}$
  - C: Constante de azimut del sol (grados), es función del ángulo de hora, ω, y el azimut variable del sol, χ, como se muestra a continuación:

Tabla 2. *Azimut solar constante, C, como función del "Ángulo de hora",* $\boldsymbol{\omega}$*, y el azimut solar variable,* $\boldsymbol{\chi}$*.*

Ángulo de hora, $\boldsymbol{\omega}$ **(Grados)**	**C si** $\boldsymbol{\chi \geq 0}$ **(Grados)**	**C si** $\boldsymbol{\chi < 0}$ **(Grados)**
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega < 180$	180	360

Tabla 3. *Altitud solar,* $\boldsymbol{H_c}$*, y azimut,* $\boldsymbol{Z_c}$*, para varias latitudes para una entrada anual de pico solar.*

	Hora local del sol						
Latitud	**10:00 a.m.**		**Mediodía**		**2:00 p.m.**		
Grados Norte	**Hc**	**Zc**	**Hc**	**Zc**	**Hc**	**Zc**	**N**
-80	32	33	33	180	32	327	350
-70	40	37	43	180	40	323	350
-60	48	43	53	180	48	317	350
-5	55	52	63	180	55	308	350
-40	60	66	73	180	60	294	350
-30	62	83	83	180	62	277	350
-20	62	96	90	180	62	264	20
-10	61	97	88	180	61	263	50
0	60	91	90	180	60	269	80
10	61	85	89	180	61	275	110
20	62	85	90	180	62	275	140
30	62	97	83	180	62	263	170
40	60	114	73	180	60	245	170
50	55	128	63	180	55	232	170
60	48	137	53	180	48	223	170
70	40	143	43	180	40	217	170
80	32	147	33	180	32	213	170

- *Flujo total de calor recibido por una superficie al nivel del mar*

$$Q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6 \qquad (15)$$

  - Y: Flujo de calor total, Q_s (w/m^2)
  - X: Altitud solar, H_c $(grados)$

Tabla 4. *Coeficientes de la ecuación.*

Atmósfera clara	
A	-42.2391
B	63.8044
C	-1.9220
D	$3.46921x10^{-2}$
E	$-3.61118x10^{-4}$
F	$1.94318x10^{-6}$
G	$-4.07608x10^{-9}$
Atmósfera industrial	
A	53.1821
B	14.2110
C	$6.6138x10^{-1}$
D	$-3.1658x10^{-2}$
E	$5.4654x10^{-4}$
F	$-4.3446x10^{-6}$
G	$1.3236x10^{-8}$

Tabla 5. *Flujo total de calor recibido de los rayos del sol por una superficie al nivel del mar.*

Grados de altitud solar	**Atmósfera clara**	**Atmósfera industrial**
$\boldsymbol{H_c}$ **(grados)**	$\boldsymbol{Q_s}$ $(\boldsymbol{W/m^2})$	$\boldsymbol{Q_s}$ $(\boldsymbol{W/m^2})$
5	234	136
10	433	240
15	583	328
20	693	422
25	770	502
30	829	571
35	877	619
40	913	662
45	941	694
50	969	727
60	1000	771
70	1020	809
80	1030	833
90	1040	849

- *Factor de corrección por elevación para el flujo total de calor*

$$Q_{se} = K_{solar} Q_s \qquad (16)$$

- $K_{solar} = A + BH_e + CH_e^2$. Factor de Corrección.
- $A = 1$
- $B = 1.14x10^{-4}$
- $C = -1.108x10^{-8}$

Tabla 6. *Factores de multiplicación del calor del sol,* $\boldsymbol{K_{solar}}$ *para altitudes altas.*

Elevación sobre el nivel del mar $\boldsymbol{H_e(m)}$	**Multiplicadores de los valores en la Tabla 5**
0	1.00
1000	1.10
2000	1.19
4000	1.28

2.4 Modelo mecánico de las líneas de transmisión

Para determinar la flecha del conductor es necesario evaluar en un plano y relacionar las tensiones que causa el peso del cable con las distancias existentes [7].

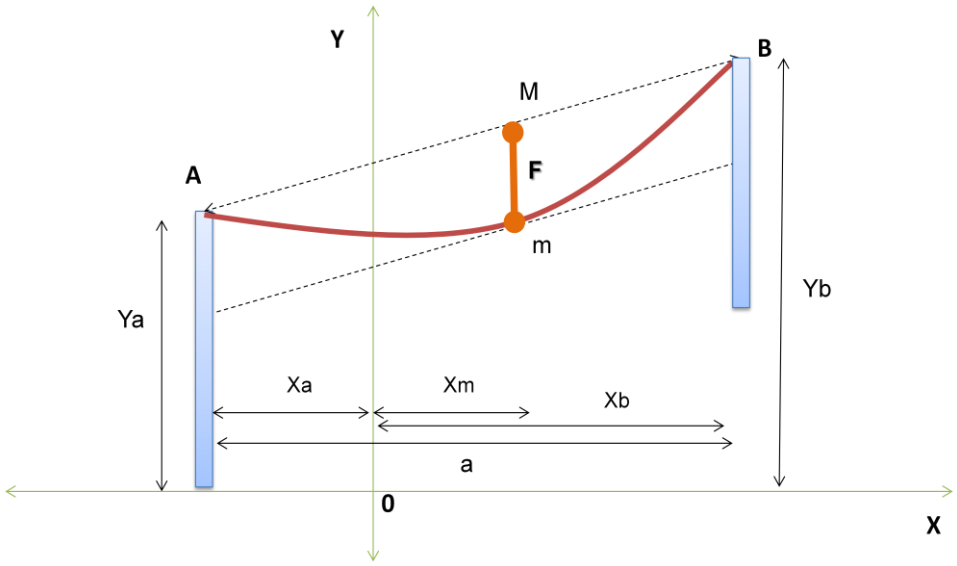

Figura 2. *Catenaria y flecha de un cable tendido entre dos puntos de apoyo.*

De la figura 2 se puede observar que el valor de la flecha (F) está determinado por la distancia entre el punto más bajo del conductor representado en la catenaria y un eje

horizontal imaginario entre los dos puntos de apoyo A y B; es decir la distancia entre los puntos 'M' y 'm' de la figura 2.

Considerando un estado en equilibrio, la única fuerza exterior que actúa sobre el conductor es la gravedad, es decir que la única fuerza que actúa sobre el conductor es la relacionada con la masa del conductor y la gravedad de la tierra. Si nos ubicamos en el punto 'm' de la figura 2 y evaluamos las fuerzas que actúan sobre este punto, se tiene como resultado la tensión aplicada por el efecto de la gravedad y de la masa. Para relacionar este tipo parámetros, se define la variable 'h' como la distancia que existe entre el eje X y el punto 'm', es decir la altura a la cual se encuentra el punto más bajo de la catenaria. Con base en esto y considerando expresiones matemáticas y geométricas se pueden definir las siguientes ecuaciones según el diagrama de la figura 2.

$$y(x) = h * Cosh\left(\frac{x}{h}\right) \qquad (17)$$

$$h = \frac{T_m}{w} = \frac{\frac{t_m}{S}}{\frac{P}{S}} = \frac{t_m}{P} \qquad (18)$$

$$L = 2h * Senh\left(\frac{a}{2h}\right) \qquad (19)$$

La ecuación 17 representa evaluar una altura en cualquier punto sobre el eje X, esta altura depende del punto de ubicación sobre ese eje y de la variable 'h', que a su vez depende de la tensión en el punto 'm' (T_m) y del peso del conductor (w - gramos por unidad de longitud); ambas variables deben considerar la sección transversal del conductor (S). Por otro lado, la ecuación 19 permite evaluar la longitud del conductor a partir de la tensión que está siendo aplicada. Si asumimos que el punto 'm' está ubicado sobre el origen del eje X, de la ecuación 17 y evaluando $x = 0$, se puede definir que el punto 'm' se encuentra a una algura igual a la variable 'h'. Ahora si se evalúa la altura del punto 'M' considerando la tensión en uno de los apoyos y que están ubicados en $x = a/2$, se tiene la siguiente expresión:

$$y_M = y(a/2) = h * Cosh\left(\frac{a}{2h}\right) \qquad (20)$$

Es decir que la flecha está definida por:

$$F = y_M - y_m = h * \left[Cosh\left(\frac{a}{2h}\right) - 1\right] \qquad (21)$$

Esta ecuación resulta de evaluar geométricamente el tendido mecánico del conductor y las fuerzas sobre sus apoyos. Como se puede observar, se utilizan funciones trigonométricas hiperbólicas, las cuales permiten dar mayor precisión a los resultados. Este tipo de expresiones, se conocen como Ecuación de la Catenaria. En algunos casos también se puede modelar la forma del cable y las tensiones de sus apoyos considerando ecuaciones de

una parábola, al comparar los resultados utilizando ambos métodos se puede ver valores similares, sin embargo para distancias mayores, el error incrementa. Considerando la ecuación de la parábola, el valor de la flecha está definido por:

$$F = \frac{a^2}{8h} = \frac{a^2 w}{8t_m} \qquad (22)$$

2.4.1 Ecuación de Cambio de Estado.

Como se mencionó anteriormente, si la temperatura del conductor aumenta, disminuye la tensión mecánica sobre el conductor y por efecto natural del cable habrá una elongación y esto provocará un aumento en la distancia relacionada con la flecha. En general los cambios de longitud en el cable se dan en función del coeficiente de dilatación lineal; así mismo las variaciones en la tensión mecánica producen una alteración en la longitud del cable en función del alargamiento elástico, el cuál es inverso del módulo de elasticidad del cable (Módulo de Young). Es decir, la ley de Hooke [6] establece para el caso de los cables:

$$L_2 - L_1 = L_1 * \alpha * \left(T_{c_2} - T_{c_1}\right) + L_1 \left(\frac{T_2 - T_1}{E}\right) \qquad (23)$$

Donde cada variable representa:

- L_1 : Longitud del cable en el estado 1. [m].
- L_2 : Longitud del cable en el estado 2. [m].
- α : Coeficiente de dilatación. [1/°C].
- T_{c_1} : Temperatura del cable en el estado 1. [°C].
- T_{c_2} : Temperatura del cable en el estado 2. [°C].
- T_1 : Tensión sobre el cable en el estado 1. $\left[\frac{kg}{mm^2}\right]$.
- T_2 : Tensión sobre el cable en el estado 2. $\left[\frac{kg}{mm^2}\right]$.
- E: Módulo de elasticidad. $\left[\frac{kg}{mm^2}\right]$.

Ahora, utilizando el concepto de longitud definido en la ecuación 19 y si se aplica esta expresión considerando dos estados diferentes con longitudes y tensiones diferentes, se tiene una ecuación que relaciona los cambios en la longitud del cable con la variación de la temperatura. En este caso si se conoce todos los valores de las variables para el primer estado y la temperatura del conductor en el segundo estado, se puede calcular el cambio en la longitud del cable, o mejor dicho el cambio en la tensión y así mismo la variación de la flecha [31]. La ecuación de cambio de estado está definida por:

$$2\frac{T_{m_2}}{w_2}Senh\left(\frac{aw_2}{2T_{m_2}}\right) = 2\frac{T_{m_1}}{w_1}Senh\left(\frac{aw_1}{2T_{m_1}}\right)\left[\alpha\left(T_{c_2} - T_{c_1}\right) + \left(\frac{T_{m_2} - T_{m_1}}{E}\right)\right] \quad (24)$$

Para resolver esta ecuación se puede utilizar un método iterativo como Newton Raphson. Cabe aclarar que la variable relacionada con el peso del conductor 'w', puede cambiar de un estado a otro cuando se considera el efecto de viento o hielo en el ambiente estudiado. Para esta expresión se tiene:

$$w_1 = m_1 * w = m_1 * \frac{P}{S} \quad (25)$$

Donde la variable 'm_1' representa el efecto de las condiciones climáticas externas como hielo y/o viento, 'P' representa el peso del conductor por unidad de longitud y 'S' representa la sección transversal del cable. Si 'm_1' es igual a 1 se considera que no hay sobrecargas por hielo o efecto del viento.

Es de interés evaluar el valor de la flecha para estados diferentes, ya que permite realizar un monitoreo del comportamiento de la flecha ante cambios dinámicos en los parámetros climáticos como la temperatura ambiente y operacionales como el valor de la corriente que circula por el conductor.

2.4.2 Cálculo de máxima corriente permitida a partir de las distancias de seguridad.

Si se está monitoreando el valor de la flecha en determinada línea de transmisión, es de gran interés evaluar el cumplimiento con las distancias de seguridad del sitio. Por lo tanto, el monitoreo constante del valor de la flecha permite evaluar en cada instante de tiempo dichos límites establecidos. A lo largo del día existe una variación natural en la flecha de la línea debido a los cambios de las condiciones climáticas, sin embargo en caso de que exista alguna contingencia o sobrecarga en el sistema y sea necesario el transporte de mayor corriente por la línea, es de gran interés determinar si la línea en cuestión puede soportar tal corriente y seguir cumpliendo con las distancias de seguridad establecidas. Es de gran interés evaluar este tipo de capacidad en condiciones de emergencia, esto con el fin de evaluar las diferentes posibilidades con las que cuenta el sistema para operar y suplir la carga en este tipo de condiciones.

3. Metodología Desarrollada

3.1 Capacidad de Corriente

Con base en el estándar de la IEEE 738-2006, se implementó los algoritmos que permiten calcular la capacidad de corriente, teniendo como entrada parámetros ambientales, parámetros de los conductores y la temperatura a la que se encuentra el conductor. Así

mismo, también se puede calcular la temperatura del conductor a partir de parámetros ambientales y del conductor y conociendo el valor de la corriente que fluye por este. Considerando el primer caso, a continuación se presenta la primera secuencia del programa desarrollado, en donde es necesario introducir ciertos parámetros de entrada y se inician los cálculos de otras variables que serán utilizadas para calcular todos los flujos de transferencia de calor existentes en los conductores.

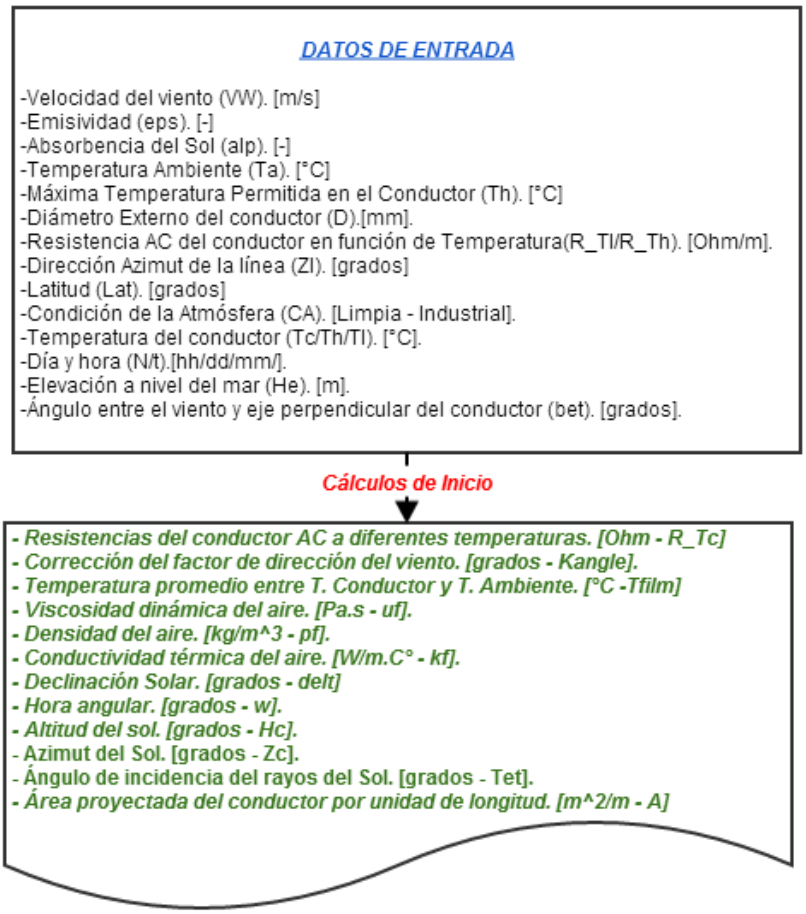

Figura 3. *Datos de entrada necesarios para calcular variables dependientes.*

Posteriormente se inicia el cálculo del equilibrio térmico en el conductor. Retomando lo expuesto en el marco teórico, se debe considerar las pérdidas por convección (Qc), pérdidas por radiación (Qr), absorción de calor por radiación solar (Qs) y finalmente el calor producido por efecto Joule [1]. Este programa se implementó utilizando el Software MATLAB. A continuación se presenta un resumen de los diagramas de flujo necesarios para el cálculo de cada uno de estos valores.

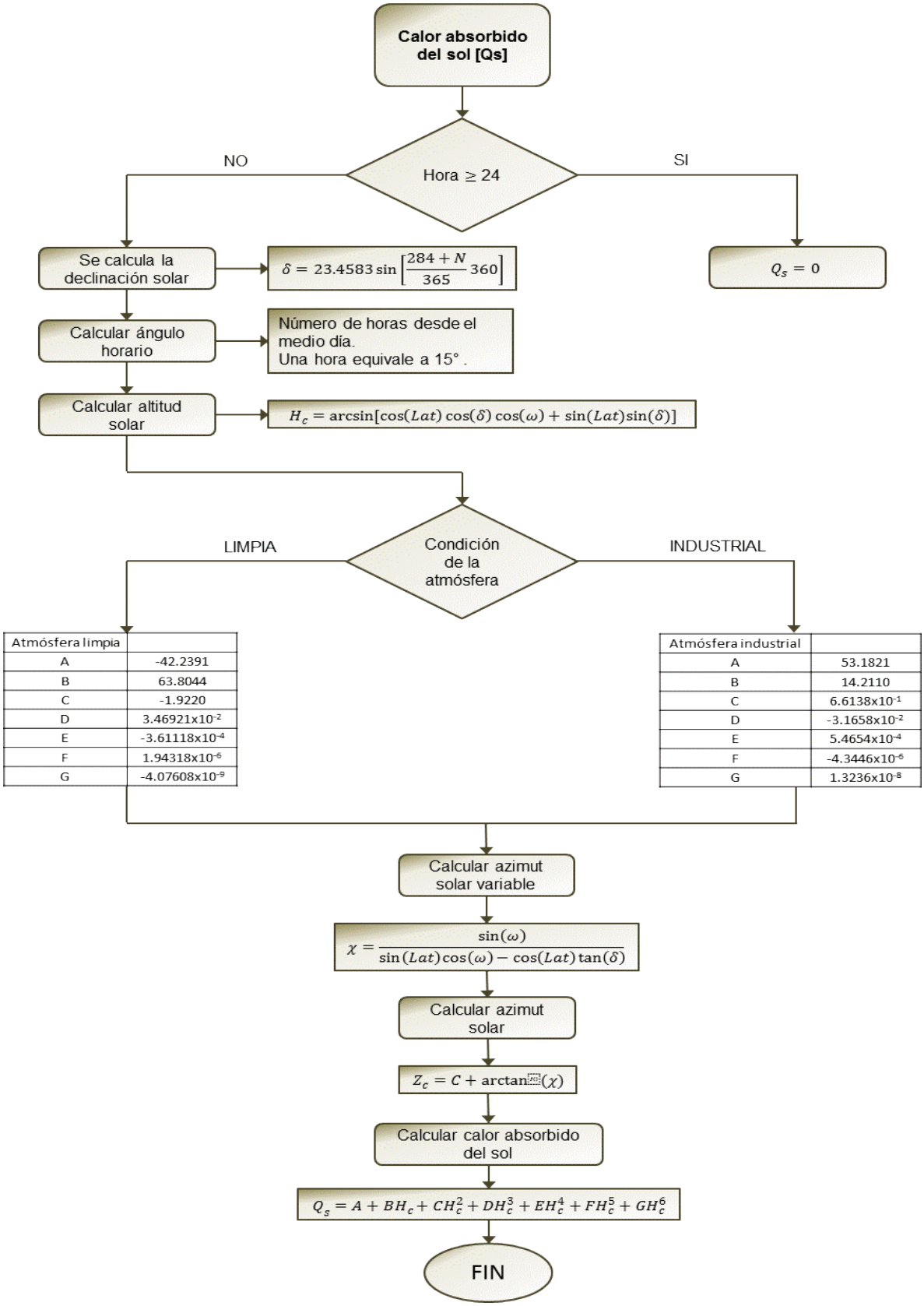

Figura 4. *Diagrama de Flujo para calcular el Calor absorbido por efecto de la radiación solar.*

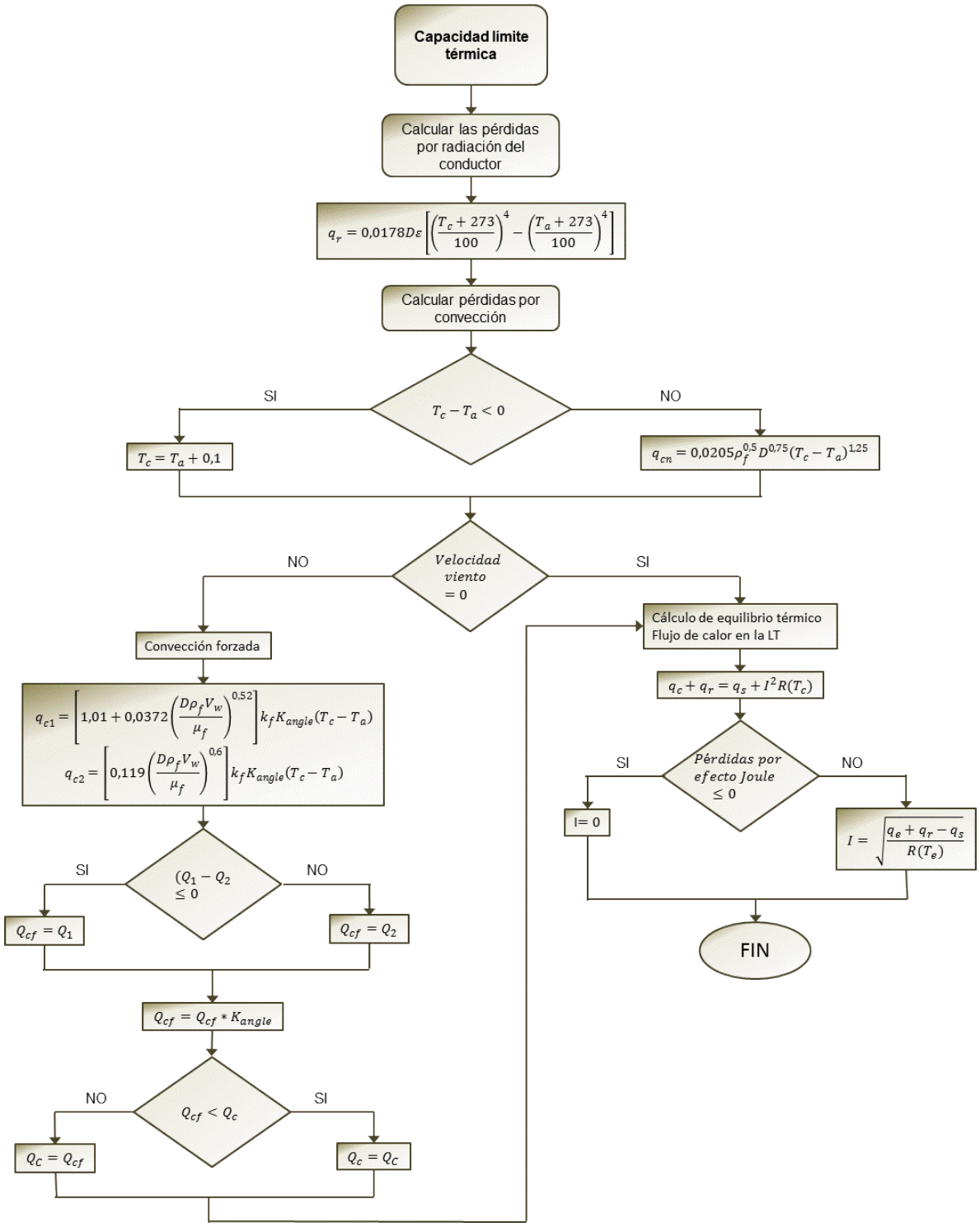

Figura 5. *Diagrama de Flujo para determinar la Capacidad Térmica.*

Como resultado de este programa se obtiene la capacidad de corriente del conductor para una temperatura dada. Como se mencionó anteriormente, el proceso consiste en calcular las pérdidas de calor por radiación y convección, además de calcular la ganancia de calor por radiación solar. A partir de estos valores se puede obtener el calor por efecto joule y despejar la variable que representa el valor de la corriente. A continuación se presenta el diagrama de flujo que relaciona el proceso a desarrollar:

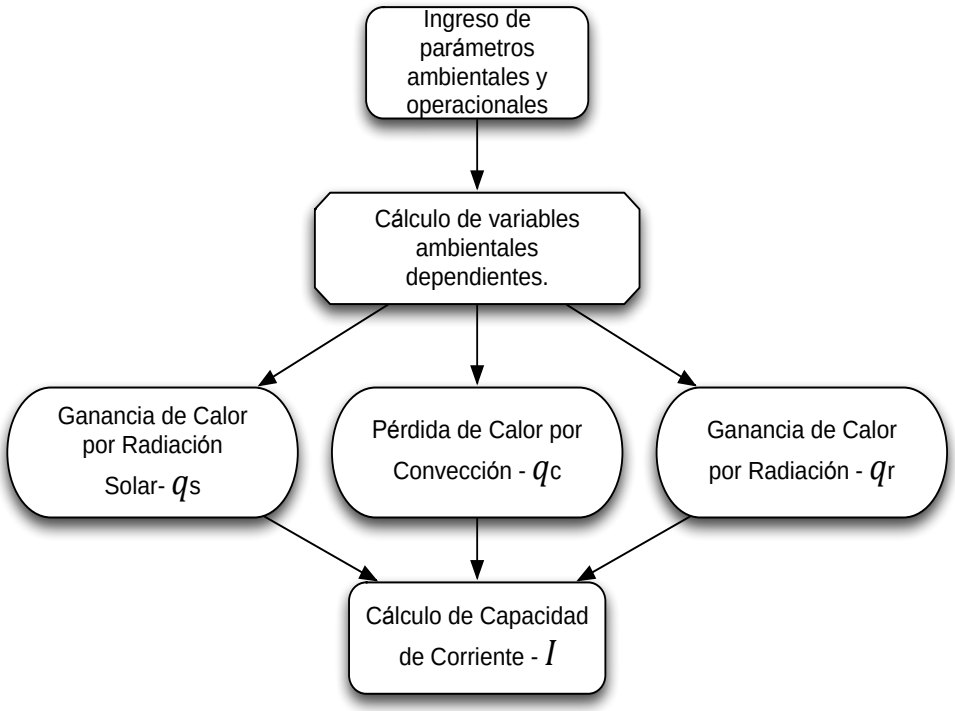

Figura 6. *Diagrama de flujo del proceso para determinar la capacidad de corriente.*

3.2 Temperatura del Conductor

Para la temperatura del conductor se debe considerar su valor en estado estable y en estado transitorio. En estado estable el proceso para calcular la temperatura del conductor consiste en evaluar inicialmente los parámetros que no dependen de la temperatura del conductor, posteriormente entra a un ciclo en el cual se tiene como resultado evaluar la ecuación de equilibrio térmico, que básicamente cuando se logra la condición de equilibrio debe ser igual a 0. Si el valor no se aproxima a cero, se cambia el valor de la temperatura del conductor y se vuelve a iniciar los cálculos de las variables dependientes. Este proceso se repite hasta cumplir con una condición de parada determinada por un porcentaje de error establecido. Este proceso se puede observar con mayor detenimiento en el siguiente diagrama:

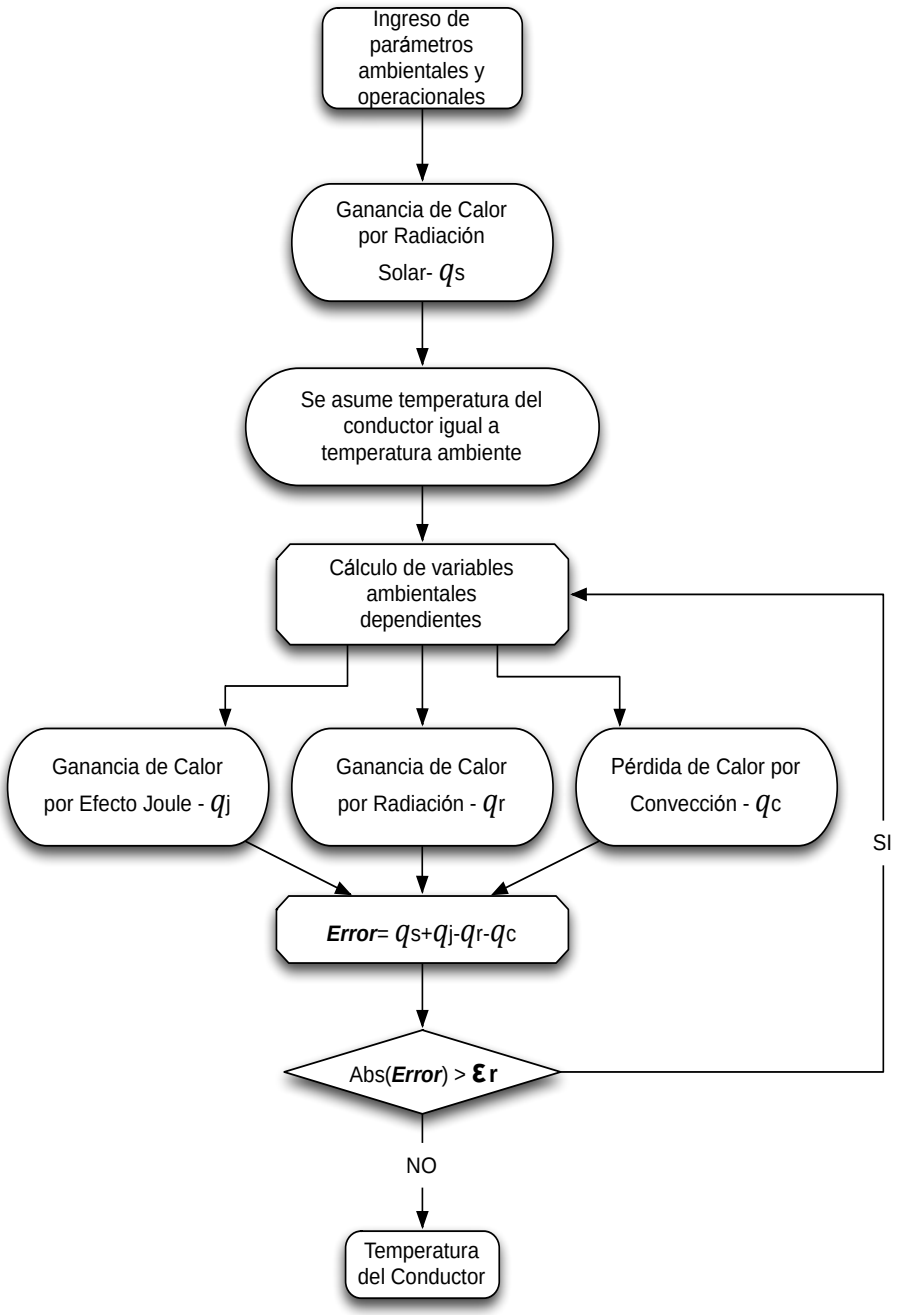

Figura 7. *Diagrama de flujo relacionado con el proceso de determinar la temperatura del conductor en estado estable.*

La respuesta de la temperatura del conductor ante cambios en la corriente se manifiesta a través de estados transitorios y posteriormente se establece en un valor fijo, como se puede apreciar en la siguiente figura:

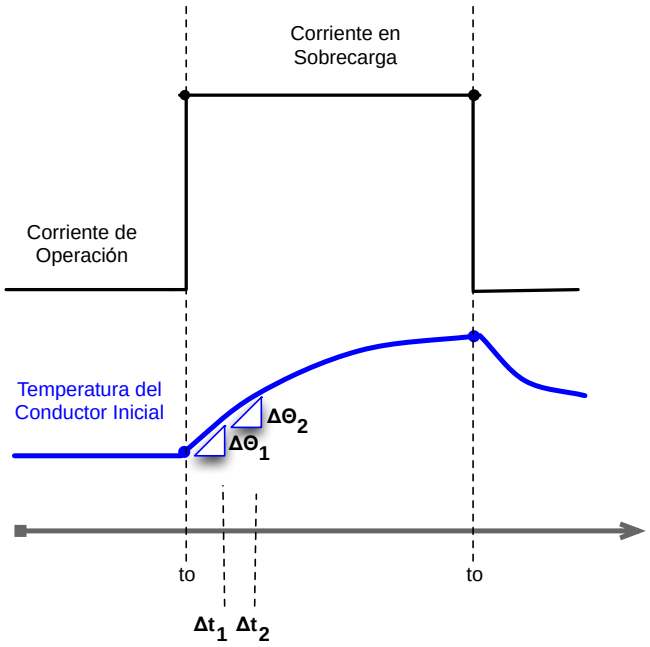

Figura 8. *Efecto transitorio de temperatura del conductor ante variaciones en la corriente.*

En este caso es de tener en cuenta que los cambios de temperatura no son inmediatos ante los cambios de corriente y por ende la importancia de evaluar su valor y su cambio a través de diferentes intervalos de tiempo. Para este caso la ecuación de balance térmico debe considerar el cambio de la temperatura en el tiempo y es necesario evaluar nuevas variables como la masa del conductor y el calor específico.

$$mC_p * \frac{dT_c}{dt} = q_s + q_j - q_r - q_c \qquad (26)$$

Esta ecuación relaciona la energía almacenada en el conductor con la ecuación de balance térmico. Esta energía almacenada está representada por la variación de la temperatura del conductor en el tiempo y por otras variables como el calor específico a presión constante del material del conductor (C_p) y por la relación de masa por unidad de longitud del conductor (m). Es necesario considerar que para cada material estos valores pueden cambiar, incluso en caso de tener un conductor compuesto por 2 materiales diferentes, como un conductor de aluminio con refuerzo de acero –ACSR, es necesario considerar como influyen ambos materiales, es decir:

$$mC_p = m'C_{p-acero} + m'C_{p-aluminio} \qquad (27)$$

En este caso los calores específicos para el acero y para el aluminio son $477\frac{J}{k_g℃}$ y $954\frac{J}{k_g℃}$ respectivamente [4]. Para obtener la variación de la temperatura en el tiempo es necesario resolver la ecuación (26), las variables que relacionan la resistencia del conductor, las pérdidas de calor por convección y radiación, dependen de la temperatura del conductor [32], [33]. Por lo tanto se tiene la siguiente expresión:

$$\Delta T_c = T_{c_f} - T_{c_i} = \int_0^{t_f} \left(\frac{q_s + q_j - q_r - q_c}{m C_p} \right) dt \quad (28)$$

Esta expresión tiene como resultado el cambio de temperatura (ΔT_c) entre un periodo de tiempo (t_f) en el que ocurrió una variación de la corriente. Para resolver este tipo de ecuaciones, se considera pequeños intervalos de tiempo (es recomendable incrementos de 10 segundos), es decir que en cada intervalo se calcula el cambio de temperatura (ΔT_c) que ocurrió y al final del tiempo total evaluado se obtiene el valor de la temperatura final. Para solucionar este tipo de ecuaciones iterativas, se recomienda utilizar el algoritmo de Runge Kutta de cuarto orden, el cual permite hacer una buena aproximación a la solución de este tipo de ecuaciones.

En general, los algoritmos presentados en el Std IEEE 738-2006 permite calcular la capacidad de corriente a partir de la temperatura del conductor, ó la temperatura del conductor a partir de la corriente de operación; es decir que establece una relación directa entre estas dos variables.

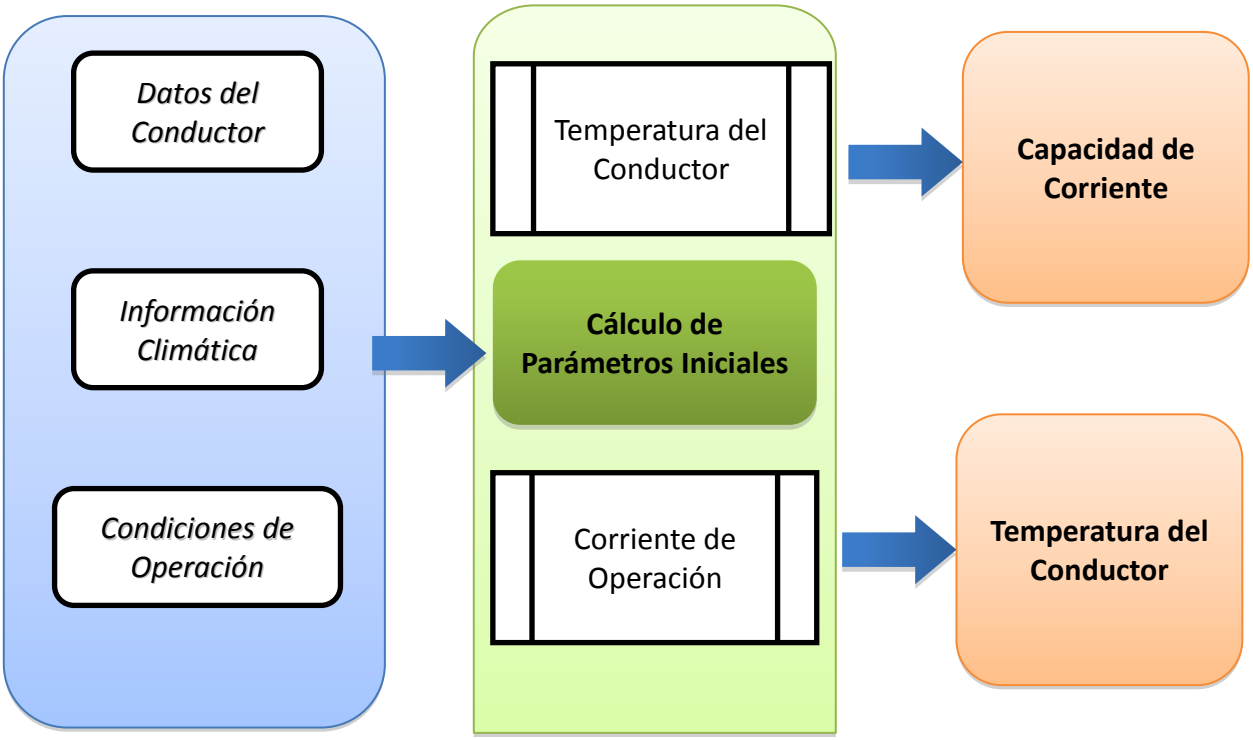

Figura 9. *Resumen de los procesos que se pueden implementar con base en el Std 738-2006 de la IEEE.*

3.3 Longitud del cable y flecha ante cambios de temperatura del conductor

Una vez se presenten los cambios de temperatura en el conductor, es necesario evaluar la elongación que se provocó en el cable y determinar el nuevo valor de la flecha. Considerando la ecuación de cambio de estado y las ecuaciones que permiten calcular la longitud del cable que fueron presentadas en la sección anterior, se tiene el siguiente diagrama de flujo:

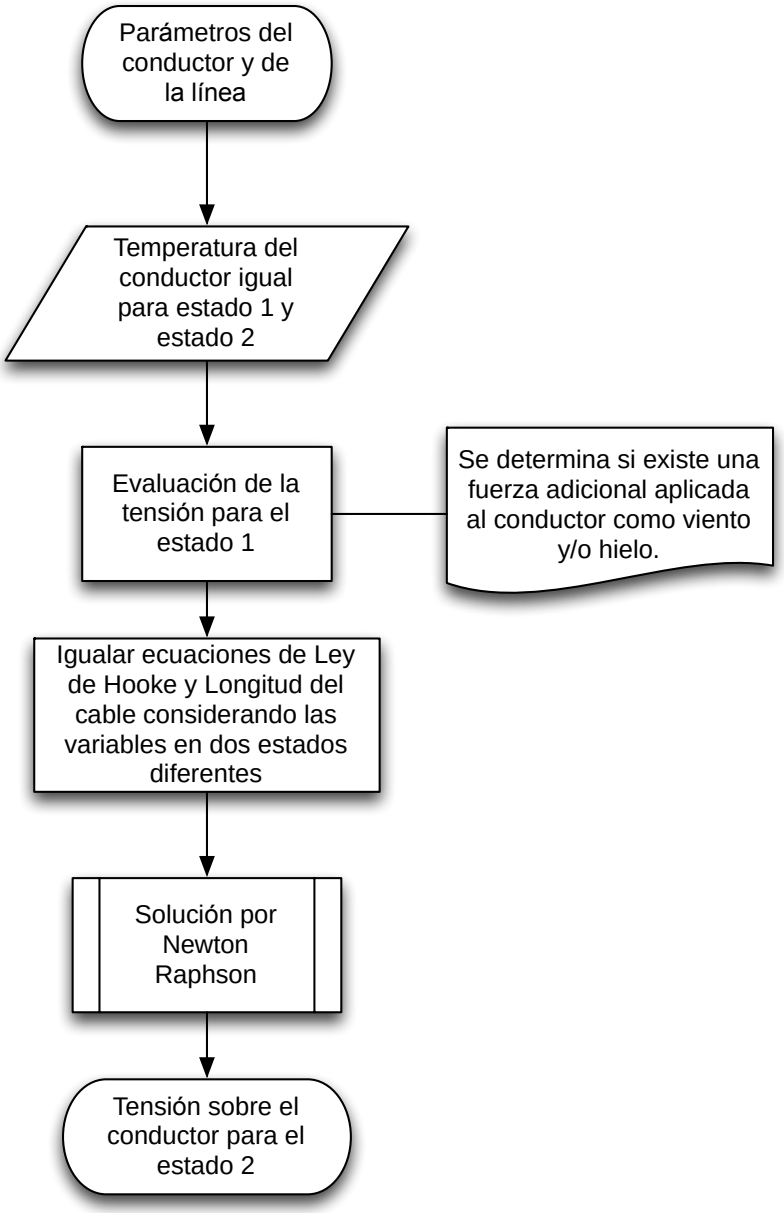

Figura 10. *Diagrama de flujo relacionado con el proceso para determinar la tensión en el segundo estado, posterior a un cambio de temperatura en el conductor.*

Como resultado se obtiene la tensión en el segundo estado. Considerando dos valores de tensiones diferentes, se puede evaluar dos valores de flechas para los correspondientes estados. Para esto se tiene:

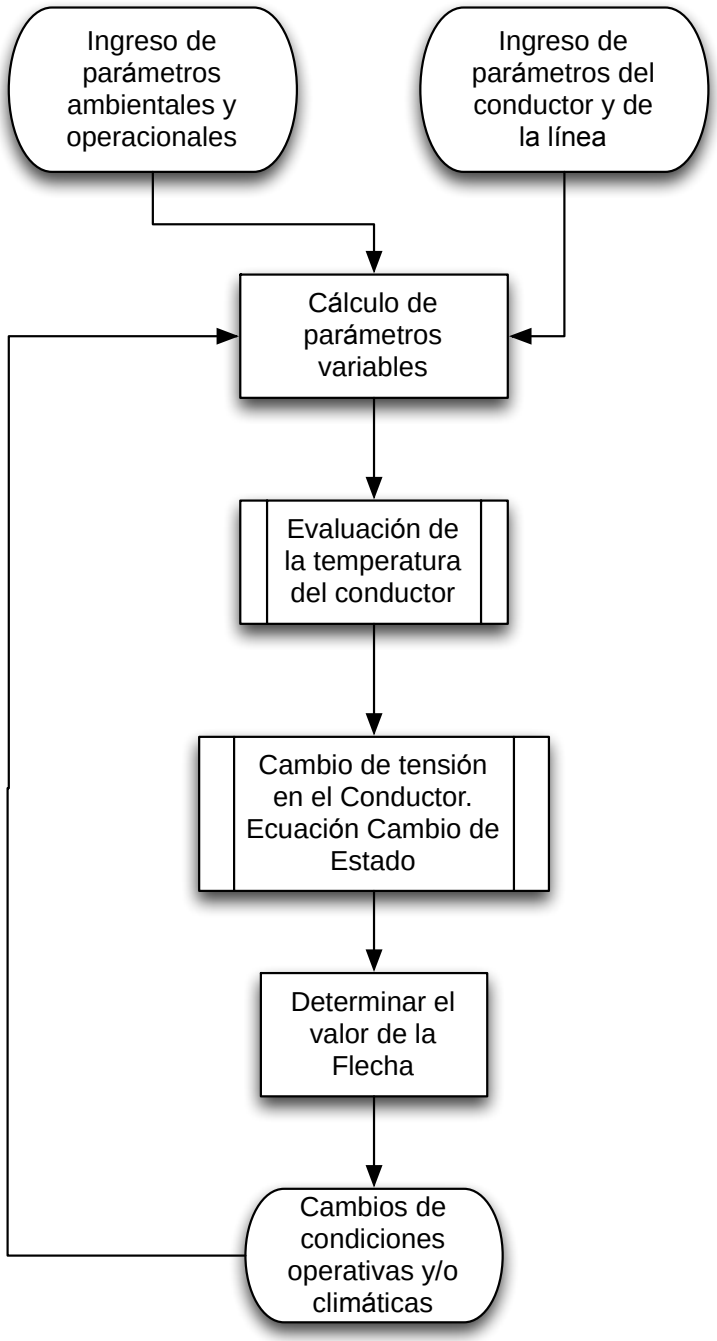

Figura 11. *Diagrama de Flujo relacionado con el proceso para determinar la flecha ante continuos cambios en la temperatura del conductor.*

En este caso el diagrama ilustra el programa del cálculo de la flecha ante constantes cambios de parámetros meteorológicos u operativos que ocurren normalmente durante días de operación de las líneas. Como se mencionó anteriormente, ante condiciones de

emergencia, es muy importante evaluar el valor de la flecha durante cada instante de tiempo, ya que permite evaluar la máxima corriente de operación que permite mantener las distancias de seguridad establecidas. Es decir que como desarrollo final de este proyecto de grado se tiene un programa que permite realizar la siguiente secuencia de cálculos:

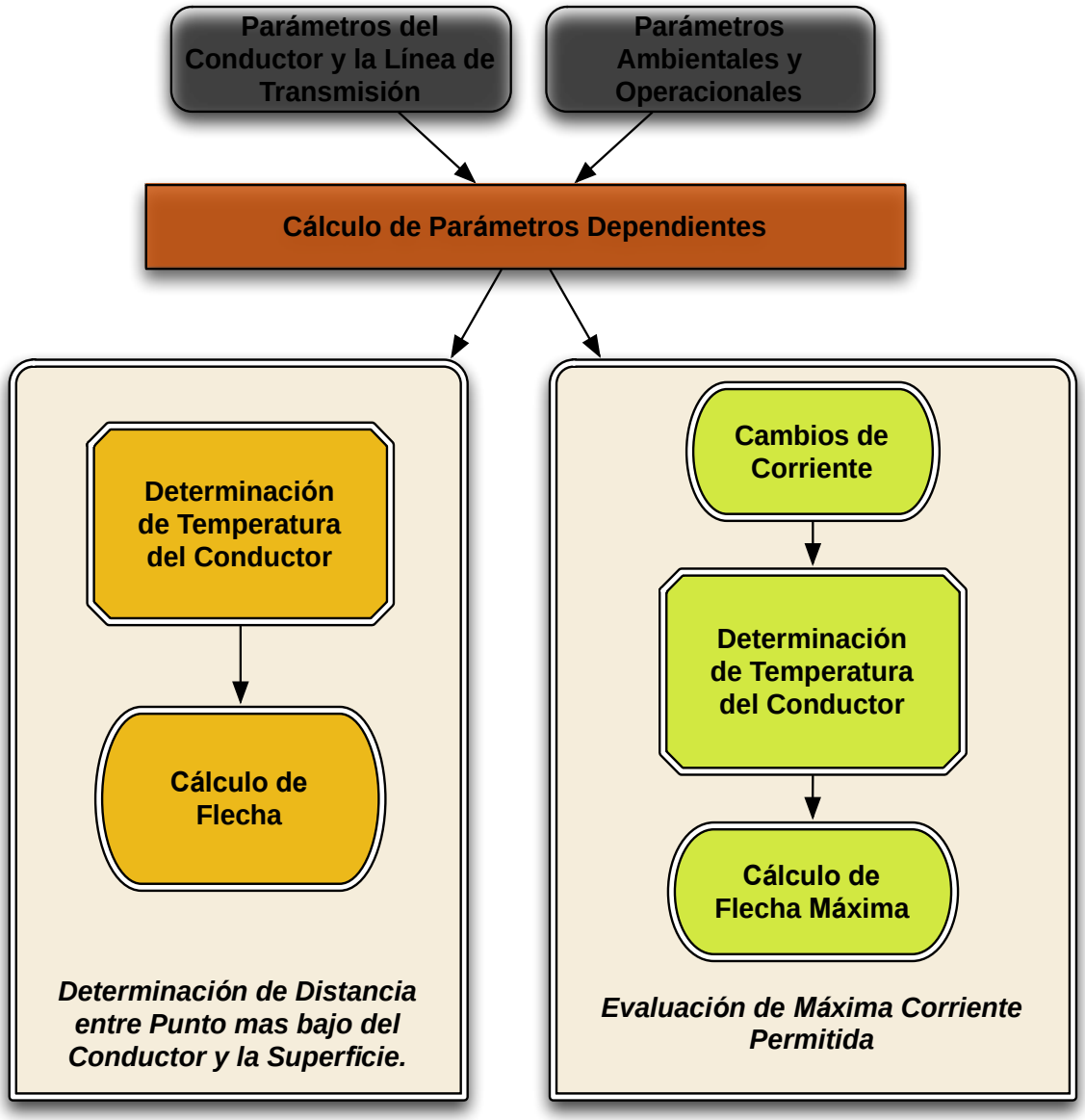

Figura 12. *Resumen de los procesos que se pueden desarrollar conociendo la temperatura del conductor y calculado la flecha considerando el modelo mecánico de las líneas de transmisión.*

Para entender mejor el concepto relacionado con la evaluación de máxima corriente permitida se puede evaluar el siguiente caso. Suponiendo que se tiene el siguiente perfil del valor de la flecha para un día de operación. Que pasaría si ocurre un cambio en la corriente de operación a medio día?

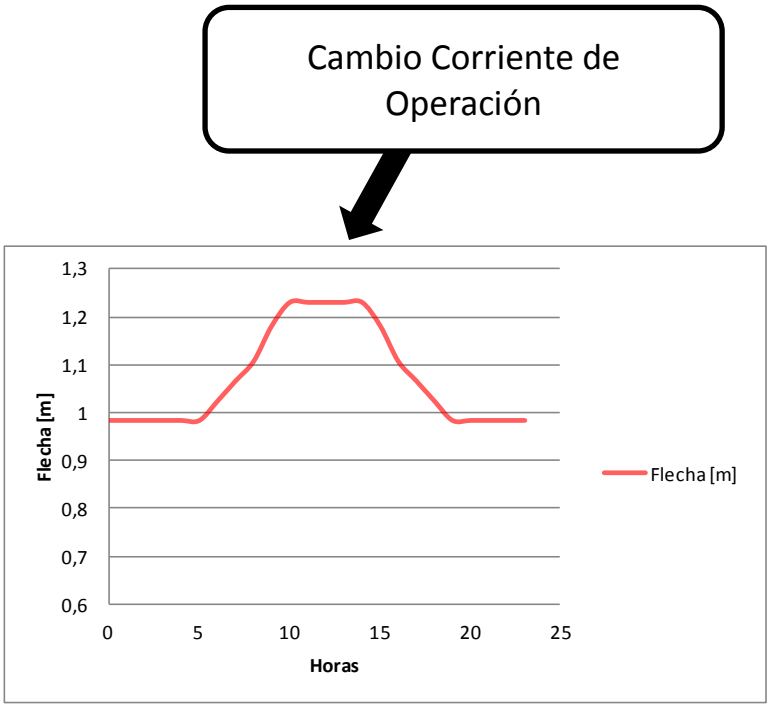

Figura 13. *Flecha de una línea de transmisión durante un día de operación*

Básicamente puede ocurrir que al estar en el valor máximo de flecha, el valor de la corriente que permite conservar las distancias de seguridad adecuadas, sea inferior al permitido cuando se encuentra en horas de operación de la mañana y noche. Para el valor de la flecha ilustrado anteriormente, se puede obtener la siguiente gráfica de corriente de operación y la corriente máxima permitida.

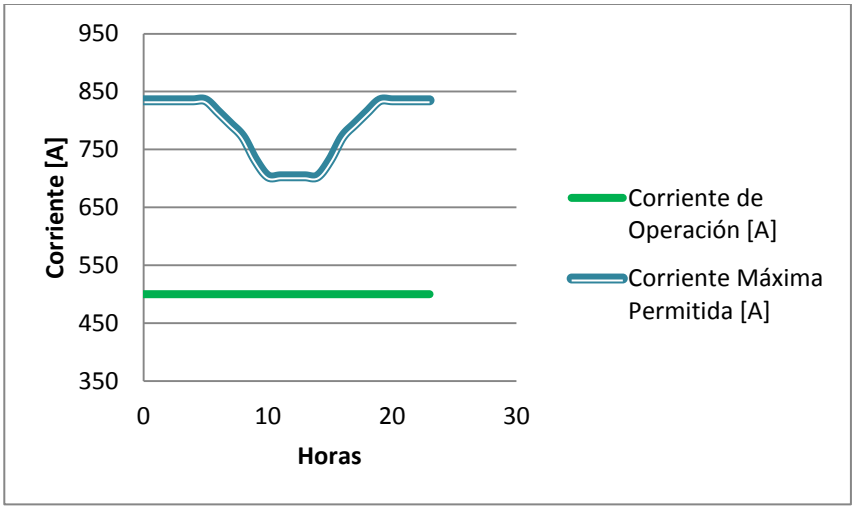

Figura 14. *Corriente de operación y máxima permitida durante un día de operación.*

Como se puede observar, la corriente máxima permitida es menor cuando se llega al medio día, lo cual concuerda y es coherente con la gráfica de la variación de la flecha presentada.

4. Simulaciones y Resultados

Como resultado del algoritmo encargado de calcular la capacidad de corriente, se obtiene el número que representa dicha variable; por ende para dar un análisis más afondo sobre el cambio de este parámetro ante condiciones ambientales, a continuación se presenta una serie de simulaciones que presentan el impacto que causan sobre la capacidad de corriente. Posteriormente se realiza un análisis similar contemplando como variable a analizar la temperatura del conductor. Finalmente se evalúa el valor de la flecha del conductor ante variaciones en la temperatura del conductor para diferentes condiciones climáticas en un día de operación continua.

4.1 Análisis de Sensibilidad de la Capacidad de Corriente

Para realizar un análisis detallado sobre el comportamiento de la capacidad de corriente de los conductores ante diferentes cambios climáticos, a continuación se presenta un análisis de sensibilidad considerando los principales parámetros:

- Velocidad del Viento. [m/s].
- Dirección del Viento. [Grados].
- Radiación Solar. [W/m^2].
- Temperatura Ambiente. [°C].

De acuerdo a lo expresado anteriormente, se establecen los siguientes valores en condiciones estables:

Tabla 7. *Datos de Entrada para análisis de sensibilidad de la capacidad de corriente.*

Velocidad del Viento [m/s]	2	**Resistencia Cond. A 25°C [Ω/m]**	7,283 e-5
Emisividad	0,5	**Resistencia Cond. A 75°C [Ω/m]**	8,688 e-5
Absorbencia del Sol	0,5	**Latitud**	30° Norte
Tmax Conductor [°C]	85	**Condición Atmosfera**	Limpia
Diámetro Externo Cond. [mm]	28,14	**Temperatura Conductor [°C]**	100
Fecha y Hora	11am / 10 de Junio	**Dirección del Viento**	45°
Radiación Solar [W/m^2]	1000	**Temperatura Ambiente [°C]**	20

En la literatura relacionada con el tema, se expresa que los parámetros de mayor influencia sobre los cálculos son la velocidad y dirección del viento, temperatura ambiental y radiación solar. Con base en esta información, primero se realizó una variación en la velocidad del viento considerando el rango de 0 a 25 m/s como se muestra en la siguiente figura:

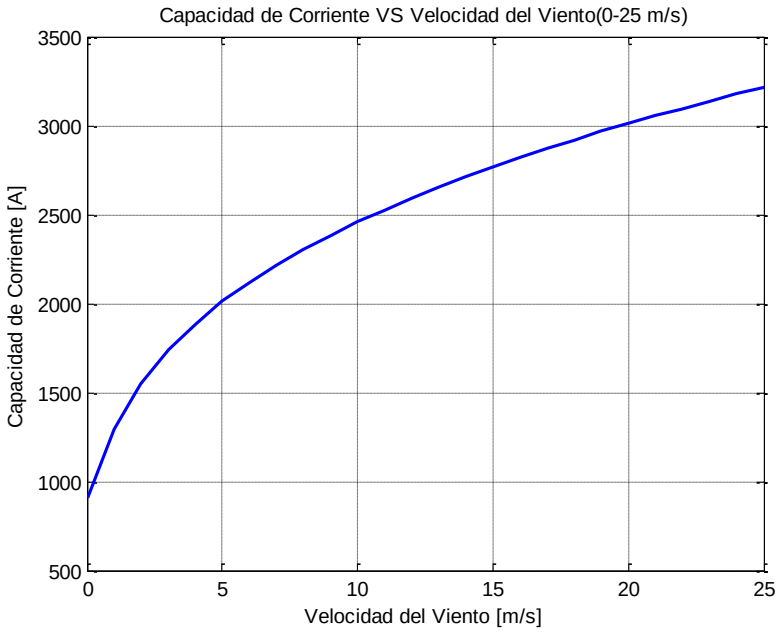

Figura 15. *Capacidad de corriente ante variaciones de velocidad del viento 0 -25m/s.*

De la gráfica se puede apreciar que la capacidad de corriente paso de un valor de aproximadamente 850A a un valor de 3250A. Es decir que hubo un aumento de un 382% del valor inicial.

Ahora para el ángulo relacionado con la dirección del viento se realizó una variación de 0 90 grados, los resultados se presentan en la siguiente figura:

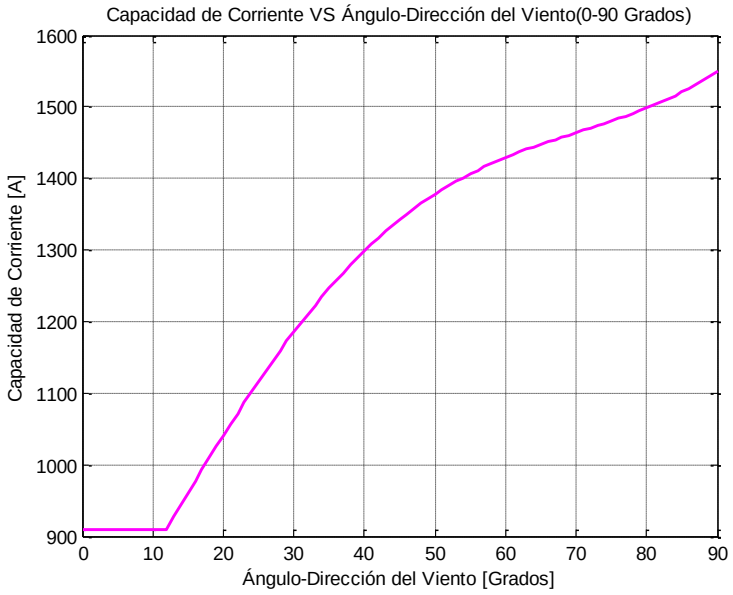

Figura 16. *Capacidad de corriente ante variaciones del ángulo y dirección del viento (0 a 90 grados).*

En este caso se puede apreciar que no hay una gran variación durante los primeros valores de grados, sin embargo una vez inicia el aumento de la capacidad, empieza a incrementar hasta un punto en donde se ve un tipo de saturación. De esta gráfica se puede concluir que a mayor ángulo, la capacidad está incrementando. Para la Radiación solar se realizó una variación entre 0 y 1000 W/m^2, los resultados fueron los siguientes:

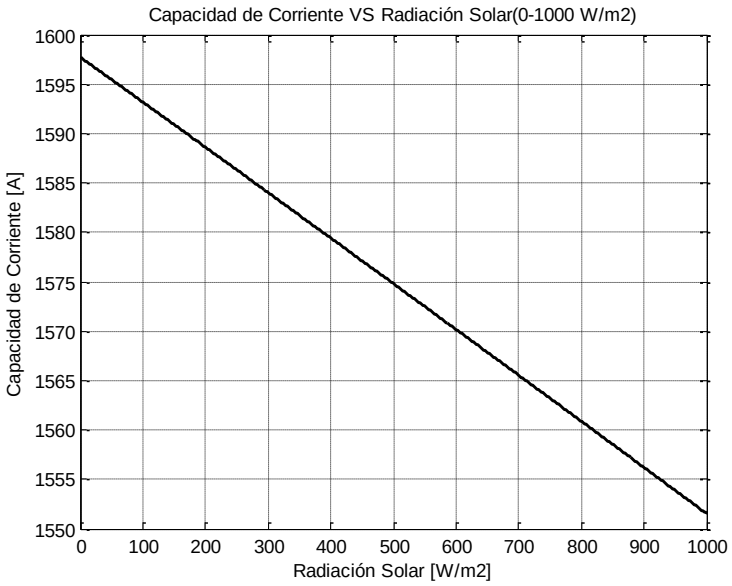

Figura 17. *Capacidad de corriente ante variaciones de la radiación solar (0-1000 W/m^2).*

Para este caso se puede observar que a mayor radiación solar existe una disminución en la capacidad de corriente, sin embargo no afecta en gran medida, ya que decreció cerca de un 3% de su valor inicial al aumentar la radiación solar. Finalmente al variar la temperatura ambiente desde -20°C hasta 40°C se puede apreciar el siguiente comportamiento:

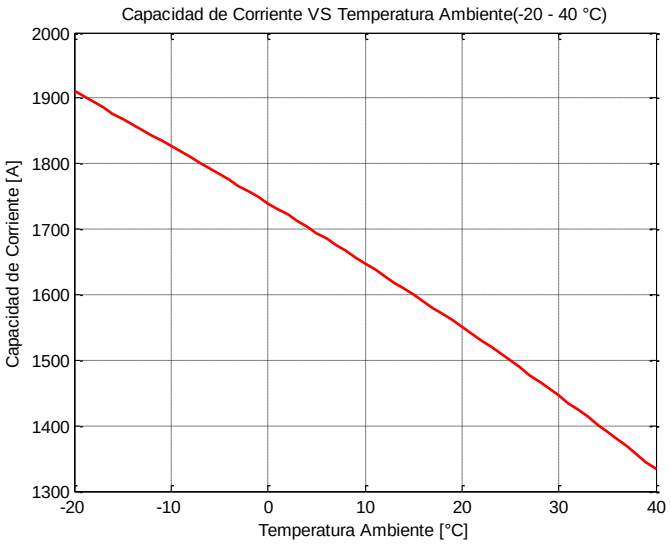

Figura 18. *Capacidad de corriente ante variaciones de la temperatura ambiente (-20°C – 40°C).*

Para este caso se puede observar que la capacidad está decreciendo alrededor de un 31%, es decir que este parámetro si causa un impacto considerable sobre la capacidad de corriente del conductor estudiado.

En general se pudo confirmar el impacto que tiene cada una de las variables sobre la capacidad de corriente, ya que al aumentar los parámetros relacionados con el viento se esperaba que causara un enfriamiento sobre el conductor y por ende pérdida de calor, lo que permite que el conductor tenga la capacidad de transportar mayor corriente. Por otro lado, al aumentar la temperatura y la radiación solar el efecto debería ser lo contrario; ya que si el conductor absorbe más calor de agentes externos, esto limitaría el flujo de corriente al que está sometido.

A continuación se presenta los diferentes valores de capacidad de corriente obtenidos al variar 2 parámetros. Primero se realiza una variación sobre la velocidad del viento y la temperatura ambiente, considerando los mismos rangos sobre los que se varió estos parámetros en las simulaciones presentadas anteriormente. El mismo estudio se realiza considerando la dirección y velocidad del viento.

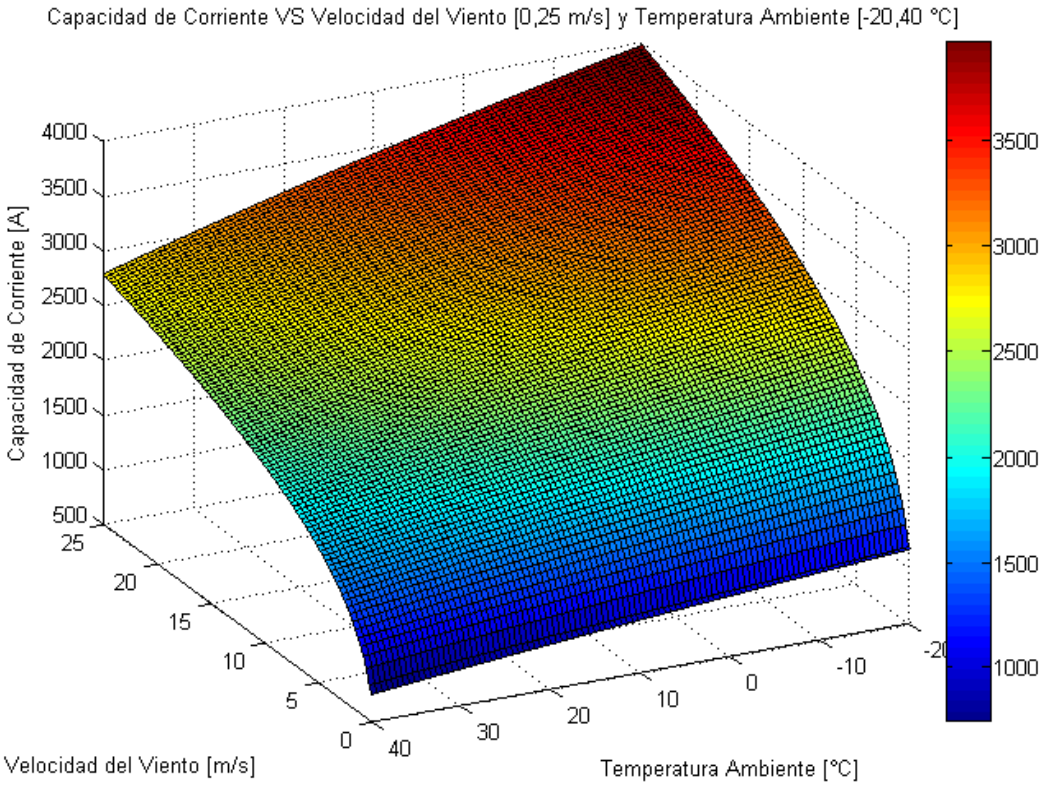

Figura 19. *Capacidad de corriente ante variaciones de velocidad del viento y temperatura ambiente,*

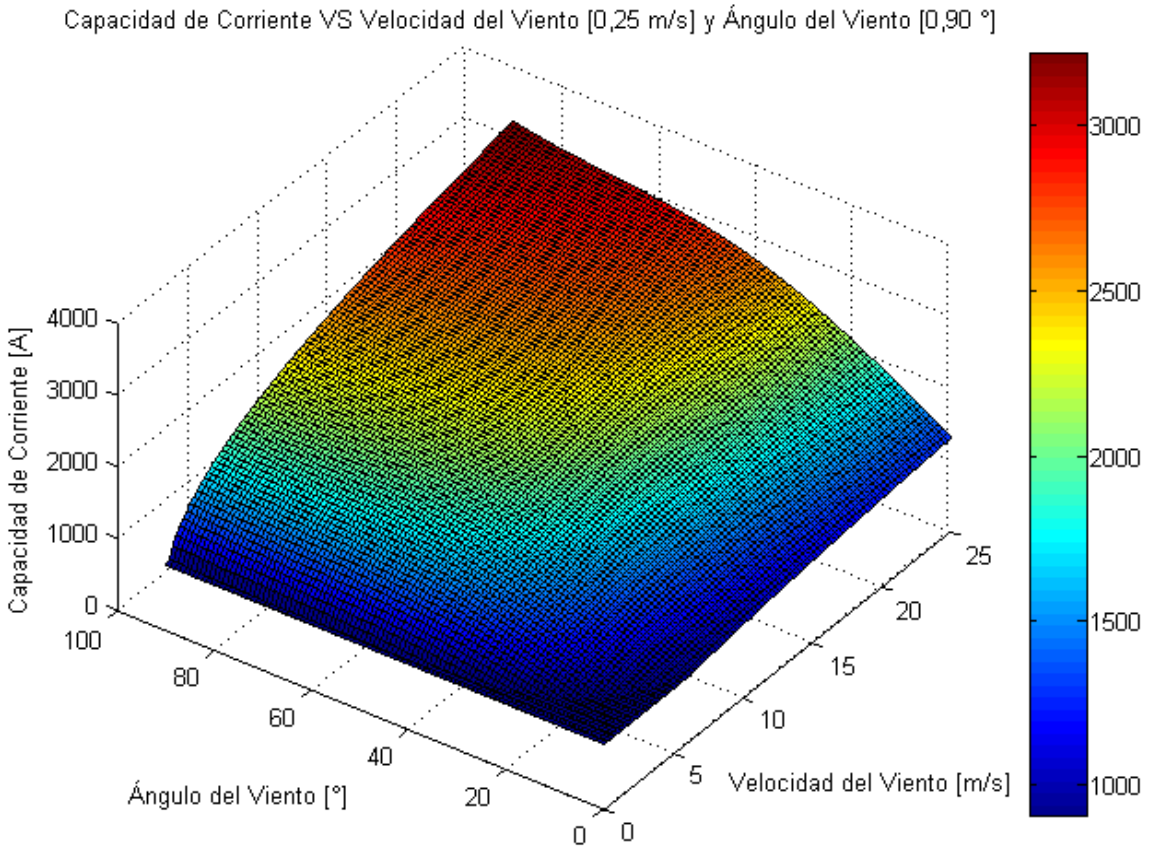

Figura 20. *Capacidad de corriente ante variaciones de velocidad del viento y ángulo del viento.*

De los resultados obtenidos se puede apreciar conclusiones similares a las expuestas anteriormente, aunque se puede observar más claramente como la velocidad del viento es el parámetro más influyente, ya que aunque la temperatura ambiente se mantenga constante el valores elevados, si se aumenta la velocidad del viento se generará una aumento considerable sobre la capacidad de corriente.

4.2 Análisis de Sensibilidad de la Temperatura del Conductor

Se realizó un estudio del comportamiento de la temperatura en el conductor ante cambios en la corriente que fluye a través del conductor. A continuación se presenta una gráfica de diferentes pasos de corriente:

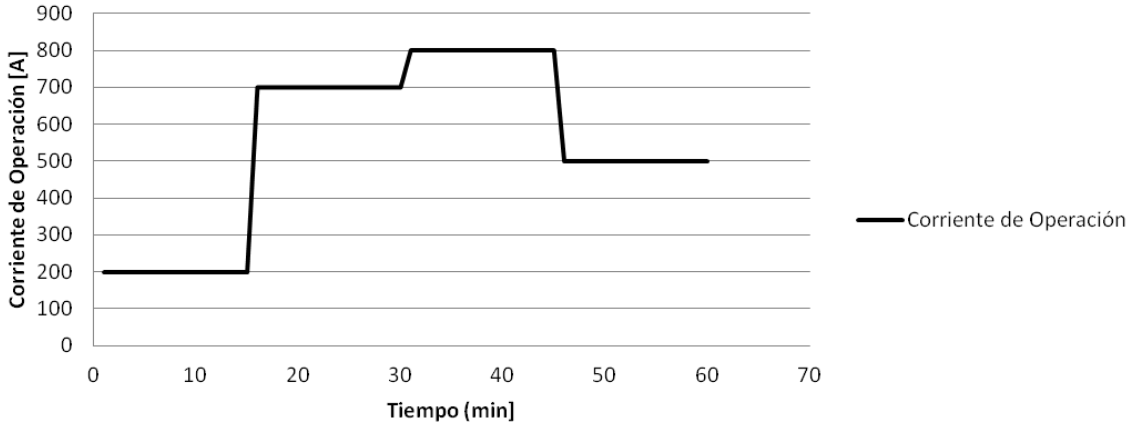

Figura 21. *Perfil de corriente de operación para 1 hora.*

Ante este tipo de valores de corriente se obtuvo las siguientes variaciones de temperatura:

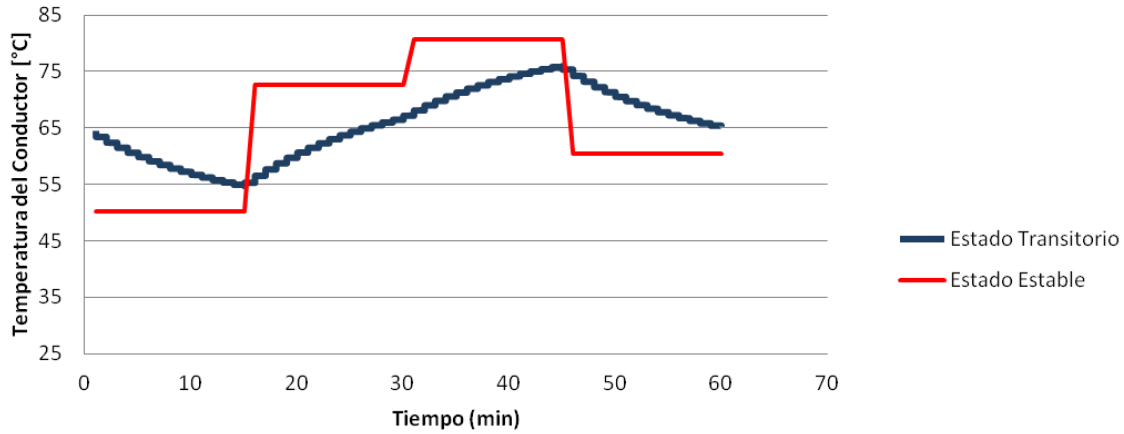

Figura 22. *Comparación entre resultados de temperatura del conductor en estado estable o transitorio.*

En rojo están los valores en estado estable y en azul los valores en estado transitorio. De esta gráfica se puede observar la importancia de considerar el efecto transitorio en los cálculos, ya que aunque hayan pasado varios minutos no se ha alcanzado el valor de temperatura en estado estable.

A continuación se presentan los resultados de simulaciones de la variación de la temperatura del conductor al realizar cambios en la velocidad del viento y la temperatura ambiente.

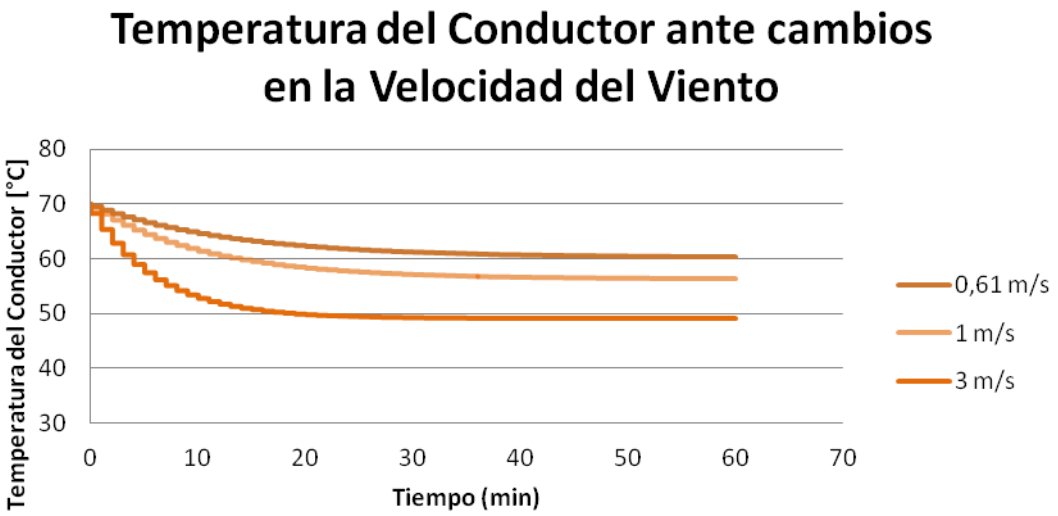

Figura 23. *Temperatura del conductor ante diferentes valores de velocidad del viento.*

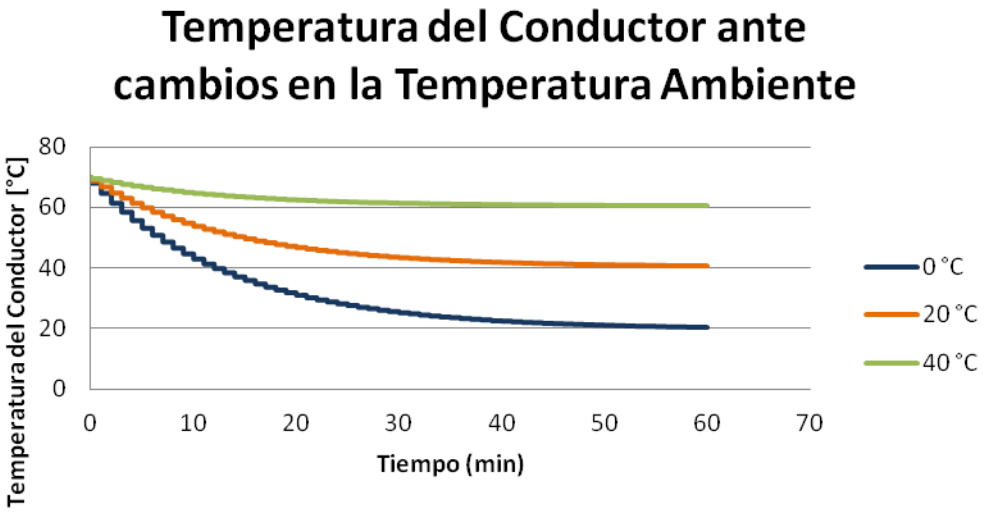

Figura 24. *Temperatura del conductor ante diferentes valores de temperatura ambiente.*

En las anteriores gráficas se realizó el mismo estudio de sensibilidad sobre la temperatura del conductor al variar la velocidad del viento y la temperatura ambiente, considerando una corriente de operación de 550A. De los resultados obtenidos se puede concluir que como es de esperarse, literalmente al disminuir la temperatura ambiente y aumentar la velocidad del viento se está refrigerando más rápidamente el conductor e incluso logra una reducción considerable en su temperatura. En este caso se puede observar que es más crítico afectar la temperatura ambiente que la velocidad del viento. Así mismo a continuación se presenta una gráfica donde se ilustra el comportamiento de la temperatura en el conductor si se realiza alteraciones sobre la radiación solar. Para este caso los resultados muestran que todos los puntos tienen a un mismo valor y que las diferencias entre cada uno de los casos

evaluados no son demasiados, es decir que no tiene gran influencia sobre el comportamiento del conductor.

4.3 Evaluación del impacto del cambio térmico sobre el conductor

Para este caso se evalúa el efecto del cambio de la temperatura ambiente a lo largo de un día considerando los siguientes parámetros para una línea con conductor Hawk 26/7.

Tabla 8. *Datos de entrada para evaluación del cambio de la flecha ante variaciones de la temperatura ambiente y la corriente de operación en 24 horas.*

Velocidad del Viento [m/s]	1,21	**Resistencia Cond. A 25°C [Ω/m]**	11,9 e-5
Emisividad	0,5	**Resistencia Cond. A 75°C [Ω/m]**	12,7-5
Absorbencia del Sol	0,5	**Latitud**	25° Norte
Tmax Conductor [°C]	75	**Condición Atmosfera**	Limpia
Diametro Externo Cond. [mm]	28,11	**Coeficiente de dilatación Lineal [1/°C]**	1,97E-5
Fecha y Hora	11 am / 30 de Agosto	**Dirección del Viento**	12°
Elevación a nivel del mar [m]	1340	**Módulo Elasticidad Kg/mm2**	7730

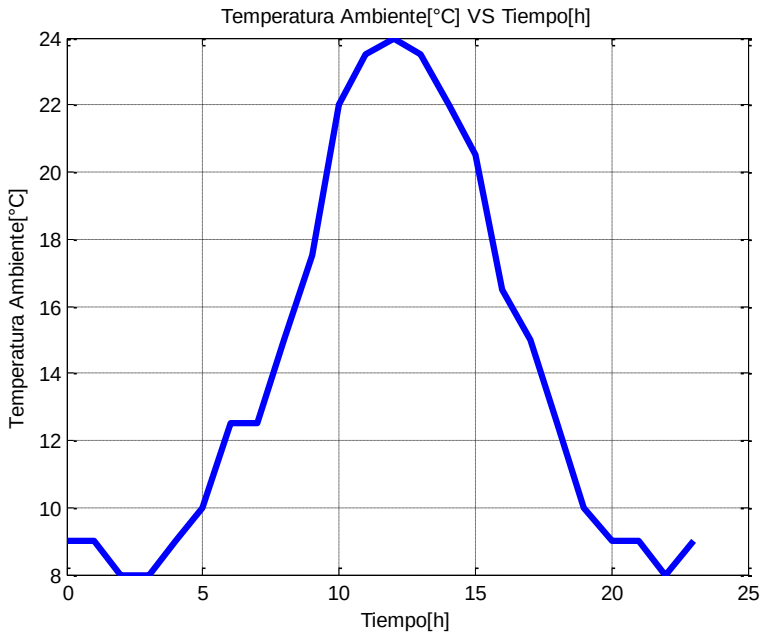

Figura 25. *Perfil de temperatura ambiente para un día de operación.*

Evaluación de la Flecha – Cambios de Temperatura Ambiente

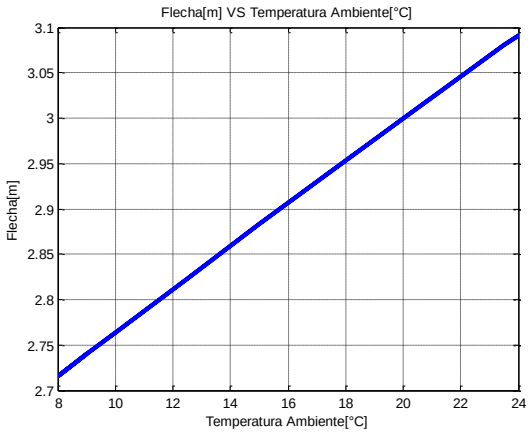

Figura 26. *Variación de la flecha ante cambios en la temperatura ambiente.*

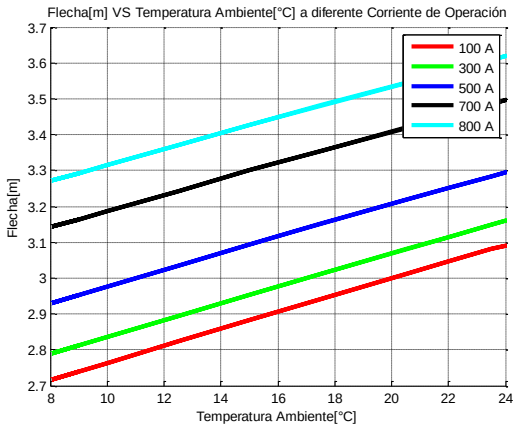

Figura 27. *Variación de la flecha ante cambios en la temperatura ambiente para diferentes corrientes de operación.*

Relación de la Temperatura del Conductor y la Flecha

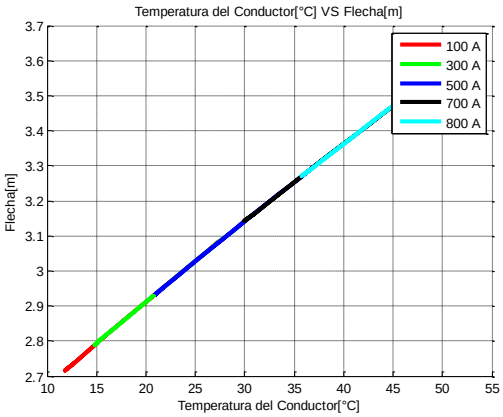

Figura 27. *Variación de la flecha ante cambios en la temperatura del conductor a diferentes corrientes de operación.*

Temperatura Conductor en el Tiempo

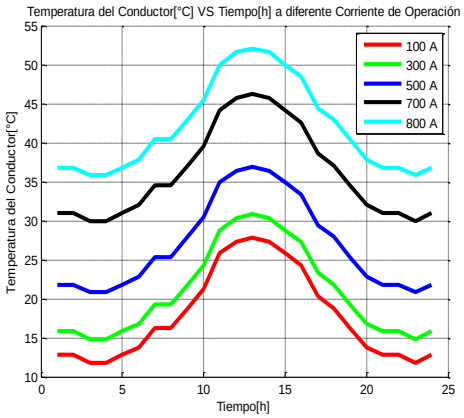

Figura 28. *Variación de la temperatura del conductor ante diferentes corrientes de operación.*

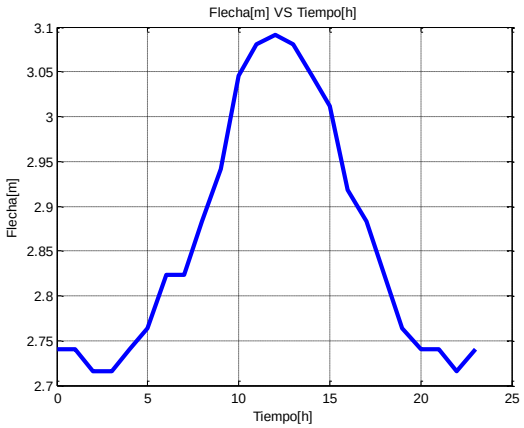

Figura 29. *Variación de la flecha en un periodo de 24 horas.*

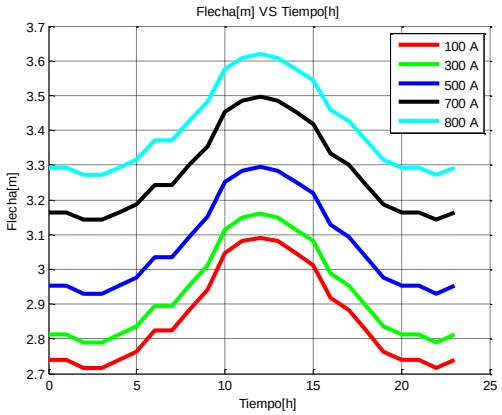

Figura 30. *Variación de la flecha en un periodo de 24 horas a diferentes corrientes de operación*

5. Implementación Computacional

Con el fin de implementar todos los algoritmos evaluados en el marco teórico, se realiza el desarrollo y programación de los algoritmos en LabVIEW. Este software permite elaborar una interfaz para el ingreso de datos iniciales y la visualización de los resultados obtenidos.

En general se desarrollaron programas relacionados con la capacidad térmica de corriente, el cambio de la temperatura del conductor, el cálculo de la flecha de la línea y la corriente máxima permitida por distancia de seguridad. Estos programas se implementaron para evaluar condiciones en estado estable y/o estado transitorio.

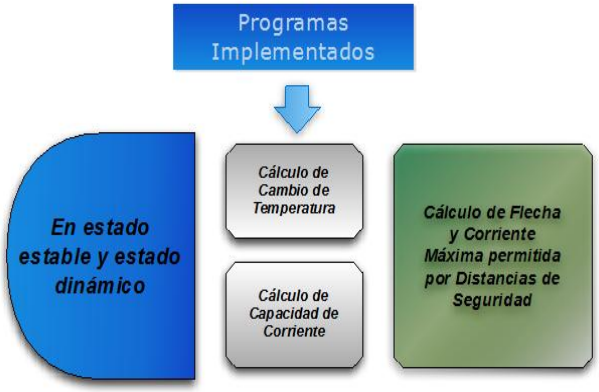

Figura 31. *Programas implementados.*

Tabla 9. *Listado de programas y bloques desarrollados en LabVIEW.*

Programa Implementado	***Bloque***
Calcula Temperatura del Conductor	
Determina la Flecha	
Calcula parámetros Variables	
Pérdida de Calor por Radiación	
Ganancia de Calor por Radiación Solar	
Ganancia de Calor por Efecto Joule	
Algoritmo Runge Kutta	

Básicamente para calcular la capacidad térmica de corriente y la temperatura del conductor en estado estable se desarrolló una misma interfaz, la diferencia radica en que para la primera la temperatura del conductor es un parámetro de entrada y para la segunda se requiere conocer el valor de la corriente de operación.

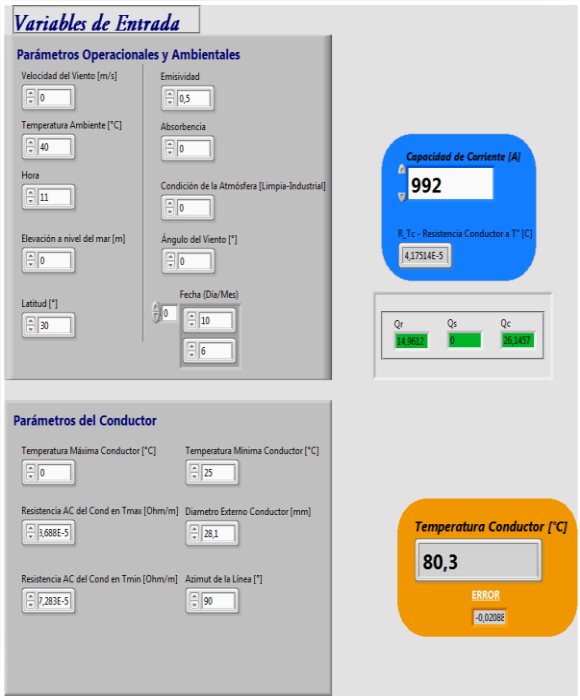

Figura 32. *Interfaz para el cálculo de capacidad de corriente y temperatura del conductor.*

El programa encargado de evaluar estas condiciones en estado transitorio, permite visualizar los cambios en cada instante de tiempo.

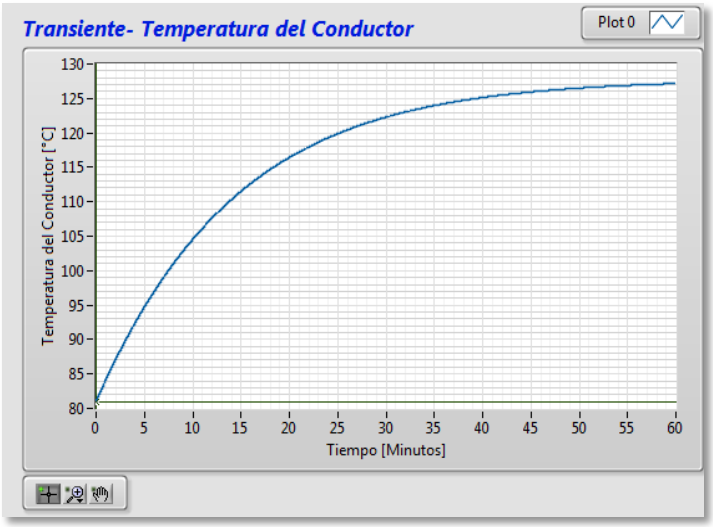

Figura 33. *Visualización en estado transitorio del cambio de la temperatura del conductor en el tiempo.*

Finalmente en el programa para el cálculo de la flecha y la corriente máxima permitida se desarrolló la siguiente interfaz:

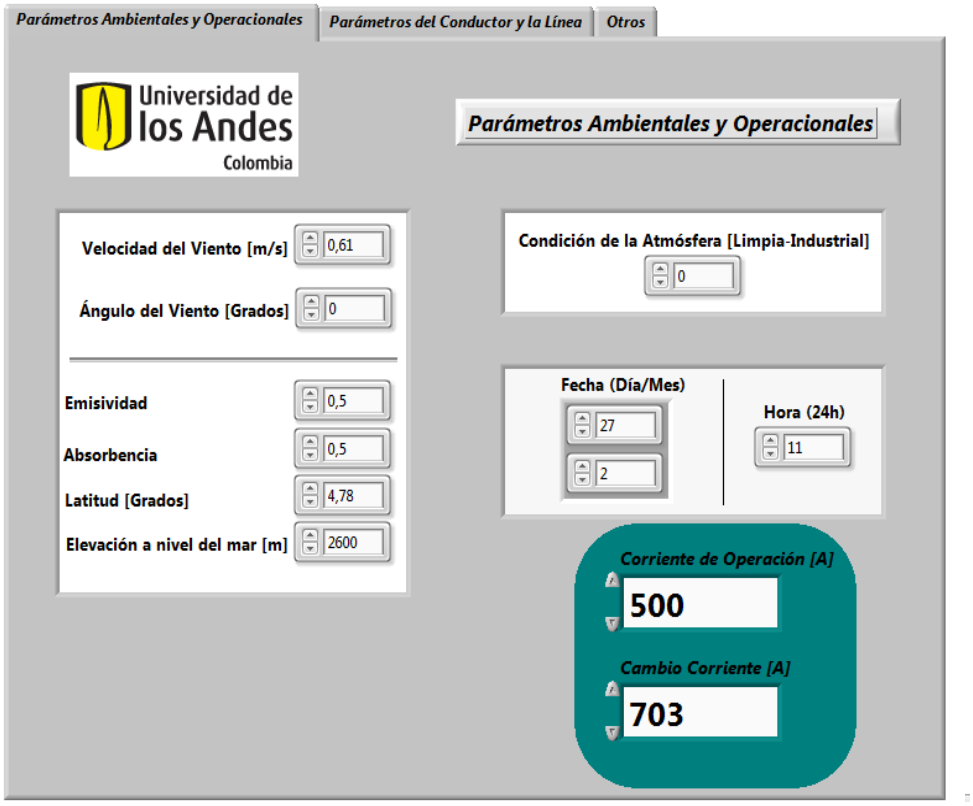

Figura 34. *Interfaz para ingresar datos de parámetros ambientales y operacionales.*

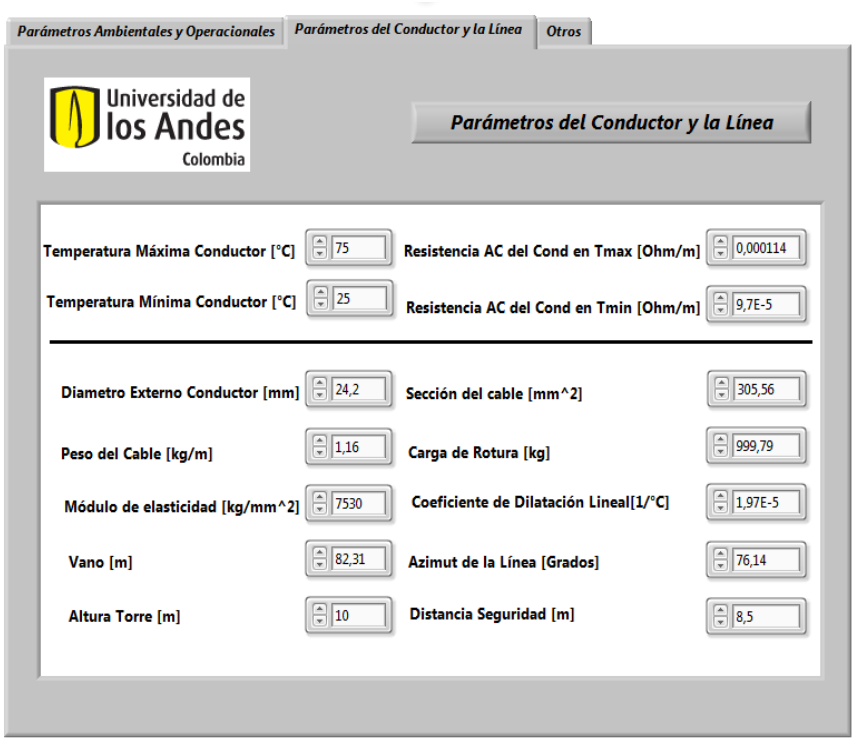

Figura 35. *Interfaz para ingresar datos del conductor y la línea.*

Para ingresar el valor de la temperatura ambiente existen dos opciones, se pueden fijar los valores manualmente de un día o el programa cuenta con una alternativa de realizar una simulación de Montecarlo y fijar los valores de temperatura ambiente para la cantidad de días o periodo de tiempo que el usuario desee.

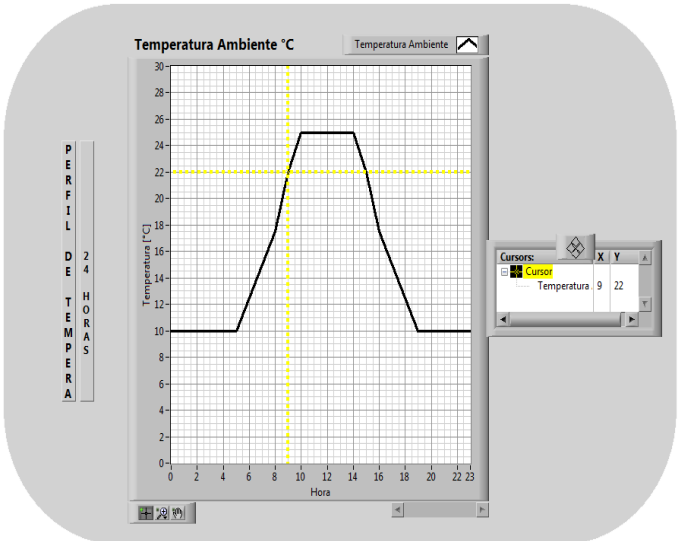

Figura 36. *Visualización del perfil de temperatura fijado o simulado.*

Ahora para la visualización de los resultados se tiene:

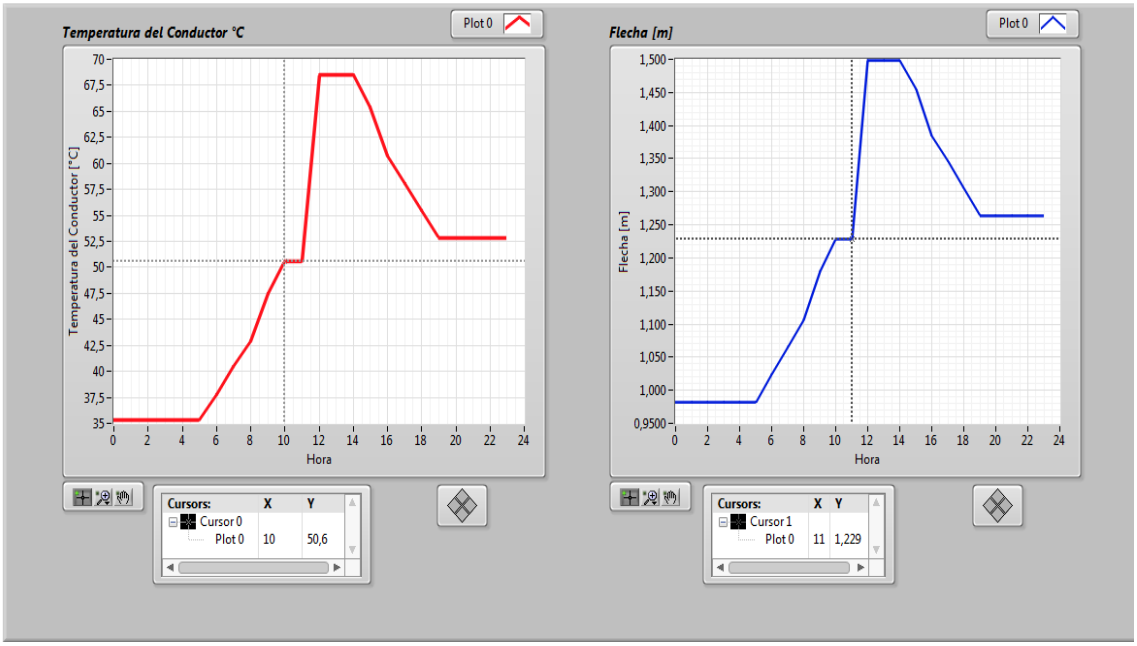

Figura 37. *Visualización de resultados relacionados con temperatura del conductor y la flecha en un periodo de tiempo.*

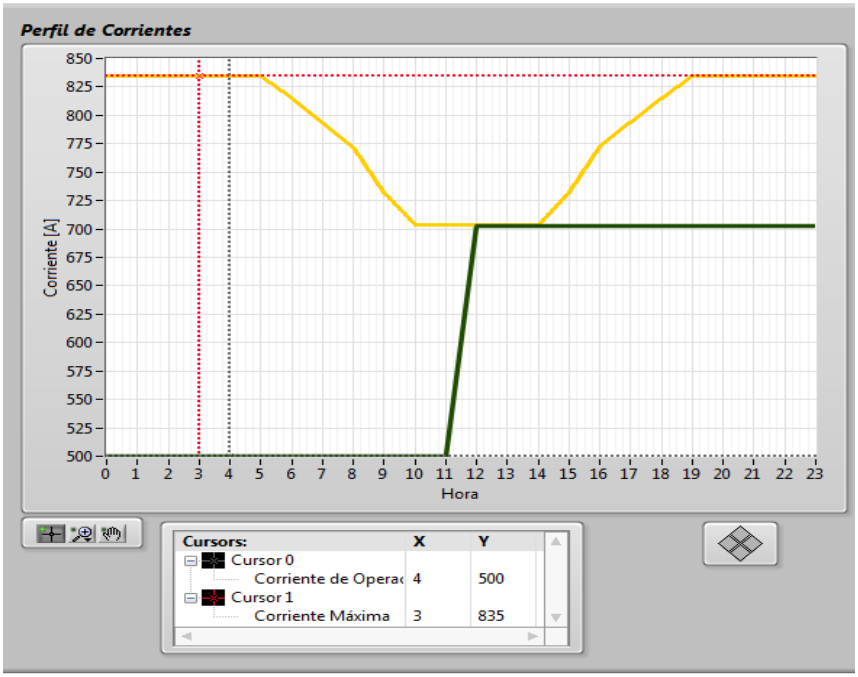

Figura 38. *Visualización de corriente de operación y corriente máxima permitida.*

5.1 Caso de Estudio

En esta sección se realizará una evaluación del programa desarrollado. El conductor a evaluar es un Peacock 24/7 y se considera los siguientes parámetros:

Tabla 10. *Parámetros ambientales a ingresar en el programa.*

Valores Ambientales		
Parámetro	**Valor**	**Unidades**
Vel. Viento	0,61	m/s
Áng. Viento	0	Grados
Emisividad	0,5	-
Absorbencia	0,5	-
Elevación Nivel del Mar	2600	m
Latitud	4,78	Grados
Atmosfera (Limpia-Industrial)	0	0-1

Tabla 11. *Parámetros de la línea y el conductor a ingresar en el programa.*

Valores Línea o Conductor		
Parámetro	**Valor**	**Unidades**
Diámetro Externo	24,2	mm
Temp. Máx Cond	75	°C
Temp. Min Cond	25	°C
Resistencia AC a Tmax	0,000114	Ohm/m
Resistencia AC a Tmin	9,70E-05	Ohm/m
Azimut Línea	76,14	Grados
Carga de Rotura	9798	kg
Coef Dilatación	1,97E-05	1/°C
Sección Transversal	305,56	Mm^2
Peso del Cable	1,16	kg/m
Vano	82,31	m
Módulo Elasticidad	7530	kg/mm^2
Coef Seguridad	1	-
Altura del Conductor	15	m
Desnivel entre apoyos	0,4	m
Capacidad Nominal	760	A

Considerando estos parámetros definidos y variando la temperatura ambiente y la corriente de operación se obtienen los resultados presentados en las figuras 16 y 17.

De los resultados obtenidos es claro que a mayor corriente de operación, se va a generar un mayor calentamiento en el conductor y por ende su temperatura va a aumentar. Así mismo el valor de la flecha aumenta cuando la corriente que circula por el conductor es mayor. De los resultados obtenidos también se puede apreciar que los valores de temperatura del conductor y flecha aumentan a medida que la temperatura ambiente también aumenta. Esto es notorio ya que para las 12 horas llegan a sus valores máximos.

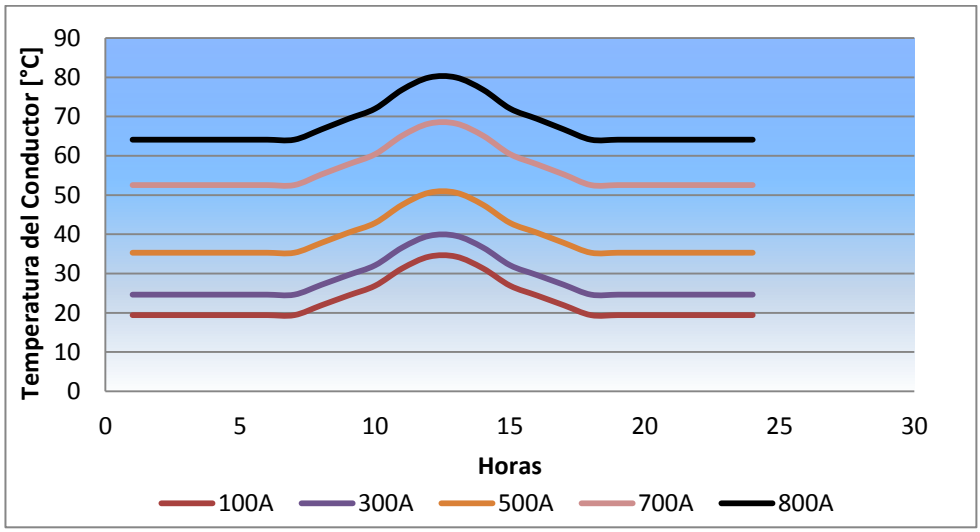

Figura 39. *Temperatura del conductor a diferentes corrientes de operación.*

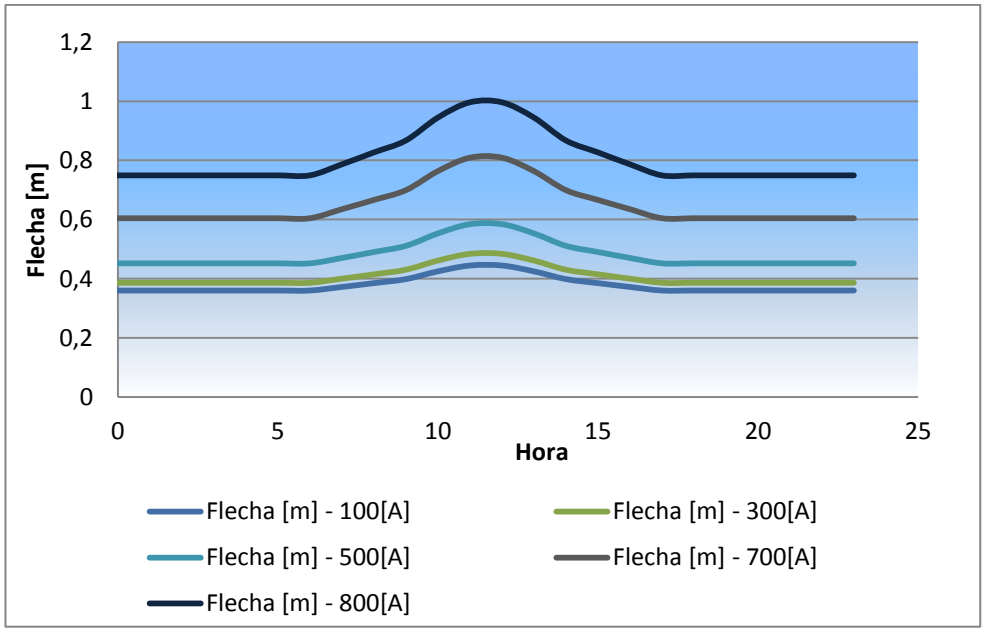

Figura 40. *Flecha de la línea a diferentes corrientes de operación.*

Cuando la corriente de operación es más pequeña, los cambios en la temperatura del conductor y en la flecha no son tan significativos que cuando el conductor se encuentra operando niveles de corrientes superiores. De las gráficas se puede concluir que básicamente existe una relación lineal entre la flecha y la temperatura del conductor, ya que ambas presentan comportamientos similares para las condiciones evaluadas.

Ahora si se considera un perfil aleatorio de la temperatura ambiente para 3 días y una variación de la corriente de operación entre valores de 500A y 750A, se puede evaluar la corriente máxima permitida fijando los valores de la altura de la estructura y la distancia mínima de seguridad. En este caso se evalúa el mismo conductor Peacock 24/7 considerando que es una línea de 220kV y que está operando a una corriente de 500A. Para los otros parámetros se utiliza la información de las tablas 2 y 3.

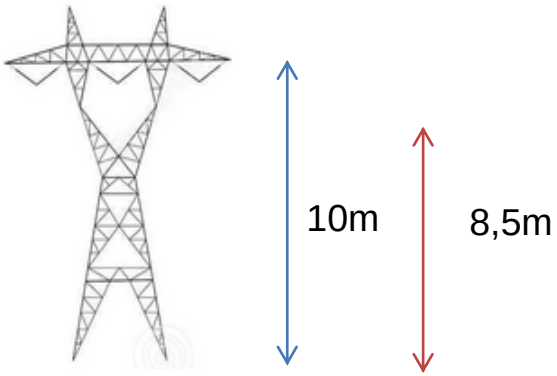

Figura 41. *Altura de los conductores en la estructura (10m) y distancia mínima de seguridad (8,5m).*

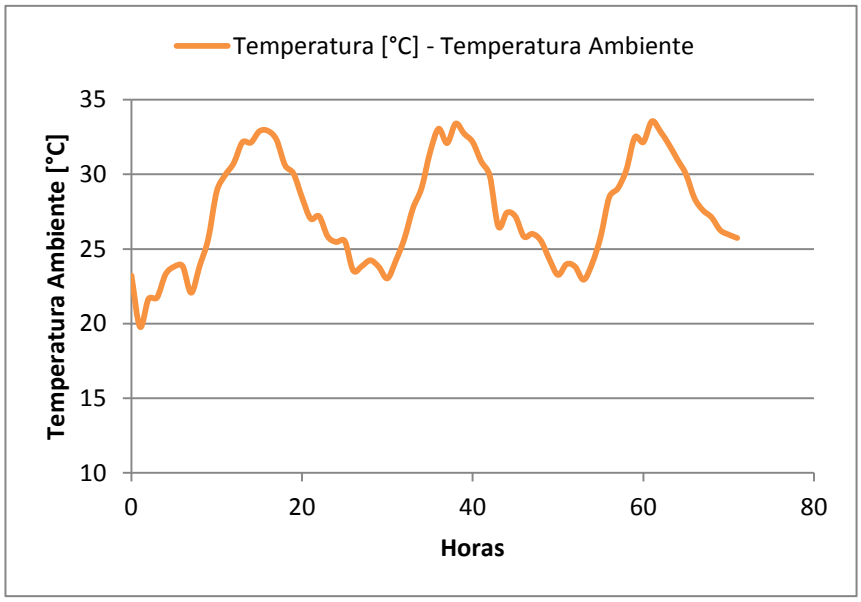

Figura 42. *Perfil de temperatura aleatorio para 3 días de simulación.*

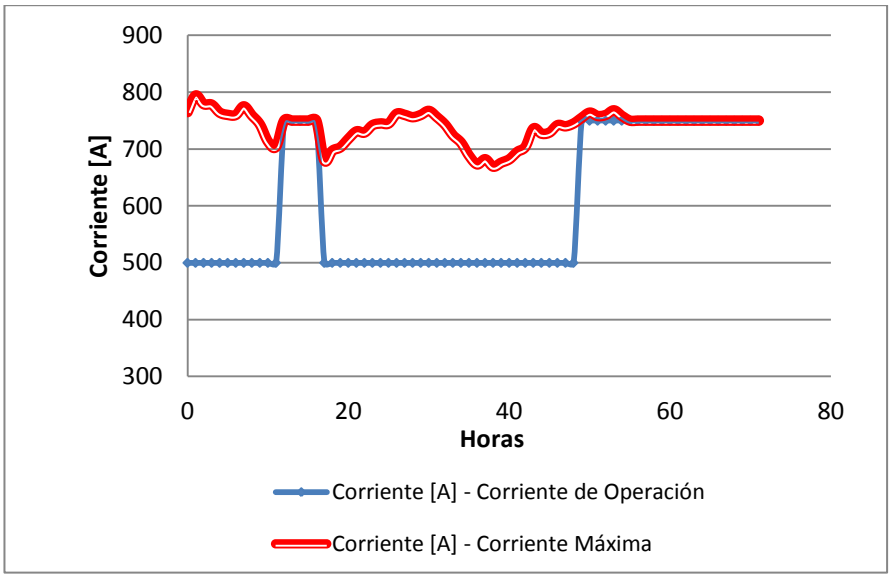

Figura 43. *Evaluación de corriente máxima de operación relacionada con la distancia mínima de seguridad.*

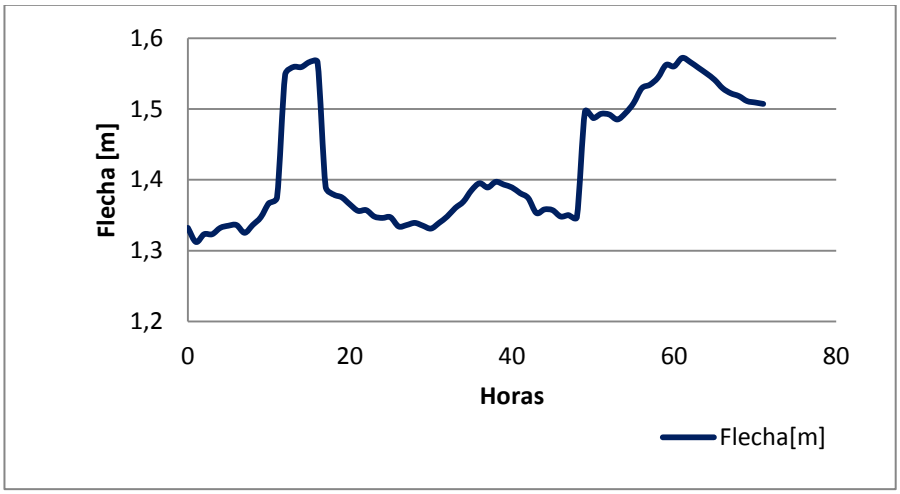

Figura 44. *Variación de la flecha en el tiempo.*

De los resultados obtenidos, se puede ver que a diferentes valores de temperatura ambiente, el valor de la corriente de operación máxima está variando y que cuando se supera la mínima distancia de seguridad (para este caso 1,5m), la gráfica de corriente máxima permitida que se ilustra en la figura 20, de cierta forma se satura; lo cual muestra que se está superando dichos límites. Por ejemplo, esto se puede ver en la gráfica de la figura 21, ya que para las horas mayores a 48 horas, las distancias mínimas de seguridad fueron sobrepasadas y por eso se muestra un tipo de saturación en la corriente máxima permitida para estas horas en la gráfica de la figura 20.

Es importante resaltar que la flecha máxima que se genere a diferentes corrientes de operación, está definida por el cambio de temperatura en el conductor que se produzca al pasar de una corriente de operación a otra.

El desarrollo de esta plataforma es importante ya que permite evaluar en condiciones emergencias la máxima corriente de operación permitida de las líneas en caso de necesitar aumentar los flujos de corriente en algunas líneas. De este modo en caso de utilizar modelos probabilísticos, se puede generar funciones de probabilidad que representen o modelen el comportamiento de líneas de transmisión y de esta forma poder plantear varios escenarios y poder predecir el posible comportamiento de las líneas ante diferentes condiciones de operación.

6. Conclusiones

Se implementó una herramienta computacional que permite evaluar diferentes casos de simulación tanto en estado estable como en estado transitorio. Sobre estos casos es necesario definir parámetros ambientales y operacionales dependiendo del resultado final que se esté buscando, es decir la capacidad de corriente, la temperatura del conductor, la flecha o la corriente máxima de operación relacionada con las distancias mínimas de seguridad.

A través de la herramienta desarrollada se realizó un análisis de sensibilidad, verificando que los parámetros que más influyen sobre la capacidad térmica de corriente son la velocidad y ángulo del viento, que permiten refrigerar el conductor; y por otro lado la temperatura ambiente y la radiación solar, que causan un efecto de calentamiento sobre el conductor, lo cual hace disminuir la capacidad de corriente para esas condiciones. Así mismo se pudo evaluar el comportamiento transitorio de la temperatura del conductor ante cambios en la corriente de operación y otro tipo de factores; de esta forma se pudo establecer que es necesario considerar estos tiempos y las magnitudes de la temperatura del conductor, ya que al tomar los valores en estado estable, se puede cometer el error de asumir valores que no han sido alcanzados por el conductor debido a que aún no se estabiliza en un valor determinado.

Para este programa no se contempla la opción del desgaste mecánico en los conductores por su tiempo en servicio o instalado. Este es un factor que se recomienda considerar para futuros estudios ya que afecta directamente sobre parámetros utilizados como las tensiones en los cables [6]. Considerando este tipo de restricción se puede definir con mayor precisión las limitaciones que tiene el conductor y así mismo obtener mejores resultados a la hora de evaluar los parámetros de salida del programa.

La herramienta desarrollada puede ser utilizada tanto para evaluar líneas que se encuentran actualmente instaladas y realizar un monitoreo de su estado o para considerar el diseño e instalación de nuevas líneas. En ambos casos si se modifican algunos parámetros se pueden realizar simulaciones que pueden predecir el comportamiento de la línea condiciones operativas o ambientales determinadas. Para poder realizar un adecuado monitoreo es

necesario que hayan estaciones climáticas sobre los sitios a evaluar, ya que es de gran importancia conocer una serie de características ambientales en el momento en el que se está realizando los cálculos. El programa desarrollado en LabVIEW, permite que en un futuro se adapte este tipo de datos o entradas a la interfaz del programa, con el fin de que se pueda implementar y poder realizar un monitoreo continuo.

Así mismo, el programa desarrollado tendrá una gran importancia cuando el sistema eléctrico se encuentre en condiciones de emergencia, ya que permitirá definir el límite de corriente que puede fluir por las líneas considerando parámetros ambientales y operacionales de esta forma se puede establecer el mejor escenario de operación considerando las condiciones de ese momento.

Si se cuenta con funciones de probabilidad que representen ciertos datos de entrada como temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación solar, entre otros; se puede realizar simulaciones de Montecarlo para diferentes horas del día, este tipo de análisis permite obtener un modelo probabilístico sobre la línea evaluada, lo cual permitiría evaluar su comportamiento ante diferentes escenarios.

En conclusión, la herramienta desarrollada es de gran utilidad para el análisis de sistemas de transmisión de energía, ya que permite evaluar la capacidad máxima de corriente que puede fluir por las líneas considerando parámetros ambientales y operacionales, es decir que permite realizar un monitoreo real y constante sobre las líneas, lo cual permitiría mejorar la operación de los sistemas en general.

7. Referencias

[1] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Condcutors, IEEE Standard 738, 2006.

[2] Xu Bolun. "Predictive power dispatch for the Integration of high renewable shares incorporating dynamic line rating". March 2012.

[3] Douglass D. Dynamic Rating of Overhead Lines. IEEE Tutorial. Detroit, MI, July 25, 2011.

[4] Kim, S.D.; Morcos, M.M., "An Application of Dynamic Thermal Line Rating Control System to Up-Rate the Ampacity of Overhead Transmission Lines," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.28, No.2.

[5] Staszewski, L.; Rebizant, W., "The differences between IEEE and CIGRE heat balance concepts for line ampacity considerations," 2010 Proceedings of the International Symposium Modern Electric Power Systems (MEPS), pp.1-4, 20-22 Sept. 2010.

[6] Torres A, Chavarro A, "Diseño mecánico de líneas de transmisión", Módulo de clases de curso especialización. Universidad de los Andes.

[7] Davis, Murray W., "A new thermal rating approach: The real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines -- Part I: General description and justification of the real time thermal rating system," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.96, no.3, pp.803-809, May 1977.

[8] House, H.E.; Tuttle, P. D., "Current-Carrying Capacity of ACSR," Power apparatus and systems, part III. Transactions of the American IEEE, vol.77, no.3, pp.1169-1173, April 1958.

[9] Berjozkina, S.; Sauhats, A.; Bargels, V.; Vanzovichs, E. Detecting the Capacity Reserve in an Overhead Line. World Academy of Science, Engineering & Technology, 2012, Issue 61, p380.

[10] Kimp L. Magee W. Dasovich S. Bare overhead transmission conductor ratings. Issue 10/9. March 2010.

[11] Yi Yang; Harley, R.G.; Divan, D.; Habetler, T.G., "Adaptive Echo State Network to maximize overhead power line dynamic thermal rating," Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. pp.2247-2254, 20-24 Sept. 2009

[12] Yi Yang; Harley, R.G.; Divan, D.; Habetler, T.G., "MLPN based Parameter Estimation to Evaluate Overhead Power Line Dynamic Thermal Rating," Intelligent System Applications to Power Systems, 2009. ISAP '09. Conference on 15th International, vol., no., pp.1-7, 8-12 Nov. 2009.

[13] Yi Yang; Divan, D.; Harley, R.G.; Habetler, T.G., "Real-time dynamic thermal rating evaluation of overhead power lines based on online adaptation of Echo State Networks," Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE , pp.3638-3645, 12-16 Sept. 2010

[14] Kreikebaum, F.; Das, D.; Yang, Y.; Lambert, F.; Divan, D., "Smart Wires — A distributed, low-cost solution for controlling power flows and monitoring transmission lines," Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES , pp.1-8, 11-13 Oct. 2010

[15] Yi Yang; Harley, R.G.; Divan, D.; Habetler, T.G., "Overhead conductor thermal dynamics identification by using Echo State Networks," Neural Networks, 2009. IJCNN 2009. Conference on International Joint , vol., no., pp.3436-3443, 14-19 June 2009

[16] Yi Yang; Harley, R.G.; Divan, D.; Habetler, T.G., "Thermal modeling and real time overload capacity prediction of overhead power lines," Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2009. SDEMPED 2009. IEEE International Symposium on , pp.1-7, Aug. 31 20096-Sept. 3 2009

[17] Dynamic circuit thermal line rating. PIER, Public Interest Energy Research. California Energy Commission.

[18] Krontiris, T.; Wasserrab, A.; Balzer, G., "Weather-based loading of overhead lines — Consideration of conductor's heat capacity," Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010 Proceedings of the International Symposium , pp.1-8, 20-22 Sept. 2010

[19] Musavi, M.; Chamberlain, D.; Qi Li, "Overhead conductor dynamic thermal rating measurement and prediction," Smart Measurements for Future Grids (SMFG), 2011 Conference on IEEE International , pp.135-138, 14-16 Nov. 2011.

[20] Van Staden, P.; de Kock, J.A., "The practical comparison of conductor operating temperatures against IEEE and CIGRE ampacity calculations," Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa (PowerAfrica), 2012 IEEE , pp.1-7, 9-13 July 2012.

[21] Dong-Min Kim; Jong-Man Cho; Hyo-Sang Lee; Hyun-Soo Jung; Jin-O Kim, "Prediction of Dynamic Line Rating Based on Assessment Risk by Time Series

Weather Model," Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. Conference on PMAPS 2006. pp.1-7, 11-15 June 2006.

[22] Douglass, D.A.; Edris, A., "Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits," Power Delivery, vol.11, no.3, pp.1407-1418, Jul 1996

[23] Steeley, W. J.; Norris, B.L.; Deb, A.K., "Ambient temperature corrected dynamic transmission line ratings at two PG&E locations," Power Delivery, , vol.6, no.3, pp.1234-1242, Jul 1991.

[24] Matus, M.; Saez, D.; Favley, M.; Suazo-Martinez, C.; Moya, J.; Jimenez-Estevez, G.; Palma-Behnke, R.; Olguin, G.; Jorquera, P., "Identification of Critical Spans for Monitoring Systems in Dynamic Thermal Rating," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.27, no.2, pp.1002-1009, April 2012.

[25] Staszewski, L.; Rebizant, W., "Temperature dependent dynamic loadability control for transmission lines," Advanced Power System Automation and Protection (APAP), vol.3, no., pp.1981-1985, 16-20 Oct. 2011.

[26] Qi Li; Musavi, M.; Chamberlain, D., "Overhead conductor thermal rating using neural networks," Smart Measurements for Future Grids (SMFG), 2011 IEEE International - pp.139-142, 14-16 Nov. 2011.

[27] Kumelo-Chakonta, C.; Kopsidas, K., "Assessing the value of employing dynamic thermal rating on system-wide performance," Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 International Conference and Exhibition on 2nd IEEE PES, pp.1-8, 5-7 Dec. 2011.

[28] Wan, H.; McCalley, J.D.; Vittal, V., "Increasing thermal rating by risk analysis,", IEEE Transactions on Power Systems , vol.14, no.3, pp.815-828, Aug 1999.

[29] Deb A, "Powerline ampacity system: theory, modeling and applications". ISBN 0-4893-1306-6. 2000.

[30] Checa L, "Líneas de transporte de energía". ISBN 970-15-0576-X. Tercera Edición. 1988.

[31] Davidson, G.A.; Donoho, T.E.; Landrieu, P.R.H.; Mcelhaney, R.T.; Saeger, J.H., "Short-Time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-88, no.3, pp.194-199, March 1969.

[32] Black, W.Z.; Rehberg, R. L., "Simplified Model for Steady State and Real-Time Ampacity of Overhead Conductors," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-104, no.10, pp.2942-2953, Oct. 1985.