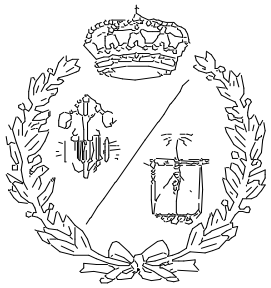
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

CÁLCULO Y MONITORIZACION DE CABLES AEREOS DESNUDOS ACSR

(Calculation and monitoring of ACSR bare overhead conductors)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: Javier Ruiz Ortiz
Septiembre-2017

Índice principal

1.-Introducción……Pág. 6

2.-Descripción del proyecto y objetivos……Pág. 11

3.-Descripción del proceso de cálculo……Pág. 15

4.-Descripción del proceso de cálculo mediante el código implementado……Pág. 27

5.-Ensayo de laboratorio y comparación con cálculo del programa……Pág. 45

6.-Cálculo y representación de casos posibles……Pág. 51

7.-Conclusiones……Pág. 61

8.-Referencias bibliográficas……Pág. 65

Anexo I: Descripción de las variables del programa……Pág. 67

Anexo II: Descripción y caracterización de los parámetros del programa……Pág. 70

Índice general

1 Introducción……..…Pág. 6

2 Descripción del proyecto y objetivos…….... Pág. 11

2.1 Descripción del proyecto…… Pág. 13

2.2 Objetivos……... Pág. 13

3 Descripción del proceso de cálculo…….. Pág. 15

3.1 Calculo de temperaturas y corrientes…….....…… Pág. 17

3.2 Descripción de casos establecidos…….. Pág. 18

3.2.1 Caso 1: Determinación de la temperatura a partir de régimen permanente de corriente…… Pág. 18

3.2.2 Caso 2: Determinación de la corriente a partir de régimen permanente de temperatura…….. Pág. 19

3.2.3 Caso 3: Temperatura instantánea para régimen transitorio de corriente…….. Pág. 20

3.2.4 Caso 4: Límite térmico máximo para los diferentes estados transitorios de corriente…… Pág. 20

3.3 Método de cálculo……... Pág. 21

4 Descripción del proceso de cálculo mediante el código implementado…… Pág. 27

4.1 Estructura general del código…… Pág. 29

4.2 Script de cálculo “ampacity_01”…… Pág. 30

4.3 Función “ieee_738_2013”…….. Pág. 31

4.4 Función “ieee_738_2013_initial_bounds”……... Pág. 35

4.5 Función “ieee_738_2013_find_TCDR”..…… Pág. 36

4.6 Función “ieee_738_2013_input”…….…… Pág. 37

4.7 Función “ieee_738_2013_muller”…… Pág. 38

4.8 Función “ieee_738_2013_output”…… Pág. 39

4.9 Función “ieee_738_2013_solar”…….…… Pág. 40

4.10 Función “ieee_738_2013_starting_ci”……... Pág. 41

4.11 Función “ieee_738_2013TCDR_vs_TIME”……... Pág. 42

4.12 Función “ieee_738_2013_thermal_rating”…… Pág. 43

4.13 Función “ieee_738_2013_thermal”…… Pág. 44

5 Ensayo de laboratorio y comparación con cálculo del programa…….. Pág. 45

5.1 Descripción del ensayo de laboratorio…… Pág. 47

5.2 Comparación del ensayo de laboratorio y cálculo del programa…… Pág. 49

6 Cálculo y representación de casos posibles…….…… Pág. 51

6.1 Primer caso……..…… Pág. 53

6.2 Segundo caso…….…… Pág. 57

7 Conclusiones……..……Pág. 61

7.1 Conclusiones propias del trabajo……..Pág. 63

7.2 Conclusiones personales……Pág. 64

8 Referencias bibliográficas…… Pág. 65

Anexo I: Descripción de las variables del programa……..……Pág. 67

Anexo II: Descripción y caracterización de los parámetros del programa……Pág. 70

1.-INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico español ha sufrido importantes cambios durante los últimos años, tanto en la cantidad de energía producida como en el modo de producirla. Ha habido diversos factores que han producido grandes variaciones en la demanda de energía en España, especialmente afectaron fuertemente durante los últimos diez años los económicos que tuvieron a su vez gran repercusión en el sector industrial haciendo disminuir la producción eléctrica.

Después de varios años disminuyendo la demanda de energía los dos últimos años se ha producido una mejora en la misma, debido al aumento el consumo en los sectores industrial y servicios.

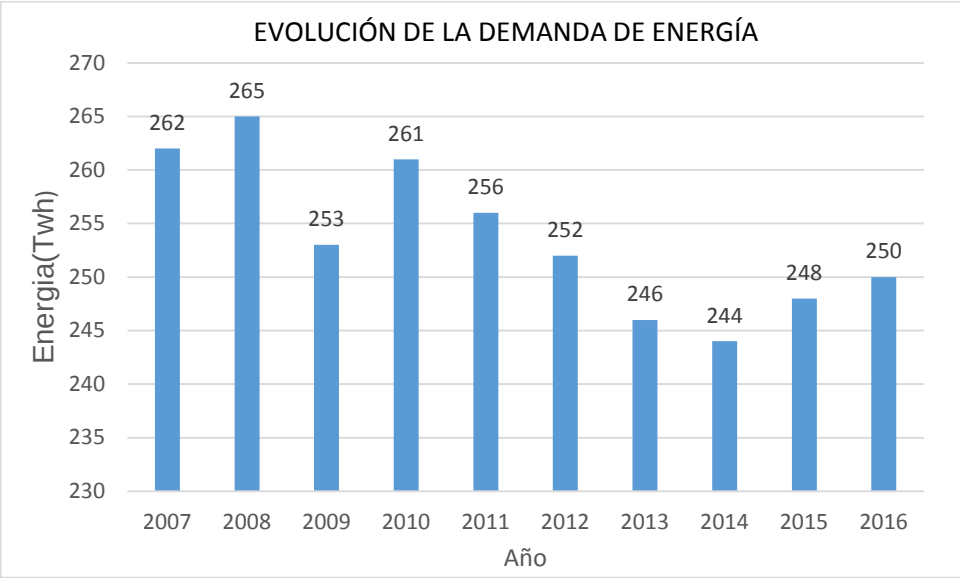


Figura 1-1: Evolución de la demanda de energía últimos 10 años (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)

Otro de los aspectos que han tenido gran importancia en la producción eléctrica ha sido la incursión en el sistema de las energías renovables que han hecho variar las producciones de otras energías, como la térmica de carbón o la nuclear, en la búsqueda de una producción eléctrica con menor contaminación ambiental y con una menor generación de residuos.

Este impulso a las energías renovables produjo hace unos años un aumento considerable de la energía generada mediante estas fuentes aunque en los últimos cinco años la instalación de nuevas instalaciones mediante el aprovechamiento de estos recursos ha sido muy bajo aumentando en algunos casos de nuevo la producción mediante fuentes no renovables.

En la siguiente figura podemos ver la evolución de la generación renovable y no renovable en los últimos años.

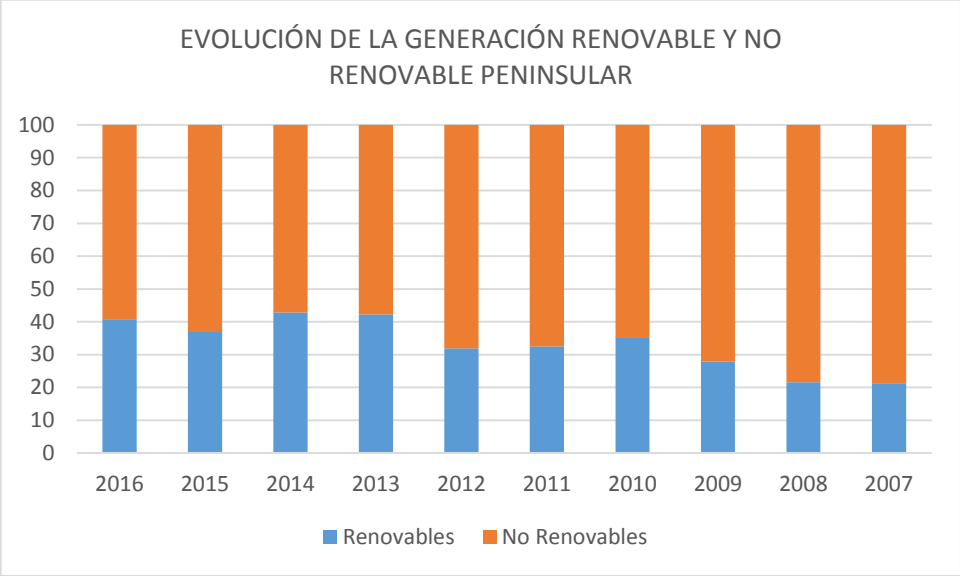


Figura 1-2: Evolución de la generación renovable y no renovable peninsular (Adaptado del informe del sistema eléctrico español "REE")

En la siguiente gráfica y su correspondiente tabla de datos podemos ver la evolución de los porcentajes de cada energía según la potencia instalada en los últimos años.

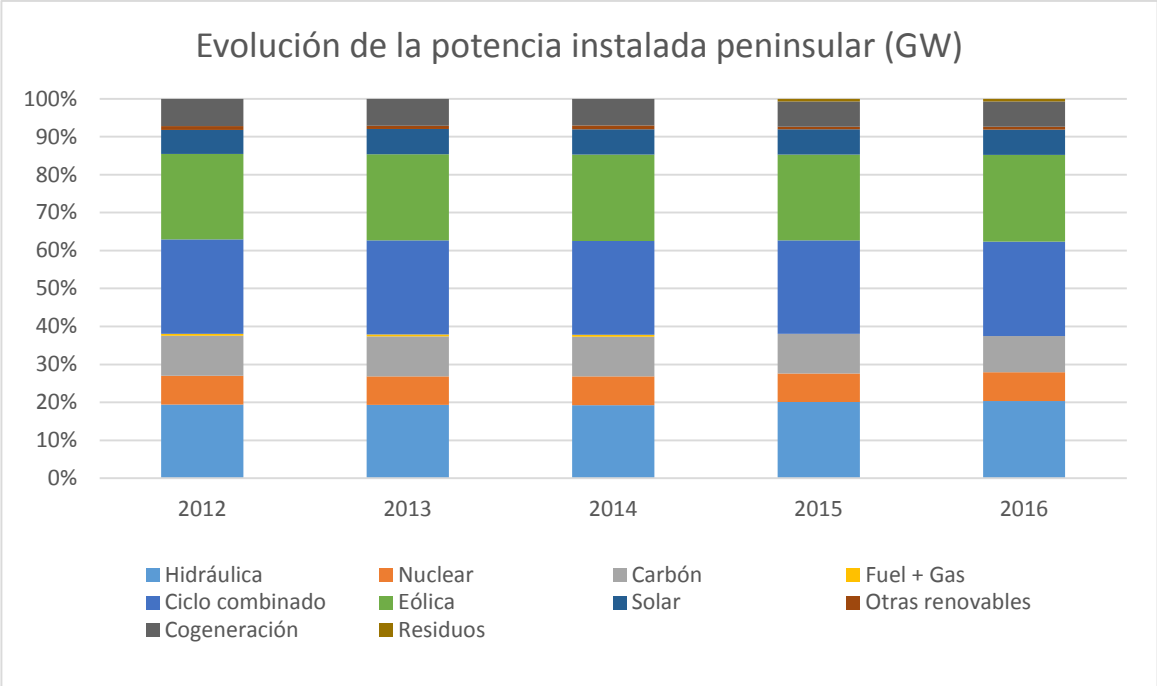


Figura 1-3: Porcentajes de potencia instalada por energías (Adaptado del informe del sistema eléctrico español "REE")

Tabla 1.1: Porcentajes de potencia instalada por energías (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)

Energía/Año	2012	2013	2014	2015	2016
Hidráulica	19,4	19,4	19,4	20,3	20,4
Nuclear	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6
Carbón	10,6	10,6	10,5	10,5	9,5
Fuel + Gas	0,5	0,5	0,5	0	0
Ciclo combinado	24,9	24,9	24,9	24,9	24,9
Eólica	22,6	22,8	22,9	22,9	22,9
Solar	6,3	6,7	6,7	6,7	6,7
Otras renovables	1	0,9	1	0,7	0,7
Cogeneración	7,2	7,1	7,1	6,7	6,7
Residuos	0	0	0	0,7	0,7

Pese a que en los últimos cinco años la evolución de la potencia instalada se ha ralentizado cabe destacar la importancia que están adquiriendo en el sistema eléctrico las energías renovables dentro de las cuales, cabe destacar la eólica, con la mayor cantidad de energía producida, es con una producción de casi el 50% de las energías renovables la de mayor importancia y la hidráulica que debido a su gran facilidad para la producción ha permitido el incremento de la producción renovable durante el último año.

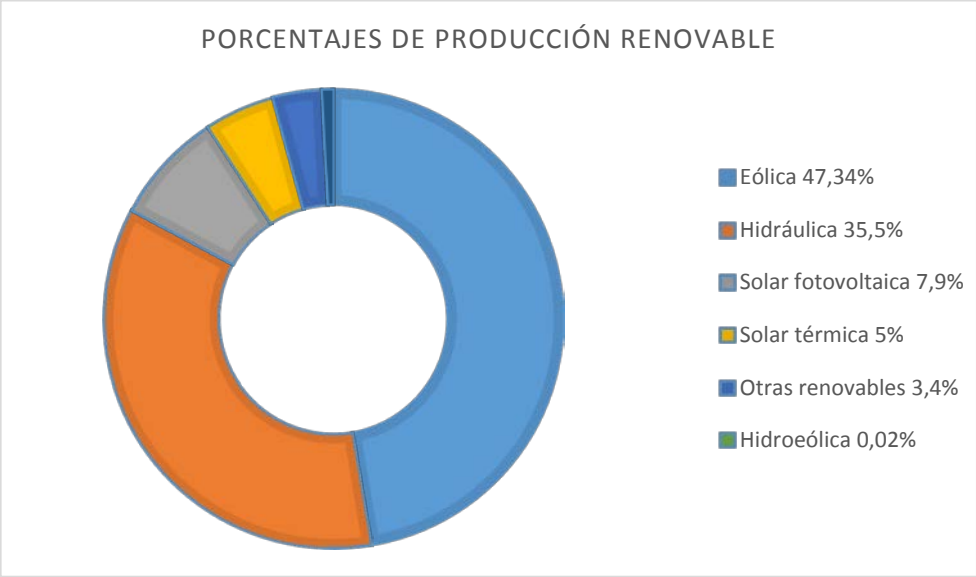


Figura 1-4: Porcentajes de producción renovable (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)

La incursión de la energía eólica en el sistema eléctrico español ha tenido gran importancia debido a la búsqueda de energías más limpias y que produzcan menor cantidad de residuos ya que la orografía española tiene unas características a las que esta energía se adapta perfectamente y lo cual produjo hace unos años un gran impulso a la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de estos recursos como podemos ver en el grafico siguiente.

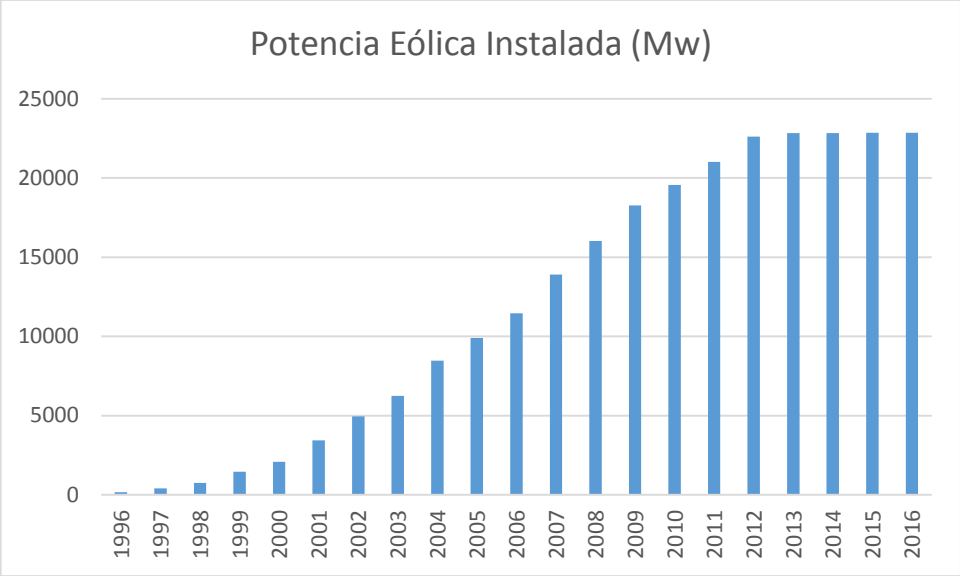


Figura1-4: Potencia eólica instalada en España (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)

El principal impedimento que supone la instalación de nuevos parques eólicos es la necesidad de construcción de nuevas líneas eléctricas para el transporte de esta energía dado que generalmente estos se sitúan en zonas geográficas de difícil acceso debido a la necesidad de zonas despejadas para el correcto funcionamiento de los aerogeneradores; lo cual hace que sea necesario por un lado la repotenciación de líneas eléctricas cercanas y por otro la construcción de nuevas líneas ya que en muchos casos las líneas existentes en la zona no fueron construidas para soportar las capacidades necesarias de transporte que se generan en los campos eólicos.

En determinadas situaciones, cuando se experimenta un pico en la demanda es necesario transportar potencias superiores a las de construcción de la línea por lo que se busca mediante la aplicación de técnicas dinámicas los aspectos que pueden influir en el funcionamiento correcto de la línea, buscando los limites tanto de temperatura como de corriente que esa línea puede transportar se producir daños en el conductor en las condiciones en las que se encuentre en ese caso.

2.- Descripción del proyecto y objetivos

Índice

2 Descripción del proyecto y objetivos……..Pág. 11

2.1 Descripción del proyecto……Pág. 13

2.2 Objetivos……Pág. 13

2.1 Descripción del proyecto

El objetivo de este proyecto es analizar la posibilidad del incremento de la capacidad de cables aéreos desnudos de tipo ACSR monitorizados en temperatura mediante fibra óptica, en relación a las capacidades estáticas o pseudo-estáticas estacionales utilizadas habitualmente en la explotación de sistemas eléctricos de potencia.

Este análisis se realizara a partir de la utilización de las normas IEEE 738 y CIGRE WS 22.12, que establecen los modelos térmicos para el análisis y simulación del comportamiento térmico de conductores desnudos.

El análisis teórico se realizara a partir de la implementación de las especificaciones de las normas IEEE 738 y CIGRE WS 22.12 sobre el modelo térmico de los conductores desnudos a partir del desarrollo de una aplicación realizada mediante el programa OCTAVE.

LA simulación experimental se realizara a partir del estudio monitorizado de un conductor LA-455 CONDOR permitiendo la comparación de los resultados desarrollados teóricamente mediante la realización de ensayos al conductor.

2.2 Objetivos

- Permitir la evacuación de grandes potencias producidas en las centrales de generación en determinados periodos de tiempo.
- Evitar la necesidad de construcción de nuevas líneas eléctricas debido a su alto coste y tiempo de ejecución.
- Evitar la repotenciación de líneas debido a que este proceso implica la indisponibilidad de las mismas durante el periodo de ejecución.
- Empleo de técnicas dinámicas para la optimización de las infraestructuras disponibles.
- Permitir el cálculo de las corrientes máximas que puede soportar un determinado conductor en ciertas condiciones ambientales.
- Permitir la determinación de la temperatura que alcanzaría el conductor al ser atravesado por una corriente elevada.

- Permitir la utilización de técnicas dinámicas de utilización de las líneas frente a las estáticas.

  -Las técnicas de determinación estáticas son muy empleadas debido a su simplicidad ya que no requieren de la situación meteorológica instantánea o la instalación de sensores térmicos en la línea para la monitorización del conductor; sino que se basan en el análisis de las condiciones meteorológicas históricas de la región para los distintos conductores en la línea.

  -Las técnicas dinámicas por su parte permiten la obtención del estado de la línea a partir de los datos transmitidos desde las estaciones meteorológicas que permiten la obtención de los valores instantáneos de velocidad y dirección del viento, así como la temperatura ambiente y la radiación solar sobre el conductor en la línea.

3.-Descripción del proceso de cálculo

Índice

3 Descripción del proceso de cálculo…….. Pág. 15

3.1 Calculo de temperaturas y corrientes……..…Pág. 17

3.2 Descripción de casos establecidos……...Pág. 18

3.2.1 Caso 1: Determinación de la temperatura a partir de régimen permanente de corriente……Pág. 18

3.2.2 Caso 2: Determinación de la corriente a partir de régimen permanente de temperatura……Pág. 19

3.2.3 Caso 3: Temperatura instantánea para régimen transitorio de corriente……Pág. 20

3.2.4 Caso 4: Límite térmico máximo para los diferentes estados transitorios de corriente……Pág. 20

3.3 Método de cálculo……..……Pág. 21

El proceso de cálculo viene descrito a partir de las normas IEEE 738 y CIGRE WS 22.12 sobre el modelo térmico de los conductores desnudos el cual se describe a continuación.

3.1 Calculo de temperatura y corriente

El cálculo de la temperatura en régimen permanente de un conductor se puede realizar a través de la ecuación de equilibrio térmico en base a la hipótesis de que el calor generado en un determinado momento en el conductor es igual al calor disipado o en función de las potencias tanto producidas en el conductor como las potencias disipadas por el mismo.

Según la ecuación de equilibrio térmico:

$$2.1\ (1)\quad q_c+q_r=q_s+I^2*R(T_{avg})$$

Siendo:

qc el calor debido a la convección. I la corriente que circula por el conductor.

qr el calor debido a la radiación. $R(T_{avg})$ el calor debido a la resistencia del conductor

qs el calor superficial del conductor.

Según las potencias generadas y disipadas:

$$2.1\ (2)\quad P_J+P_M+P_S+P_i=P_C+P_r+P_w$$

Pj es la potencia debida al efecto Joule.

Pm es la potencia producida en el conductor debido a la acción del campo magnético terrestre.

Ps es la potencia aportada al cable por la radiación solar.

Pi es la potencia debida al efecto corona.

Pc es la potencia disipada por convección.

Pr es la potencia disipada por radiación.

Pw es la potencia disipada por evaporación en el conductor.

En general los términos debidos al campo magnético, el efecto corona y la evaporación pueden ser despreciados.

Estos dos métodos de cálculo son empleados para la consecución de dos objetivos:

-El cálculo de la temperatura del conductor mediante el modelo térmico y la intensidad eléctrica.

-El cálculo de la intensidad eléctrica que da lugar a la temperatura máxima del conductor.

3.2 Descripción de casos establecidos

A partir de las dos premisas descritas en el apartado anterior se establecen cuatro posibles casos a desarrollar dependiendo de en qué condiciones nos encontremos.

3.2.1 Caso 1: Determinación de la temperatura a partir del régimen permanente de corriente

En el caso número uno se procede a la determinación de la temperatura a la que se encuentra el conductor debido a que este es sometido a una determinada corriente.

En este caso los términos de transferencia de calor y de resistencia del conductor son función de la temperatura mientras que la radiación solar no. Si la temperatura del conductor es calculada en lugar de venir determinada la ecuación de balance térmico debe ser resuelta para la temperatura del conductor en términos de la corriente y las variables climáticas mediante un proceso iterativo incluso si se supone que el conductor se encuentra en régimen permanente.

El uso de un método de resolución numérica evita la necesidad del uso de números complejos y las aproximaciones de consumo de tiempo en la linearización necesaria para el cálculo de las pérdidas de calor debidas a radiación y convección. Usando las condiciones climáticas adecuadas en régimen permanente, el proceso de cálculo es sencillo:

- El calor recibido por radiación solar para el conductor se calcula (es independiente de la temperatura del conductor).
- Se supone una temperatura del conductor de prueba.
- La resistencia del conductor se calcula para la temperatura de ensayo.
- En combinación con las condiciones asumidas, los términos de pérdida de calor por convección y radiación se calculan.
- La corriente del conductor se calcula por medio de la ecuación de balance de calor.
- La corriente calculada se compara con la corriente del conductor de prueba.
- La temperatura del conductor de prueba se aumenta o disminuye hasta igualarla con los valores calculados de la corriente de prueba dentro de una tolerancia especificada por el usuario.

El método empleado para este proceso de cálculo es el método de iteración de Muller que produce la convergencia numérica.

3.2.2 Caso 2: Determinación de la corriente a partir de régimen permanente de temperatura

En el caso numero dos se procede a la determinación de la corriente que alcanza el conductor al encontrarse a una determinadas condiciones de temperatura y a unos determinados parámetros climáticos como pueden ser la velocidad del viento, la temperatura ambiente, etc.

A partir de estos parámetros podremos calcular los las pérdidas de calor debidas a la convección y radiación, la ganancia de calor solar y las debidas a la resistencia del conductor mediante las formulas descritas en el apartado 3.3 referido al método de cálculo.

La corriente que se desea calcular se obtendrá a partir de la ecuación de equilibrio térmico descrita a continuación.

3.2.2 (1) $q_c+q_r=q_s+I^2*R(T_{avg})$

3.2.2 (2) $I = \sqrt{\frac{qc+qr-qs}{R(Tavg)}}$

Siendo:

qc el calor debido a la convección. I la corriente que circula por el conductor.

qr el calor debido a la radiación. $R(T_{avg})$ el calor debido a la resistencia del conductor

qs el calor superficial del conductor.

3.2.3 Caso3: Temperatura instantánea para régimen transitorio de corriente

En el caso número tres se realiza el cálculo de la temperatura transitoria del conductor al ser sometida está a variaciones de corriente de tipo escalón siendo las condiciones climáticas asumidas como constantes durante el proceso de cálculo.

Para un tiempo inmediatamente anterior al escalón de corriente (t=0-); se asume que el conductor se encuentra en equilibrio térmico.

Para un tiempo inmediatamente posterior al escalón de corriente (t=0+); la temperatura del conductor no cambia pero el valor de calor generado debido al efecto de Joule si incrementa. Como resultado de este desequilibrio en el balance térmico, el calor que no puede ser disipado o radiado hacia fuera del conductor se queda almacenado en el conductor lo cual provoca que la temperatura del conductor aumente hasta un valor dado según la ecuación de equilibrio térmico de régimen transitorio.

$$3.2.3\ (1)\quad qc + qr + m * cp * \frac{dTavg}{dt} = qs + I^2 * R(Tavg)$$

$$3.2.3\ (2)\quad \frac{dTavg}{dt} = \frac{1}{m * cp} * [R(Tavg) * I^2 + qs - qc - qr]$$

Después de un periodo de tiempo Δt, la temperatura se habrá incrementado en en un valor $\Delta Tavg$. El incremento de la temperatura hace que las perdidas debidas a convección y radiación aumenten y lo que hace que aumente la generación de calor debido al efecto de Joule por el incremento del valor de la resistencia del conductor. Durante una serie de intervalos de tiempo Δt la temperatura del conductor sigue aumentando pero en menor medida hasta que alcanza el régimen permanente.

La variación en la temperatura en conductores aéreos desnudos es aproximadamente exponencial, con constantes de tiempo de entre 5 y 20 minutos dependiendo del conductor. Por lo que los valores máximos transitorios se calculan para corrientes que persisten en el tiempo entre 5 y 30 minutos.

La exactitud en el cálculo iterativo transitorio requiere que el intervalo de tiempo elegido sea suficientemente pequeño con respecto a la constante de tiempo térmica. Es conveniente volver a ejecutar el cálculo con un intervalo de tiempo menor para comprobar si los valores calculados cambian. Para la mayoría de los cálculos con sobrecarga típica en conductores desnudos trenzados, un intervalo de cálculo de 10 segundos o menos es suficiente.

3.2.4 Caso 4: Límite térmico máximo para los diferentes estados de transitorios de corriente

En el caso número cuatro se determina el valor máximo de temperatura en estado transitorio el cual se realiza a partir del mismo procedimiento descrito para la Tavg(t) para un rango de valores de corriente, de los cuales se seleccionará la corriente que produce que la temperatura del conductor alcance el máximo valor permitido en el tiempo establecido.

3.3 Método de cálculo

Para los diferentes casos es necesario el cálculo de las diferentes pérdidas producidas en el conductor:

-Perdidas de calor por convección

Las pérdidas de calor por convección son generalmente función del número de Reynolds.

$$3.3\ (1)\quad Nre=\frac{Do*\rho f*Vw}{\mu f}$$

Estas pérdidas son normalmente calculadas a partir de la temperatura superficial media del conductor, pero si se tratan de bajas velocidades de viento se considera la mayor de las dos.

Las pérdidas por convección son computadas de dos maneras diferentes:

-Convección forzada: consiste en evacuar el calor producido alrededor del conductor al ser este soplado por aire frio.

Dependiendo de si el número de Reynolds es alto o bajo se empleará para el cálculo de las pérdidas por convección una ecuación u otro pero se recomienda el cálculo en ambos casos y tomar el de mayor valor.

$$3.3\ (2)\quad q_{c1}=K_{angle*}[1.01+1.35*N_{Re}^{0.52}]*k_f*(T_s-T_a)$$

$$3.3\ (3)\quad q_{c2}=K_{angle}*0.754*N_{Re}^{0.6}]*k_f*(T_s-T_a)$$

Estas ecuaciones son válidas para valores de las variables comprendidos entre los siguientes:

Variable	SI unidades
Diámetro	0,01-150mm
Velocidad del viento	0-18,9m/s
Temperatura ambiente	15,6-260ºC
Temperatura del conductor	21-1004ºC
Presión atmosférica	40,5-405kPa

Ambas ecuaciones vienen multiplicadas por un factor de dirección del viento el cual viene dado según las siguientes ecuaciones:

-Si el ángulo tomado es el ángulo entre la dirección del viento y la dirección del eje del conductor será:

$$3.3\ (4)\quad K_{angle}=1.194-\cos(\varphi)+0.194*\cos(2\varphi)-0.368*\sin(2\varphi)$$

-Si el ángulo tomado es el ángulo entre la dirección del viento y la perpendicular al eje del conductor será:

$$3.3\ (5)\quad K_{angle}=1.194-\sin(\beta)-0.194*\cos(2\beta)+0.368*\sin(2\beta)$$

-Convección natural: Realiza el mismo proceso que la convección forzada pero con una fuerza del viento aproximada de 0.2m/s.

Para el caso de convección natural ocurre lo mismo que para la convección forzada por lo que las ecuaciones que describen estas pérdidas vendrán dadas por:

3.3 (6) $q_{cn}=3.645*\rho_f^{0.5}*D_0^{0.75}*(T_s-T_a)^{1.25}$

3.3 (7) $q_{cn}=1.825*\rho_f^{0.5}*D_0^{0.75}*(T_s-T_a)^{1.25}$

-Perdidas de calor por radiación

Cuando un conductor desnudo alcanza temperaturas superiores a las de su entorno, esta energía es radiada a los alrededores. El nivel de energía radiada depende de la diferencia de temperaturas entre la del conductor y la de su entorno la cual es considerada como la temperatura ambiente. El estado superficial del conductor, es decir, su emisividad también afecta a la transmisión de energía radiada. Por lo que el calor radiado vendrá dado según las ecuaciones:

3.3 (8) $q_r=17.8*D_0*\varepsilon*[(\frac{Ts+273}{100})^4-(\frac{Ta+273}{100})^4]$

3.3 (9) $q_r=1.656*D_0*\varepsilon*[(\frac{Ts+273}{100})^4-(\frac{Ta+273}{100})^4]$

-Ganancia de calor por efecto solar

El sol proporciona calor al conductor. El conjunto de la energía solar transmitida al conductor depende de la posición del sol en el cielo, la constante solar, el conjunto de esta energía que es transmitida a través de la atmosfera al conductor, la orientación del conductor, y la condición superficial del conductor, es decir, su absortividad. Los conductores brillantes reflejan la mayor parte de esta energía mientras que los conductores oscuros absorben la mayor parte de la energía. Esta energía viene dada por la ecuación:

3.3 (10) $q_s=\alpha*Q_{se}*\sin(\theta)*A'$

3.3 (11) $\theta=\arccos[\cos(H_c)*\cos(Z_c-Z_1)]$

-Resistencia eléctrica del conductor

La resistencia eléctrica del conductor varía con la sección transversal, la potencia de alimentación, la corriente y la temperatura. Para cualquier conductor se debe tener en cuenta en el cálculo de la resistencia eléctrica el efecto piel y la acción de los campos magnéticos.

La resistencia eléctrica es ajustada linealmente para la temperatura superficial del conductor. Se supone que los valores de resistencia tabulados representan el efecto piel y la magnitud de la corriente. Por ejemplo la resistencia del conductor a una temperatura elevada, T_{high}, y una temperatura baja, T_{low}, pueden tomarse de valores tabulados en las referencias o proporcionado por el fabricante. La resistencia del conductor a cualquier otra temperatura, Tavg, se calcula por interpolación lineal.

3.3 (12) $R(Tavg)=[\frac{R(Thigh)-R(Tlow)}{Thigh-Tlow}]*(Tavg-Tlow)+R(Tlow)$

El empleo de este método de cálculo para la resistencia permite el uso de los valores de resistencia para temperaturas altas y bajas, los cuales tienen en cuenta los efectos debidos a campo magnético y el efecto piel.

-Gradiente de temperatura radial dentro del conductor

El calor generado en las capas interiores del conductor debe ser conducido a las capas exteriores para ser disipado, ya que el calor solo fluye de altas a bajas temperaturas. Los parámetros meteorológicos tienen un efecto en la temperatura superficial del conductor, pero solo un efecto indirecto sobre el gradiente de temperatura del conductor.

La magnitud de la diferencia de temperatura radial depende de diversos parámetros del conductor como:

-Forma del hilo del conductor.

-Magnitud de la corriente eléctrica.

-Resistencia eléctrica de los hilos del conductor.

-Número de capas de conductores.

-La condición de la edad del conductor.

-El área de contacto y la presión entre las capas.

Independientemente de la construcción del conductor la diferencia de temperatura suele ser de 5ºC para densidades de corriente inferiores a 1A/mm^2. Para densidades de corriente superiores se han llegado a medir diferencias de temperatura de entre 10ºC y 25ºC.

Debido a la mayor área de contacto entre capas de aluminio, el uso de alambres de aluminio trapezoidales puede reducir la diferencia de temperatura radial, siempre y cuando los cables estén bajo tensión. Sin embargo, una vez que los cables de aluminio tienen aislamiento, si alargamiento plástico debido a las altas cargas de hielo o elongación térmica debido a la alta temperatura, la falta de presión de contacto entre capas de aluminio es probable que conduzca a una diferencia de temperatura radial significativa entre el núcleo y las capas superficiales.

La ecuación que permite el cálculo de la diferencia de temperatura si la conductividad térmica radial efectiva es conocida es:

$$3.3\ (13)\quad T_{core}-T_s=\frac{I^2*R(Tavg)}{2\pi*kth}*\left[\frac{1}{2}-\frac{Dcore^2}{D0^2-Dcore^2}*\left(\ln\frac{D0}{Dcore}\right)\right]$$

Para todos los conductores de aluminio, la ecuación es:

$$3.3\ (14)\quad T_{core}-T_s=\frac{I^2*R(Tavg)}{4\pi*kth}$$

En los cálculos en los que el núcleo del conductor se encuentra significativamente más caliente que la superficie, las caídas de tensión de la línea serán más altas, el material del núcleo puede experimentar un mayor deterioro, y la resistencia del conductor puede ser mayor de lo previsto si todos estos cálculos se basan en la temperatura de superficie del conductor.

Para los cálculos del límite térmico, si se encuentra que el gradiente de temperatura supera los 10 °C, entonces la máxima temperatura de la superficie del conductor permitida debe reducirse si la temperatura del núcleo es superior, produciéndose deterioros en el conductor o una inadecuada holgura de pandeo.

-Capacidad calorífica del conductor

La capacidad calorífica del conductor se define como el producto del calor específico y la masa por unidad de longitud. Si el conductor está compuesto por más de un material la capacidad será la suma de las capacidades del núcleo y los hilos exteriores.

Para conductores no homogéneos, la mayor parte del calor es generado en los hilos de aluminio y transferido al núcleo de acero con una constante interna de tiempo menor de 1 minuto. Para régimen permanente y límite térmico transitorio los cálculos con duraciones de 5 a 30 minutos, la temperatura de los componentes del conductor pueden asumirse iguales y la capacidad calorífica del conductor puede calcularse como:

$$3.3\ (15)\quad mC_p=\Sigma m_i*C_{pi}$$

-Cálculo de las propiedades del aire, ángulos solares y flujos de calor solar

-Viscosidad dinámica del aire

$$3.3\ (16)\quad \mu_f=\frac{1.458*10^{6}*(T_{film}+273)^{1.5}}{T_{film}+383.4}$$

$$3.3\ (17)\quad \mu_f=\frac{0.00353*(T_{film}+273)^{1.5}}{T_{film}+383.4}$$

-Densidad del aire

$$3.3\ (18)\quad \rho_f = \frac{1.293-1.525*10^{-4}*H_e+6.379*10^{-9}*H_e^2}{1+0.00367*T_{film}}$$

$$3.3\ (19)\quad \rho_f = \frac{0.080695-2.901*10^{-6}*H_e+3.7*10^{-11}*H_e^2}{1+0.00367*T_{film}}$$

-Conductividad térmica del aire

La conductividad térmica del aire depende de la temperatura del aire en la capa límite.

$$3.3\ (20)\quad k_f = 2.424*10^{-2}+7.477*10^{-5}*T_{film}-4.407*10^{-9}*T^2_{film}$$

$$3.3\ (21)\quad k_f = 7.388*10^{-3}+2.279*10^{-5}*T_{film}-1.343*10^{-9}*T^2_{film}$$

-Altitud del sol

La altitud solar del sol, Hc, viene dada en grados según la siguiente ecuación donde los argumentos de las funciones trigonométricas serán en grados:

$$3.3\ (22)\quad H_c = \arcsin[\cos(Lat)*\cos(\delta)*\cos(\omega)+\sin(Lat)*\sin(\delta)]$$

El ángulo horario, ω, expresa la hora a la que nos encontramos siendo el mediodía la hora 0º y siendo 15º positivos o negativos por cada hora de avance.

El ángulo de inclinación solar viene dado en grados también, en función de:

$$3.3\ (23)\quad \delta = 23.46*\sin\left[\frac{284+N}{365}*360\right]$$

Donde el argumento de la función seno será en grados. Esta ecuación es válida para todas las latitudes positivas y negativas.

-Azimut solar

El azimut solar viene dado por la expresión:

$$3.3\ (24)\quad Z_c = C+\arctan(\chi)$$

$$3.3\ (25)\quad \chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat)*\cos(\omega)-\cos(Lat)*\tan(\delta)}$$

La constante de azimut solar, C, es función del ángulo horario y de la variable de azimut solar; según se muestra en la Tabla 3.3-1:

Tabla 3.3-1

Angulo horario, ω,grados	C si χ≥0grados	C si χ<0grados
-180≤ω<0	0	180
0≤ω<180	180	360

-Densidad de flujo de calor total a nivel del mar frente a la altitud solar

El flujo de calor total al nivel del mar viene dado por la expresión 3.3 (26) siendo los coeficientes de la misma de distinto valor en función de que se trate de una zona con una calidad de aire industrial o claro viniendo estos dados según la Tabla 3.3-2.

3.3 (26) $Q_s = A+B*H_c +C*H_c^2+D*H_c^3 +E*H_c^4 +F*H_c^5 +G*H_c^6$

Tabla 3.3-2

Atmosfera clara	SI
A	-42,2391
B	63,8044
C	-1,922
D	$3{,}46921x10^{-2}$
E	$-3{,}61118x10^{-4}$
F	$1{,}94318x10^{-6}$
G	$-4{,}07608x10^{-9}$
Atmosfera industrial	SI
A	53,1821
B	14,211
C	$6{,}6138x10^{-1}$
D	$-3{,}1658x10^{-2}$
E	$5{,}4654x10^{-4}$
F	$-4{,}3446x10^{-6}$
G	$1{,}3236x10^{-8}$

-Factor de corrección de elevación

La intensidad de calor solar en la superficie terrestre puede corregirse con la altitud según las ecuaciones 3.3 (27) y (28) siendo los coeficientes de esta los referidos en la Tabla 3.3-3

3.3 (27) $Q_{se}=K_{solar}*Q_s$

3.3 (28) $K_{solar}=A+B*H_e+C*H_e^2$

Tabla 3.3-3

	SI
A	1
B	$1{,}148x10^{-4}$
C	$-1{,}108x10^{-8}$

4.-Descripción del proceso de cálculo mediante el código implementado

Índice

4 Descripción del proceso de cálculo mediante el código implementado…….. Pág. 27

4.1 Estructura general del código…… Pág. 29

4.2 Script de cálculo “ampacity_01”…… Pág. 30

4.3 Función “ieee_738_2013”…….. Pág. 31

4.4 Función “ieee_738_2013_initial_bounds”…….. Pág. 35

4.5 Función “ieee_738_2013_find_TCDR”..…… Pág. 36

4.6 Función “ieee_738_2013_input”…….…… Pág. 37

4.7 Función “ieee_738_2013_muller”…… Pág. 38

4.8 Función “ieee_738_2013_output”…… Pág. 39

4.9 Función “ieee_738_2013_solar”…….…… Pág. 40

4.10 Función “ieee_738_2013_starting_ci”…….. Pág. 41

4.11 Función “ieee_738_2013TCDR_vs_TIME”…….. Pág. 42

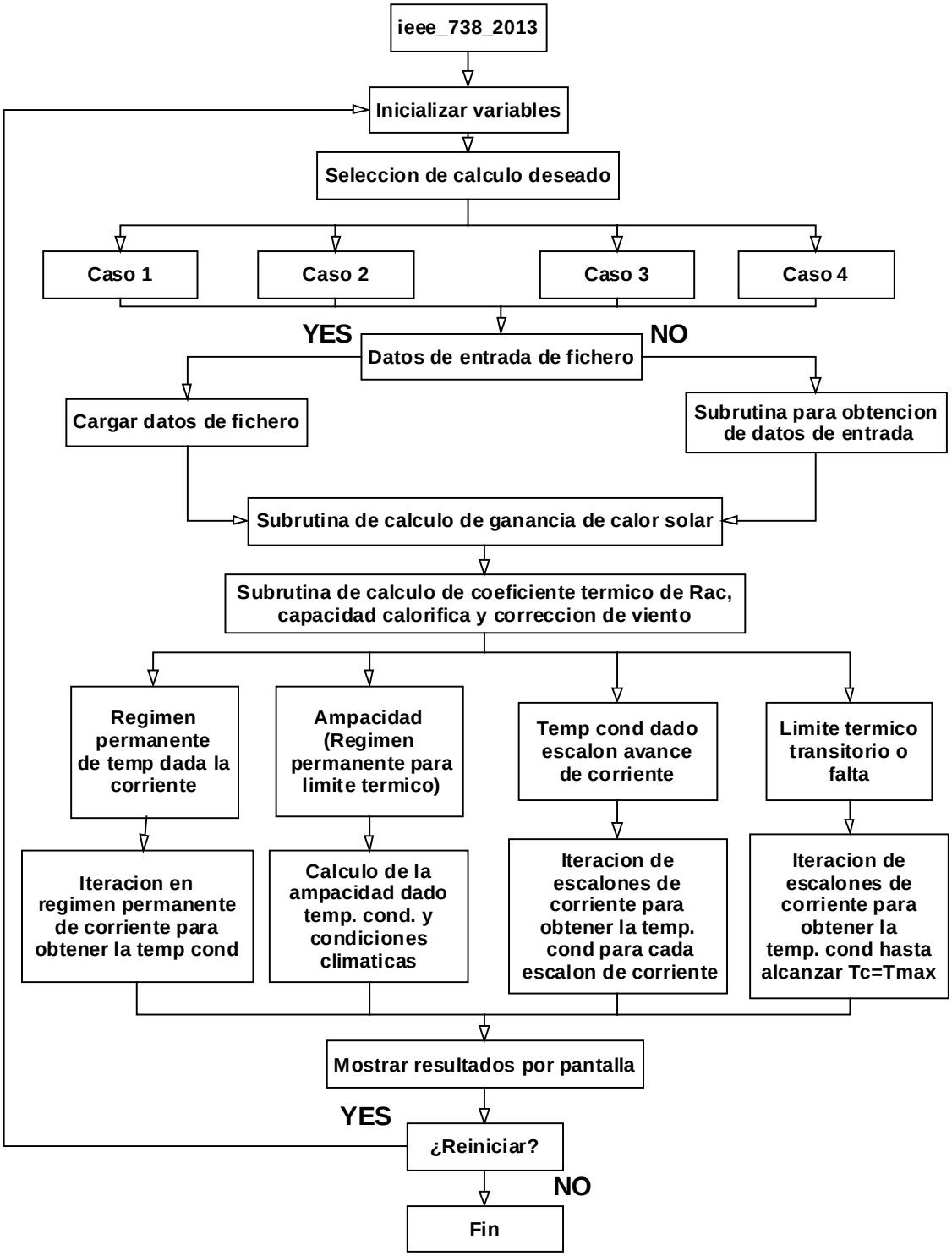
4.12 Función “ieee_738_2013_thermal_rating”…… Pág. 43

4.13 Función “ieee_738_2013_thermal”…… Pág. 44

Para la descripción del código por una parte se mostrará un diagrama resumen de todo el proceso de cálculo y por otra parte una serie de diagramas que mostraran las estructuras del script de cálculo y las diferentes funciones realizadas mediante el programa Octave, los cuales permiten tener una visión general de todo el proceso de cálculo.

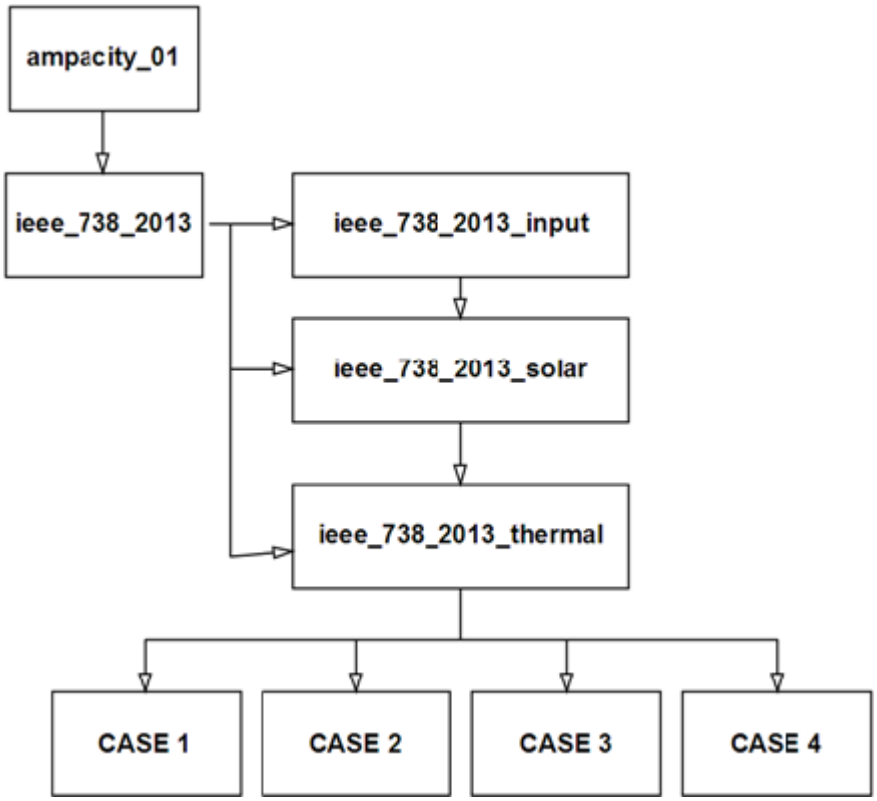
4.1 Estructura general del código

El diagrama resumen de la estructura del programa viene reflejado de la siguiente manera.



4.2 Script de cálculo “ampacity_01”

El script “ampacity_01” nos permite la obtención de los resultados variando los valores de entrada dependiendo del caso en que nos encontremos introduciendo directamente los datos que varíen en el código.



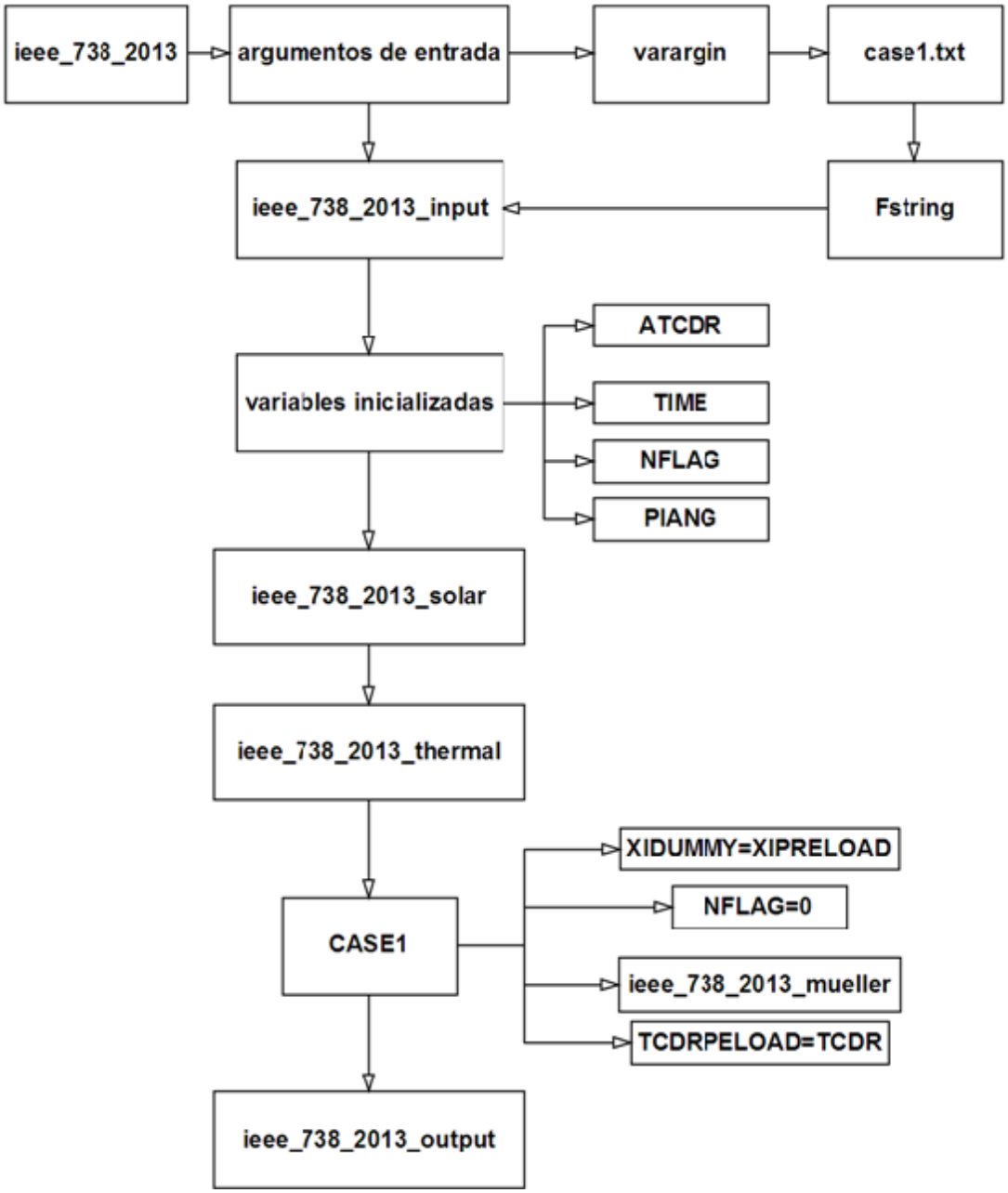
4.3 Función “ieee_738_2013”

La función “ieee_738_2013” se encarga de los aspectos descritos a continuación:

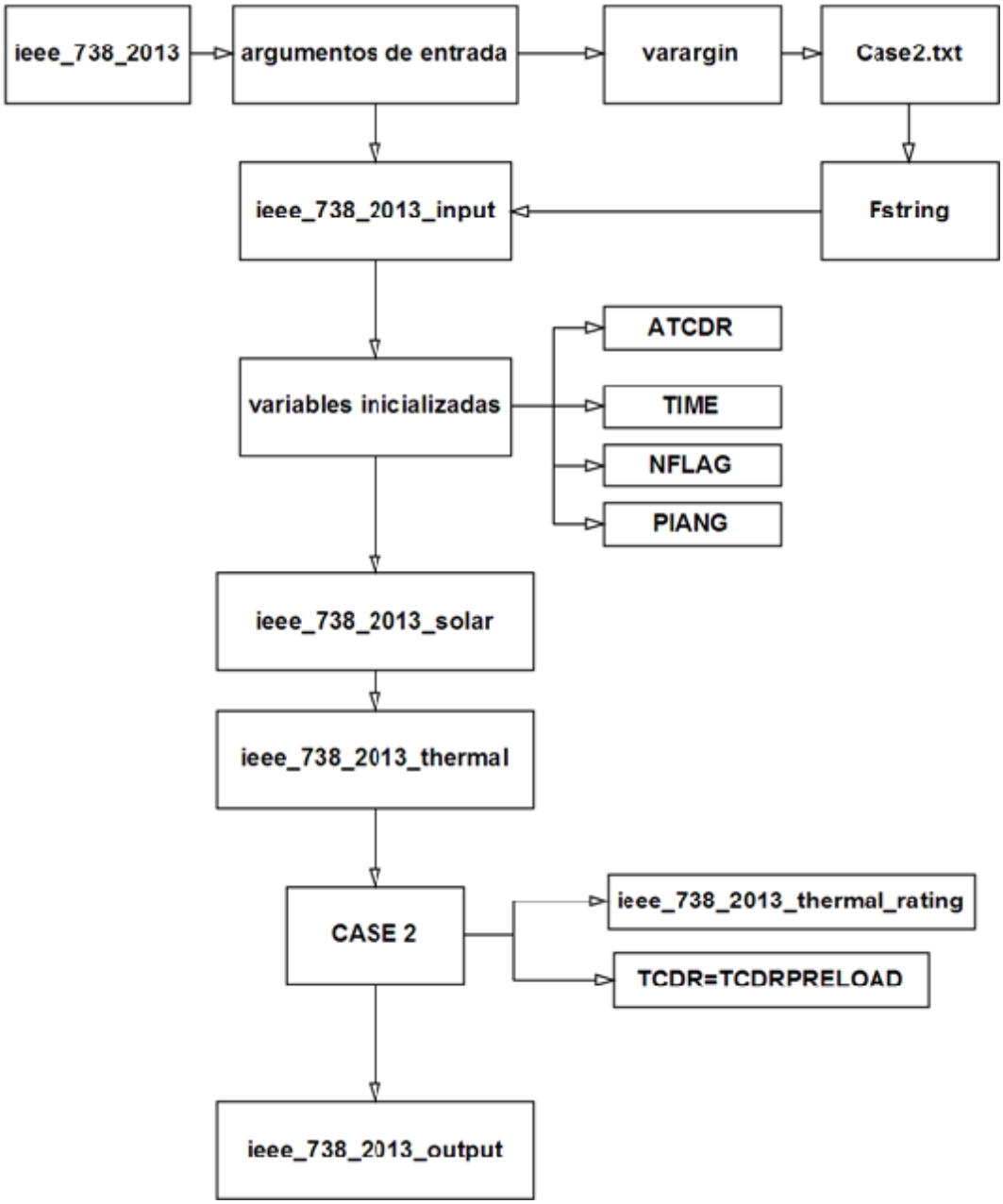
- Cargar los datos necesarios en función del cálculo a realizar según el caso que se presente.
- Se encarga de la inicialización de las variables.
- Llamada a otras funciones necesarias para el cálculo.
- Realizar los cálculos adecuados en función del caso seleccionado.
- Mostrar los datos calculados.

En este apartado se describen las cuatro posibles estructuras a seguir dependiendo de la elección de cálculo a realizar.

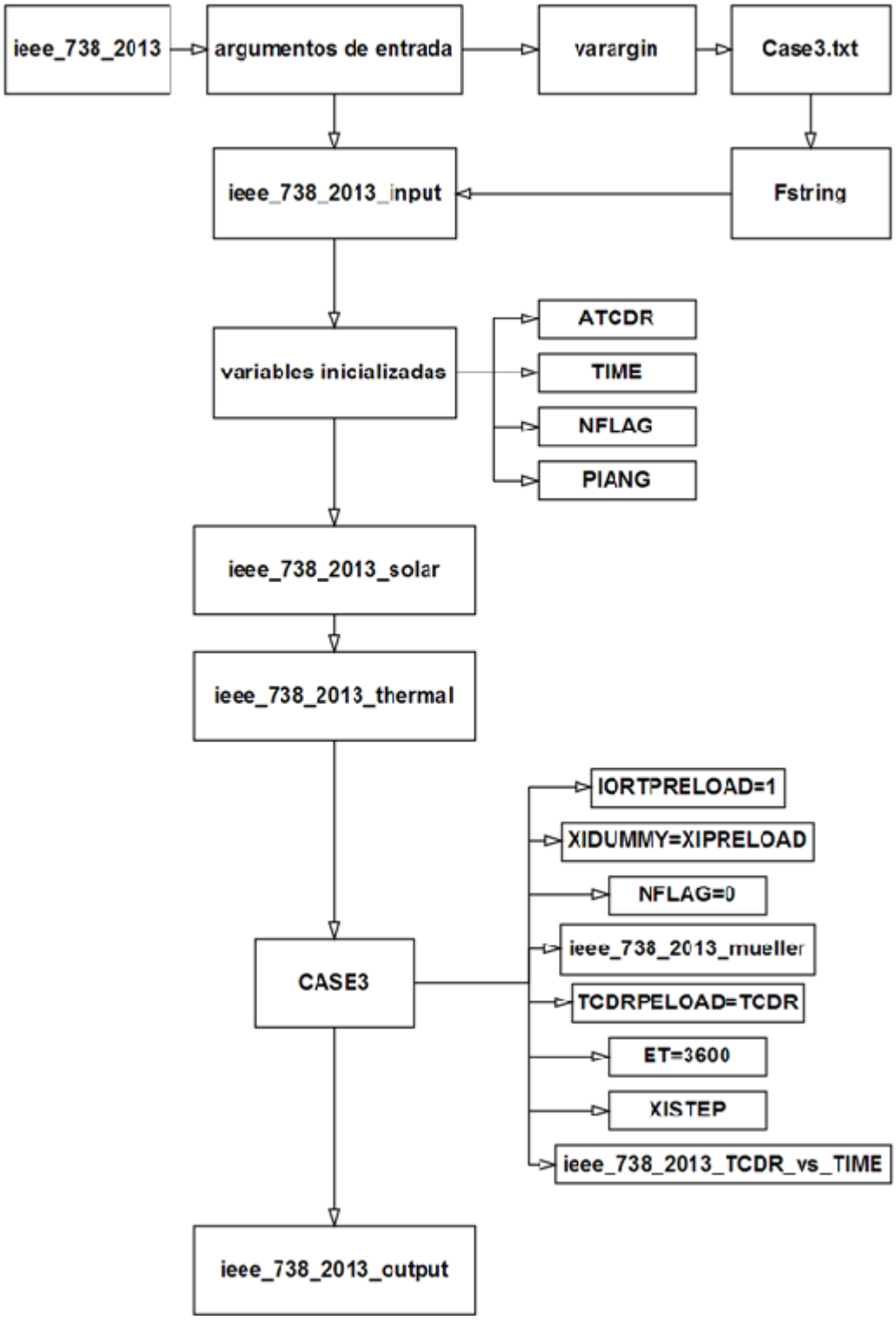
- Caso 1:



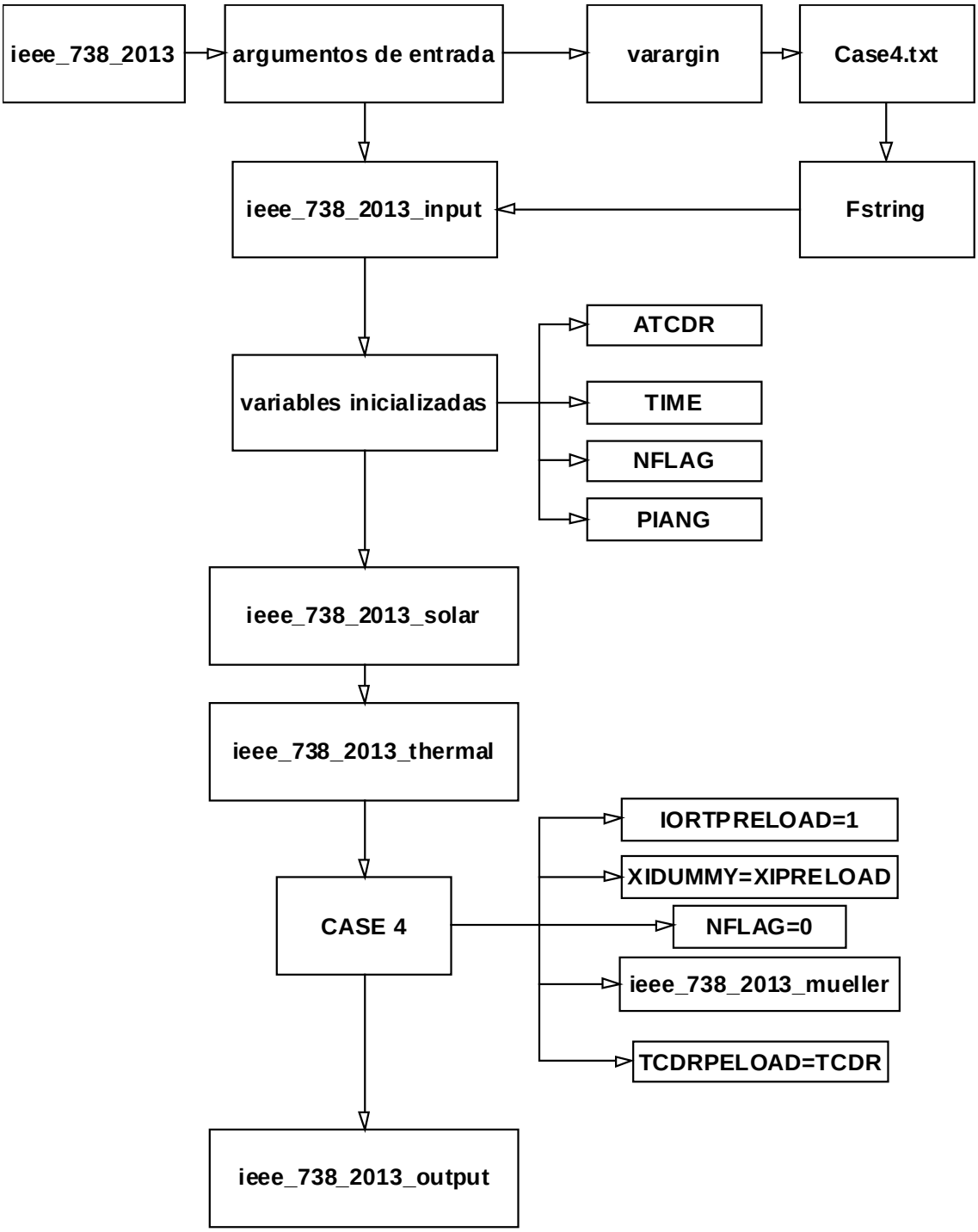
- Caso 2:


ieee_738_2013
argumentos de entrada
varargin
Case2.txt
ieee_738_2013_input
Fstring
variables inicializadas
ATCDR
TIME
NFLAG
PIANG
ieee_738_2013_solar
ieee_738_2013_thermal
CASE 2
ieee_738_2013_thermal_rating
TCDR=TCDRPRELOAD
ieee_738_2013_output

- Caso 3:

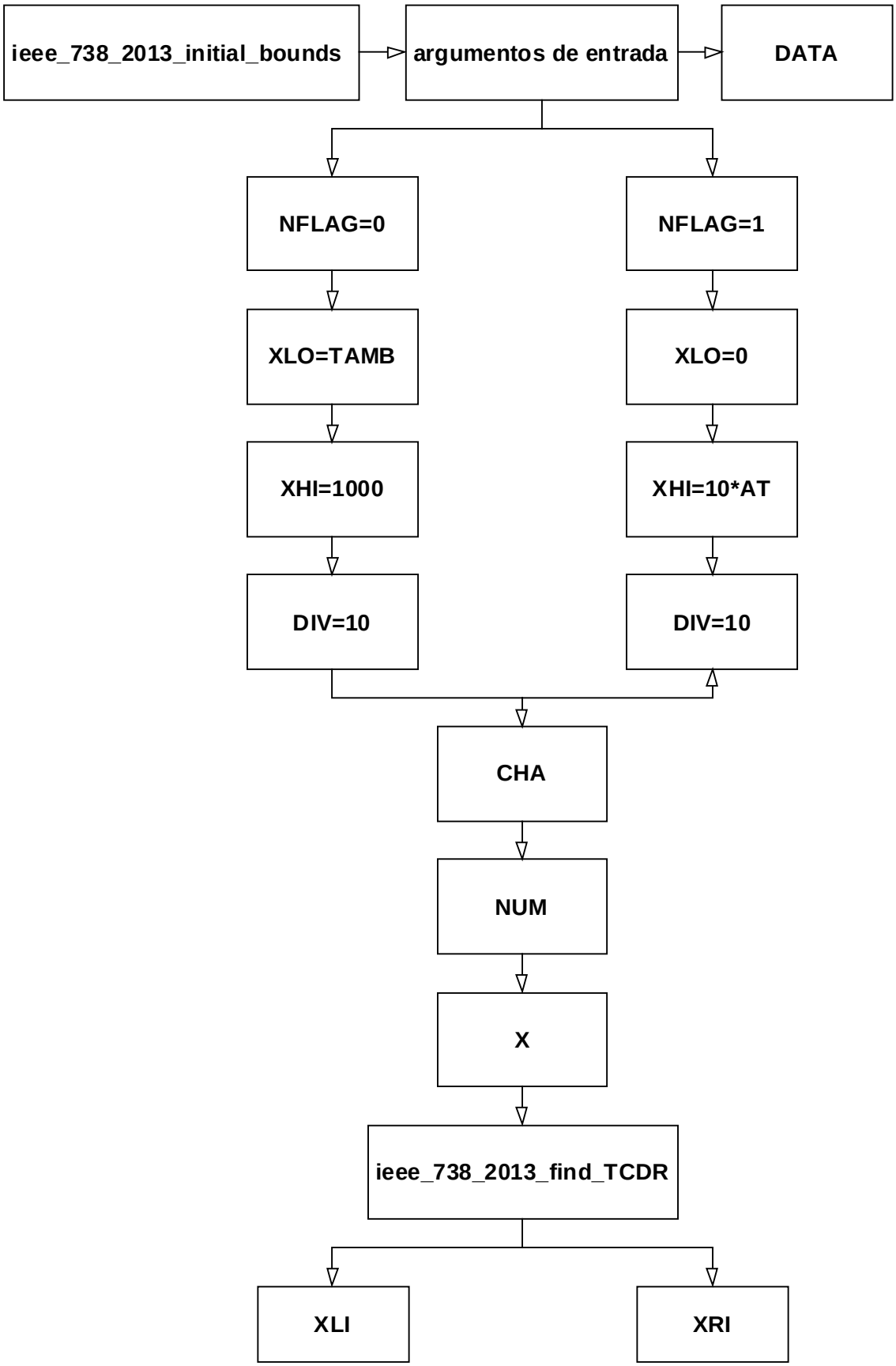

ieee_738_2013
argumentos de entrada
varargin
Case3.txt
ieee_738_2013_input
Fstring
variables inicializadas
ATCDR
TIME
NFLAG
PIANG
ieee_738_2013_solar
ieee_738_2013_thermal
CASE3
IORTPRELOAD=1
XIDUMMY=XIPRELOAD
NFLAG=0
ieee_738_2013_mueller
TCDRPELOAD=TCDR
ET=3600
XISTEP
ieee_738_2013_TCDR_vs_TIME
ieee_738_2013_output

- Caso 4:


ieee_738_2013
argumentos de entrada
varargin
Case4.txt
ieee_738_2013_input
Fstring
variables inicializadas
ATCDR
TIME
NFLAG
PIANG
ieee_738_2013_solar
ieee_738_2013_thermal
CASE 4
IORTPRELOAD=1
XIDUMMY=XIPRELOAD
NFLAG=0
ieee_738_2013_mueller
TCDRPELOAD=TCDR
ieee_738_2013_output

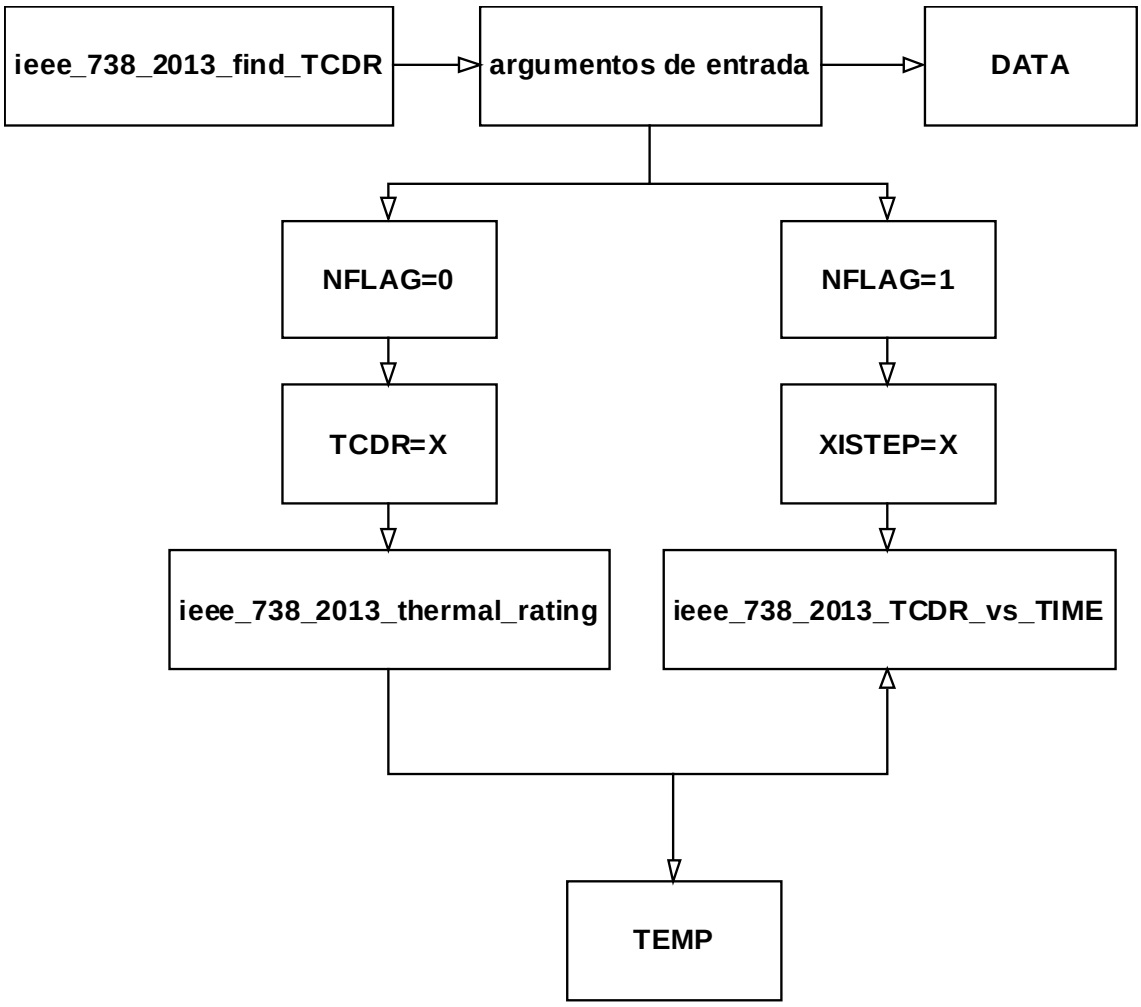
4.4 Función “ieee_738_2013_initial_bounds”

La función “ieee_738_2013_initial_bounds” se encarga de la determinación de los distintos valores iniciales para el cálculo iterativo.



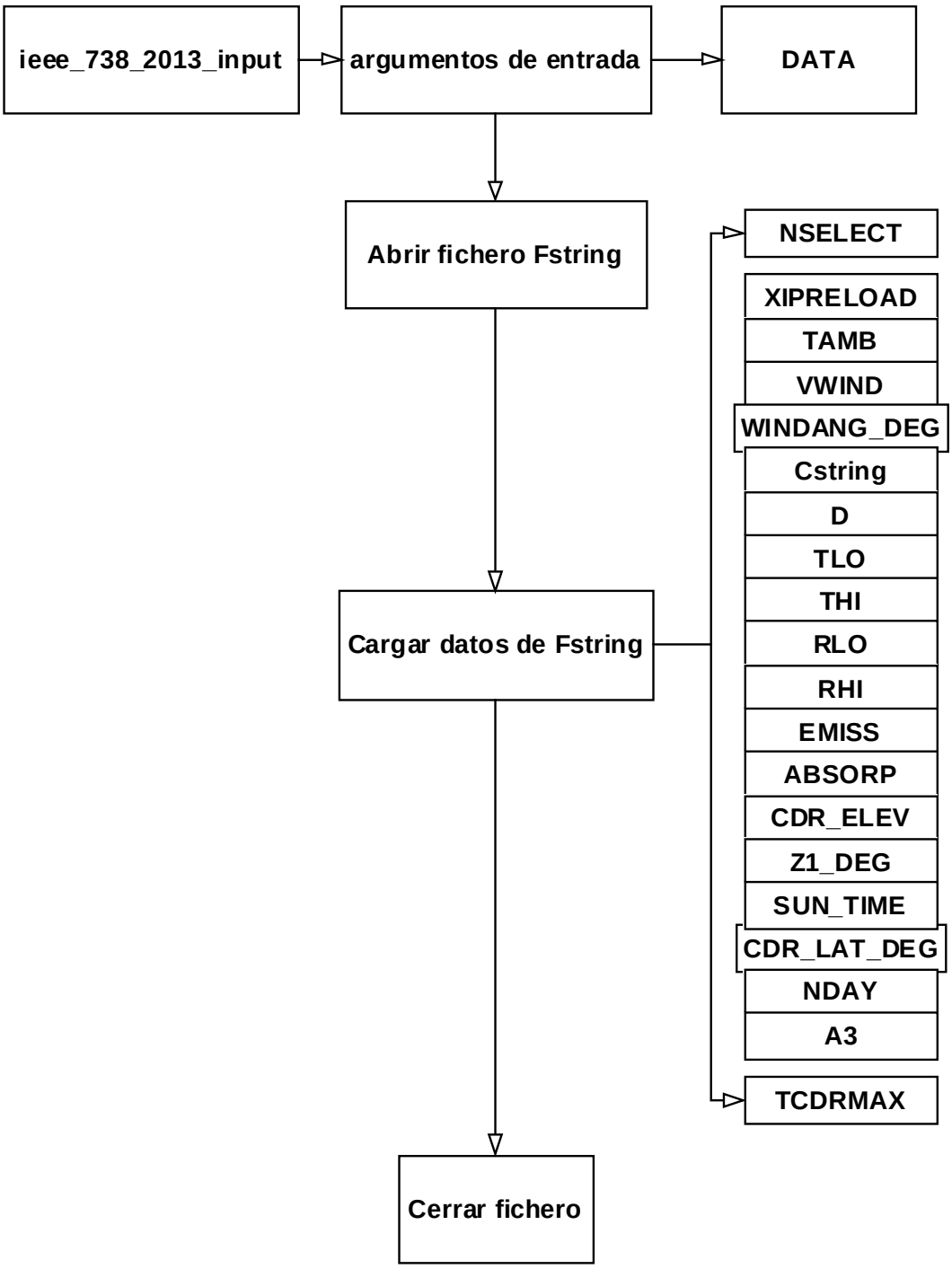
4.5 Función “ieee_738_2013_find_TCDR”

La función “ieee_738_2013_find_TCDR” se encarga de la determinación mediante un proceso iterativo del cálculo de la temperatura del conductor cuando viene dada la corriente del conductor.



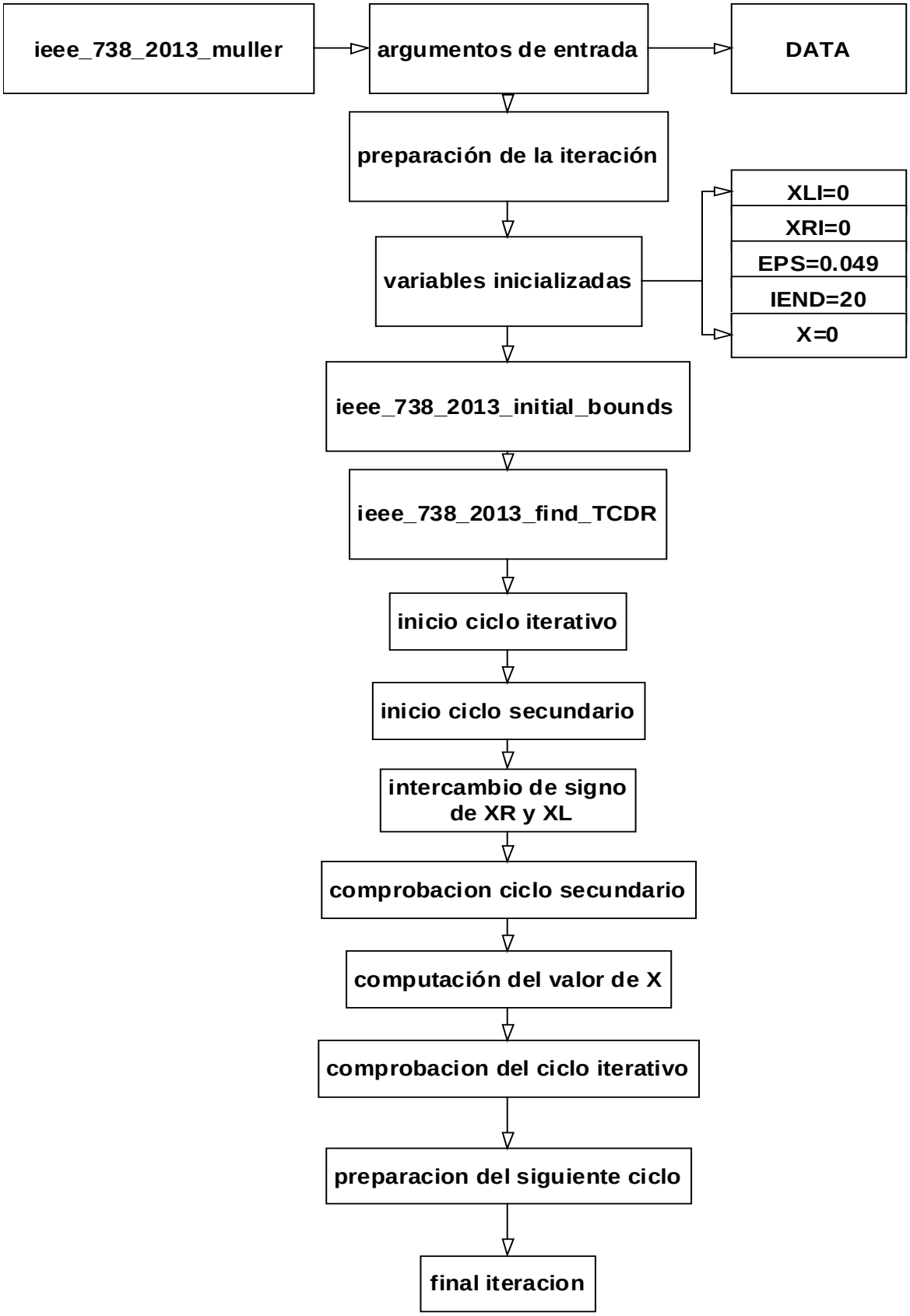
4.6 Función “ieee_738_2013_input”

La función “ieee_738_2013_input” se encarga de la apertura de los distintos ficheros que contienen los datos necesarios para el cálculo a realizar en los distintos casos así como de cargar estos en los distintos datos y arrays.



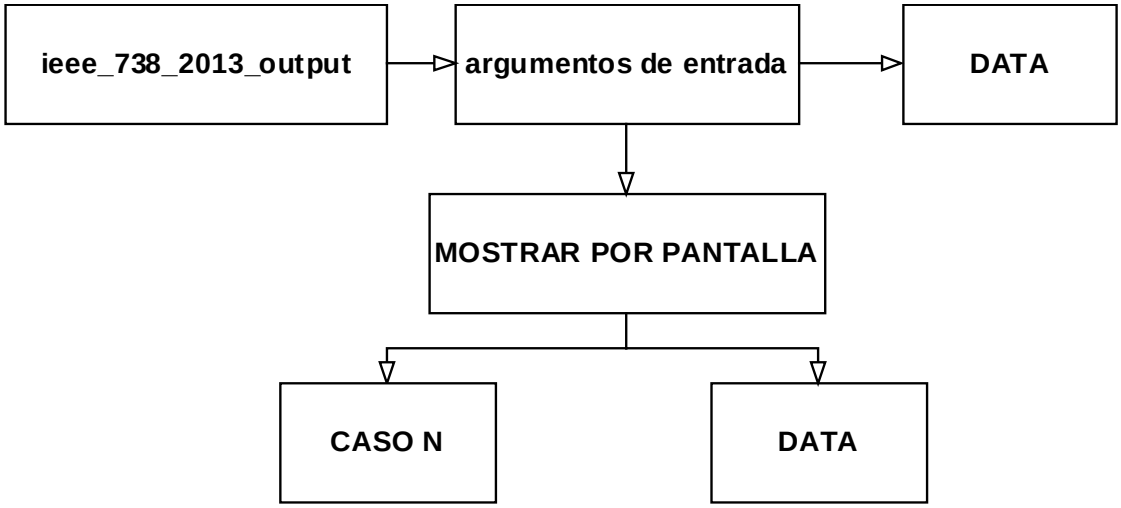
4.7 Función “ieee_738_2013_muller”

La función “ieee_738_2013_muller” se encarga a través del método Muller ir aumentando mediante un proceso iterativo la temperatura en el tiempo obteniendo la corriente para los diferentes valores de temperatura hasta alcanzar la máxima corriente permitida por el conductor.



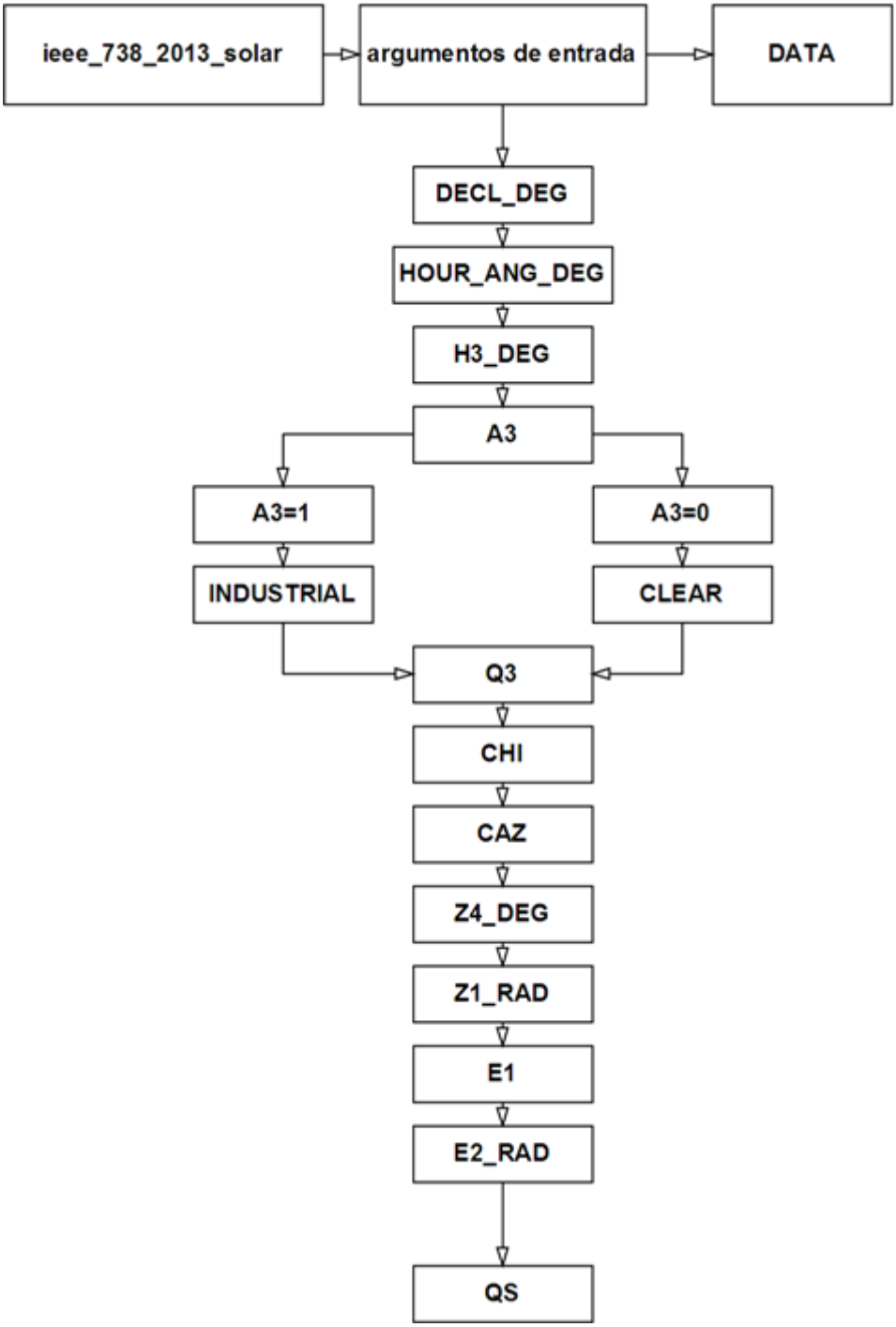
4.8 Función “ieee_738_2013_output”

La función “ieee_738_2013_output” se encarga de mostrar por pantalla los resultados obtenidos tras la ejecución del problema calculado.



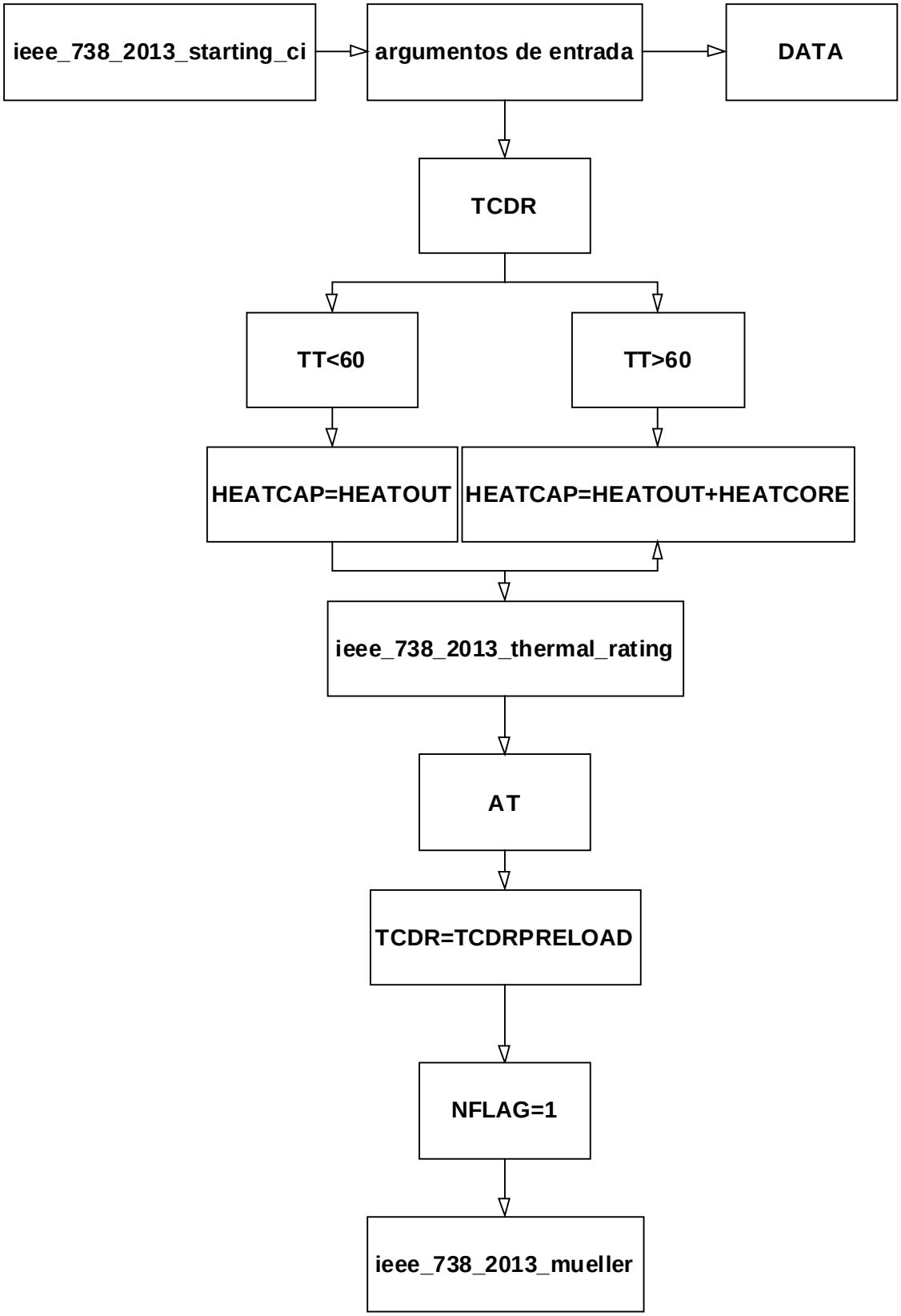
4.9 Función “ieee_738_2013_solar”

La función “ieee_738_2013_solar” se encarga del cálculo de la ganancia de calor debido al efecto del sol sobre el conductor.



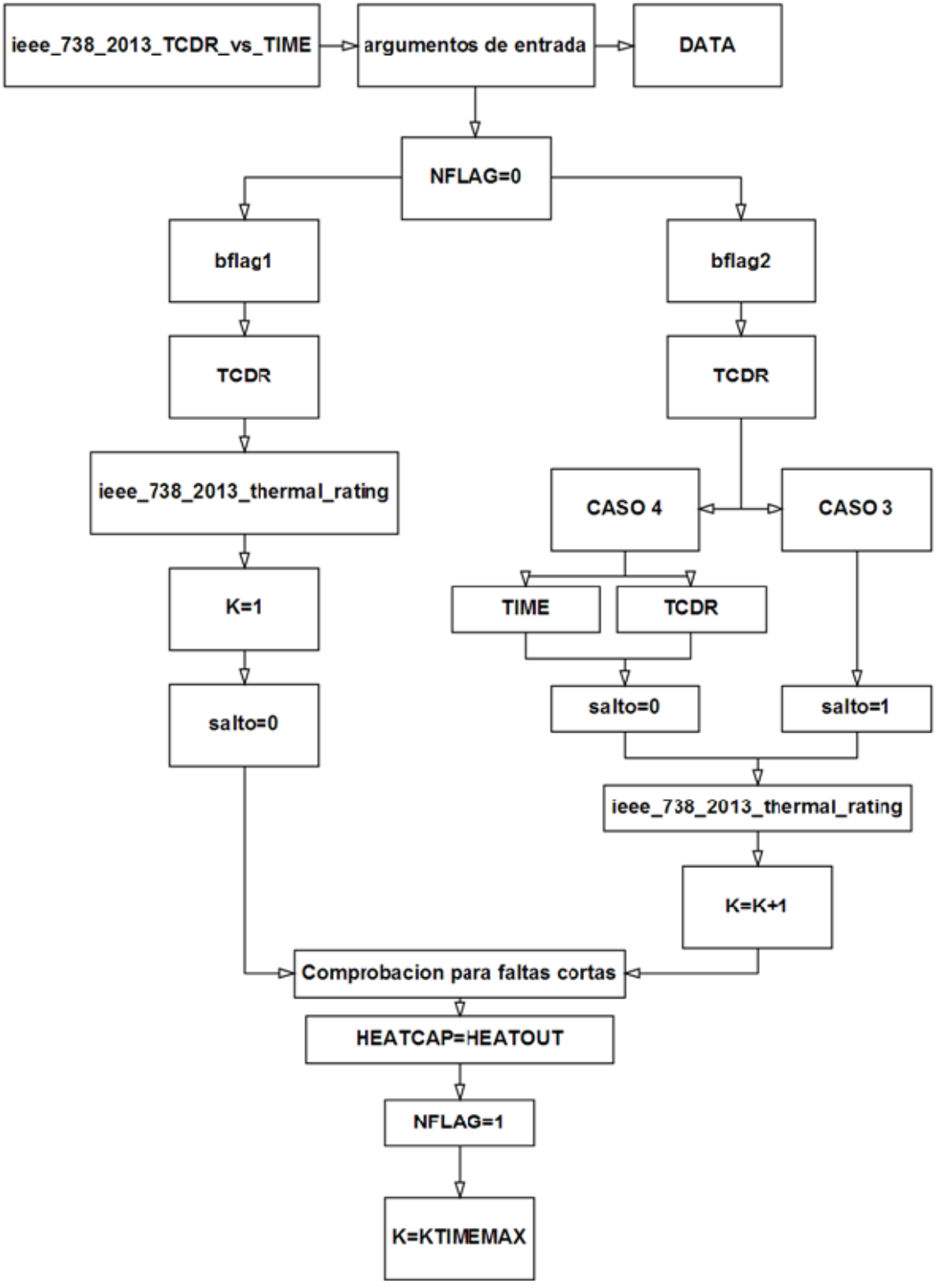
4.10 Función “ieee_738_2013_starting_ci”

La función “ieee_738_2013_starting_ci” se encarga del cálculo del valor inicial de corriente para el ciclo iterativo suponiendo un calentamiento adiabático en el tiempo.



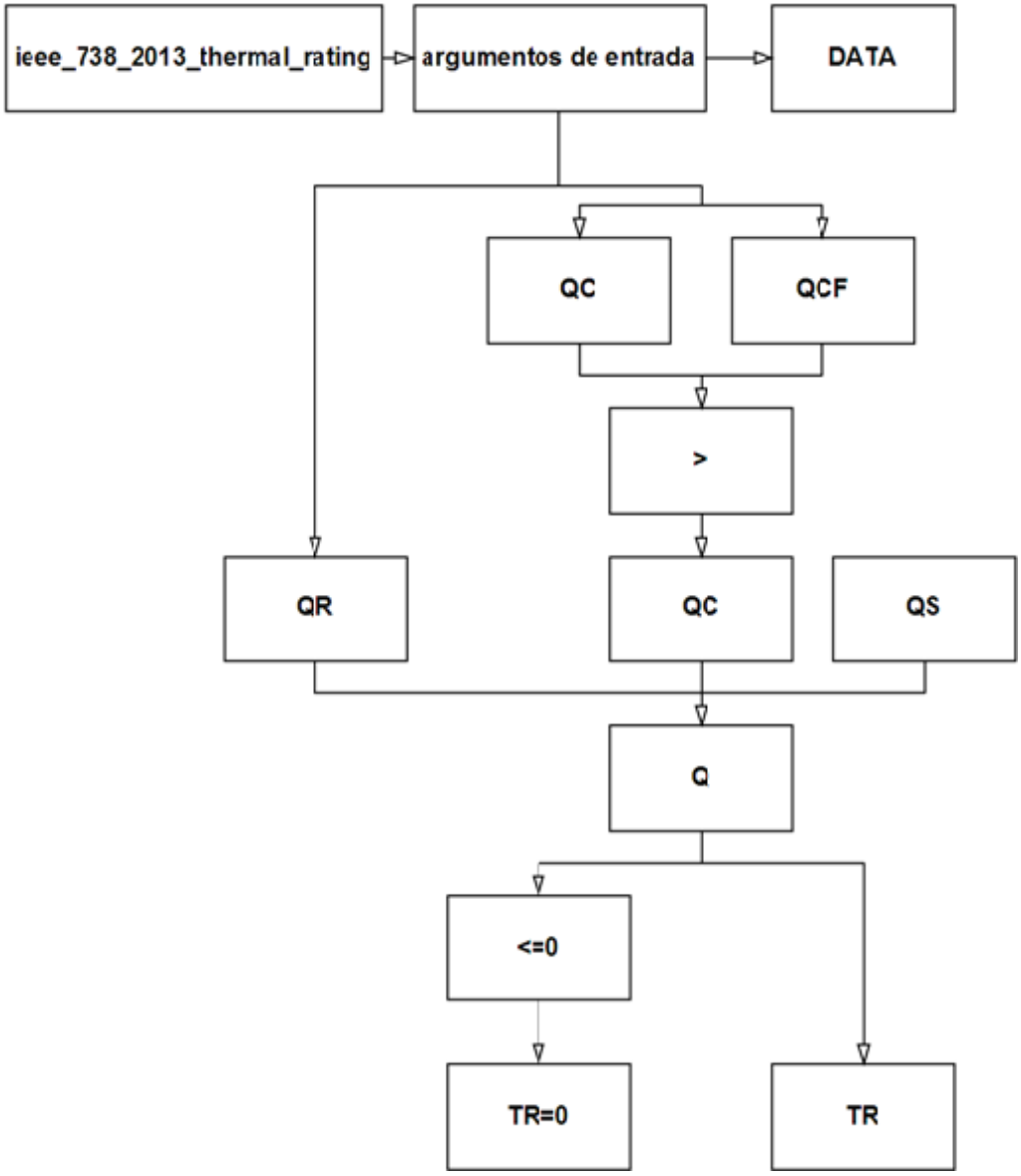
4.11 Función “ieee_738_2013_TCDR_vs_TIME”

La función “ieee_738_2013_TCDR_vs_TIME” permite el cálculo de la temperatura frente al tiempo para un aumento escalonado de la corriente.



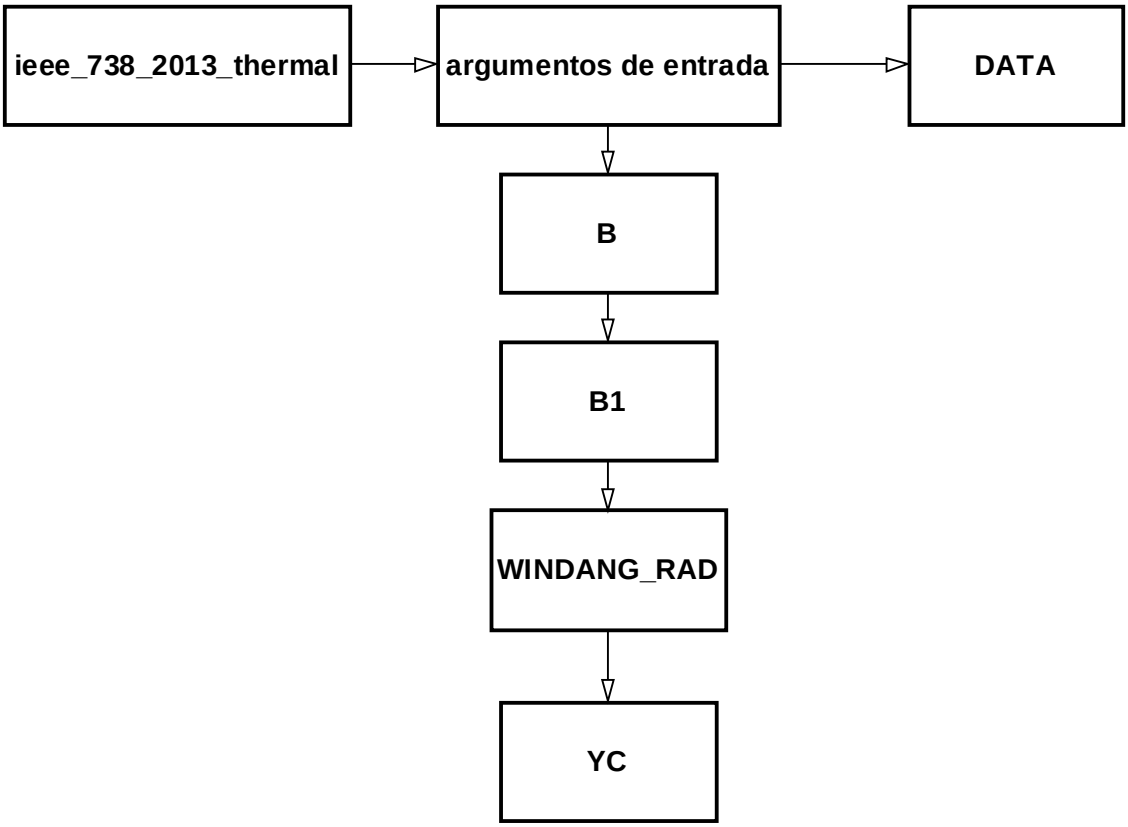
4.12 Función “ieee_738_2013_thermal_rating”

La función “ieee_738_2013_thermal_rating” permite el cálculo del límite térmico del conductor a partir de una temperatura, los parámetros del conductor y las condiciones climáticas.



4.13 Función “ieee_738_2013_thermal”

La función “ieee_738_2013_thermal” realiza el cálculo del coeficiente térmico de la resistencia de alterna, la capacidad de calentamiento y la corrección debida al viento.



5.-Ensayo de laboratorio y comparación con cálculo de programa

Índice

5 Ensayo de laboratorio y comparación con cálculo del programa…….. Pág. 45

5.1 Descripción del ensayo de laboratorio…… Pág. 47

5.2 Comparación del ensayo de laboratorio y cálculo del programa…… Pág. 49

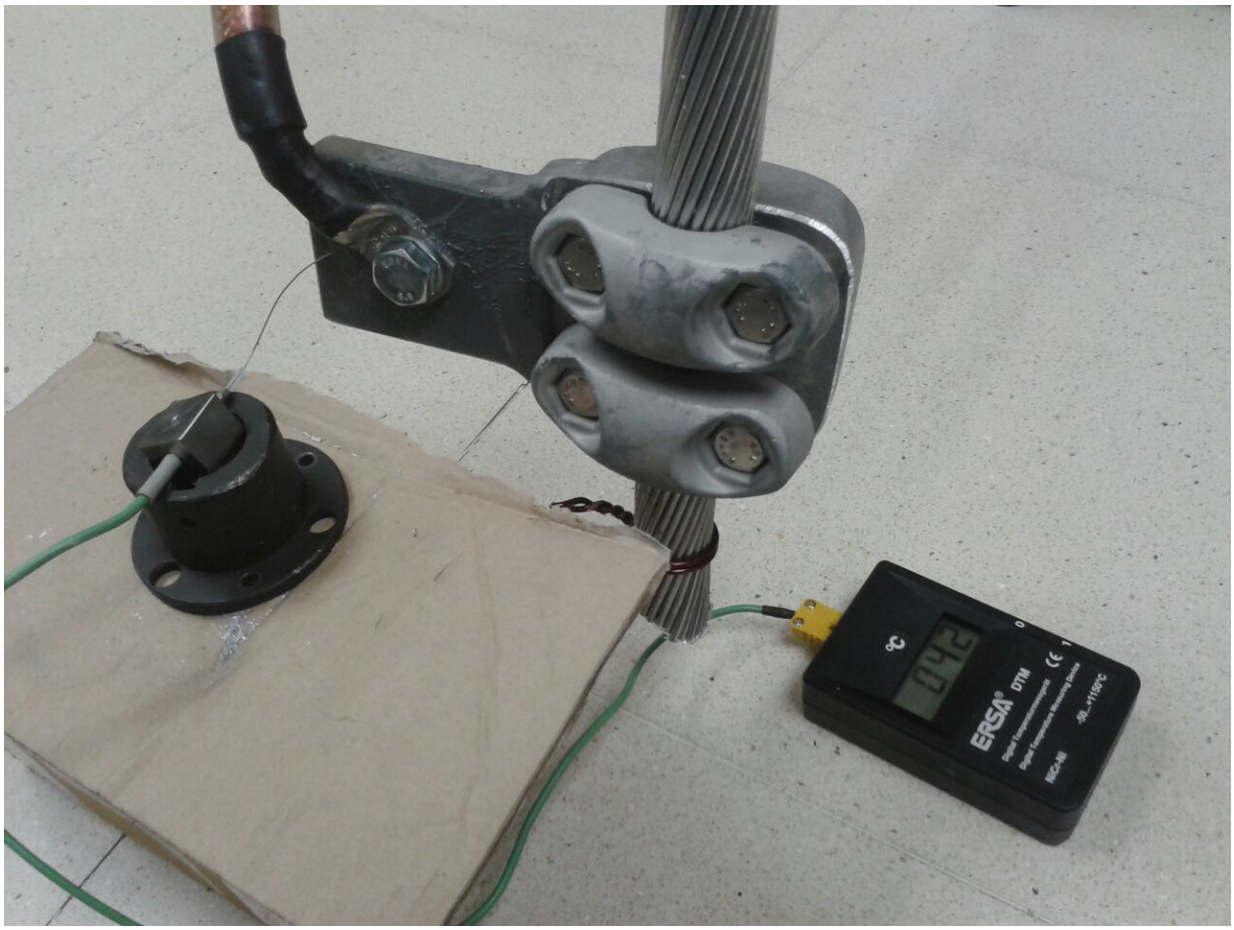
5.1 Descripción del ensayo de laboratorio

Para el ensayo realizado en el laboratorio se empleó un conductor CONDOR del cual se emplearon cinco metros de conductor así como los diferentes elementos aisladores, grapas, sensores y sondas.

El ensayo consiste en la aplicación a este conductor de una corriente de 500A de corriente continua ya que en el laboratorio no se podría aplicar esta corriente en alterna. Este ensayo se realiza generando esta corriente mediante una fuente de corriente continua.

Este ensayo se realiza a una tensión muy baja ya que en caso contrario supondría un grave peligro ya que la potencia producida seria elevada al tratarse de una corriente bastante alta y pudiéndose producir elevadas temperaturas al ser sometido el conductor a la misma.

En la siguiente imagen podemos ver un detalle de la grapa empleada para la conexión del conductor en el montaje del laboratorio.



5.2 Comparación del ensayo de laboratorio y cálculo del programa

Tras ser sometido a la realización del ensayo del conductor se obtuvo la siguiente grafica de valores de temperatura al someter al mismo a una corriente de 500 amperios.

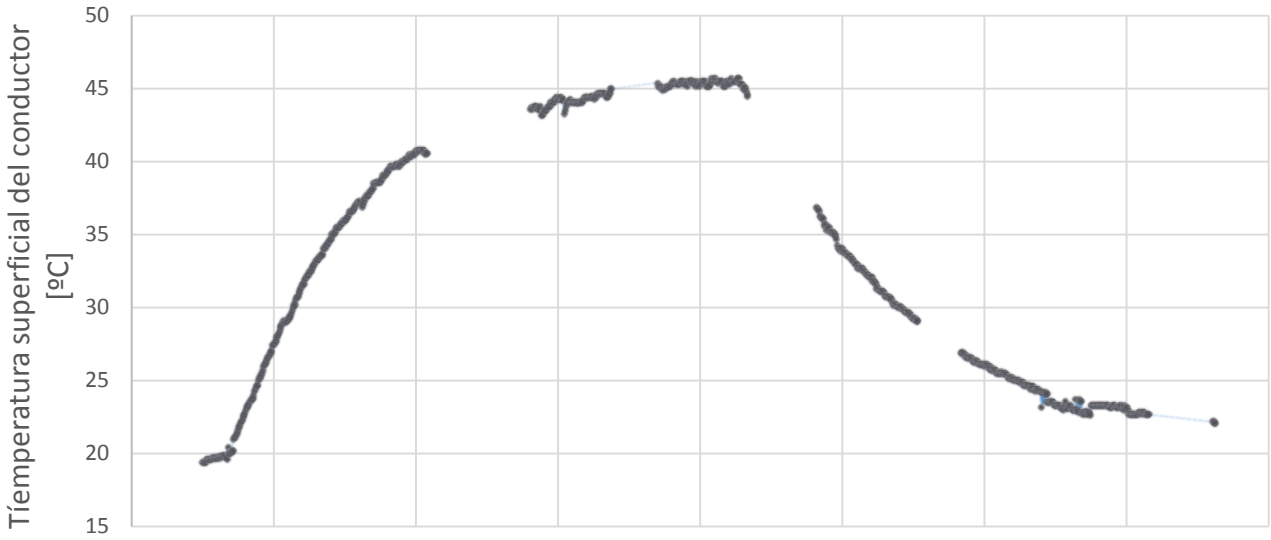


Figura 5.2.1:Evolución de la temperatura del conductor

Por otra parte se ha realizado una simulación similar al caso ensayado en el laboratorio sometiendo en esta simulación al conductor a una corriente también de 500 amperios la cual nos permite la obtención de la figura 5.2.2.

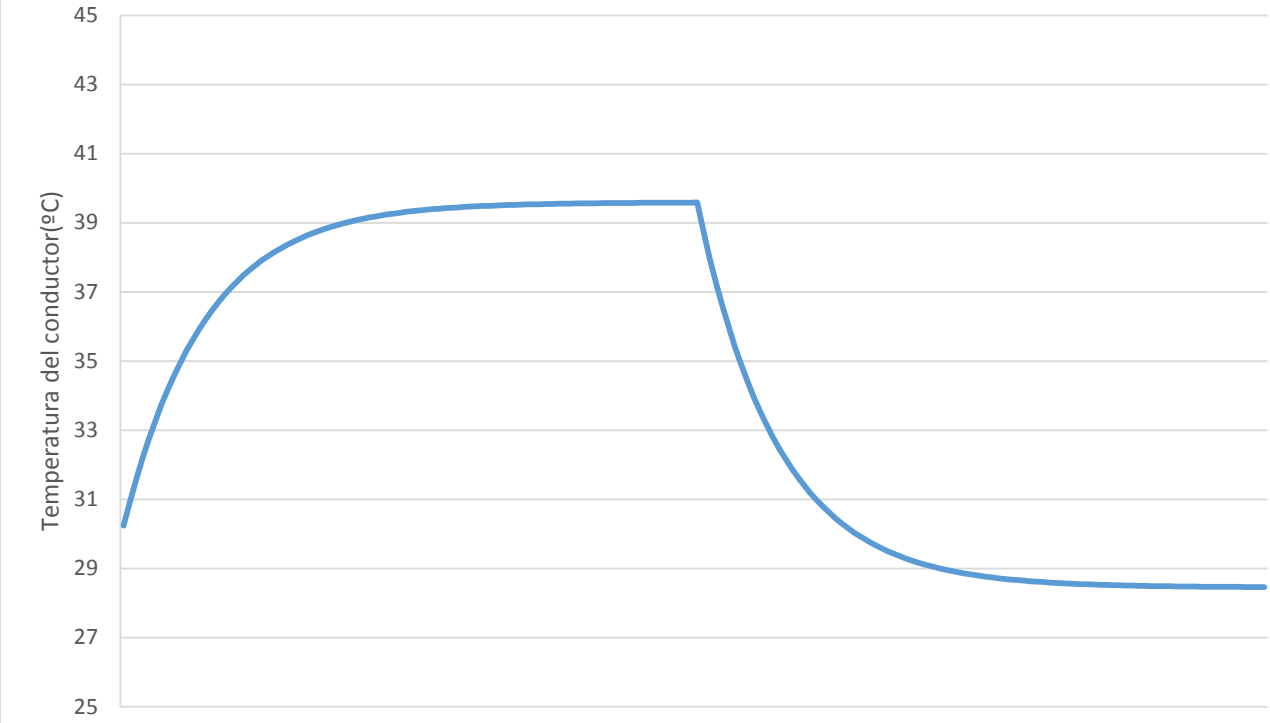


Figura 5.2.2:Evolución de la temperatura del conductor

Como podemos ver existe una diferencia entre las temperaturas que alcanza el conductor al ser sometido a la corriente de 500 A en la simulación respecto al ensayo de laboratorio. Esta diferencia se debe al hecho de que en el ensayo de laboratorio realizamos el proceso a corriente continua mientras que en la simulación es corriente alterna lo cual produce una variación en la resistencia del conductor y esto a su vez produce una variación en la temperatura que alcanza el conductor al ser sometido a la corriente de 500 amperios.

6 Cálculo y representación de casos posibles

Índice

6 Cálculo y representación de casos posibles……..……Pág. 51

6.1 Primer caso……..…… Pág. 53

6.2 Segundo caso……..…… Pág. 57

Por otra parte describiremos diferentes casos para la ejemplificación de los cálculos del programa y la visualización de la variación de los valores en función de cómo varían los diferentes parámetros a tener en cuenta en el cálculo de las temperaturas o corrientes que alcanza un determinado conductor al ser sometido a diferentes condiciones tanto atmosféricas como de localización y posicionamiento del conductor.

6.1 Primer caso

En el primer caso nos situaremos en un día típico de invierno con una temperatura ambiente de 10ºC en una zona de aire claro con una elevación del conductor de 50 metros con una velocidad del viento de 1.3m/s y con una desviación de ángulo en la posición del conductor de 65º.

Para el caso descrito si necesitamos saber la temperatura que alcanzara el conductor al someterle a una determinada corriente obtenemos el siguiente resultado:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 10 ºC
Wind speed = 1.3 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 50 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 65 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 4.273 W/m
Radiation cooling is = 0.70918 W/m
Convective cooling is = 6.4397 W/m
Given a constant current of = 200 A
The conductor temperature is = 13.1188 ºC

Para la situación descrita si quisiéramos saber la corriente necesaria para que el conductor alcanzara una determinada temperatura, en este caso de 60ºC, tendríamos la siguiente respuesta del sistema:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 10 ºC
Wind speed = 1.3 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 50 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 65 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 4.273 W/m
Radiation cooling is = 14.5117 W/m
Convective cooling is = 101.5092 W/m
Given a maximum conductor temperature of = 60 ºC
The steady-state thermal rating is = 1223.1891 Amperes

Para esta situación si suponemos la ejecución de un caso en el que sometemos al conductor a un aumento de corriente hasta alcanzar los 200 A en un periodo de tiempo de 15 minutos obtendremos los siguientes resultados:

Para el proceso de calentamiento del conductor tenemos los siguientes resultados:
IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 10 ºC
Wind speed = 1.3 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 50 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 65 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 4.273 W/m
Radiation cooling is = 0.65779 W/m
Convective cooling is = 5.9806 W/m
******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******
Initial steady-state conductor temp is = 11.9429 ºC for a PRE-STEP steady-state current = 50 Amperes
Core heat capacity = 243 W.s/mºC
Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC
The total time of interest after the current increases to 200 A .-. 15 min

Mientras que para el proceso de enfriamiento obtenemos los siguientes:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 10 ºC
Wind speed = 1.3 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 50 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 65 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 4.273 W/m
Radiation cooling is = 0.47535 W/m
Convective cooling is = 4.3414 W/m
******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******
Initial steady-state conductor temp is = 13.1188 ºC for a PRE-STEP steady-state current = 200 Amperes
Core heat capacity = 243 W.s/mºC
Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC
The total time of interest after the current increases to 0 A .-. 15 min

Obteniendo la representación en la figura 6.1-1 de todo el proceso al que es sometido el conductor:

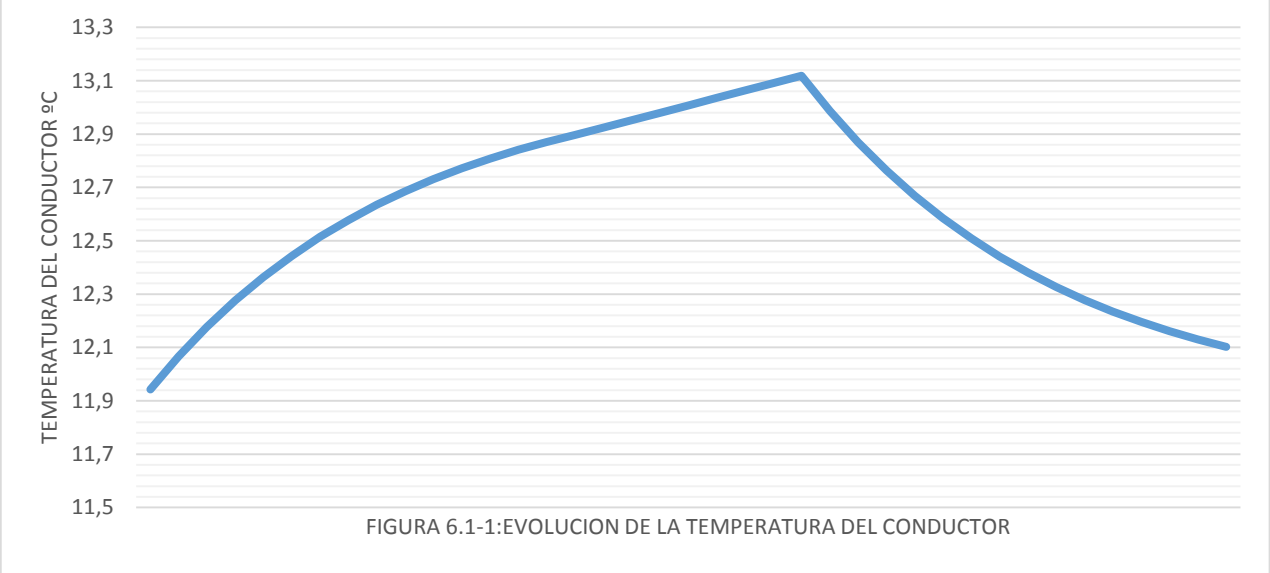


FIGURA 6.1-1:EVOLUCION DE LA TEMPERATURA DEL CONDUCTOR

Como se puede ver la temperatura del conductor aumenta en poco más de un grado debido a las bajas temperaturas que evitan el calentamiento del mismo en este periodo de tiempo requerido para alcanzar la corriente necesaria.

Si lo que deseamos saber es a que corriente deberíamos someter al conductor para alcanzar una determinada temperatura en un determinado tiempo el resultado es el siguiente:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 10 ºC
Wind speed = 1.3 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 0 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 65 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 4.2488 W/m
Radiation cooling is = 1.8664 W/m
Convective cooling is = 16.5439 W/m
******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******
Initial steady-state conductor temp is = 11 ºC
Core heat capacity = 243 W.s/mºC
Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC
Calculation time interval = 60 seconds
Calculation accuracy would improve if this time interval were reduced the transient thermal rating = 498.1069 A
that is, with this current, the CDR temperature just reaches the maximum of = 18 ºC in 15 minutes

6.2 Segundo caso

Para el segundo caso nos situaremos en un día típico de verano con una temperatura ambiente de 30ºC en una zona de aire industrial con una elevación del conductor de 20 metros con una velocidad del viento de 0,5 m/s y con una desviación de ángulo en la posición del conductor de 30º.

Para el caso descrito si necesitamos saber la temperatura que alcanzara el conductor al someterle a una determinada corriente obtenemos el siguiente resultado:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION

The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 30 ºC
Wind speed = 0.5 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 20 m above sea level
45 DEG from North; at a latitude of 35 DEG
The sun time is = 16 hours & The atmosphere is INDUSTRIAL
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC
and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 6.4192 W/m
Radiation cooling is = 1.7478 W/m
Convective cooling is = 7.6022 W/m
Given a constant current of = 200 A
The conductor temperature is = 36.1754 ºC

Para la situación descrita si quisiéramos saber la corriente necesaria para que el conductor alcanzara una determinada temperatura, en este caso de 60ºC, tendríamos la siguiente respuesta del sistema:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION

The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 30 ºC
Wind speed = 0.5 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 20 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 30 DEG
The sun time is = 16 hours & The atmosphere is INDUSTRIAL
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC

The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 6.4872 W/m
Radiation cooling is = 9.5414 W/m
Convective cooling is = 36.8735 W/m
Given a maximum conductor temperature of = 60 ºC
The steady-state thermal rating is = 731.1578 Amperes

Para este caso supondremos también el aumento de la corriente de transporte de la línea hasta alcanzar los 200 A pero para esta situación el incremento se realizara en 30 minutos.

Para el proceso de calentamiento del conductor tenemos los siguientes resultados:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION

The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 30 ºC
Wind speed = 0.5 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 20 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 30 DEG
The sun time is = 16 hours & The atmosphere is INDUSTRIAL
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 6.4872 W/m
Radiation cooling is = 1.7004 W/m
Convective cooling is = 7.4019 W/m
******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******
Initial steady-state conductor temp is = 34.4121 ºC for a PRE-STEP steady-state current = 50 Amperes
Core heat capacity = 243 W.s/mºC
Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC
The total time of interest after the current increases to 200 A .-. 30 min

Mientras que para el proceso de enfriamiento obtenemos los siguientes:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION
The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 30 ºC
Wind speed = 0.5 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 20 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 30 DEG
The sun time is = 16 hours & The atmosphere is INDUSTRIAL

The conductor diameter is = 27.72 mm

The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC

The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5

Solar Heat input is = 6.4872 W/m

Radiation cooling is = 1.2669 W/m

Convective cooling is = 5.5565 W/m

******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******

Initial steady-state conductor temp is = 36.2202 ºC for a PRE-STEP steady-state current = 200 Amperes

Core heat capacity = 243 W.s/mºC

Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC

The total time of interest after the current increases to 0 A .-. 30 min

Obteniendo la figura 6.2-1 como representación de todo el proceso:

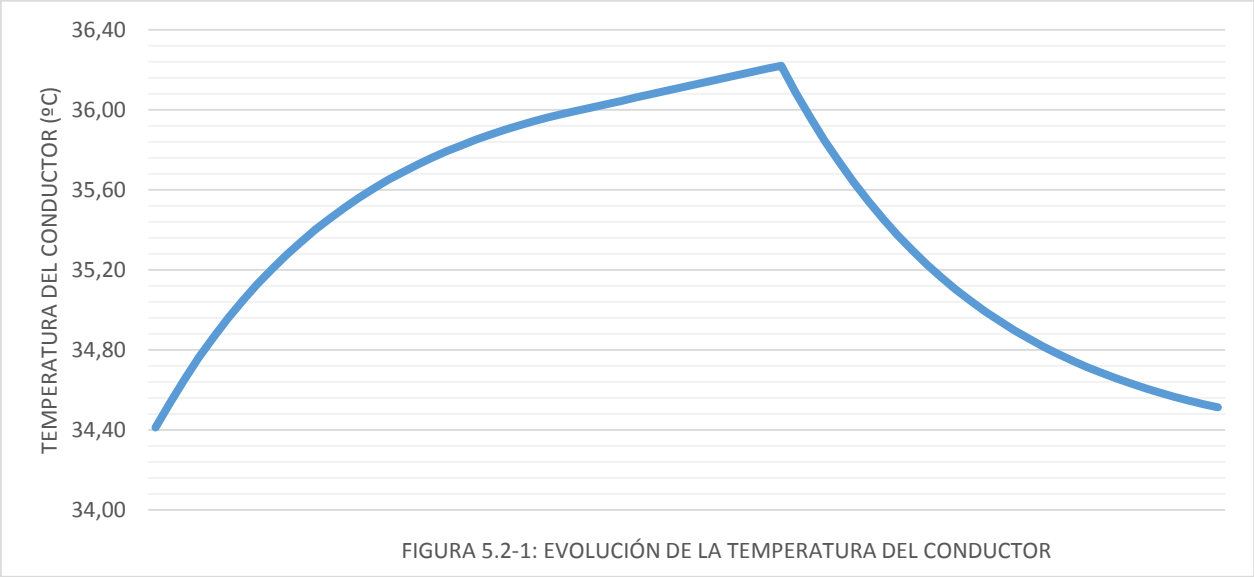


FIGURA 5.2-1: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL CONDUCTOR

Si lo que deseamos saber es a que corriente deberíamos someter al conductor para alcanzar una determinada temperatura en un determinado tiempo el resultado es el siguiente:

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION

The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR

Air temperature = 30 ºC

Wind speed = 0.5 m/s

The angle between wind and conductor is = 90 DEG

The conductor is = 20 m above sea level 45 DEG from North; at a latitude of 30 DEG

The sun time is = 16 hours & The atmosphere is INDUSTRIAL

The conductor diameter is = 27.72 mm

The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC and 0.07558 ohms/km at 75 ºC

The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5

Solar Heat input is = 6.4872 W/m

Radiation cooling is = 6.0582 W/m

Convective cooling is = 24.5971 W/m

******* TRANSIENT THERMAL CALCULATIONS *******

Initial steady-state conductor temp is = 30 ºC

Core heat capacity = 243 W.s/mºC

Outer strand layers heat capacity = 1066 W.s/mºC

Calculation time interval = 60 seconds

Calculation accuracy would improve if this time interval were reduced

the transient thermal rating = 615.6131 A that is, with this current, the CDR temperature just reaches the maximum of = 50 ºC in 30 minutes

7.-Conclusiones

Índice

7 Conclusiones…….. Pág. 61

7.1 Conclusiones propias del trabajo..…….. Pág. 63

7.2 Conclusiones personales.…….. Pág. 64

Tras la realización del trabajo se ha llegado a las siguientes a diversas conclusiones, por una parte las propias del trabajo y por otra parte las conclusiones personales.

7.1 Conclusiones propias del trabajo

-Ante la necesidad de evacuar grandes potencias ante un pico de demanda es necesario tener los medios de cálculo necesarios para establecer cuáles son las posibilidades que tenemos para realizar las diversas maniobras necesarias que nos faciliten el proceso de transporte de la cantidad de energía eléctrica necesaria.

-Tanto los parámetros de la línea como el estado en que se encuentre en el momento de efectuar una maniobra, bien sea por los estudios meteorológicos necesarios como por el estado de carga en que se encuentre la línea afectan directamente a nuestras posibilidades de efectuar un aumento de carga en la misma.

-Para la realización de un aumento de potencia de transporte en una línea eléctrica tenemos que tener en cuenta tanto los parámetros de la misma como las condiciones de entorno que se encuentran en el instante preciso de la ejecución de la maniobra por ello tienen gran importancia la instalación de estaciones meteorológicas así como de sensores en el conductor que nos aporten los parámetros necesarios para la ejecución de la misma.

-Para la obtención de los parámetros limite que podemos alcanzar son necesarios los cálculos de las potencias que afectan a la línea ya sean generadas o disipadas en el entorno de la misma.

-Respecto al cálculo mediante el programa de cálculo implementado tomaremos diversos caminos dependiendo de cuales sean los parámetros que deseamos calcular.

-En cuanto al ensayo realizado en el laboratorio, obtenemos una simulación bastante aproximada a la realidad pero al comparar con el cálculo del programa obtenemos una variación en la temperatura que alcanza el conductor debido a que se realiza con corriente continua a diferencia del cálculo realizado en alterna mediante el programa, esto provoca una alteración en la resistencia del conductor y por lo tanto una variación en el calentamiento que se produce en el conductor.

-Mediante los dos ejemplos descritos podemos ver las variaciones que se producen en un mismo conductor dependiendo de las condiciones en que se encuentre tanto el mismo como las condiciones del entorno que le rodean afectando de maneras diferentes dependiendo del lugar y condiciones meteorológicas a las que se ve sometido el conductor.

-A través del programa de cálculo podemos obtener las condiciones en que se encuentra el conductor si necesitamos realizar cualquier tipo de maniobra u operación en la línea sin necesidad de realizar las mediciones en el lugar exacto de la operación a realizar, evitando así la necesidad de desplazar a varios operarios reduciendo tiempos y costes.

7.2 Conclusiones personales

-Por una parte el desarrollo de este trabajo me ha permitido con respecto a la parte de programación y ejecución del programa de cálculo mejorar y desarrollar mis conocimientos sobre el lenguaje de programación de Octave y Matlab así como las diferencias que hay entre ambos y las posibilidades de uno y otro debido a su especificación de software y entorno de programación. Además me ha permitido aprender a utilizar otro tipo de programa como Doxygen el cual permite de una manera muy visual ver los parámetros necesarios a la hora de ejecutar un programa de cálculo.

-Por otra parte, respecto a la parte práctica del trabajo me ha permitido comprobar la importancia que tienen los cálculos a realizar a la hora de la instalación o realización de cualquier tipo de cambio en una línea eléctrica, dentro de los cuales tienen gran importancia los parámetros meteorológicos que envuelven al conductor. Además la ejecución del ensayo de laboratorio me ha permitido comprobar las diferencias que existen entre la ejecución del ensayo en corriente continua y la ejecución real a corriente alterna así como los efectos producidos en el conductor. Otro aspecto que me ha permitido ha sido la familiarización con las nomenclaturas de conductores y la conformación de los mismos.

8 Referencias bibliográficas

Para la realización del proyecto han sido necesarias diferentes fuentes de información:

1) Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión

2) Norma “IEEE 738 de 2013” “Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity Under Steady-State Conditions”.

3) Norma CIGRE WG 22.12 “The thermal behaviour of overhead conductors”

4) Página web de Red Eléctrica de España: “www.ree.es”

5) “Informe del Sistema Eléctrico Español 2016” Red Eléctrica de España.

6) Tabla de Parámetros del Conductor “LA 455 CONDOR” según Norma “UNE 50182:2002”

7) Manual de Octave: “Free your Numbers”. (“www.gnu.org”)

8) Método de Muller: “Numerical Methods Using Matblab”

9) Manual de Doxygen

Anexo I: Descripción de las variables del programa

Cada una de las estructuras que componen el programa de cálculo consta de diferentes parámetros y variables los cuales facilitan la variación de los parámetros en función de las especificaciones actuales en que se encuentre el conductor y de los factores que se desean determinar.

Todos estos parámetros se pueden diferenciar en dos partes, los parámetros y variables externos al proceso de cálculo es decir los parámetros propios del conductor y las condiciones de su entorno y por otra parte los parámetros que nos permiten facilitar el proceso de cálculo en función del proceso de cálculo a realizar.

Dentro de los parámetros del conductor y de sus condiciones de entorno se encuentran los descritos en la tabla Anexo I-1.

Tabla Anexo I-1

VARIABLES DE DATA	DESCRIPCION	UNIDADES	POSIBLES VALORES
NSELECT	caso seleccionado		1 2 3 4
TCDR	temperatura del conductor en régimen permanente	ºc	
TAMB	temperatura ambiente	ºc	
VWIND	velocidad del viento	m/s	
WINDANG_DEG	Angulo entre la dirección del viento y el eje del conductor	Deg	0-180º
Cstring	descripción del conductor		
D	diámetro del conductor	Mm	
TLO	mínima temperatura del conductor	ºc	
THI	máxima temperatura del conductor	ºc	
RLO	resistencia mínima del conductor	Ω	
RHI	resistencia máxima del conductor	Ω	
EMISS	Emisividad		
ABSORP	Absortividad		
CDR_ELEV	altura del conductor respecto al nivel del mar	M	
Z1_DEG	dirección del conductor relativa al norte	Deg	

CDR_LAT_DEG	latitud del conductor	Deg	
SUN_TIME	hora solar		0-24
NDAY	día del año		1-365
A3	claridad del aire		0-1
Bstring	descripción de la claridad		CLEAR-INDUSTRIAL
TR	corriente del conductor en régimen permanente	A	

Por otra parte se encuentran los parámetros que facilitan el proceso de cálculo y permiten estructurar el programa de diferente manera en función del proceso de cálculo seleccionado, los cuales son descritos en la tabla Anexo I-2.

Tabla Anexo I-2

VARIABLES INICIALIZADAS	DESCRIPCION	UNIDADES	POSIBLES VALORES
ATCDR	inicialización de la temperatura del conductor	ºc	
NFLAG	bandera de posición		0-1
TIME	Tiempo	seg	
XIDUMMY	corriente inicial	A	
XIPRELOAD	corriente inicial establecida	A	
XISTEP	escalón aumento de corriente	A	
IORTPRELOAD	corriente de régimen permanente	A	
TCDRMAX	temperatura máxima del conductor	ºc	
TCDRPELOAD	temperatura inicial establecida	ºc	
HEATCAP	calor generado	Ws/mºc	
HEATCORE	calor generado por el conductor	Ws/mºc	
HEATOUT	calor exterior	Ws/mºc	

Anexo II: Descripción y caracterización de los parámetros del programa

Todos estos parámetros vienen caracterizados mediante el programa Doxygen el cual nos facilita una visión de cada uno de los parámetros permitiéndonos su determinación en cada una de las estructuras del programa como variables de entrada y de salida.

Todas estas estructuras descritas a través del programa Doxygen nos permiten identificar los parámetros necesarios para la ejecución de cada una de las estructuras pero debido a la dependencia de algunas funciones del programa respecto de otras en algunas de ellas es necesaria la ejecución del programa al completo para obtener la ejecución de estas estructuras.

De este modo en algunas de las estructuras se han descrito algunos ejemplos que nos darían una visión de los resultados obtenidos en cada función del programa de cálculo dependiendo del caso descrito y los parámetros establecidos en la situación a calcular.

Directorio

Archivos

archivo	ampacity_01.m
archivo	ieee_738_2013.m
archivo	ieee_738_2013_find_TCDR.m
archivo	ieee_738_2013_initial_bounds.m
archivo	ieee_738_2013_input.m
archivo	ieee_738_2013_muller.m
archivo	ieee_738_2013_output.m
archivo	ieee_738_2013_solar.m
archivo	ieee_738_2013_starting_ci.m
archivo	ieee_738_2013_TCDR_vs_TIME.m
archivo	ieee_738_2013_thermal.m
archivo	ieee_738_2013_thermal_rating.m

Archivo ampacity_01.m

Funciones

function ampacity_01 ()

script para analizar la ampacidad de una linea

Documentación de las funciones

function ampacity_01 ( )

script para analizar la ampacidad de una linea

Parámetros

DATA.NSELECT;

Valores devueltos

DATA.XIPRELOAD;
DATA.TAMB;
DATA.VWIND;
DATA.WINDANG_DEG;
DATA.Cstring;
DATA.D;
DATA.TLO;
DATA.THI;
DATA.RLO;
DATA.RHI;
DATA.EMISS;
DATA.ABSORP;
DATA.CDR_ELEV;
DATA.Z1_DEG;
DATA.CDR_LAT_DEG;
DATA.SUN_TIME;
DATA.NDAY;
DATA.A3;
DATA.TCDRMAX;
DATA.TCDRPRELOAD;
DATA.IORTPRELOAD;
DATA.Bstring;
DATA:TR;

Archivo ieee_738_2013.m

Funciones

function ieee_738_2013 ()
SUBROUTINE FOR CALCULATION.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013 ( )

SUBROUTINE FOR CALCULATION.

Parámetros

DATA.ATCDR;

DATA.TIME;

DATA.NFLAG;

DATA.PIANG;

Valores devueltos

DATA;

Archivo ieee_738_2013_initial_bounds.m

Funciones

function ieee_738_2013_initial_bounds ()
SUBROUTINE GUESS TO DETERMINE INITIAL BOUNDS FOR ITERATION.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_initial_bounds ( )

SUBROUTINE GUESS TO DETERMINE INITIAL BOUNDS FOR ITERATION.

Parámetros

DATA.NFLAG;
DATA.XLO;
DATA.XHI;
DATA.DIV;
DATA.AT;
DATA.TEMP;

Valores devueltos

DATA.XLI;
DATA.XRI;

Archivo ieee_738_2013_find_TCDR.m

Funciones

function ieee_738_2013_find_TCDR ()
SUBROUTINE ITERATES TO FIND CONDUCTOR TEMPERATURE GIVEN THE CONDUCTOR CURRENT.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_find_TCDR ( )

SUBROUTINE ITERATES TO FIND CONDUCTOR TEMPERATURE GIVEN THE CONDUCTOR CURRENT.

Parámetros

DATA;
DATA.NFLAG;
DATA.TCDR;
DATA.XISTEP;
DATA.TCDRPRELOAD;
DATA.TCDRMAX;
DATA.XIDUMMY;
DATA.TR;
DATA.X;

Valores devueltos

DATA.TEMP;

Archivo ieee_738_2013_input.m

Funciones

function ieee_738_2013_input ()
SUBROUTINE TO ENTER INPUT DATA.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_input ( )

SUBROUTINE TO ENTER INPUT DATA.

Parámetros

DATA;
DATA.Fstring;
DATA.CaseName;
DATA.NSELECT;

Valores devueltos

DATA.XIPRELOAD;
DATA.TAMB;
DATA.VWIND;
DATA.WINDANG_DEG;
DATA.Cstring;
DATA.D;
DATA.TLO;
DATA.THI;
DATA.RLO;
DATA.RHI;
DATA.EMISS;
DATA.ABSORP;
DATA.CDR_ELEV;
DATA.Z1_DEG;
DATA.CDR_LAT_DEG;
DATA.SUN_TIME;
DATA.NDAY;
DATA.A3;
DATA.TCDRMAX;
DATA.TCDRPRELOAD;
DATA.IORTPRELOAD;
DATA.XISTEP;
DATA.SORM;
DATA.TT;
DATA.DELTIME;
DATA.HNH;
DATA.HEATOUT;
DATA.HEATCORE;
DATA.HEATCAP;

Asi para la estructura “ieee_738_2013_input” al introducir el nombre de un fichero con los datos necesarios para su ejecucion este devuelve los siguientes resultados:

Fstring: 'CASE1CONDOR.txt'
CaseName: 'Input File - Steady State Conductor Temperature Calculation - SI Units'
NSELECT: 1
XIPRELOAD: 1000
TAMB: 40
VWIND: 0.6100
WINDANG_DEG: 90
Cstring: '454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR'
D: 27.7200
TLO: 20
THI: 75
RLO: 7.2310e-05
RHI: 7.5580e-05
EMISS: 0.5000
ABSORP: 0.5000
CDR_ELEV: 0
Z1_DEG: 45
CDR_LAT_DEG: 43
SUN_TIME: 12
NDAY: 161
A3: 0
TCDRMAX: 1000

Archivo ieee_738_2013_muller.m

Funciones

function ieee_738_2013_mueller ()
SUBROUTINE RTMI MULLER-S ITERATION METHOD.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_muller ( )

SUBROUTINE RTMI MULLER-S ITERATION METHOD.

Parámetros

DATA;
DATA.XHI;
DATA.XLO ;
DATA.TEMP;
DATA.IEND;

Valores devueltos

DATA.XR;
DATA.FR;
DATA.XL;
DATA.FL;

Archivo ieee_738_2013_output.m

Funciones

function ieee_738_2013_output ()
SUBROUTINE TO SHOW THE OUTPUT VALUES.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_output ( )

SUBROUTINE TO SHOW THE OUTPUT VALUES.
Parámetros

DATA;
DATA.NSELECT;
DATA.IORTPRELOAD;
DATA.HNH;
DATA.SORM;
DATA.XIPRELOAD;
DATA.TAMB;
DATA.VWIND;
DATA.WINDANG_DEG;
DATA.Cstring;
DATA.D;
DATA.TLO;
DATA.THI;
DATA.RLO;
DATA.RHI;
DATA.EMISS;
DATA.ABSORP;
DATA.CDR_ELEV;
DATA.Z1_DEG;
DATA.CDR_LAT_DEG;
DATA.SUN_TIME;
DATA.NDAY;
DATA.A3;
DATA.TCDRMAX;
DATA.TCDRPRELOAD;
DATA.TT;
DATA.XISTEP;
DATA.DELTIME;
DATA.HEATOUT;
DATA.HEATCORE;
DATA.HEATCAP;
DATA.QS;
DATA.QR;
DATA.QC;
DATA.Bstring;
DATA.TR;
DATA.ATCDR;
DATA.KTIMEMAX;
DATA.FLAG;
DATA.TIME;

En el caso de la función “ieee_738_2013_output” es necesaria la ejecución de todo el programa ya que esta función nos muestra todos los valores de salida de la ejecución completa del programa.

IEEE STD 738-2013 METHOD OF CALCULATION

The conductor is a 454.5 MM2 CONDOR 54/7 ACSR
Air temperature = 40 ºC
Wind speed = 0.61 m/s
The angle between wind and conductor is = 90 DEG
The conductor is = 0 m above sea level
45 DEG from North; at a latitude of 43 DEG
The sun time is = 12 hours & The atmosphere is CLEAR
The conductor diameter is = 27.72 mm
The conductor resistance is = 0.07231 ohms/km at 20 ºC
and 0.07558 ohms/km at 75 ºC
The Coef. of emissivity is = 0.5 & Coef. of absorptivity is = 0.5
Solar Heat input is = 13.7392 W/m
Radiation cooling is = 6.3464 W/m
Convective cooling is = 26.0521 W/m
Given a constant current of = 500 A
The conductor temperature is = 59.1436 ºC

Archivo ieee_738_2013_solar.m

Funciones

function ieee_738_2013_solar ()
SUBROUTINE TO CALCULATE CONDUCTOR SOLAR HEAT GAIN (QS)

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_solar ( )

SUBROUTINE TO CALCULATE CONDUCTOR SOLAR HEAT GAIN (QS)

Parámetros

DATA;
DATA.SUN_TIME;
DATA.NDAY;
DATA.CDR_LAT_DEG;
DATA.A3;

Valores devueltos

DATA.Bstring;
DATA.QS;

En este caso al dotar a la función de los valores de día del año, hora y la desviación en la dirección del conductor así como un valor 0 o 1 que determina si nos encontramos en una zona de aire limpio o una zona industrial, obtenemos la ganancia de potencia obtenida debido al efecto solar.

Para el día 100 a las 12 horas:
Con unas condiciones de dirección del conductor 45º y en una zona INDUSTRIAL.
La ganancia debida al efecto solar será 9.7406 W/m.

Archivo ieee_738_2013_starting_ci.m

Funciones

function ieee_738_2013_starting_ci ()
SUBROUTINE TO CALCULATE STARTING VALUE FOR CURRENT ITERATION BY ASSUMING ADIABATIC HEATING DURING TIME TT.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_starting_ci ( )

SUBROUTINE TO CALCULATE STARTING VALUE FOR CURRENT ITERATION BY ASSUMING ADIABATIC HEATING DURING TIME TT.

Parámetros

DATA.TCDRMAX;
DATA.TAMB;
DATA.TT;
DATA.HEATOUT;
DATA.HEATCORE;
DATA.W4;
DATA.TCDRPRELOAD;

Valores devueltos

DATA.NFLAG;
DATA.AT;
DATA.TCDR;
DATA.HEATCAP;

Archivo ieee_738_2013_thermal_rating.m

Funciones

function ieee_738_2013_thermal_rating ()
SUBROUTINE T0 CALCULATE THERMAL RATING GIVEN A CDR TEMP (TCDR) AND CONDUCTOR PARAMETERS AND WEATHER CONDITIONS.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_thermal_rating ( )

SUBROUTINE T0 CALCULATE THERMAL RATING GIVEN A CDR TEMP (TCDR) AND CONDUCTOR PARAMETERS AND WEATHER
CONDITIONS.

Parámetros

DATA;

DATA.TCDR;

DATA.TAMB;

DATA.EMISS;

DATA.D;

DATA.CDR_ELEV;

DATA.VWIND;

DATA.YC;

DATA.QS;

Valores devueltos

DATA.TR;

Para el caso de la función "ieee_738_2013_thermal_rating" que nos permite obtener la temperatura límite para una determinada corriente del conductor son necesarios los valores de tempera del conductor, temperatura ambiente, emisividad, diámetro del conductor, así como la elevación del conductor, la velocidad del viento y la ganancia de potencia debido al efecto solar.

Las pérdidas por calor=34.6733W/m
El valor de TR=44.8336 A

Archivo ieee_738_2013_thermal.m

Funciones

function ieee_738_2013_thermal ()
SUBROUTINE TO CALCULATE THERM COEF OF RAC & HEATCAP & WIND CORRECTION.

Documentación de las funciones

function ieee_738_2013_thermal ( )

SUBROUTINE TO CALCULATE THERM COEF OF RAC & HEATCAP & WIND CORRECTION.

Parámetros

DATA;
DATA.RHI;
DATA.RLO;
DATA.THI;
DATA.TLO;
DATA.WINDANG_DEG;

Valores devueltos

DATA.YC;

En esta función obtenemos el coeficiente térmico de alterna y el factor corrector debido a la no perpendicularidad del viento respecto a la dirección del conductor mediante los datos de resistencia y temperatura así como el ángulo de desviación entre viento y dirección del conductor.

El coeficiente térmico de la resistencia de alterna= 7.0876e-05

El factor corrector por no perpendicularidad del viento = 1