

Simulación de un sistema de cables de potencia subterráneo usando ansys 11.0

Simulation of an underground power cable system using ansys 11.0

Vielma, Giovanni; Muñoz, Jesús* y Hernández, Jean Carlos

Post-grado EMMA-I, Grupo de Termofluidodinámica, Facultad de Ingeniería,

Universidad de Los Andes

Mérida 5101, Venezuela

*jesusm@ula.ve

Resumen

El objetivo de este trabajo, es la simulación para obtener la distribución de temperaturas de un sistema de cables que transportan corriente eléctrica en ambientes subterráneos, los cuales son considerados ambientes desfavorables desde el punto de vista térmico, debido a los valores significativos de potencia calorífica que puede ser liberada, lo que trae como consecuencia temperaturas que pueden sobrepasar los valores límite establecidos por los materiales que conforman dichos cables pudiéndose producir fallas en el sistema de transporte de corriente, esto adicionalmente al hecho de que a los cables de potencia operando en esta condición se le tendrán que ajustar sus condiciones nominales de corriente para garantizar de esta forma que el daño inminente no ocurra. Por lo tanto, para estudiar el problema se pretende hacer una simulación térmica utilizando un código computacional, ANSYS 11.0, de una instalación estándar de un banco de nueve cables subterráneos, bajo ciertas condiciones establecidas. La distribución de temperaturas obtenida muestra el cable en la posición más desfavorable en el que se alcanza la mayor temperatura, así como, la distribución de la misma en los cables circundantes del modelo considerado.

Palabras clave: Simulación, cables subterráneos, temperatura, transporte eléctrico, ANSYS.

Abstract

The aim of this work is the simulation of an underground power cable system to obtain the temperatures profile of a typical configuration. The underground environment is considered unfavorable from a thermal point of view, due to the significant values of calorific power that can be dissipated, which results in temperatures that can exceed the limit values imposed by the cable material. The temperature increment may produce faults in the current transport system, which is additional to the fact that power cables that operate under such a condition, their nominal current values would have to be adjusted to avoid a imminent path to failure. Therefore, to study the problem, the paper presents in detail a thermal simulation using a computational code developed on ANSYS 11.0, of a standard installation of nine wires underground system, under certain established conditions. The temperatures distribution obtained shows the cable in which the highest temperature is reached, as well as, the distribution of the same one in the surrounding wires of the considered model.

Key words: Simulation, underground wires, temperature, electric power, ANSYS.

1 Introducción

El término capacidad de corriente se define como la cantidad máxima de corriente que un cable puede transmitir antes de sufrir deterioro inmediato o progresivo, también se describe como índice de corriente o capacidad descarga de corriente.

Los cálculos de capacidad de corriente de cables eléc-

tricos requieren la solución de las ecuaciones de transferencia de calor, que definen una relación funcional entre la corriente del conductor y la temperatura en el cable y en sus alrededores.

Las dos tareas más importantes en los cálculos de capacidad de corriente de cable son la determinación de la temperatura del conductor para una carga de corriente dada, o por el contrario, la determinación de la carga tolerable

actual para una temperatura del conductor dado. Para llevar a cabo estas tareas, el calor generado en el cable, la velocidad de su disipación lejos del conductor para un material conductor dado y la carga dada deben ser calculados. La capacidad del medio circundante para disipar el calor juega un papel muy importante en estas determinaciones, y varía ampliamente debido a varios factores, tales como la composición del suelo, el contenido de humedad, la temperatura ambiente, y las condiciones de viento. El calor se transfiere a través del cable y sus alrededores de varias maneras.

La corriente que circula por el cable conductor genera calor, el cual se disipa a través del aislamiento, la envoltura de metal, y los cubrimientos del cable hacia el medio circundante. La capacidad de corriente del cable depende principalmente de la eficiencia de este proceso de disipación y los límites impuestos a la temperatura de aislamiento. Para comprender la naturaleza del proceso de disipación de calor, se deben utilizar las correspondientes ecuaciones de transferencia de calor.

En este trabajo se quiere hacer una simulación que permita obtener la distribución de temperaturas de un sistema de cables que transportan corriente eléctrica en un ambiente subterráneo bajo condiciones específicas, éste tipo de ambiente es considerado desfavorable desde el punto de vista térmico, debido a los valores significativos de potencia calorífica que puede ser liberada, trayendo como consecuencia temperaturas que pueden sobrepasar los valores límite establecidos por los materiales que conforma el sistema de cables, pudiéndose producir fallas en el sistema de transporte de corriente. Para estudiar el problema se pretende hacer una simulación térmica utilizando un código computacional, ANSYS 11.0, de una instalación estándar de un banco de nueve cables subterráneos, bajo ciertas condiciones establecidas. En los resultados obtenidos se observa el cable con mayor temperatura, así como, la distribución de la misma en el sistema circundante del modelo considerado. Este tipo de instalaciones tienen una importante aplicación en instalaciones interiores de fuerza motriz y alumbrado, ubicadas en ambientes de distinta naturaleza y con diferentes tipos de canalización. Se usan alambres y cables de cobre con aislamiento tendidos directamente bajo tierra, bandejas o ductos, en minas subterráneas para piques y galerías. Se construyen una gran variedad de conductores de cobre con diferentes características técnicas y condiciones de uso, tanto desnudos como aislados para satisfacer varios requerimientos de uso en diversas condiciones de instalación de cables.

2 Modelo teórico

Se considera un cable bajo tierra ubicado en un terreno homogéneo. En el cable de este tipo, se transfiere el calor por conducción a través de los componentes de cable y el suelo. Dado que la longitud del cable es mucho mayor que su diámetro, se puede hacer caso omiso de los efectos en las extremidades y el problema transferencia de calor puede

formularse en solo dos dimensiones

2.1 Ecuaciones de transferencia de calor

La ecuación diferencial que describe la conducción de calor en el suelo tiene la siguiente forma (IEC 287-1-1, 1994):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + W_{\text{int}} = c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Donde:

ρ es la resistividad térmica del material

$\frac{\partial \theta}{\partial x}$

es el gradiente de temperatura en la dirección x

c es la capacidad térmica volumétrica del material

W_{int} razón de calor generada internamente en el cable o pérdida del dieléctrico.

Para un cable enterrado en la tierra, la Ecuación (1) se resuelve con las condiciones de frontera normalmente especificadas en la superficie de la tierra. Estas condiciones de frontera pueden expresarse en dos diferentes formas. Si la temperatura es conocida a lo largo de una porción de la frontera, entonces:

$$\theta = \theta_B(s) \quad (2)$$

Donde θ_B es la temperatura de la frontera que puede ser una función de la longitud de la superficie s.

Si el calor se gana o se pierde en la frontera debido a convección $h(\theta - \theta_{\text{amb}})$ o un flujo de calor q, entonces:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial n} + q + h(\theta - \theta_{\text{amb}}) = 0 \quad (3)$$

Donde:

n es la dirección de la normal a la superficie de frontera

h es el coeficiente de convección

θ es una temperatura de la frontera (desconocida).

En el cálculo del índice del cable, la temperatura del conductor generalmente es conocida y se busca la máxima de corriente I que fluye en el conductor. Así, cuando la pérdida de calor en un conductor de resistencia eléctrica R es la única fuente de energía en el cable, se tiene la siguiente ecuación para el cálculo de la razón de calor generada internamente en el cable:

$$W_{\text{int}} = I^2 R \quad (4)$$

En este caso, la Ecuación (4) y la Ecuación (1) se utili-

zan para obtener la corriente, con las condiciones de frontera especificadas, haciendo un simple balance de potencia, en donde la única incógnita es la corriente, ya que la temperatura del conductor en este caso es conocida.

El reto en la solución de la Ecuación (1) analíticamente se origina principalmente en la dificultad de cálculo de la distribución de la temperatura en el suelo que rodea el cable. Una solución analítica se puede obtener cuando un cable se representa como una línea fuente colocada en unos alrededores infinitos y homogéneos. Dado que este no es un supuesto práctico para instalaciones de cable, otro supuesto es de uso frecuente, se considera la superficie de la Tierra isotérmica. (Anders, 2005) señala que en los casos prácticos, la profundidad de enterramiento de los cables es del orden de diez veces su diámetro externo, y para el rango de temperatura habitual alcanzado por esos cables, la hipótesis de una superficie de la tierra isotérmica es razonable. En los casos en que esta hipótesis no es aplicable, es decir, para grandes diámetros de cable y cables ubicados cerca de la superficie de la tierra, se hace una corrección en la ecuación de solución al aplicar un método numérico, lo cual puede estudiarse con más detalle en la referencia señalada.

3 Método numérico

La ecuación (1) se puede resolver analíticamente, con algunos supuestos simplificadores, o numéricamente. Un ejemplo simplificado sería, usando la ecuación (4) como término de generación de calor e igualándolo con el término convectivo, podríamos obtener la temperatura superficial del conductor en condiciones de estado permanente. Los métodos numéricos requieren aproximaciones iterativas para encontrar la capacidad de corriente del cable y proporcionan una mayor flexibilidad en el análisis de complejos sistemas de cables y permiten una representación de las condiciones de contorno más realista. En la práctica, los métodos analíticos han encontrado una aplicación mucho más amplia que los métodos numéricos. Hay varias razones para esta situación. Probablemente la más importante es histórica: los ingenieros de cable han estado utilizando soluciones analíticas basadas en el formalismo encontrado en la bibliografía (Neher y col., 1957) o la publicación (IEC 60287, 1994) por un largo tiempo. Los cálculos para un sistema de cables simple a menudo se puede realizar usando lápiz y papel o con la ayuda de una calculadora de mano. Los métodos numéricos, por otro lado, exigen amplia manipulación de matrices grandes y sólo han llegado a ser popular con la llegada de potentes computadoras.

El método del elemento finito (FEM) se ha vuelto básico para predecir y simular el comportamiento físico de sistemas de ingeniería complejos. Los programas comerciales de análisis del elemento finito (FEA) han ganado común aceptación entre ingenieros en la industria e investigadores en las universidades y los laboratorios gubernamentales.

La base de FEA, originalmente introducido por (Turner y col., 1956) depende de la descomposición del dominio

en un número finito de subdominios (los elementos) para los que la solución aproximada sistemática se construye aplicando los métodos variacionales o peso residual, para detalles, (Madenci y col., 2006). FEA reduce el problema a un número finito de incógnitas dividiendo el dominio en elementos y expresando las variables de campo desconocidas en término de las funciones aproximadas asumidas dentro de cada elemento. Estas funciones (también llamadas funciones de interpolación) se definen en términos de los valores de las variables de campo en puntos específicos, llamados nodos. Los nodos normalmente se localizan a lo largo de las fronteras del elemento, y ellos conectan los elementos adyacentes.

La habilidad para discretizar los dominios irregulares con elementos finitos hace del método una valiosa y práctica herramienta de análisis para la solución de problemas de valor propio, inicial, y en la frontera que aparecen en varias disciplinas de la ingeniería.

El programa de ANSYS, Inc es un software de simulación ingenieril y es una poderosa herramienta de análisis multipropósito basado en el método de elementos finitos, está disponible comercialmente y puede usarse en una amplia variedad de disciplinas de ingeniería, bajo la teoría del elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos para el desarrollo típico de una simulación: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están previstos de una interfaz gráfica.

3.1 Pre-procesamiento

En esta etapa se establece el modelo, se construye la geometría, se definen las propiedades y se genera el mallado. El objetivo de esta investigación es utilizar el método de elementos finitos para obtener la distribución de temperaturas en un sistema de cables enterrados colocados en un relleno, para esto se realizó una simulación utilizando la versión 11.0 del software comercial ANSYS.

Con la finalidad de cumplir con el objetivo propuesto, se consideró un arreglo de nueve cables, con las dimensiones especificadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos geométricos y físicos de los cables

Elemento	Diámetro externo en mm	Resistividad Térmica (mK/W)
Ducto de aceite	18	6
Conductor de cobre	39.3	0.00268
Pantalla de papel dieléctrico	82.75	5
Envoltura de plomo	89.75	0.02857
Cubierta protectora de polietileno	100	3.5

La fig. 1 muestra un cable típico de esta configuración. Los cables se colocaron en un relleno de 600 x 600 mm ubicado a una profundidad de 500 mm de la superficie del suelo, la Fig. 2 muestra las dimensiones del relleno, la profundidad a la que es colocada y las separaciones entre cables para esta configuración. En (Mushamaliwa y col., 1988) se considera que la conductividad térmica es igual a 3W/mK para el suelo circundante y 1W/mK para el relleno

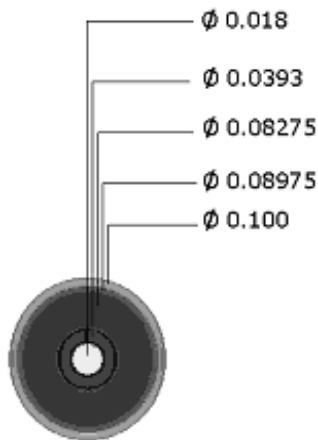


Fig. 1. Dimensiones del cable (metros)

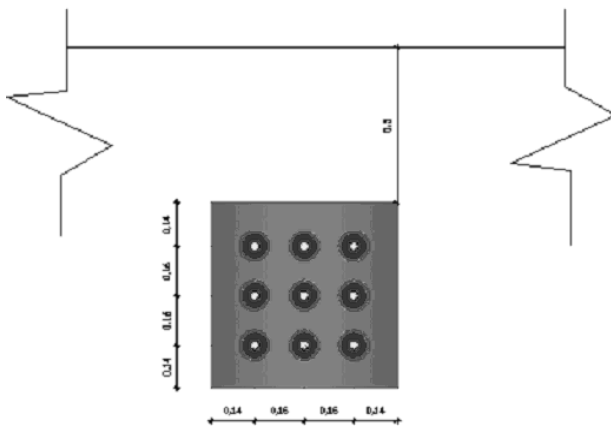


Fig. 2. Configuración del modelo de forma cuadrada. Dimensiones en milímetros

El software ANSYS, requiere que el calor generado sea expresado en términos de potencia por unidad de volumen, debido a que los valores dados en la tabla 2, tienen unidades de W/m. Por esta razón se debe dividir entre el área respectiva.

Tabla 2. Pérdidas de calor en W/m, para un índice de corriente $I=114$ A para un sistema de tres capas

Conductor	0.34
Dieléctrico	10.66
Envoltura de plomo	1.66

Una vez definidos todos los parámetros a utilizar se procedió a construir el modelo, en la fase de pre-procesamiento, primero, se definieron las unidades, las propiedades de los diferentes materiales, el tipo de elemento a utilizar, luego, se construyó la geometría, fig. 3. En la discretización de la geometría se utilizó el elemento PLANE35, este es un elemento triangular de 6 nodos. El elemento tiene un grado de libertad, la temperatura, en cada nodo. Este elemento es aplicable a análisis térmico en estado estable y transitorio en 2-D, véanse las fig. 4 y 5, finalmente se aplicaron las condiciones de frontera.

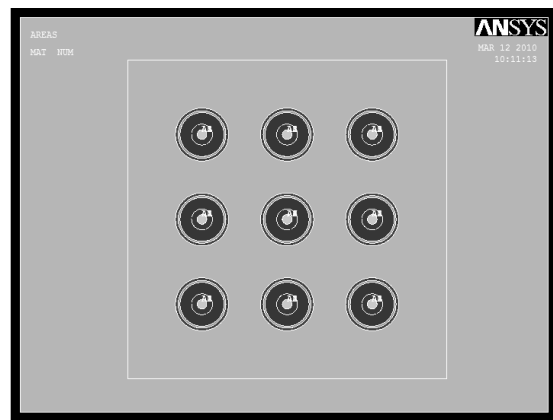


Fig. 3. Geometría de sistema de nueve cables subterráneos

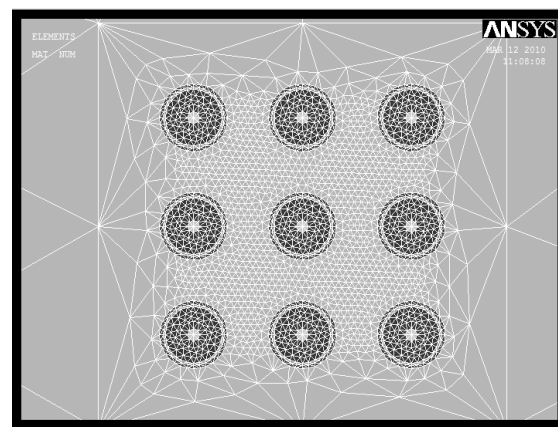


Fig. 4. Discretización de la geometría de sistema de nueve cables subterráneos

3.2 Procesamiento

En la fase de procesamiento se aplican las condiciones de frontera para el modelo, éstas son: se considera que la superficie del suelo es isotérmica y con una temperatura igual a 300 K, los otros límites son adiabáticos, en esta etapa se define el tipo de análisis de transferencia de calor. El software resuelve la Ecuación (1), que no es otra que la ecuación de energía en su forma general, en este caso se resuelve en estado estable y aplicándole las condiciones del problema que se está estudiando las cuales han sido definidas en el código y se obtiene la solución.

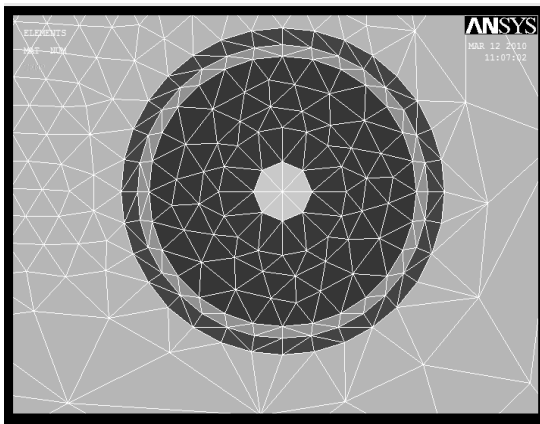


Fig. 5. Detalle de la discretización de un cable

3.3 Post-procesamiento

En la última etapa, la de post-procesamiento se visualiza los resultados a través de una gráfica de la distribución de temperaturas para los diferentes elementos que conforman el modelo. Esto se ilustra en las fig. 6 y 7. En estas figuras se puede observar la variación de temperatura desde el valor mínimo de 300 K, hasta un valor máximo de 333.874 K marcadas en zonas de color rojo.

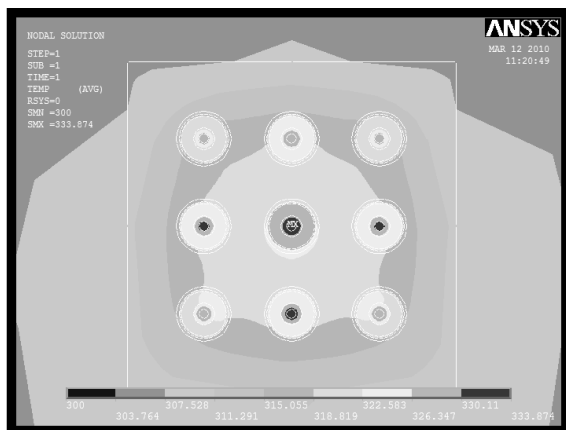


Fig. 6. Distribución de temperaturas del modelo de sistema de nueve cables subterráneos

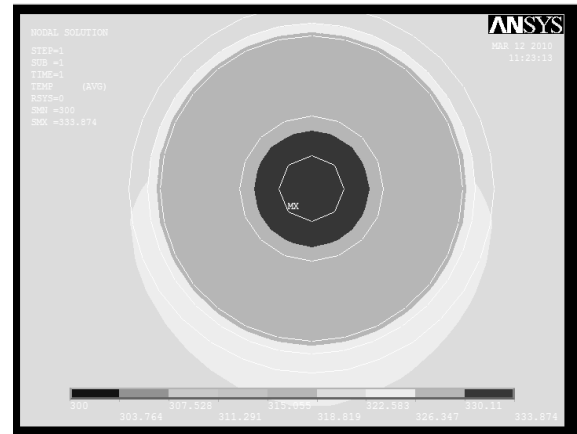


Fig. 7. Distribución de temperaturas en el cable central de la configuración

4 Conclusiones

La temperatura máxima en la configuración es de 333,874 K, el cable sometido a mayores temperaturas es el que está colocado en la posición central del arreglo, esto es explicable por el hecho de que este cable es el que tiene menos posibilidad de expulsar el calor al medio circundante debido a que lo rodean los otros ocho cables. Debido a que el calor fluye en la dirección de temperatura decreciente, el cable central puede transferir mayor cantidad de calor hacia la parte superior y contrariamente hacia la zona inferior, lo cual tiende a aumentar la temperatura en esta zona.

Se puede observar que para los valores de índice de corriente y condiciones geométricas del problema planteado no se alcanza un valor elevado de temperatura que pueda provocar condiciones críticas de funcionamiento y colapso del sistema.

Las temperaturas obtenidas para los diferentes cables de este arreglo, son bastante similares a las que se obtienen en el trabajo de (Mushamalirwa y col., 1988), según se podría observar en esta referencia. Lo cual valida los resultados obtenidos.

El desarrollo de esta investigación crea la posibilidad de efectuar diversos estudios en el área de cables subterráneos, debido a las potencialidades de ANSYS y del Método de los Elementos Finitos.

5 Recomendaciones

En este trabajo para simplificar el modelo se considero la condición de frontera isotérmica en la superficie de la tierra. Debido a que la superficie de la tierra normalmente no es isotérmica, se recomienda en futuras investigaciones considerar una frontera convectiva lo cual proporciona una representación mucho mejor de la situación real, esto se puede hacer en el código ANSYS en el momento de definir las condiciones de frontera, al seleccionar una condición convectiva en la frontera superior, con un valor apropiado del coeficiente convectivo, así como de la temperatura am-

biente.

Realizar una simulación donde se estudie el caso transitorio.

En el trabajo (Mushamalirwa y col., 1988), los cables se colocan en ductos de 120 mm de diámetro, entre los cables y estos ductos se genera un espacio que está lleno de aire, para este trabajo no se tomo en consideración esta condición. Se recomienda hacer un estudio en el futuro, analizando los efectos de esto sobre la distribución de temperaturas en el cable.

Estudiar la variación de las temperaturas en el cable con respecto a las dimensiones del relleno, la profundidad a la que es colocado y su material.

Referencias

Anders G J, 2005, Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

IEC 287-1-1, 1994, Electric Cables Calculation of the Current Rating-part I: Current Rating Equations (100% Load Factor) and Calculations of Losses-Section 1: General, IEC Publication 60287.

IEC Standard 60287, Part 2-1, 1994, Calculation of thermal resistances.

Madenci E, Guven I, 2006, The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS, Springer Science+Business Media, LLC.

Mushamalirwa D, Gerday N y Steffens, J.C, 1988, A 2-D Finite Element Mesh Generator for Thermal Analysis of Underground Power Cables, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 1.

Neher J H, and McGrath M H, 1957, The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems, AIEE Transactions, Vol. 76, Part 3, pp. 752-772.

Turner M J, Clough R W, Martin H C, y Topp L J, 1956, Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures, Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 23, pp. 805-823.

Das S, Knapp R H and Shimabukuro T A, Finite Element Analysis - A New Tool for Cable Design. Proc 50th Intl. Wire and Cable Symposium, Paper 11-4, Lake Buena Vista, FL, Nov. 12-15, 2001

Recibido: 03 de febrero de 2011

Revisado: 10 de noviembre de 2011