

ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD EN CONDUCTORES DESNUDOS

IVÁN ALBERTO SANÍN RINCÓN

*Ingeniero Electricista, Universidad Industrial de Santander
Profesional de Interconexión Eléctrica S.A.
iasanin@isa.com.co*

GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA

*Ingeniero Electricista, Especialista Universitario en Técnicas de Investigación Tecnológica,
Doctor Ingeniero Industrial.
Profesor de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Universidad Industrial de Santander.
gaby@uis.edu.co*

*Fecha de Recibido: 23/01/2009
Fecha de Aprobación: 15/07/2009*

RESUMEN

En este artículo se presentan las principales consideraciones, logros y aportes obtenidos de los análisis teóricos y experimentales de las metodologías del IEEE y el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en conductores desnudos y su aplicación al sector eléctrico colombiano.

PALABRAS CLAVE: Líneas de transmisión, capacidad de transporte, límite térmico, equilibrio térmico, Ampacidad.

ABSTRACT

In this paper, the authors present the most important considerations, achievements and contributions that they achieve through the experimental and theoretic analysis that they did about the methodologies to estimate the Ampacity Rating in Overhead Conductors propose to IEEE and CIGRÉ investigation groups. Additionally the authors present an analysis about the application of these methodologies in the Colombian's electrical service.

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

1. INTRODUCCIÓN

La planeación y operación de un sistema de potencia debe garantizar el funcionamiento óptimo, económico y eficiente de los recursos disponibles buscando que éste responda de manera efectiva a las exigencias de operación normal o de contingencia que se presenten, garantizando así, la continuidad del suministro eléctrico en el territorio nacional. Para ello, es necesario que cada línea de transmisión tenga un margen de utilización o cargabilidad asociado. Dicho margen permitirá operar la línea de forma segura, conservando las características mecánicas del conductor, y respetando los criterios de seguridad que establece la ley. Por esta razón, en la etapa

de diseño de una línea de transmisión, es importante seleccionar el conductor considerando la ampacidad que está asociada a cada una de las alternativas propuestas para el proyecto, de tal forma, que se alcance un alto grado de optimización operativa y económica.

En la actualidad son reconocidas internacionalmente dos metodologías para el cálculo de la ampacidad: “El Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors” del IEEE y “The Thermal Behavior of Overhead Conductors” del CIGRÉ. Aunque ambas se fundamentan en el mismo principio físico (equilibrio térmico), al aplicarlas a un mismo caso de estudio, los resultados difieren. De

aquí surge la necesidad de analizarlas y establecer las diferencias y compatibilidades que presentan ante diversas condiciones atmosféricas y geográficas.

El trabajo presentado en esta publicación presentan los resultados más relevantes de la revisión de las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad, basándose en el análisis del equilibrio térmico que debe existir en el entorno de una línea de transmisión, identificando las variables ambientales que influyen en el balance térmico y estableciendo si existe o no alguna restricción en los rangos de operación para cada una de ellas, determinando adicionalmente, bajo qué condiciones las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ son válidas. Así mismo, este análisis se complementa con la comparación directa de las metodologías estudiadas, teniendo en cuenta un enfoque práctico que evidencia el comportamiento de cada una ante diferentes condiciones de aplicación en el territorio colombiano. El trabajo fue desarrollado como un proyecto de grado que se gestó como producto de una práctica industrial previa que realizó el Ingeniero Sanín en Interconexión Eléctrica S.A. con la supervisión de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander.

2. COMPARACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS PARA EL CÁLCULO DE LA AMPACIDAD DESARROLLADAS POR EL IEEE Y EL CIGRÉ

Las metodologías para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión desarrolladas por el IEEE y el CIGRÉ [1][2][3] modelan el balance térmico a partir de los factores de calentamiento por efecto solar, calentamiento por efecto Joule, refrigeración por convección y radiación. Sin embargo, el CIGRÉ incluye en su ecuación el calentamiento por efecto magnético, el calentamiento por efecto corona y la refrigeración por evaporación. Cada uno de estos términos está definido teóricamente dentro de la metodología del CIGRÉ, pero son descartados en el proceso de cálculo porque su influencia en el análisis es mínimo y algunos efectos térmicos se compensan de forma natural, como es el caso del calentamiento por efecto corona, el cual, generalmente ocurre en condiciones de fuertes precipitaciones y bajas temperaturas, lo que anula significativamente su efecto sobre el comportamiento térmico de las líneas de transmisión en Colombia. Así mismo, existe diferencia entre los modelos

matemáticos utilizados para el cálculo de los factores de calentamiento y refrigeración, pues, cada metodología se basa en aproximaciones y estudios publicados por diferentes autores.

El modelo matemático utilizado para el balance térmico por las dos metodologías es el establecido en la ecuación (1) y considera tanto factores de calentamiento como de refrigeración.

$$P_j + P_m + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (1)$$

Los parámetros de esta ecuación son los siguientes:

- P_j : Calentamiento por efecto joule (W/m)
- P_m : Calentamiento por efecto magnético considerado por el CIGRÉ (W/m)
- P_s : Calentamiento por insolación (W/m)
- P_i : Calentamiento por efecto corona considerado por el CIGRÉ (W/m)
- P_c : Refrigeración por convección (W/m)
- P_r : Refrigeración por radiación (W/m)
- P_w : Refrigeración por evaporación - Considerado por el CIGRÉ (W/m)

Una vez establecido el modelo matemático utilizado por las dos metodologías, a continuación se presentan las principales diferencias existentes entre ellas.

2.1 Calentamiento por efecto solar

El calentamiento por insolación, es un fenómeno que depende fundamentalmente de la posición del sol con respecto a la línea de transmisión y de la intensidad solar presente. Las diferencias asociadas a estos parámetros son:

2.1.1 Posición solar.

Este parámetro es función de la altitud y el acimut solar, los cuales, a su vez dependen del día del año para el cual se desea realizar el cálculo. Así mismo, la posición solar está relacionada con el ángulo horario del sol, que define la hora del día para la cual se desea realizar el cálculo, y la latitud geográfica de la zona donde se encuentra ubicada la línea de transmisión.

Las metodologías analizadas (IEEE y CIGRÉ) desarrollan modelos matemáticos para el cálculo de la altitud y el acimut solar. Estos son válidos para ambos hemisferios terrestres y permiten obtener los parámetros para cualquier día del año. La diferencia entre los valores calculados por cada metodología no supera el

1%. En el caso del acimut solar, se observa que entre las metodologías existe una clara diferencia entorno al punto de referencia para el giro angular, de tal forma que el CIGRÉ asume ángulo positivo en dirección Sur a Oeste y el IEEE de Sur a Este.

2.1.2 Intensidad solar.

Para el cálculo de este parámetro el CIGRÉ presenta dos métodos, el primero de ellos considera la radiaciones solares directa, difusa y el albedo (reflectancia) del terreno. El segundo se centra, al igual que el método del IEEE, en la radiación solar global incidente. La metodología del IEEE desarrolla el modelo matemático para el cálculo de la radiación solar global considerando el tipo de atmósfera existente en la zona, mientras que el método del CIGRÉ presenta el modelo matemático para el cálculo de la radiación solar directa y no presenta modelo alguno para estimar las radiaciones global y difusa. Así mismo, el CIGRÉ considera el efecto del terreno, proponiendo algunos valores característicos del albedo para al agua, los bosques, las áreas urbanas, el lodo, el pasto, los cultivos, la arena, el hielo y la nieve.

Al calcular con ambas metodologías el calentamiento por insolación, se evidencia que los resultados obtenidos con la metodología del CIGRÉ (considerando únicamente la radiación solar global) son más altos en un porcentaje cercano al 3% que los resultados generados con la metodología del IEEE. Por otro lado, al aplicar el método opcional de radiación solar directa y difusa del CIGRÉ se obtienen valores superiores hasta en un 47% a los calculados con el IEEE. Esto se debe al alto grado de incertidumbre existente en el cálculo de la radiación solar difusa y a la ausencia de un modelo matemático que permita estimar de forma confiable el efecto que la altura sobre el nivel del mar ejerce en el cálculo de la radiación solar directa.

2.2 Refrigeración por convección

Las dos metodologías analizadas (IEEE y CIGRÉ) consideran el efecto de la convección natural (viento nulo) y forzada (presencia de viento). De tal forma, que seleccionan el mayor valor obtenido y lo aplican a la ecuación de equilibrio térmico. Cabe resaltar que cada metodología desarrolla sus propios modelos matemáticos para estimar los valores de convección y las propiedades del aire que hacen parte del fenómeno, tales como la densidad, la viscosidad y la conductividad térmica. Sin embargo, es importante aclarar que la metodología del CIGRÉ aplica un factor de proporcionalidad constante de 0,42 veces la refrigeración a $\delta = 90^\circ$ cuando el viento

viaja paralelo al conductor y uno de 0,55 cuando la velocidad del viento es menor de 0,5 m/s. Así mismo, recomienda un ángulo de incidencia del viento de $\delta=45^\circ$ para el análisis a bajas velocidades de viento cuando δ es desconocido (ver figura 1). Estas dos últimas consideraciones aplicadas por el CIGRÉ hacen que los valores calculados presenten diferencias del 36 al 46% con respecto a los factores de refrigeración calculados utilizando el método del IEEE (ver figura 2).

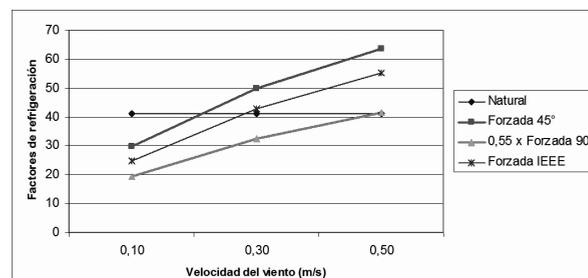


Figura 1. Comparación de los factores de refrigeración por convección forzada referenciados a la convección natural.

Para establecer el efecto del ángulo de incidencia del viento (δ) en la refrigeración natural y forzada para bajas velocidades se realiza el cálculo de los factores de refrigeración por convección considerando $\delta = 0^\circ$, $\delta = 5^\circ$, $\delta = 10^\circ$, $\delta = 30^\circ$, $\delta = 60^\circ$ y $\delta = 90^\circ$. La figura 3 presenta los resultados obtenidos. Se observa que para ángulos menores de 30° los factores de refrigeración mayores son los obtenidos considerando la convección natural, mientras que para los ángulos mayores de 30° estos factores son mayores si se considera la convección forzada. Así mismo, cuando se considera un ángulo de 30° estos factores son similares para los dos tipos de refrigeración, lo cual, minimiza el sobredimensionamiento del cálculo realizado.

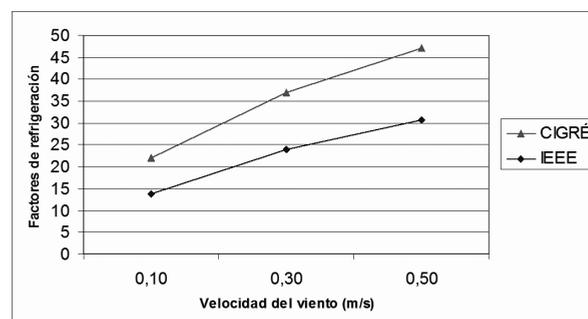


Figura 2. Comparación de los factores de refrigeración por convección forzada.

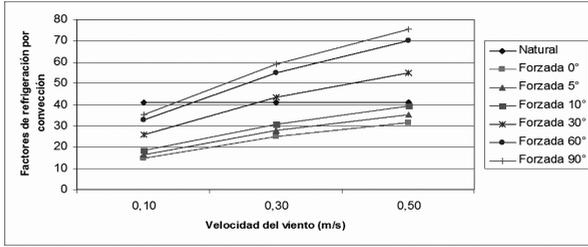


Figura 3. Comparación entre la refrigeración por convección natural y forzada para diferentes ángulos de incidencia del viento.

Finalmente, al aplicar ambos métodos se evidencia una diferencia máxima del 5% para el cálculo de la densidad del aire, 6% para la viscosidad dinámica y menos del 1% para la conductividad térmica. En todos los casos, los valores calculados a través de la metodología del IEEE superan a los valores obtenidos con la metodología del CIGRÉ. Así mismo, al realizar el análisis de la refrigeración por convección se observa que la diferencia en sus resultados varía con base en la altura sobre el nivel del mar y la velocidad del viento. En términos generales, la metodología del CIGRÉ tiende a considerar factores de refrigeración por convección más altos que los calculados por el IEEE y su diferencia aumenta significativamente con la altura (ver figura 4). Por ejemplo, para zonas geográficas a menos de 1000 m se presenta un error máximo del 5%, mientras que a 4000 m éste puede ser hasta del 22%. La tabla 1 resume los máximos errores hallados en la refrigeración por convección como función de la altura sobre el nivel del mar y el ángulo de incidencia del viento. Así mismo, la tabla 2 presenta las velocidades de viento asociadas a dichos errores.

Tabla 1. Máximos errores en el cálculo de la refrigeración por convección.

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

Tabla 2. Velocidades de viento asociadas al máximo error (m/s)

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

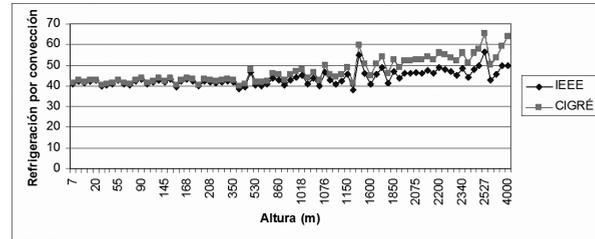


Figura 4. Variación de la refrigeración por convección en función de la altura.

En la tabla 1 se observa que el máximo error tiende a ser independiente de la variación del ángulo de incidencia. La única excepción se presenta para el ángulo de incidencia: $\delta = 0^\circ$ y una altura sobre el nivel del mar menos a mil metros ($H \leq 1000 m$). Esto se debe a que la velocidad del viento asociada al máximo error en dicha zona está en el rango de 1 a 2 m/s, lo cual, hace que la convección forzada sea dominante. Lo anterior, unido al hecho que la metodología del CIGRÉ aplica un índice de proporcionalidad constante de 0,42 veces la refrigeración forzada a $\delta = 90^\circ$ cuando el ángulo de incidencia es $\delta = 0^\circ$, produce un aumento significativo en el factor de refrigeración por convección calculado.

2.3 Refrigeración por radiación

El modelo matemático que ambas metodologías utilizan para el cálculo de la refrigeración por radiación esta basado en la ley de Stefan-Boltzmann y la diferencia existente en los resultados obtenidos es menor del 0,1%.

2.4 Calentamiento por efecto Joule y magnético

Ambas metodologías consideran el calentamiento por efecto Joule dentro de sus modelos matemáticos. Sin embargo, la metodología del CIGRÉ hace una diferenciación en sus ecuaciones para conductores homogéneos y no homogéneos. Esto genera una diferencia menor del 2% en el cálculo de la ampacidad.

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

La ecuación de equilibrio térmico aplicada al cálculo de la capacidad de carga de las líneas de transmisión, está constituida por el modelo matemático de cada uno de los fenómenos que contribuyen a la refrigeración y al calentamiento del conductor. La ecuación (1) es el modelo matemático utilizado por el IEEE y el CIGRÉ para caracterizar el balance térmico¹.

Existe una incertidumbre asociada a la utilización de los modelos matemáticos presentados en ambas metodologías. Para calcularla, se tiene en cuenta la guía de evaluación de incertidumbre o teoría de propagación de errores [4] para establecer las ecuaciones que permiten el modelamiento de su comportamiento en función de las variables meteorológicas, geográficas y operativas que hacen parte del fenómeno.

Los modelos matemáticos desarrollados son función de la incertidumbre δx asociada al equipo de medición utilizado para monitorizar cada uno de los parámetros considerados. Esta se define como:

$$\delta x = \frac{\%E_{Equipo}}{100} \times Valor\ medido \quad (2)$$

Siendo:

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

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

1. Como se describió al inicio de la sección II la metodología del IEEE descarta el calentamiento por efecto magnético, corona y la refrigeración por evaporación.

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

3.1 Refrigeración por convección

Para establecer la incertidumbre asociada al cálculo de la refrigeración por convección se analizan, de forma individual, los modelos matemáticos presentados por las metodologías del IEEE y el CIGRÉ. A continuación se presentan las expresiones matemáticas obtenidas para predecir la incertidumbre asociada a los factores de refrigeración por convección en el cálculo de la ampacidad.

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

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

El modelo matemático presentado para el cálculo de la densidad del aire es función de la altura sobre el nivel

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

Al aplicar en cada una de las ecuaciones presentadas en el Std IEEE 738 la técnica de propagación de errores para un sistema de varias variables [4], se obtiene la expresión matemática para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por convección natural y forzada.

Las ecuaciones (3), (4) y (5) corresponden a la incertidumbre asociada a la convección natural, a la convección forzada con viento leve y a la convección forzada con viento fuerte.

$$\varepsilon(q_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_n}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_n}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_n}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon(q_{c1}) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial V_w} \delta V_w\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c1}}{\partial \mu_f} \delta \mu_f\right)^2 + \dots} \quad (4)$$

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

$$\varepsilon(q_{c2}) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial \rho_f} \delta \rho_f\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial V_w} \delta V_w\right)^2 + \left(\frac{\partial q_{c2}}{\partial \mu_f} \delta \mu_f\right)^2 + \dots} \quad (5)$$

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

Donde:

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

$\varepsilon(q_{c1})$ y $\varepsilon(q_{c2})$: Son las incertidumbres asociadas a la refrigeración por convección forzada con viento leve y fuerte respectivamente.

ρ_f : Densidad del aire kg / m^3

k_f : Conductividad térmica del aire $w / m - ^\circ C$

V_w : Velocidad del viento m/s

k_{angle} : Factor de proporción angular

T_a : Temperatura ambiente $^\circ C$

μ_f : Viscosidad dinámica del aire $Pa - s$

D : Diámetro del conductor mm

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Donde:

$\delta D, \delta \rho_f, \delta V_w, \dots, \delta T_a$: Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para estimar cada uno de los parámetros.

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

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

temperatura promedio $T_{AV} = \frac{(T_a + T_s)}{2}$. Al igual que en la metodología del CIGRÉ no presenta ninguna restricción en el rango de validez de dicha temperatura, presentando como intervalo de valores típicos 0 a 100°C.

A continuación se presenta la expresión matemática obtenida para el cálculo de la incertidumbre asociada a este factor de refrigeración:

$$\varepsilon(P_c) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_c}{\partial \lambda_f} \delta \lambda_f\right)^2 + \left(\frac{\partial P_c}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (6)$$

Donde:

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

λ_f : Conductividad térmica del aire $w/m - ^\circ C$

T_s : Temperatura del conductor $^\circ C$

T_a : Temperatura ambiente $^\circ C$

N_u : Número de Nulset

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

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

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

3.2 Refrigeración por radiación

Para establecer la incertidumbre asociada a los modelos matemáticos utilizados en el cálculo de la refrigeración por radiación se analiza, de forma individual, cada una de las ecuaciones presentadas en las metodologías del IEEE y el CIGRÉ. A continuación se presentan las expresiones matemáticas propuestas para estimar la incertidumbre asociada al cálculo de la refrigeración por radiación en el cálculo de la ampacidad a partir de las ecuaciones propuestas por las dos metodologías analizadas en este trabajo.

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

El modelo matemático desarrollado por el IEEE para el cálculo del factor de refrigeración por radiación es función del diámetro del conductor D , la temperatura ambiente T_a y la emisividad del conductor ε , esta última puede tomar valores entre 0 y 1.

La expresión matemática para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación es:

$$\varepsilon(q_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_r}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial q_r}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (7)$$

Donde:

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

ε : Emisividad del conductor

T_c : Temperatura del conductor $^\circ C$

T_a : Temperatura ambiente $^\circ C$

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

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

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

$\delta D, \delta \varepsilon$ y δT_a : Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para censar cada uno de los parámetros.

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

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

La ecuación matemática obtenida para el cálculo de la incertidumbre asociada a la refrigeración por radiación es:

$$\varepsilon(P_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_r}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_r}{\partial \varepsilon} \delta \varepsilon\right)^2 + \left(\frac{\partial P_r}{\partial T_a} \delta T_a\right)^2} \quad (8)$$

Donde:

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

ε : Emisividad del conductor

T_s : Temperatura del conductor °C

T_a : Temperatura ambiente °C

D : Diámetro del conductor mm

σ_B : Constante de Stefan Boltzmann

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

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

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

$\delta D, \delta \varepsilon$ y δT_a : Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para estimar cada uno de los parámetros.

3.3 Calentamiento por insolación

Para conocer la incertidumbre asociada al cálculo del calentamiento por insolación se analizan, de forma individual, los modelos matemáticos presentados por las metodologías del IEEE y el CIGRÉ. A continuación se presentan los modelos matemáticos obtenidos para predecir la incertidumbre asociada al cálculo de los factores de calentamiento por insolación en el cálculo de la ampacidad.

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

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

La expresión obtenida para el cálculo de la incertidumbre asociada al calentamiento por insolación es:

$$\varepsilon(q_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_s}{\partial \alpha} \delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial q_s}{\partial Q_{SE}} \delta Q_{SE}\right)^2} \quad (9)$$

Donde:

α : Grado de absorción del conductor

Q_{SE} : Radiación solar incidente w/m²

A' : Diámetro efectivo del conductor m

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

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

$\delta \alpha$ y δQ_{SE} : Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para estimar cada uno de los parámetros.

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

El CIGRÉ presenta dos modelos matemáticos para el cálculo del calentamiento por insolación. El primero de ellos es el más utilizado debido a que considera la radiación solar global incidente como un único parámetro, mientras que el segundo modelo matemático considera de forma independiente la radiación solar directa y la difusa, trayendo consigo el problema de obtener dichos parámetros de forma confiable.

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

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

$$\varepsilon(P_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} \delta \alpha_s\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial S} \delta S\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial D} \delta D\right)^2} \quad (10)$$

Donde:

S : Radiación solar w/m^2

α : Grado de absorción del conductor

D : Diámetro del conductor mm

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

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

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

$\delta \alpha_s$, δS y δD : Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para estimar cada uno de los parámetros.

El segundo modelo presentado por el CIGRÉ es función del coeficiente de absorción α_s , del diámetro del conductor D , de la radiación solar directa I_D y de la radiación solar difusa I_d . El cálculo de la incertidumbre asociada a la utilización del segundo modelo se realiza con la siguiente expresión:

$$\varepsilon(P_s) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} \delta \alpha_s\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial D} \delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial I_D} \delta I_D\right)^2 + \left(\frac{\partial P_s}{\partial I_d} \delta I_d\right)^2} \quad (11)$$

Donde:

H_s : Altitud solar

η : Ángulo de incidencia solar

F : Reflectancia

I_D : Radiación solar directa

I_d : Radiación solar difusa

D : Diámetro del conductor mm

$\delta \alpha_s$, δD , δI_D y δI_d : Son las incertidumbres asociadas al equipo de medición utilizado para estimar cada uno de los parámetros.

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

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

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

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

3.4 Incertidumbre asociada al cálculo de la ampacidad utilizando las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ.

El proceso de cálculo de la máxima corriente de carga en estado estable está estructurado de forma secuencial, esto permite aplicar directamente la teoría de propagación de errores [4] para obtener la expresión matemática que permita conocer y predecir la incertidumbre presente en el análisis realizado.

Debido a que las metodologías del IEEE y el CIGRÉ consideran el mismo conjunto de factores de calentamiento y refrigeración en la ecuación de equilibrio térmico² (ver ecuación (1)), el modelo matemático desarrollado para estimar la incertidumbre asociada al cálculo de la ampacidad se aplica en ambas. Sin embargo, la incertidumbre asociada a cada uno de los factores de refrigeración y calentamiento se rige por los modelos matemáticos presentados en las secciones A, B y C.

$$I = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R}} \quad (12)$$

La ecuación para el cálculo de la incertidumbre es la siguiente:

$$\varepsilon(I) = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial P_c} \varepsilon(P_c)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial P_r} \varepsilon(P_r)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial P_s} \varepsilon(P_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R} \varepsilon(R)\right)^2} \quad (13)$$

Donde:

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

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

² El CIGRÉ considera solo de forma teórica los factores de calentamiento por efecto magnético y por fenómeno corona, así como la refrigeración por evaporación.

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

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

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

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

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

$\varepsilon(P_s)$: Es la incertidumbre asociada al calentamiento por efecto solar.

$\varepsilon(R)$: Es la incertidumbre asociada a la resistencia eléctrica del conductor.

Con el ánimo de verificar la validez de los modelos matemáticos desarrollados para la predicción de la incertidumbre asociada al cálculo de la ampacidad, se aplican las metodologías del IEEE y el CIGRÉ a 20 casos de estudio a lo largo del territorio colombiano. Así mismo, se asume que el error real es la diferencia existente entre el resultado obtenido a través de la metodología del IEEE y el CIGRÉ. Por otro lado, el error predicho se obtiene a través de la ecuación (13). La tabla 3 presenta las zonas geográficas consideradas, el resultado obtenido con cada metodología, el error predicho y el real. La información meteorológica utilizada para el análisis fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM.

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

3.5 Aplicabilidad de los modelos matemáticos ante diferentes zonas geográficas

Los modelos matemáticos presentados en las metodologías del IEEE y el CIGRÉ son función de los parámetros geográficos y eléctricos considerados en el caso de estudio, así como de las características del conductor. La aplicabilidad de dichas metodologías a un territorio específico depende solo de las condiciones geográficas de la zona de ubicación de la línea de transmisión. Entorno a estos parámetros, ambas metodologías no presentan ninguna restricción³, pues,

son aplicables a cualquier latitud geográfica (norte ó sur), condición climática, altura sobre el nivel del mar y hora del día. Es importante tener en cuenta que la efectividad en la aplicación de las metodologías depende fundamentalmente de las condiciones meteorológicas que se consideren en el estudio [6].

Tabla 3. Zonas geográficas consideradas en el análisis

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

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo se basan en los resultados más relevantes de la revisión realizada y buscan guiar al usuario en la selección de los criterios de análisis aplicados en las metodologías IEEE y

³ Las versiones del Std IEEE 738 anteriores al 2006 están restringidas a latitudes norte, de tal forma que no son aplicables en el hemisferio sur [5].

CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión. A continuación se presentan las principales consideraciones, logros y aportes del mismo:

- Aplicando la teoría de propagación de errores, se han desarrollado y validado expresiones matemáticas para la predicción de la incertidumbre asociada a la utilización de los métodos propuestos por el IEEE y el CIGRÉ para el cálculo de la ampacidad en líneas de transmisión. Estos proporcionan al usuario un mayor grado de conocimiento y comprensión del análisis realizado y de los resultados obtenidos.
- Se ha comprobado que la velocidad del viento y su dirección angular ejercen un papel fundamental en el proceso de cálculo de la ampacidad de las líneas de transmisión. Así mismo, se ha comprobado que las recomendaciones dadas por el CIGRÉ entorno a la dirección angular y los factores de proporcionalidad utilizados en el cálculo de los factores de refrigeración por convección pueden sobredimensionar, en algunos casos, la ampacidad obtenida en el estudio.
- A partir del análisis realizado sobre el impacto generado por la variación del ángulo de incidencia del viento en el cálculo de la ampacidad, se ha demostrado que utilizar un ángulo de 30° garantiza un balance entre los diferentes tipos de refrigeración por convección, mientras que los valores menores de 30° dan un carácter dominante a la refrigeración natural y los mayores de 30° a la refrigeración forzada.
- Se ha demostrado la existencia de diferencias significativas entre las metodologías para el cálculo de la ampacidad desarrolladas por el IEEE y el CIGRÉ. De igual forma se han identificado y clasificado cada una de ellas con el fin de proporcionar al usuario una visión clara de las fortalezas, debilidades, ventajas y desventajas que cada uno de los métodos tiene, permitiendo así, que el análisis se realice con el enfoque que mejor se ajuste a las condiciones y necesidades asociadas al caso de estudio.
- Se ha verificado que las metodologías propuestas por el IEEE y el CIGRÉ no poseen restricción teórica alguna para su aplicación en las condiciones atmosféricas y geográficas del territorio colombiano. Así mismo, se ha comprobado que la efectividad del análisis realizado depende fundamentalmente de los criterios asumidos por el analista del sistema eléctrico.
- Se ha demostrado que la metodología para el cálculo de la ampacidad que presenta un mayor grado de claridad y uniformidad en los modelos matemáticos propuestos es la desarrollada por el IEEE. Así mismo, se concluye que la metodología propuesta por el CIGRÉ ofrece consideraciones y recomendaciones que permiten dar al análisis el enfoque y la objetividad deseados.
- Aplicar las metodologías para el cálculo de la ampacidad, seleccionando con criterio envolvente los parámetros meteorológicos de la zona en estudio, evita el sobre y subdimensionamiento de la capacidad de carga de las líneas de transmisión que hacen parte del Sistema de Transmisión Nacional (STN). Permitiendo así, alcanzar un mayor grado de conocimiento acerca de su comportamiento térmico, confiabilidad y control durante la operación.
- El trabajo realizado ha demostrado la importancia de establecer criterios para la aplicabilidad de las metodologías y recomendaciones que surgen de las investigaciones realizadas a nivel internacional, ya que cada país presenta condiciones geográficas, atmosféricas, sociales, políticas y económicas propias, que la mayoría de la veces difieren de las consideraciones asumidas en dichos trabajos.

5. REFERENCIAS

- [1] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. Noviembre 2006.
- [2] CIGRÉ The Thermal Behaviour of Overhead Conductors: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and the application thereof. *ÉLECTRA* No 144 Octubre 1992; p. 107-125
- [3] CIGRÉ The Thermal Behaviour of Overhead Conductors: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the unsteady state . *ÉLECTRA* No 174 Octubre 1997; p. 59-69
- [4] ZUÑIGA. Juan. Técnicas Experimentales en Física General: Propagación de errores, Sección 3.2. Universidad de Valencia. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. 2003; p. 1-14G.
- [5] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors. Junio 1993.
- [6] CIGRÉ, Probabilistic Determination of Conductor Current Ratings, *ELECTRA* No 164, Febrero 1996, p 103-117

6. CURRÍCULUM

Iván Alberto Sanín Rincón. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander (2008). Presidente del Centro de Estudios de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (2005). Director del Capítulo Estudiantil de la PES-IEEE en la Universidad Industrial de Santander (2006). Ha desarrollado investigaciones entorno a la capacidad de carga de las líneas de transmisión, se ha desempeñado como contratista en investigación y desarrollo para la Dirección de Proyectos de Infraestructura de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. Actualmente es profesional en desarrollo de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P.

Gabriel Ordóñez Plata. Ingeniero Electricista de la Universidad Industrial de Santander (1985), Distinción Cum Laude; Especialista Universitario en Técnicas de Investigación del Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia Comillas 1993, Doctor Ingeniero Industrial de la de la Universidad Pontificia Comillas 1993, Madrid (España) 1993. Profesor Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones Universidad Industrial de Santander (UIS). Investigador del Grupo GISEL. *Senior Member* IEEE. Áreas de trabajo: Tratamiento de señales, mediciones eléctricas, calidad del servicio, gestión tecnológica y formación basada en competencias.