

# Definición De Índices De Salud Para Cables De Media Tensión Aislados En XLPE

L. Agudelo-Vélez, M. Suárez-Medina, D. Gómez-Torres

INTERCOLOMBIA S.A E.S.P. Calle 12 Sur # 18-168 – Medellín, Colombia

## Resumen

Los cables aislados en XLPE son diseñados para mantener durante su vida útil sus propiedades eléctricas y mecánicas para garantizar una alta confiabilidad. Sin embargo, su vida útil puede verse afectada debido a factores ambientales, el contexto operativo y tipo de fabricación.

Con el fin de mitigar el riesgo de falla de estos elementos en INTERCOLOMBIA S.A E.S.P., en el presente trabajo se plantea una metodología de evaluación de la condición para estimar el grado de deterioro, la cual se denomina índice de salud; mediante ésta se busca priorizar inversiones respecto a renovaciones, mantenimientos correctivos y mantenimientos preventivos requeridos en cables aislados en XLPE de media tensión.

## Introducción

Los cables de media tensión (13.8 kV y 34.5 kV) aislados en XLPE son ampliamente utilizados en subestaciones eléctricas y circuitos de distribución para la conexión de equipos que cumplen funciones importantes para el sistema como el control de tensiones, suministro de energía a los sistemas de protecciones y alimentación de los sistemas de distribución de energía, entre otros; razón por la cual es fundamental que cuenten con un alto nivel de confiabilidad.

Estos elementos pueden sufrir procesos de deterioro que reducen su fiabilidad y vida útil, por lo tanto, es necesario contar con mecanismos que permitan hacer seguimiento a la condición del cable y estimar su grado de deterioro en todo el ciclo de vida.

El presente trabajo, describe una metodología desarrollada en INTERCOLOMBIA S.A E.S.P para la estimación del grado de deterioro de un cable aislado llamada índices de salud, mediante la cual se disminuye el riesgo de falla de estos elementos y se puede definir y priorizar planes de inversión que contemplan actividades de mantenimiento preventivo, correctivo o renovación de estos elementos.

## Antecedentes

A continuación, se presentan dos casos de fallas en cables XLPE de media tensión

ocurridos en una empresa del sector eléctrico y sus posibles causas.

1. En agosto de 2013 se presentó disparo de un transformador de potencia 230/115 kV de la subestación A. Esta falla ocasionó una indisponibilidad de aproximadamente 30 horas del equipo, derivando en pagos de compensaciones económicas. Luego del análisis del evento se identificó que el origen de la falla se localizó en un cable de potencia por ingreso de humedad. [1].

En la Fig. 1, las flechas rojas muestran las señales de corrosión en la pantalla metálica del cable, lo cual da indicios de que la falla pudo haber sido por ingreso de humedad a través de la chaqueta.



Fig. 1. Falla por ingreso de humedad en cable

La humedad causó corrosión en la pantalla metálica dejando expuesto el aislamiento y generando arborescencias en éste (cavidades microscópicas dentro del aislamiento), formando caminos por los cuales circulan

corrientes de pérdidas que degradan el XLPE hasta el punto de falla como se observa en la flecha amarilla.

2. En agosto de 2015 se presentó la salida de dos transformadores de la subestación B por falla de los cables de potencia a nivel de 13.8 kV que alimentan las celdas de distribución. Este evento ocasionó una demanda no atendida de energía de 1471.38 MWh y un impacto significativo para la imagen de la compañía debido a la afectación del suministro de energía a los usuarios. En el análisis del evento, se observó que la corriente por los cables superaba los límites de cargabilidad permitidos en un 40% debido a que no tenían una disposición adecuada en el cárcamo para una buena disipación térmica. [2]

En la Fig. 2, la flecha amarilla muestra la forma como se encontraban tendidos los cables en el cárcamo. Luego de modelar el caso, se determinó que la falla se debió al deterioro acelerado en el aislamiento por estrés térmico.



Fig. 2. Disposición Inadecuada en cárcamos

### **Marco Teórico**

#### **Factores de Degradación de Cables Aislados XLPE en Media Tensión.**

La falla en un cable aislado se presenta cuando un estrés eléctrico local es mayor que la rigidez dieléctrica local del material aislante ya sea al interior del propio cable o en sus accesorios (terminales y empalmes). Con el tiempo, el aislamiento se envejece debido a diferentes factores de degradación los cuales se listan a continuación:

- **Estrés Térmico:** La causa típica de la degradación del aislamiento por temperatura es la corriente excesiva en el conductor por condiciones ambientales y operativas.
- **Estrés Eléctrico:** Las causas más comunes de presencia de estrés eléctrico en el cable son defectos de fabricación, como presencia de contaminantes, cavidades en el aislamiento, protuberancias, mala adherencia de capas semiconductoras, mala instalación de chaquetas, entre otros.
- **Arborescencias de agua:** son cavidades microscópicas dentro del aislamiento que se generan por presencia de humedad, impurezas o contaminación y crecen formando caminos al interior del aislamiento generando pérdidas, degradándolo y aumentando el riesgo de falla.
- **Químicos:** la presencia de agentes químicos como hidrocarburos, aceites, fertilizantes o agua pueden causar en el aislamiento deformaciones o protuberancias que dañan la homogeneidad de la sección del cable, provocando estrés eléctrico localizado.
- **Corrosión de la Pantalla Metálica:** Causada principalmente por ingreso de humedad a través de la chaqueta.
- **Estrés Eléctrico en Terminales:** Generalmente se presenta por procesos inadecuados de fabricación donde no se tiene cuidado de las condiciones medioambientales especiales para evitar el ingreso de humedad o contaminantes al aislamiento, además del uso de mano de obra no certificada para su instalación.

La principal consecuencia de todos estos mecanismos de deterioro es la reducción de la rigidez dieléctrica, la cual se puede evidenciar mediante pruebas de diagnóstico como medición de Tangente Delta, descargas parciales y reflectometría.

**Pruebas de Diagnóstico de Cables en Campo**  
Debido a que existen diversas pruebas y

técnicas de diagnóstico de cables aislados en XLPE, el comité de conductores aislados de la IEEE ha dividido estos métodos o filosofías en dos categorías fundamentales [3]:

- *Pruebas de Campo Tipo I:* Están destinadas a detectar defectos en el aislamiento del cable, después de que una parte defectuosa ha sido removida y se han hecho reparaciones. Estas pruebas se categorizan como “Pasa/Falla”.
- *Pruebas de Campo Tipo II:* Su propósito es indicar si el aislamiento del cable está deteriorado. Estas pruebas incluyen:
  - Reflectometría en el dominio del tiempo
  - Descargas Parciales (IEEE 400.3)
  - Factor de disipación (Tangente Delta) (IEEE 400.2))
  - Corriente de relajación Isotérmica

De acuerdo con el análisis del objetivo y pertinencia de cada prueba, para el diagnóstico de cables aislados de media tensión, se seleccionaron las pruebas eléctricas de Reflectometría (TDR), Tangente Delta en baja frecuencia (VLF) y Descargas Parciales, pues son las que permiten identificar diversos modos de falla de forma más oportuna y que conjuntamente permiten hacer un diagnóstico más acertado de un cable que ha estado en operación.

### **Metodología Propuesta**

#### **Metodología de Índices de Salud**

La metodología de salud de activos, permite evaluar y cuantificar el estado de los equipos, validando su condición de deterioro en el tiempo, a través de datos de desempeño, fallas y monitoreo periódico, teniendo como finalidad, definir las posibles acciones a ejecutar según la etapa de envejecimiento del activo.

El primer paso para la construcción de una metodología de índices de salud es buscar los factores que afectan el desempeño del equipo o elemento; en el segundo paso se califica cada factor de degradación, en donde un valor alto

representa una condición pobre relacionada con el factor influyente. Finalmente, como tercer paso se asignan pesos considerando la importancia del factor influyente. Se resalta que la selección de los factores influyentes, la calificación y los pesos a asignar puede ser definido por el experto de cables de cada compañía, basado en la experiencia que se tenga o en desarrollos anteriores.

La Ecuación 1, permite encontrar el índice de salud de un equipo. El índice está expresado entre 0 y 100 donde cercano a 0 representa cerca al fin de vida y 100 corresponde a un a condición de nuevo.

$$HI = \left( \frac{\sum_{m=1}^x \alpha_m (CPS_m * WCP_m)}{\sum_{m=1}^x \alpha_m (4 * WCP_m)} \right) * RF\%$$

Ecuación 1. Cálculo de índice de salud

Dónde:

- HI: Índice de salud.
- m: Condición del parámetro/variable m.
- CPSm: Calificación de la condición del parámetro/variable que evidencia modo de Falla.
- ωCPm: Peso de la condición del parámetro/variable.
- αm: Coeficiente de disponibilidad de datos para el parámetro de estado m (Si αm=1 información disponible, si αm=0 información no disponible).
- RF: Factores de reducción del índice de salud relacionados con edad y tasa de fallas.

Para la aplicación de la metodología de índices de salud en cables aislados en XLPE de media tensión, se debe integrar los parámetros de deterioro, los resultados de pruebas eléctricas y de inspección visual en un mismo índice.

A continuación, en las Tablas 1, 2 y 4 se muestran las pruebas eléctricas de diagnóstico, el criterio de asignación de la condición de acuerdo a los resultados de cada prueba realizada y el peso asignado (WCPm) a cada prueba para el cálculo final del índice de salud.

Para la asignación de los WCPm en cada prueba se consideró aquellas que brindarán información más relevante del estado del cable y sus accesorios por lo tanto la prueba de Tangente Delta y Descargas Parciales se les asignó el 40% a cada una. Por su parte a la prueba de reflectometría y a las inspecciones visuales se les asignó un WCPm igual al 10% en cada caso. Se resalta que mediante la reflectometría y las inspecciones visuales es posible evidenciar que hay un defecto en el cable, sin embargo, no se mide la severidad del mismo, ni su localización, lo cual es imprescindible para la definición de acciones correctivas.

Tabla 1. Diagnóstico Con Prueba De Reflectometría

Criterio	Calif.	WCP
Cable uniforme sin cambios aparentes de impedancias.	4	10%
Cable con presencia de cambios leves de impedancia debido a ingreso de humedad, o neutro corroído.	3	
Cable con cambios elevados de impedancia debido a empalmes defectuosos y/o defectos por doblado en el cable.	1	

Tabla 2. Diagnóstico Reflectometría Descargas Parciales

Criterio	Calif.	WCP
Puntos localizados con presencia de descargas parciales con poca cadencia.	4	40%
Puntos localizados con presencia de descargas parciales moderadas.	3	
Puntos localizados con presencia de descargas parciales de alta cadencia.	2	
Poca actividad de descargas parciales combinada con altas pérdidas dieléctricas	1	

En la Tabla 3, se muestra el criterio definido para el diagnóstico a través de los hallazgos en inspecciones visuales en el cable y sus accesorios.

Tabla 3. Diagnóstico Con Inspecciones Visuales

Criterio	Calif.	WCP
Terminales o accesorios sin deterioro físico. Chaqueta sin deterioro visible.	4	10%
Daños en terminales interiores como: faldas rotas, sin exposición del aislamiento o señales de calentamiento en el terminal en zonas diferentes a la ubicación del control de esfuerzos.	2	
Señales de afectación en terminal o chaqueta (por rayos UV, radios de curvatura inadecuados) sin exposición visible del aislamiento.	1	
Terminales o empalmes con deterioro visible (cuerpo rotos con aislamiento expuesto). Chaqueta con rotura y exposición de aislamiento.	0	

Tabla 4. Diagnóstico Con Prueba De Tangente Delta

Criterio	Calif.	WCP
TD Estabilidad a $U_0 < 0.1$ Dif. TD a $0.5U_0 - 1.5 U_0 < 5$ TD a $U_0 < 4$	4	40%
TD Estabilidad a $U_0 < 0.1$ a $0.5$ Dif. TD a $0.5U_0 - 1.5 U_0 < 5$ a $80$ TD a $U_0 < 4$ a $50$	3	
TD Estabilidad a $U_0 < 0.5$ Dif. TD a $0.5U_0 - 1.5 U_0 < 80$ TD a $U_0 < 50$	1	

Los Factores de Reducción (RF), se describen en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5. Factores De Reducción Por Cargabilidad

Cargabilidad	Factor
<100% de la cargabilidad máxima	1
>100% de la carga en emergencias. Tiempo Controlado	0.8
>100% de la carga en emergencias. Tiempo No Controlado	0.5

Tabla 6. Factores De Reducción Por Edad

Edad	Factor
0-9	0.95
10 a 20	0.85
20 a 30	0.6
>30	0.5

Tabla 7. Factores De Reducción Por Tasa De Fallas

Tasa de fallas	Factor
0	1
1 a 2	0.8
>2 fallas	0.5

Finalmente, en la Tabla 8, se definen las acciones a realizar de acuerdo con el resultado obtenido del índice de salud.

Tabla 8. Acciones De Acuerdo Al Índice De Salud

Criterio	Acción
$100\% < HI < 85\%$	Continuar con plan de mantenimiento periódico.
$85\% \leq HI < 70\%$	Seguimientos adicionales cada tres años.
$70\% \leq HI < 60\%$	Seguimiento anual y pruebas adicionales.
$60\% \leq HI < 40\%$	Reemplazo en tiempo no mayor a 1.
$HI \leq 40\%$	Reemplazo inmediato hasta 6 meses.

## Resultados

A continuación, se presentan los resultados y acciones propuestas de la aplicación del procedimiento en dos grupos de cables XLPE.

Caso 1: Los datos fueron tomados de pruebas realizadas en tres cables a 13.8 kV. Los resultados de las pruebas son los siguientes.

1. Prueba de Reflectometría: En la Fig. 3, se muestra la gráfica resultante de la prueba de reflectometría. La línea roja y verde representa el patrón de reflectometría resultante en las tres fases.

La prueba de reflectometría identifica y posiciona todo cambio de impedancia en la trayectoria del cable, los cuales serán visualizados como pulsos de polaridades específicas como muestran las flechas azules del gráfico. Los cambios de impedancias pueden ser atribuidos en este caso a daños en el cable, ingreso de humedad, radios de curvaturas inadecuados y empalmes defectuosos.



Fig. 3. Gráfica prueba de Reflectometría. [5]

2. Prueba de Tangente Delta: En la Fig. 4, se muestra la gráfica resultante de la prueba de tangente delta. De acuerdo con los resultados de la prueba, el cable no muestra una degradación elevada, porque se presentan valores óptimos de tangente delta (curvas verde, roja y azul). Sin embargo, se observa un valor más elevado de pérdidas en la fase B (color verde).

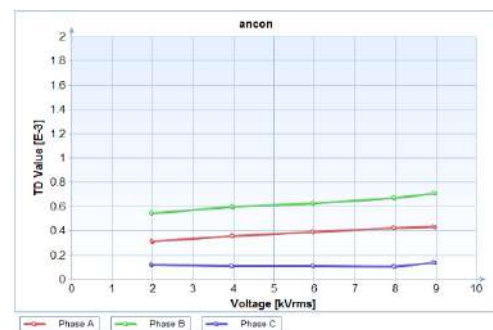
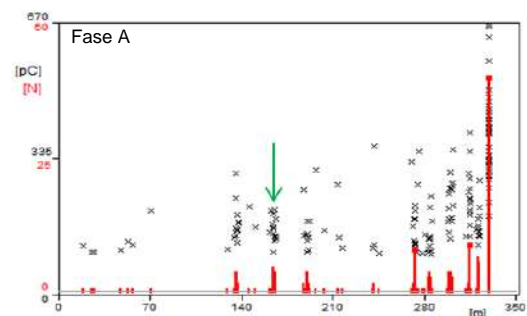


Fig. 4. Curvas de Prueba TD por fase

3. Prueba de Reflectometría de Descargas Parciales: En la Fig. 5, se muestran las gráficas resultantes de la prueba de reflectometría de descargas parciales. Las cruces como las señaladas con la flecha verde, muestran la cadencia de la descarga parcial, es decir, entre más cadencia se observe (mayor cantidad de "x"), podría indicar una condición más crítica.



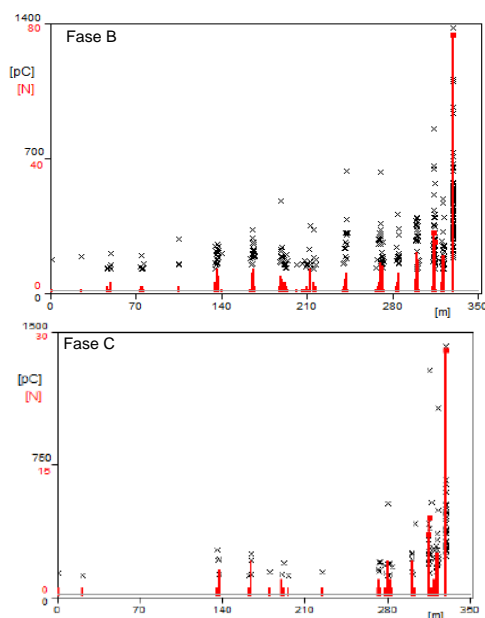


Fig. 5. Resultados pruebas Descargas Parciales

De acuerdo con los resultados de la prueba, los cables muestran muchos puntos de descargas parciales en toda su longitud. Al comparar los cables de las tres fases, se observa una cadencia y magnitud mayor en la fase B, por lo cual se concluye que esta fase es la que posee un mayor grado de envejecimiento en el sistema.

Se resalta que, con este tipo de pruebas, es posible concluir una condición inicial a partir de la cadencia y magnitud de la descarga, siempre que sea combinado con los resultados de pruebas adicionales.

4. Inspecciones visuales: Para identificar posibles daños físicos de los cables probados, se hizo una inspección visual en los mismos y se identificaron las siguientes anomalías:

En la Fig. 6, la flecha roja muestra que el cable tiene un radio de curvatura inadecuado.



Fig. 6. Radio de Curvatura inadecuado. [5]

En estos puntos se genera estrés eléctrico en el aislamiento por concentración de campo eléctrico.

En la Fig. 7, el ovalo rojo muestra que el cable tiene defecto en el empalme, en donde se encuentra expuesto el aislamiento, aumentando el riesgo de deterioro por ingreso de humedad.



Fig. 7. Empalme Defectuoso. [5]

Se resalta que las anomalías encontradas coinciden con los resultados de las pruebas de reflectometría en donde se observaban cambios de impedancias en ciertos puntos a lo largo de la trayectoria del cable, lo cual confirma la severidad de la condición.

5. Aplicación de factores de reducción: Una vez se tiene la condición de cada variable, se haya un HI inicial, el cual se verá afectado por los factores de reducción explicados en el Numeral V. Para los cables analizados, los factores de reducción que aplicarían son los mostrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Factores De Reducción Aplicados Al Caso 1

Criterio	Descripción	Factor
Cargabilidad	<100% de la cargabilidad máxima	1
Edad	20 a 30	0.4
Tasa de fallas	0 fallas	1

En la Tabla 10, se resumen los resultados obtenidos de las pruebas eléctricas de diagnóstico y la inspección visual realizada.

Tabla 10. Resultados Obtenidos Caso De Estudio 1

Prueba	Calificación	Peso
Reflectometría	1	10%
Tangente Delta	4	40%
Descargas parciales	2	40%
Inspección Visual	0	10%

Con estos datos se calcula el índice de salud:

$$HI = \left( \frac{(1 * 10) + (4 * 40) + (2 * 40) + (0 * 10)}{(4 * 100)} \right) * RF\%$$

Finalmente, se aplican los factores de reducción indicados en la Tabla 10

$$HI = (63) * 1 * 0.4 * 1\%$$

$$HI = (63) * 1 * 0.4 * 1\%$$

$$HI = 38\%$$

De acuerdo con el resultado obtenido se observa que el resultado del HI es coherente con el resultado de las pruebas eléctricas e inspecciones visuales realizadas. Si bien la prueba de Tangente Delta mostró óptimas condiciones de aislamiento, la prueba de descargas parciales y reflectometría evidenciaron la presencia de anomalías críticas en el cable, las cuales fueron confirmadas a través de la inspección visual.

Para este valor de índice de salud la recomendación es el reemplazo de la terna de cables.

Caso 2: Los datos fueron tomados de pruebas realizadas en seis cables a 34.5 kV, los cuales poseen aproximadamente 18 años en operación. Dentro de los resultados de las pruebas de diagnóstico realizadas se tiene lo siguiente.

1. Prueba de Reflectometría: No se muestran cambios significativos de impedancia en la trayectoria de los cables.
2. Prueba de tangente delta: De acuerdo con los resultados de la prueba, el valor obtenido de tangente delta muestra una condición de

deterioro en el cable que no es crítica, sin embargo, requiere un seguimiento para evaluar su tasa de evolución.

3. Prueba de descargas parciales: De acuerdo con los resultados de la prueba, los cables presentan descargas parciales localizadas de baja cadencia y magnitud.
4. Inspecciones visuales: Las anomalías identificadas en la inspección visual son las siguientes:

En la Fig. 8, el círculo rojo muestra una anomalía encontrada en varios terminales del grupo de cables, los cuales se encontraban rotos y tenían exposición del tubo controlador de esfuerzos.



Fig. 8. Anomalía en Terminales

5. Aplicación de factores de reducción: Una vez se tiene la condición de cada variable, se haya un HI inicial, el cual se verá afectado por los factores de reducción explicados en el Numeral V. Para los cables analizados, los factores de reducción que aplicarían son los mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Factores De Reducción Aplicados Al Caso 2

Criterio	Descripción	Factor
Cargabilidad	<100% de la cargabilidad máxima	1
Edad	20 a 30	0.7
Tasa de fallas	0 fallas	1

En la Tabla 12, se resumen la calificación

obtenida de las pruebas eléctricas de diagnóstico y la inspección visual realizada.

Tabla 12. Resultados Obtenidos Caso De Estudio 2

Prueba	Calificación	Peso
Reflectometría	1	10%
Tangente Delta	3	40%
Descargas parciales	4	40%
Inspección Visual	0	10%

Con estos factores de reducción se calcula el índice de salud así:

$$HI = \left( \frac{(1 * 10) + (3 * 40) + (4 * 40) + (0 * 10)}{(4 * 100)} \right) * RF\%$$

Finalmente, se aplican los factores de reducción indicados en la Tabla 12:

$$HI = (72) * 1 * 0.85 * 1\%$$

$$HI = (72) * 1 * 0.85 * 1\%$$

$$HI = 61\%$$

De acuerdo con el resultado obtenido se observa que el resultado del HI es coherente con el resultado de las pruebas eléctricas e inspecciones visuales realizadas. Si bien el cable se encuentra apto para la operación, la prueba de Tangente Delta mostró una degradación del aislamiento que requiere seguimiento. Para este valor de índice de salud la recomendación es el seguimiento a la condición del cable mediante pruebas periódicas adicionales en un año.

### **Conclusión**

De acuerdo con los resultados obtenidos en los dos casos aplicados, se observa que la metodología de índice de salud propuesta, es una estimación muy acertada de la condición actual del cable, la cual es útil para la elaboración de planes de inversión que contemplan actividades de mantenimiento preventivo, correctivo o renovación. Esta metodología se basa en las tecnologías actuales de diagnóstico de cables aislados en XLPE, sin embargo, puede ser modificada en el futuro de

acuerdo con nuevas técnicas o pruebas que se desarrollen.

Adicionalmente, como complemento a este desarrollo, es importante realizar un análisis de costos de las acciones definidas en los diferentes rangos del índice de salud para la aplicación específica en una compañía del sector eléctrico, considerando las normativas regulatorias y el contexto operacional específico.

### **Referencias**

- [1] DOCUMENTO SIGO OCURRENCIA FORZADA 000004432013
- [2] Análisis\_Causa\_Raíz\_Ternera\_2015\_
- [3] Sandri, T. Acceptance and maintenance testing for medium voltage electrical power cables. Shermco Industries. 82nd International Conference of Doble Clients. DOBLE Engineering Company. 2015.
- [4] Williams, D. Cable Accesory Failure Analysis. ICC Education Sesión. National Electric Energy Testing, Research and Applications Center (NEETRAC). Fall 2010.
- [5] Informe de Diagnostico Cables Servicios Auxiliares Ancón Sur. Julio 2016

### **Hoja de vida de los autores**

#### **Laura Agudelo Vélez**

Ingeniera Electricista, Universidad Nacional Sede Medellín. Especialista en Sistemas de Transmisión y Distribución Universidad Pontificia Bolivariana. Cargo actual: Analista Gestión Mantenimiento. Dirección Mantenimiento – INTERCOLOMBIA. lagudelo@intercolombia.com Medellín, Antioquia, Colombia.

#### **Mallory Suárez Medina**

Ingeniera Electricista, Universidad del Norte. Especialista en Sistemas de Transmisión y Distribución Universidad Pontificia Bolivariana. Cargo actual: Analista Gestión Mantenimiento. Dirección Mantenimiento - INTERCOLOMBIA. msuarez@intercolombia.com Medellín, Antioquia, Colombia.

#### **David Ernesto Gómez Torres**

Ingeniero Electricista, Especialista en Finanzas - Universidad Nacional Sede Medellín. Cargo actual: Coordinador Gestión Equipo Líneas. Dirección Mantenimiento - INTERCOLOMBIA. degomez@intercolombia.com Medellín, Antioquia, Colombia.