

DESARROLLO DE UN ENTORNO DE PRUEBAS EN ATPDRAW Y SIMULINK PARA
EL ANÁLISIS DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN LA PANTALLA DE CABLES XLPE

KEVIN ARDILA PINZON
JHONNATAN ORLANDO PEREZ VASQUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES, INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA

2025

DESARROLLO DE UN ENTORNO DE PRUEBAS EN ATPDRAW Y SIMULINK PARA
EL ANÁLISIS DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN LA PANTALLA DE CABLES XLPE

KEVIN ARDILA PINZÓN
JHONNATAN ORLANDO PERÉZ VÁSQUEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

José David Esparza Gómez
Magister en Sistemas Energéticos

Codirector

Valdomiro Vega García
Postdoctorado en Ingeniería Eléctrica

Codirector

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga
Doctor en Ingeniería Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES, INGENIERÍA ELÉCTRICA
BUCARAMANGA

2025

Dedicatoria

Dedico este logro en especial a mis padres que con su ayuda incondicional me ayudaron a formarme como profesional y lo más importante como persona. A cada uno de los miembros de mi familia, que han estado presentes y me apoyan en cada paso que doy.

A mi profesor de área técnica Edwin Forero Gamba, quien sentó las bases de mi carrera profesional y me enseñó que con humildad y esfuerzo se logran las cosas.

A mi grupo de amigos “*CATION*” y a todas aquellas personas que aportaron su granito de arena en la realización de este proyecto.

Kevin Ardila Pinzón

A mis padres, Orlando Pérez y Blanca Vásquez, por su amor infinito, apoyo incondicional y ejemplo de perseverancia, que han sido la base de cada uno de mis logros. Su ejemplo me ha guiado y acompañado en cada paso de este camino.

A mis hermanas, Vanessa Pérez y Wendy Pérez, por su cariño, compañía constante en este camino y por ser parte fundamental en mi vida.

A todas las personas que, de una u otra manera, han estado conmigo en los distintos momentos de mi vida, brindándome respaldo, motivación y apoyo para seguir adelante.

Jhonnatan Orlando Pérez Vásquez

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. MARCO TEORICO Y REGULATORIO	13
1.1 CABLE DE POTENCIA XLPE	13
1.2 FUNDAMENTOS DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN PANTALLAS.....	14
1.2.1 Principios de inducción electromagnética.....	14
1.2.1.1 Ley de Faraday.	14
1.2.1.2 Ley de Lenz.....	14
1.2.2 Cálculo de la tensión en pantalla.....	15
1.2.3. Factores Clave que Influyen en la Tensión Inducida.....	15
1.2.4. Tensión de contacto.	16
1.3 NORMATIVA Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES.....	16
1.3.1 Normatividad relevantes.....	16
2. FUNDAMENTOS DE MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA CABLES SUBTERRÁNEOS.....	18
2.1 PARÁMETROS CONCENTRADOS Y DISTRIBUIDOS.....	18
2.1.1 Parámetros concentrados.	18
2.1.2 Parámetros distribuidos.....	19
2.1.3 Modelos en ATP/Simulink.	19
2.2 IMPEDANCIA DE RETORNO A TIERRA.....	19
2.3 MATRICES DE IMPEDANCIA Y ADMITANCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.	20
2.3.1 Modelo PI MATLAB/Simulink	20
2.3.2 Modelo PI ATPdraw.	21
3. ENTORNO DE SIMULACIÓN: CARACTERIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN	23
3.1 ATPDRAW: PREPROCESADOR GRÁFICO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMTP).....	23
3.1.1 ¿Qué es ATPDraw?.	23

3.1.2 Bloque Line/Cable.....	24
3.2 SIMULINK Y SIMSCAPE ELECTRICAL.....	25
3.2.1 Matlab-Simulink.....	25
3.2.2 AC Cable (Three-Phase).....	26
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CABLE DE ESTUDIO.....	27
4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	30
4.1 ESCENARIO 1	30
4.1.1 Versión 1.	32
4.1.2 Versión 2.	32
4.1.3 Versión 3.....	32
4.1.4 Versión 4.	32
4.2 ESCENARIO 2	32
4.2.1 Versión 1.	33
4.2.2 Versión 2.	33
4.3 ESCENARIO 3	33
4.3.1. Inyección de Armónicos.	36
4.3.2 Versión 1.	36
4.3.3 Versión 2.....	37
4.4 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y REGISTRO DE RESULTADOS.....	39
4.4.1. Medición en Simulink.....	39
4.4.2. Medición en ATPDraw.....	39
5. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	40
5.1 IMPACTO DE LAS CONDICIONES DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN	40
5.1.1 Escenario 1.	40
5.1.1.1 Versión 1.	40
5.1.1.2 Versión 2.	41
5.1.1.3 Versión 3.....	42
5.1.1.4 Versión 4.	43
5.1.2 Escenario 2.	43
5.1.2.1 Versión 1.	43

5.1.2.2 Versión 2.	44
5.1.3 Escenario 3.	45
5.1.3.1 Versión 1.	45
5.1.3.2 Versión 2.	46
5.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MODELOS (ATPDRAW VS. SIMULINK)	47
5.3 CONDICIONES DE RIESGO	49
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
6.1 CONCLUSIONES.....	53
6.2.1 Futuras investigaciones.....	54
6.2.1 Propuesta regulatoria	54
BIBLIOGRAFÍA	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Interacción entre ATPDraw y otros programas ATP.....	24
Figura 2. Geometría de cables coaxiales con cantidades de bucle.....	25
Figura 3. AC Cable con transposición en pantalla.....	26
Figura 4. Composición de cable XLPE para media tensión.	27
Figura 5. Modelo de cable unipolar con pantalla metálica.....	30
Figura 6. Esquema unifilar del escenario real.	34
Figura 7. Escenario real versión 1 sin armónicos en ATPDraw.....	36
Figura 8. Escenario real versión 1 en Simulink.	37
Figura 9. Escenario real versión 2 con armónicos en ATPDraw	38
Figura 10. Escenario real versión 2 con armónicos en Simulink.	38
Figura 11. Tensiones inducidas escenario uno versión uno.....	41
Figura 12. Tensiones inducidas escenario uno, versión dos.....	42
Figura 13. Tensiones inducidas escenario uno, versión tres.....	42
Figura 14. Tensiones inducidas escenario uno, versión cuatro.....	43
Figura 15. Tensiones inducidas escenario dos, versión uno.....	44
Figura 16. Tensiones inducidas escenario dos, versión dos.....	45
Figura 17. Tensiones inducidas escenario tres, versión uno.....	46
Figura 18. Tensiones inducidas escenario tres, versión dos.....	47
Figura 19. Diferencia promedio en voltios de la tensión inducida entre ATPDraw y Simulink.....	48
Figura 20. Diferencia en voltios de la tensión inducida entre ATPDraw y Simulink para el escenario tres.....	49
Figura 21. Impedancia del cuerpo humano.	50
Figura 22. Zonas de tiempo/corriente de los efectos de las corrientes alternas de 15 Hz a 100 Hz.....	51

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Normatividad técnica relacionada con tensiones inducidas en pantallas de cables	17
Tabla 2. Características de los Materiales de Aislamiento de Cables para Media Tensión	28
Tabla 3. Características del Cobre y del Aluminio.....	29
Tabla 4. Condiciones de Simulación escenario 1.....	31
Tabla 5. Condiciones de Simulación escenario 2.....	33

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN ENTORNO DE PRUEBAS EN ATPDRAW Y SIMULINK PARA EL ANÁLISIS DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN LA PANTALLA DE CABLES XLPE*

AUTOR: KEVIN ARDILA PINZÓN, JHONNATAN ORLANDO PEREZ VASQUEZ**

PALABRAS CLAVE: CABLE, XLPE, ENTORNO, SIMULACIÓN, CUBIERTA, PANTALLA, TENSIÓN

DESCRIPCIÓN: En este proyecto se abarca la problemática de las tensiones inducidas en las pantallas de cables de potencia tipo XLPE con disposición subterránea en Colombia. Esta idea nace ante la falta de una normatividad nacional clara que especifique los parámetros mínimos de cumplimiento en este tipo de instalaciones, dado que estas tensiones representan un riesgo latente para la seguridad operativa del personal y la integralidad del sistema eléctrico.

El proyecto se centra en lo que es el desarrollo de un entorno de simulación utilizando herramientas como ATPDraw y Simulink. Dicho entorno permitirá modelar el comportamiento de cables XLPE y evaluar las tensiones inducidas bajo diversas condiciones de instalación y operación, en cierto tipo de escenarios especificados.

La metodología que se adopta comprende la caracterización de los cables y el diseño de escenarios paramétricos en ambos simuladores, para efectuar un análisis correspondiente de los resultados identificando discrepancias y similitudes entre los modelos que proporcionan los simuladores.

Se espera que los hallazgos que se hacen en este proyecto generen evidencia técnica y contribuyan a la propuesta de recomendaciones que se puedan aplicar en la etapa de diseño en este tipo de instalaciones en Colombia, así mismo fomentando el uso de sistemas eléctricos más seguros y eficientes.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Ingeniería Eléctrica. Director: José David Esparza Gómez. Magister en Sistemas Energéticos. Codirector: Valdomiro Vega García. Postdoctorado en Ingeniería Eléctrica. Codirector: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. Doctor en Ingeniería Eléctrica.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A TEST ENVIRONMENT IN ATPDRAW AND SIMULINK FOR THE ANALYSIS OF INDUCED VOLTAGE IN XLPE CABLES SCREEN*

AUTHOR: KEVIN ARDILA PINZÓN, JHONNATAN ORLANDO PEREZ VASQUEZ**

KEY WORDS: CABLE, XLPE, ENVIRONMENT, SIMULATION, SHEATH, SCREEN, VOLTAGE

DESCRIPTION: This project covers the problem of induced voltages in XLPE type power cable screens with subway layout in Colombia. This idea was born due to the lack of clear national regulation that specifies the minimum compliance parameters in this type of installations, since these voltages represent a latent risk for the operational safety of the personnel and the integrity of the electrical system.

The project focuses on the development of a simulation environment using tools such as ATPDraw and Simulink. This environment will allow modeling the behavior of XLPE cables and evaluating the induced stresses under various installation and operating conditions, in certain types of specified scenarios.

The methodology adopted includes the characterization of the cables and the design of parametric scenarios in both simulators, to perform a corresponding analysis of the results identifying discrepancies and similarities between the models provided by the simulators.

It is expected that the findings made in this project will generate technical evidence and contribute to the proposal of recommendations that can be applied in the design stage in this type of installations in Colombia, thus promoting the use of safer and more efficient electrical systems.

*Degree work

** Faculty of Physic Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Electrical Engineering. Director: José David Esparza Gómez. Master in Energy Systems. Co-director: Valdomiro Vega García. Post-doctorate in Electrical Engineering. Co-director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga. PhD in Electrical Engineering

INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico global exige un fortalecimiento de la infraestructura para satisfacer la creciente demanda de resiliencia y calidad de servicio. En este contexto, diversas naciones desarrolladas han adoptado la distribución eléctrica subterránea reconocida por su alta confiabilidad y menor vulnerabilidad a fallas externas, así como por sus ventajas estéticas urbanas, tal como lo destaca la agencia Europea de Medio Ambiente¹ Sin embargo, la infraestructura de distribución colombiana se enfrenta al desafío de la modernización. El país debe transicionar hacia soluciones subterráneas para mitigar las limitaciones operacionales de las redes aéreas y alinear su sistema con los estándares internacionales de eficiencia y seguridad.

A pesar de la dependencia actual de Colombia en las redes de distribución aéreas, el país ha iniciado la consideración y planificación de la transición hacia sistemas subterráneos, en consonancia con sus objetivos de modernización y expansión urbana. Esta transformación genera nuevos desafíos técnicos y regulatorios que deben ser abordados para garantizar la seguridad y fiabilidad de estas redes. Específicamente, uno de los aspectos técnicos más críticos a evaluar es el análisis de la tensión inducida en la pantalla del cable, la cual es altamente sensible al comportamiento del conductor bajo diversos escenarios operativos. Para abordar este fenómeno, y frente a las limitaciones de los métodos analíticos para capturar la compleja interacción de factores, las herramientas de simulación son fundamentales para estudiar la tensión inducida en escenarios realistas y con mayor precisión.

¹ Agencia Europea de Medio Ambiente. [Sitio web]. Unión Europea: Climate-ADAPT, Reemplazo de líneas aéreas por cables subterráneos en Finlandia. [Consulta: 25 de mayo 2025]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/case-studies/replacing-overhead-lines-with-underground-cables-in-finland>

Dentro de este marco, existen diversas plataformas de software orientadas al modelado de redes de distribución, entre ellas ATPDraw y Simulink con su “*Toolbox AC Cable with Bonded Sheaths*”, las cuales permiten la construcción de modelos eléctricos virtuales detallados y ajustados a las condiciones reales de operación. Estas herramientas hacen posible un análisis más específico, al considerar variables críticas como la transposición del conductor, la profundidad de enterramiento y la presencia de componentes armónicos. No obstante, a pesar de la disponibilidad de estos recursos, no existe, hasta la fecha, una metodología consolidada que articule de manera sinérgica estas plataformas para un análisis integral de múltiples factores en escenarios complejos.

Por consiguiente, la necesidad de optimizar el desempeño de los cables soterrados y, fundamentalmente, garantizar la seguridad operacional respecto a las tensiones inducidas en su pantalla, justifica la implementación de un entorno de simulación acoplado (o marco de *testing* virtual) que integre las capacidades de ATPDraw y Simulink. El objetivo central de esta investigación es establecer una metodología rigurosa para determinar la influencia de las diversas condiciones de operación e instalación en la magnitud de la tensión inducida en las cubiertas (pantallas) de los cables de distribución XLPE. Específicamente, el análisis se centrará en la cuantificación del impacto de múltiples factores críticos, incluyendo la configuración de transposición de fases y de pantallas, seccionamiento del conductor, el esquema de puesta a tierra de la pantalla y la presencia de componentes armónicos en el régimen permanente. La contribución clave del presente estudio es el desarrollo de una herramienta predictiva que optimice las prácticas de instalación para el control de la tensión y que pueda servir como referente técnico validado para la actualización de la normativa regulatoria en el sistema eléctrico nacional.

1. MARCO TEORICO Y REGULATORIO

1.1 CABLE DE POTENCIA XLPE

El cable de potencia con aislamiento de polietileno reticulado (XLPE) es un elemento esencial en los sistemas de distribución eléctrica modernos, especialmente en las redes subterráneas. El acrónimo XLPE (del inglés *Cross-Linked Polyethylene*) identifica un cable que utiliza este compuesto químico como material aislante principal.

“La reticulación es un proceso crucial que altera la estructura química y física del polietileno, resultando en una mejora sustancial de sus propiedades térmicas y eléctricas entre otras características, superando al polietileno termoplástico convencional”².

Algunas características y ventajas de este conductor las cuales son: su alta resistencia térmica la cual le permite soportar temperaturas de hasta 90°C en operación continua, 130°C en condiciones de sobrecarga y hasta 250°C en condición de corto circuito³; una mayor vida útil a diferencia de otros conductores ya que la reticulación del polietileno evita el envejecimiento prematuro del conductor; resistencia a la humedad y a las altas temperaturas; carencia de halógenos y en caso de un incendio, no producen gases tóxicos ni corrosivos, protegiendo así la salud y los equipos.

² POLIETILENO RETICULADO: características y aplicaciones | POLISANTAFE. POLISANTAFE [página web]. [Consultado el 7, julio, 2025]. Disponible en: <https://polisantafe.com.ar/poliestireno-reticulado>

³ MEDIA TENSIÓN Cobre 90°C XLPE 15kV 100% PC PVC. Nexans - Centelsa by Nexans | Electrificamos el futuro en Colombia [página web]. [Consultado el 8, julio, 2025]. Disponible en: <https://www.nexans.co/es/products/Redes-de-Transmisión-y-Distribución-de-Energía/Cables-de-Media>

Los cables XLPE tienen un diseño robusto y gran capacidad de transporte de energía que los convierte en ideales para una gran cantidad de aplicaciones, son utilizados en redes de transmisión y distribución de energía eléctrica, en la industria como sistema de alimentación para maquinaria y procesos industriales, sector residencial y comercial, energías renovables en la conexión de paneles solares y aerogeneradores.

1.2 FUNDAMENTOS DE LA TENSIÓN INDUCIDA EN PANTALLAS

1.2.1 Principios de inducción electromagnética. Para el estudio de la tensión inducida fenómeno conocido como inducción electromagnética se definen dos leyes principales.

1.2.1.1 Ley de Faraday. Esta ley establece que la tensión inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia el flujo magnético que lo atraviesa⁴. Dicho de otra forma, una variación del campo magnético en el tiempo genera una fuerza electromotriz (FEM) produciendo una corriente en un circuito cerrado. A continuación, se presenta la ecuación que describe la fuerza electromotriz de acuerdo con la ley de Faraday:

$$Fem = - \frac{d\phi}{dt} V \quad (1)$$

1.2.1.2 Ley de Lenz. Esta ley establece que al tener una variación de un campo magnético en el tiempo se va a generar una fuerza electromotriz según la ley de Faraday⁵, y dependiendo de la polaridad de esa fuerza electromotriz (FEM) se genera una corriente

⁴ HAYT, William H. Teoria Electromagnetica - 8b: Edicion. MC Graw Hill, 2000. p. 237.

⁵ Ibid., p. 238.

inducida que se opone a la variación de campo magnético que la produce. Esta ley es la que interpone el signo negativo en la Ecuación 1, que es la ecuación de Faraday.

1.2.2 Cálculo de la tensión en pantalla. Para un arreglo de conductores XLPE en configuración trébol de un solo circuito, la estimación del gradiente de tensión inducida en la pantalla metálica se obtiene a partir de las expresiones presentadas en la norma IEEE Std 575-2014⁶, tal como se resume en las siguientes ecuaciones.

$$E_a = j\omega I_a((m)2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (2)$$

$$E_b = j\omega I_b(2 \times 10^{-7}) \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (3)$$

$$E_c = j\omega I_c(2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (4)$$

1.2.3 Factores Clave que Influyen en la Tensión Inducida. La tensión inducida en la pantalla de cables subterráneos depende de factores de instalación y operación. La longitud del tendido es determinante, pues la tensión inducida crece proporcionalmente con la distancia recorrida; además, la configuración de puesta a tierra influye significativamente, variando si la pantalla está conectada en ambos extremos, en uno solo o, en el caso más crítico, no se encuentra aterrizada⁷. En el mismo documento⁸ se indica también que el tipo de conductor afecta este fenómeno, al depender del material,

⁶ IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. p. 40.

⁷ QUIROGA QUIROGA, Oscar Arnulfo; ESPARZA, José David y SERNA SUÁREZ, Iván David. Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA - SICEL. 2024. vol. 11, p.4.

⁸ Ibid., p.4.

el diámetro de la pantalla y del conductor, así como de la permitividad eléctrica. En la *IEEE 575 2014*⁹ se señala que la transposición de pantalla (cross-bonding) constituye una práctica eficaz para reducir la magnitud de la tensión inducida, cuya efectividad depende del número y uniformidad de los seccionamientos. Además, la presencia de armónicos también incrementa la tensión inducida en la pantalla de forma proporcional a su orden¹⁰, por lo que debe considerarse en el diseño para evitar riesgos operativos.

1.2.4. Tensión de contacto. “Diferencia de potencial que durante una falla se presenta entre una estructura metálica puesta a tierra y un punto de la superficie del terreno a una distancia de un metro. Esta distancia horizontal es equivalente a la máxima que se alcanza al extender un brazo”¹¹.

1.3 NORMATIVA Y ESTÁNDARES INTERNACIONALES

1.3.1 Normatividad relevantes. El fenómeno de la tensión inducida en la pantalla de los cables debe ser controlado, por lo que es esencial cumplir con las normativas que establecen límites permisibles y criterios de diseño, instalación y operación. Estas regulaciones son clave para minimizar riesgos en sistemas de cableado subterráneo. La Tabla 1 resume las regulaciones técnicas más relevantes que definen los criterios de diseño, control de tensiones inducidas y mitigación de factores de riesgo, como los armónicos.

⁹ IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. p. 15.

¹⁰ DU,Y.; WANG,X. H. y YUAN,Z. H. Induced Voltages and Power Losses in Single-Conductor Armored Cables. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009. p. 2148

¹¹ COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 1, Disposiciones Generales.

Tabla 1. Normatividad técnica relacionada con tensiones inducidas en pantallas de cables

Norma	Descripción
RETIE	Establece requisitos de seguridad para diseñar, construir y operar instalaciones eléctricas en Colombia. Busca garantizar la protección de las personas, los animales, el medio ambiente y la infraestructura frente a riesgos eléctricos.
Normas para Cálculo y Diseño de Sistemas de Distribución	La norma de la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P. establece los lineamientos técnicos y criterios que deben aplicarse en el cálculo y diseño de sistemas de distribución eléctrica. Define procedimientos, parámetros de diseño y requisitos de calidad para garantizar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de las redes.
NTC 2186-1/2015	Rige los lineamientos técnicos de cables apantallados de 5 kV hasta 46 kV, utilizados en sistemas de distribución y transmisión.
IEEE Std 575-2014	Guía para la conexión de blindajes y cubiertas de cables clasificados de 5 kV a 500 kV, describe métodos de medición de voltajes y corrientes en blindajes/cubiertas y establece límites de tensión inducida.
IEEE Standard 519	Establece objetivos para el diseño de sistemas eléctricos que contienen cargas lineales y no lineales, limitando la inyección de armónicos por parte de usuarios y definiendo límites de TDD y THD.
IEC 60479-2	Expone los efectos de la corriente sobre el hombre y el ganado, incluyendo impacto de corriente AC e impulsos eléctricos en el cuerpo humano, proporcionando rangos aceptables de corriente de contacto.
IEC 61000-3-2 (2000)	Expone límites para las emisiones de corrientes armónicas de equipos con corrientes de entrada hasta 16A por fase, asegurando compatibilidad con límites de voltaje en la red pública de baja tensión.
IEC 61000-3-6 (1996)	Expone los límites de emisión de corriente armónica para equipos conectados a sistemas de Media y Alta Tensión (entre 1 kV y 230 kV).

Fuente: Elaboración propia.

2. FUNDAMENTOS DE MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PARA CABLES SUBTERRÁNEOS

El control riguroso de la tensión inducida en las pantallas de los cables XLPE, en conformidad con la normativa regulatoria vigente (Sección 1.3), requiere ineludiblemente la traducción de la infraestructura física del cable a un modelo eléctrico funcional. Por lo tanto, el análisis se desplaza ahora hacia los principios teóricos y las metodologías esenciales para la representación precisa del comportamiento eléctrico de estos sistemas. Esto sienta las bases para construir el entorno de simulación propuesto.

2.1 PARÁMETROS CONCENTRADOS Y DISTRIBUIDOS

El paso inicial en la modelación de cables subterráneos consiste en definir cómo serán representados sus elementos constitutivos (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia). Dentro del análisis y la simulación de sistemas eléctricos, la representación de las líneas de transmisión y los cables subterráneos se aborda mediante dos enfoques fundamentales: los parámetros concentrados y los parámetros distribuidos. La elección del modelo es crítica para la precisión en el cálculo de la tensión inducida y depende directamente de la longitud del cable y del régimen de operación a estudiar.

2.1.1 Parámetros concentrados. Tal como se indica en “TLEIS,Nasser”¹², esta representación eléctrica se encarga de simplificar las propiedades eléctricas de la línea

¹² TLEIS,Nasser. Modelling of Multiconductor Overhead Power Lines, Underground and Submarine Cables: Elsevier, 2019. p. 101

de transmisión o cable subterráneo (resistencia, inductancia y capacitancia) representados como elementos localizados y discretos. El equivalente PI es uno de los modelos más comunes para este propósito, siendo especialmente recomendado para frecuencia fundamental y longitudes cortas. En este modelo, la impedancia y la admitancia totales se calculan multiplicando los parámetros por la longitud total del componente.

2.1.2 Parámetros distribuidos. De acuerdo con el manual de ATPDraw¹³, esta representación eléctrica considera que las propiedades eléctricas de la línea de transmisión o cable subterráneo están distribuidas uniformemente a lo largo de la longitud, esta representación generalmente es más precisa porque puede incorporar la dependencia de la frecuencia con los parámetros.

2.1.3 Modelos en ATP/Simulink. En Simulink solo se dispone del modelo PI, este es adecuado para líneas o cables de corta longitud y parámetros eléctricos constantes y que no dependen de la frecuencia mientras tanto en ATP dispone de una variedad de modelos, se encuentra el modelo PI, así como los modelos de J. Marti y de Noda que son fundamentales para la representación de parámetros dependientes de la frecuencia.

2.2 IMPEDANCIA DE RETORNO A TIERRA

La impedancia de retorno a tierra es el camino por donde la corriente remanente de un sistema eléctrico fluye de vuelta. Esta corriente puede circular por varias rutas, como la pantalla metálica del cable, estructuras paralelas, el neutro o la tierra física.

¹³ HØIDALEN, Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025, p. 193

De acuerdo con la IEEE 575 - 2014¹⁴ la impedancia de retorno se compone de la impedancia del blindaje o pantalla metálica y la de la tierra, siempre que el blindaje esté aterrizado en ambos extremos. Si la conexión a tierra no existe, el circuito queda abierto y no hay corriente de retorno, evitando pérdidas y sobrecalentamiento. Sin embargo, esto genera la acumulación de tensiones inducidas en el blindaje, lo que puede causar descargas eléctricas y deterioro del aislamiento¹⁵. Cuando el blindaje está aterrizado en ambos extremos, las tensiones inducidas se descargan, lo que mejora la seguridad del sistema.

En el RETIE¹⁶ se especifica que el valor máximo de la resistencia del terreno para un aterrizaje adecuado debe ser inferior a 10 ohmios. En caso de que la resistencia del terreno sea muy alta, la corriente de retorno disminuye, lo que aumenta la tensión inducida en la pantalla del conductor. Si el blindaje sólo está aterrizado en un extremo, la tensión será más alta en el punto más alejado del aterrizaje.

2.3 MATRICES DE IMPEDANCIA Y ADMITANCIA POR UNIDAD DE LONGITUD.

2.3.1 Modelo PI MATLAB/Simulink. En Simulink se encuentra el bloque AC Cable (Three-Phase), basado en el modelo equivalente PI, que permite representar cables de potencia. Este modelo se fundamenta en tres matrices principales: resistencia [R], inductancia [L] y capacitancia [C], las cuales se describen en el centro de ayuda de

¹⁴ IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. p. 11.

¹⁵ GOURAMANIS, K. V., et al. Sheath Voltage Calculations in Long Medium Voltage Power Cables. En: IEEE, 2015. p. 1

¹⁶ COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 3, Instalaciones Objeto del RETIE, p. 40.

Matlab¹⁷ y permiten caracterizar el comportamiento eléctrico del cable dentro de la simulación.

La matriz de resistencia [R] refleja las pérdidas óhmicas de los conductores, las pantallas y la trayectoria de retorno. Sus valores en la diagonal representan las resistencias propias de cada uno de estos elementos, mientras que los valores fuera de la diagonal describen el acoplamiento resistivo a través de la tierra o un neutro compartido.

La matriz de inductancia [L] describe los efectos magnéticos del sistema. Sus términos en la diagonal indican las inductancias propias de los componentes, y los términos fuera de la diagonal corresponden a las inductancias mutuas, que muestran el acoplamiento magnético entre fases, pantallas y la trayectoria de retorno.

La matriz de capacitancia [C] se encarga de los efectos eléctricos y el almacenamiento de energía. En su diagonal, se encuentran las capacitancias propias de cada conductor con respecto a la trayectoria de retorno. Los términos fuera de la diagonal representan las capacitancias mutuas entre las fases, pantallas y la tierra, reflejando así la interacción eléctrica entre estos elementos.

2.3.2 Modelo PI ATPdraw. En el programa ATP-EMTP, el módulo para la simulación de cables subterráneos se llama LCC (Line/Cable Component). Este módulo se basa en el modelo equivalente PI y utiliza las matrices de impedancia y admitancia formuladas por Ametani¹⁸ para describir el comportamiento eléctrico del cable.

La matriz de impedancia [Z] combina los efectos resistivos e inductivos, tanto propios de los conductores como de los acoplamientos mutuos y del retorno por tierra. Esta matriz

¹⁷ Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, AC CABLE (Three-Phase). [Consulta: 8 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/accablethreephase.html>

¹⁸ A. Ametani. A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. En: IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. vol. PAS-99, no. 3, p. 902–910

es crucial para modelar las caídas de tensión y el comportamiento del cable durante eventos transitorios.

Por otro lado, la matriz de admitancia $[Y]$, se asocia con los coeficientes de potencial y describe los acoplamientos capacitivos y las corrientes de desplazamiento del sistema. Sus valores dependen de la geometría del conductor, la pantalla, la armadura y el aislamiento. Esta matriz es la base para representar la respuesta dieléctrica y las corrientes transitorias.

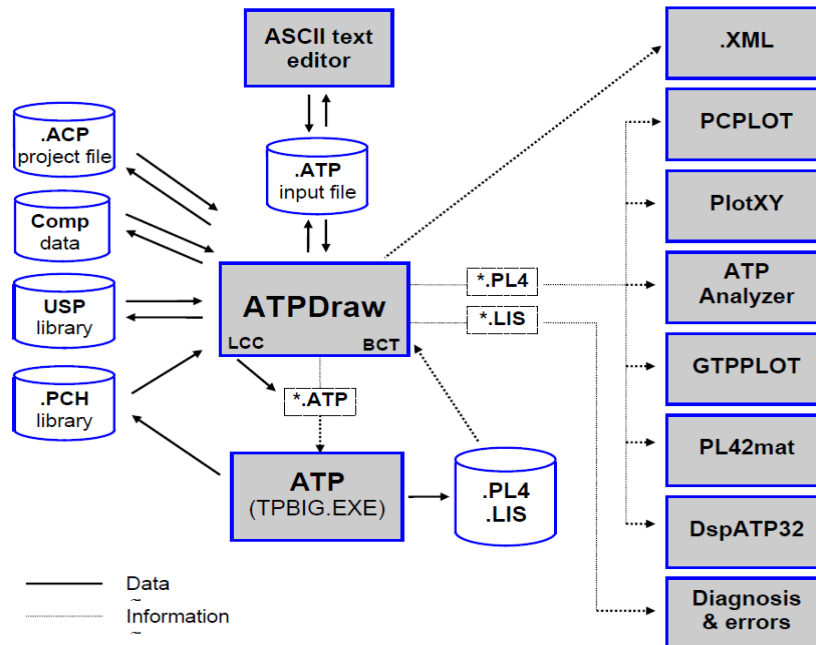
3. ENTORNO DE SIMULACIÓN: CARACTERIZACIÓN Y CONFIGURACIÓN

Una vez establecidos los fundamentos teóricos y el modelo de parámetros seleccionado para la representación del cable XLPE, el análisis se traslada a la implementación práctica. Esta etapa exige la caracterización y configuración de un entorno de simulación acoplado capaz de materializar dicha modelación. Por lo tanto, el presente numeral se concentra en describir las herramientas elegidas para el análisis de transitorios electromagnéticos (EMTP), con el fin de realizar la cuantificación de las tensiones inducidas en el sistema.

3.1 ATPDRAW: PREPROCESADOR GRÁFICO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS (EMTP)

3.1.1 ¿Qué es ATPDraw?. ATPDraw es una interfaz gráfica para el programa de transitorios electromagnéticos (EMTP) que opera en Windows. Su entorno visual permite construir circuitos eléctricos con componentes predefinidos o modelos propios, basando su funcionamiento sistemático en un archivo de proyecto con extensión .acp. Este archivo se crea automáticamente y actúa como el núcleo, interpretando la estructura del circuito y gestionando la comunicación con las demás librerías y archivos asociados, proceso que se ilustra en la Figura 1.

Figura 1. Interacción entre ATPDraw y otros programas ATP



Fuente: HØIDALEN, Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025, p. 26

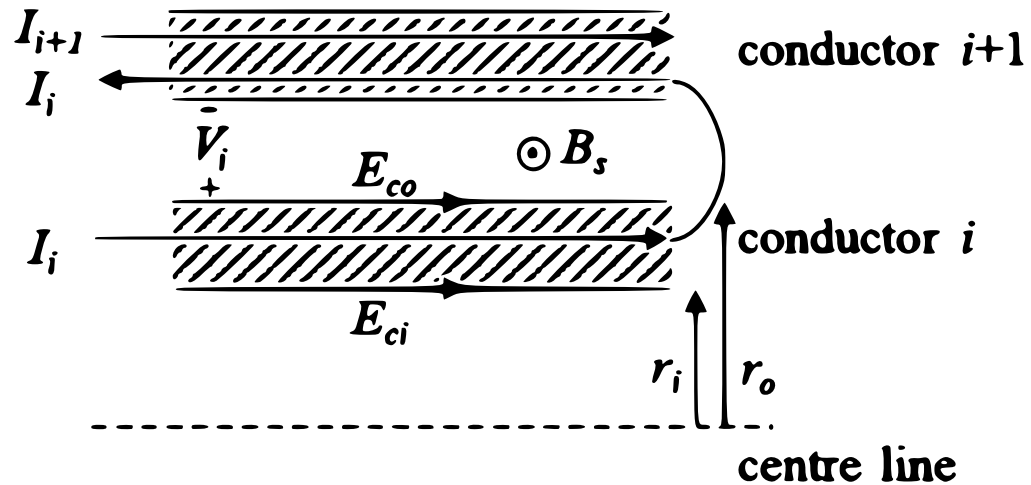
Este software se adquiere gratuitamente mediante la licencia oficial de ATP-EMTP, la cual, una vez aprobada la solicitud, proporciona acceso a la interfaz, su compilador y la herramienta de graficación PlotXY.

3.1.2 Bloque Line/Cable. Según describe el Manual de ATPDraw, el funcionamiento de este bloque se rige a partir de la formulación de Ametani¹⁹ que se usa tanto para los cables que van en tubería, como para los que van enterrados directamente. “Las impedancias de los cables se formulan primeramente en magnitudes de bucle. Quiere decir una corriente de bucle entra en el conductor i y sale por la siguiente capa, el

¹⁹ A. Ametani. A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. En: IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. vol. PAS-99, no. 3, p. 902–910

conductor $i+1$, como se muestra en la Figura 2. Las tensiones de bucle se miden entre los conductores”²⁰.

Figura 2. Geometría de cables coaxiales con cantidades de bucle



Fuente: HØIDALEN,Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025, p. 367

Este bloque permite trabajar con diferentes modelos de líneas, para efectos de este proyecto la configuración del cable se hará solo con el modelo PI-equivalente, este modelo usa una configuración de parámetros concentrados lo cual lo hace adecuado para líneas cortas. Este modelo realiza el cálculo de sus parámetros a frecuencia fija y no se ajustan para componentes armónicos en un amplio espectro.

3.2 SIMULINK Y SIMSCAPE ELECTRICAL

3.2.1 Matlab/Simulink. Simulink es un modelo de programación visual que se conecta al entorno de programación de Matlab, su uso principalmente es para simular el

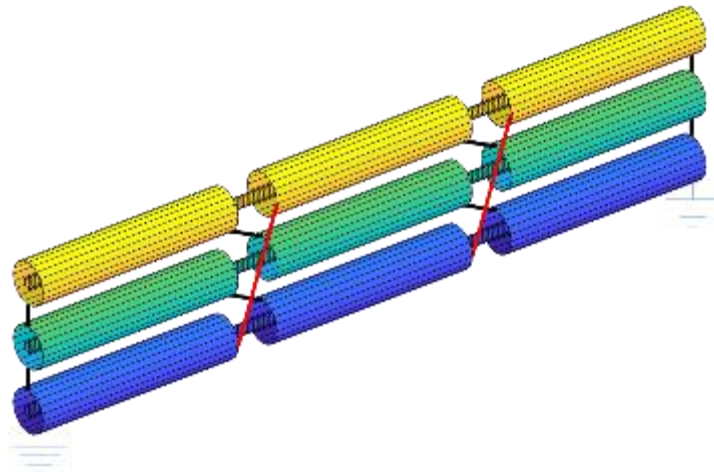
²⁰ HØIDALEN,Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025, p. 367.

comportamiento de modelos dinámicos ya sea lineales o no lineales. Esta interfaz permite utilizar múltiples tipos de librerías para diferentes necesidades de ingeniería, lo cual la hace una herramienta muy útil a la hora de evaluar modelos reales.

Para este proyecto se hace uso de la licencia educativa de Mathworks que proporciona la universidad, dando acceso a todas las herramientas que ofrece Matlab incluyendo Simulink y su librería de Simscape Electrical. En esta librería se encuentran componentes para el análisis de sistemas eléctricos, electrónicos y mecatrónicos, permitiendo evaluar su comportamiento.

3.2.2 AC Cable (Three-Phase). La librería de Simscape Electrical maneja el bloque de AC Cable que modela un cable trifásico con una funda conductora que rodea cada fase como se ve en la Figura 3. Existe también el bloque AC Cable (Multiple Pi-sections) que es la conexión en serie de varios AC Cable, con la particularidad que permite hacer transposición en la pantalla esto quitando la necesidad de unir varios cables manualmente.

Figura 3. AC Cable con transposición en pantalla



Fuente: Mathworks, Centro de ayuda de Matlab, Documentación, AC Cable (Three-Phase), Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/accablethreephase.html>

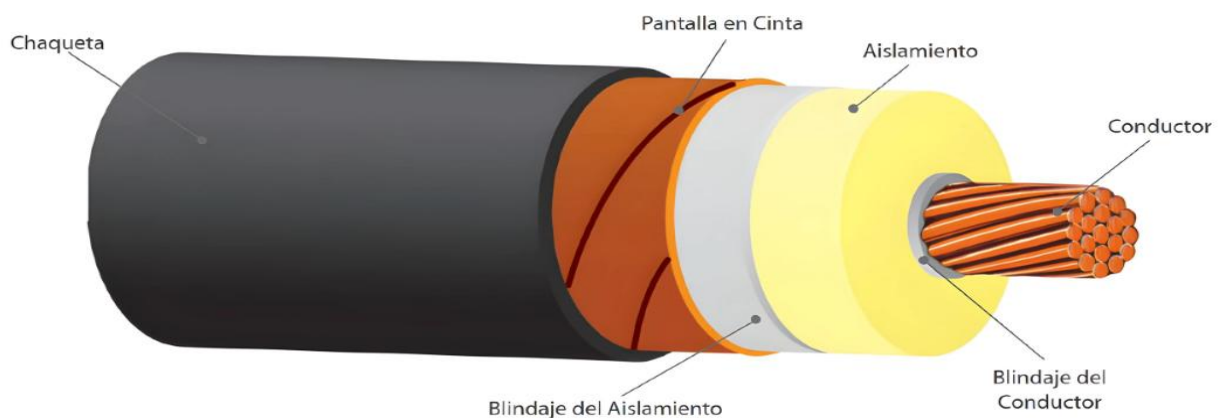
Esta librería también permite lo que es el uso de secciones individuales de cable, es decir, utilizar un segmento de cable y conectarlos con otros variando las conexiones tanto del cable como de la pantalla, permitiendo una mayor libertad en el entorno de simulación de los cables XLPE.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL CABLE DE ESTUDIO

El XLPE se produce a través de un proceso de reticulación del polietileno que une químicamente sus cadenas moleculares, pasando de ser un material termoplástico a uno termoestable, dicho proceso le otorga propiedades mecánicas y térmicas superiores. Este tipo de aislamiento se ha convertido en un estándar para la mayoría de cables en media tensión por las prestaciones que ofrece.

La construcción de un cable XLPE monopolar de media tensión se compone de una serie de elementos que cumplen el objetivo de proteger el conductor central y aislarlo del ambiente externo de donde se pueda encontrar, tal cual como se ve en la Figura 4.

Figura 4. Composición de cable XLPE para media tensión.



Fuente: Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008.

“Pantalla en cinta de cobre: Consiste en una pantalla metálica no magnética de cobre que se sitúa sobre el blindaje del aislamiento con el fin de realizar la puesta a tierra, se instala de forma helicoidal sobre el blindaje del aislamiento recubriéndolo en su totalidad.”²¹

“Blindaje del aislamiento: Es una capa de material que recubre al aislamiento, está fabricada de polietileno semiconductor y su objetivo es confinar de forma homogénea las líneas del campo eléctrico al interior del aislamiento.”²²

“Aislamiento: El polietileno de cadena cruzada o XLPE (Cross-Linked Polyethylene) es el tipo de material de aislamiento más usado en los cables para media tensión y el caucho de etileno propileno o EPR (Ethylene Propylene Rubber) se emplea en menor proporción, en ambos se les aplica el proceso de vulcanización, logrando que los materiales sean más termoestables.”²³

Tabla 2. Características de los Materiales de Aislamiento de Cables para Media Tensión

Características	Unidades	XLPE	EPR
Rigidez dielectrica	kV/mm	25	25
Permitividad electrica		2,1	2,3
Factor de Perdidas (Tangente Delta)	%	0,1	1,5
Constante de Aislamiento	Mohm-km	6100	6100
Resistencia a la Ionización		Buena	Muy Buena
Resistencia a la Humedad		Muy Buena	Excelente
Color		Traslúcido opaco	Rojizo
Temperatura de Operación		90	90
Temperatura Máxima de Sobrecarga*		130	130
Temperatura máxima en cortocircuito**		250	250
Principales Ventajas		Bajo factor de pérdidas	Flexibilidad

²¹ Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008, p. 8.

²² Ibid., p. 8.

²³ Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008, p. 6.

*Los tiempos de operación en sobrecarga no debe exceder 1500 horas acumuladas durante la vida útil del cable.

**Adicionalmente es recomendable que los períodos continuos en sobre carga no excedan dos horas. Los tiempos de duración de un corto circuito son normalmente menores a un segundo.

Fuente: Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008, p. 7.

“Blindaje del conductor: Este material se encuentra en contacto con el conductor y se encarga de recubrir al conductor, dándole una forma circular al mismo. Este primer material se encarga de que el campo eléctrico sea radial a partir de su superficie, evitando concentraciones puntuales de campo, obteniéndose así una superficie equipotencial alrededor de esta primera capa.”²⁴

“Conductor: Es el encargado de transportar la energía eléctrica, los materiales más usados son el cobre y el aluminio y sus propiedades se detallan en la siguiente tabla.”²⁵

Tabla 3. Características del Cobre y del Aluminio

Propiedades	Unidades	Cobre suave	Aluminio 1350
Densidad	g/cm ³	8.89	2.705
Resistividad	Ω - mm ² /km	17.241	28.172
Conductividad	(%IACS)	100	61.2
Tensión de Rotura	Mpa	220	155 - 200
Elongación a Rotura	%	25 - 30	1.4 - 2.3
Norma ASTM (NTC)		B3 (359)	B230 (360)
Resistencia a la Corrosión		Excelente	Buena

Fuente: Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008, p. 4.

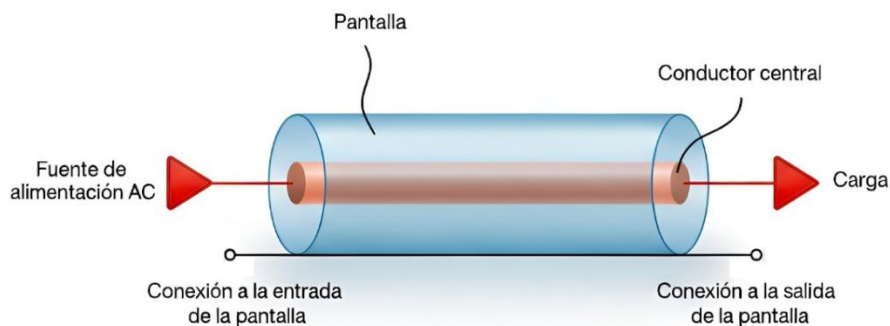
²⁴ Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008, p. 5.

²⁵ JEREZ MOSQUERA, Yeison Fabian. Diseño de un escudo para la atenuación de campos magnéticos de baja frecuencia producidos por cables eléctricos subterráneos. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2022, p. 28.

4. ANÁLISIS DE ESCENARIOS Y METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

En esta sección se explican los métodos de simulación en ATPdraw y Simulink, así como los escenarios bajo los cuales se someten a prueba los cables XLPE subterráneos de media tensión. Para evaluar el comportamiento de la tensión inducida en la pantalla del cable se evalúa el comportamiento de ocho diferentes cables en dos escenarios distintos y uno adicional de estos en un escenario de condiciones reales. En la Figura 5 se muestra el modelo de cable en cuestión, donde se ajusta según el escenario.

Figura 5. Modelo de cable unipolar con pantalla metálica.



Fuente: Elaboración propia.

4.1 ESCENARIO 1

Este escenario representa un punto de partida para analizar las diferentes configuraciones de puesta a tierra de la pantalla en cables subterráneos, el objetivo de este escenario es observar el desempeño de las diferentes configuraciones durante su operación en estado estable. Este escenario se divide en cuatro versiones diferentes, donde se varía solo las configuraciones de puesta a tierra en la pantalla y la longitud del

conductor, las condiciones de operación del conductor se mantienen iguales, trabajando en un entorno trifásico balanceado.

Cabe destacar que la variación de distancia del cable se hace en proporción a la regulación de tensión que este se somete. Para este proyecto se acoge la norma del operador de red del departamento de Santander ESSA²⁶, esta norma resalta que, para circuitos en media tensión entre subestaciones, la regulación de tensión no debe superar el 3%. Igualmente, para la resistencia de puesta a tierra se contempla el mínimo permitido que da el RETIE²⁷ en Colombia, que es de 10 Ω para instalaciones en media tensión. En la siguiente tabla se observan las características y valores que solicitan los entornos de simulación.

Tabla 4. Condiciones de Simulación escenario 1.

Característica	Unidad	Valor
Cargabilidad	%	80
Frecuencia Fundamental	Hz	60
Resistencia del Terreno	Ω/m	100
Permitividad relativa del entorno		13
Disposición	Trébol	

Fuente: Elaboración propia.

²⁶ ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A.E.S.P, Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución, Proceso Gestión Expansión del Sistema, p. 12.

²⁷ COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 3, Instalaciones Objeto del RETIE, p. 40.

4.1.1 Versión 1. En esta versión se contempla la configuración tomada de “Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures”²⁸ que representa un modelo teórico donde se aterriza la pantalla directamente a un extremo y en el otro se hace a través de una resistencia de 1 MΩ. Esta configuración representa como la variación en la longitud del conductor afecta la tensión inducida en la pantalla.

4.1.2 Versión 2. En esta versión se adopta una de las configuraciones más utilizadas, la cual es poner a tierra la pantalla en un solo extremo. Al dejar la pantalla técnicamente abierta, se evita la existencia de corrientes circulantes por la misma, pero a su vez el extremo que queda abierto puede que presente tensiones inducidas considerables.

4.1.3 Versión 3. En esta versión la pantalla se encuentra totalmente desconectada del sistema de puesta a tierra.

4.1.4 Versión 4. En esta versión la pantalla se encuentra aterrizada en sus dos extremos, ayudando a mitigar las tensiones inducidas en la misma. Al estar en esta configuración se pueden presentar corrientes circulantes dentro de la pantalla.

4.2 ESCENARIO 2

Para este escenario solo se hace uso de las configuraciones de puesta a tierra en versiones 2 y 4 del escenario anterior, dado que estas dos configuraciones son las que más se adaptan en el mundo real. A diferencia del escenario anterior las condiciones de simulación cambian. En este caso la distancia se maneja constante, pero se varía el

²⁸ QUIROGA QUIROGA, Oscar Arnulfo, ESPARZA, José David y SERNA SUÁREZ, Iván David. Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures. En: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA - SICEL. 2024. vol. 11.

seccionamiento del cable con el objetivo de observar el efecto que tiene la transposición de la pantalla en la tensión inducida de la misma.

Tabla 5. Condiciones de Simulación escenario 2.

Característica	Unidad	Valor
Cargabilidad	%	100
Frecuencia Fundamental	Hz	60
Resistencia del Terreno	Ω/m	100
Permitividad relativa del entorno		13
Disposición	Trébol	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Versión 1. Conductor seccionado con transposición en pantalla y aterrizado en un extremo.

4.2.2 Versión 2. Conductor seccionado con transposición en pantalla y aterrizado en ambos extremos.

4.3 ESCENARIO 3

Como ejemplo práctico se toma el escenario presentado en “Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network”²⁹ donde se presenta una granja solar ubicada en Canadá, que se encuentra dividida en dos secciones cada una de 10 MW.

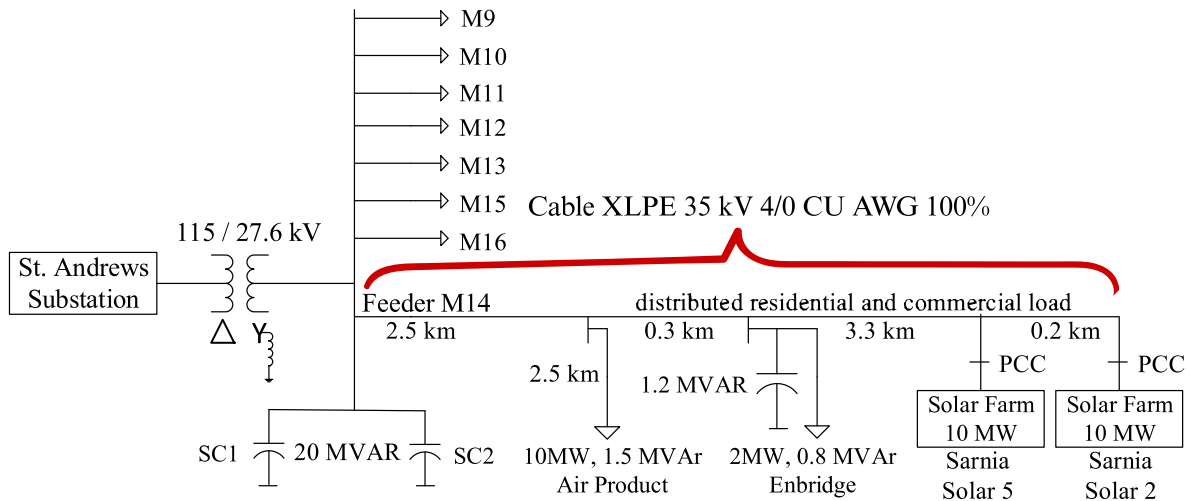
²⁹ VARMA, Rajiv K., *et al.* Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network. En: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. pp. 89

Actualmente, en esta granja se utilizan líneas de media tensión aéreas para llevar la energía generada por los paneles en forma de corriente alterna hasta la subestación Andrews.

Para efectos de este proyecto se analiza la Solar Sarnia 2 (SS2) donde con ayuda del sistema SCADA de la subestación y simulaciones en PSCAD se hicieron análisis de redes en media tensión con una desviación de datos relativamente bajo, comparando los valores del sistema SCADA contra las simulaciones en PSCAD. Gracias a este trabajo se obtuvieron datos de espectro armónico en estado estable.

Con esta información se busca observar el efecto de distorsión armónica sobre la tensión inducida en la pantalla, si se intercambiaran las líneas de transmisión aéreas por cables XLPE en disposición subterránea. En la Figura 6. se puede observar un esquema unifilar de la granja solar y donde se analizará el cable en cuestión.

Figura 6. Esquema unifilar del escenario real.



Fuente: Figura adaptada de VARMA, Rajiv K., *et al.* Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network. En: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. pp. 89

Para este escenario real se opta por simularse en las mismas dos versiones que se trabajaron en el escenario dos, con la particularidad que no se va a variar el seccionamiento del conductor, esto dado que la configuración con solo tres secciones es la que mejor estrategia para mitigar el efecto de tensión inducida en la pantalla, ya que la transposición hace que las fases no compartan la misma pantalla en más de un tramo.

En este escenario se considera para cada una de las dos versiones, una variación en el espectro armónico de la señal de tensión de alimentación del cable, para observar el efecto que tiene la distorsión en el comportamiento de la tensión inducida en la pantalla del cable XLPE. Para esto se analizan tres casos en cada una de las versiones, un caso con el sistema sin armónicos, otro con la distorsión armónica que se presenta al evaluar el sistema con un nivel de cortocircuito cuatro veces mayor al nominal de la subestación Andrews. En el artículo “se investigan casos de cuatro y cinco veces el nivel de cortocircuito para anticipar casos de impactos adversos en casos extremos”³⁰, pero para efectos de este proyecto se asumen los primeramente mencionados.

Adicionalmente a esto, como un caso de condiciones extremas, se analiza el mismo escenario real en condiciones de distorsión armónica máxima permitida. Para esto se acoge la norma IEEE 519 2022³¹ que define límites de distorsión total de la demanda (TDD) y distorsión armónica total (THD). Para los valores de distorsión armónica individual que son los que solicitan directamente los simuladores se van a usar los mismos valores del caso anterior o sea el real, pero escalados a un factor de diez veces

³⁰ VARMA, Rajiv K., et al. Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network. En: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. pp. 89

³¹ IEEE 519 Std-2022. Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. p. 17

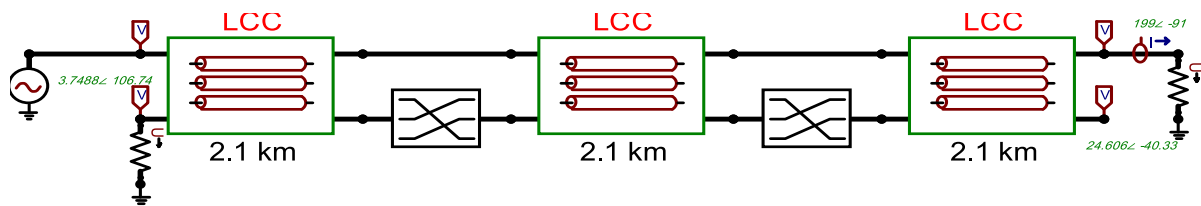
su magnitud, esto hace que el sistema trabaje al límite de distorsión armónica total e individualmente permitido por la norma, siendo este el caso más desfavorable.

Cabe resaltar que en el artículo no se describe condiciones físicas del entorno y mucho menos del terreno, se asumen las mismas condiciones de simulación que en el escenario 2.

4.3.1. Inyección de Armónicos. Para simular el impacto de los armónicos generados los paneles fotovoltaicos, en Simulink, se hace uso del bloque “Voltage Source (Three-Phase)”³² que aparte de servir como fuente de alimentación, también da la posibilidad de generar armónicos por fase. Por otro lado, en ATPDraw se puede realizar utilizando el bloque “HFS Source”³³ que de igual manera que en Simulink permite generar armónicos por fase, pero este bloque debe estar en paralelo con la fuente de alimentación.

4.3.2 Versión 1. En esta versión la pantalla del conductor se encuentra aterrizada en un solo extremo y seccionada en tres partes iguales, mediante la transposición. En las Figuras 7 y 8 se pueden observar las conexiones dentro de ATPDraw y Simulink correspondientemente, representando en ambos programas el mismo escenario sin armónicos.

Figura 7. Escenario real versión 1 sin armónicos en ATPDraw

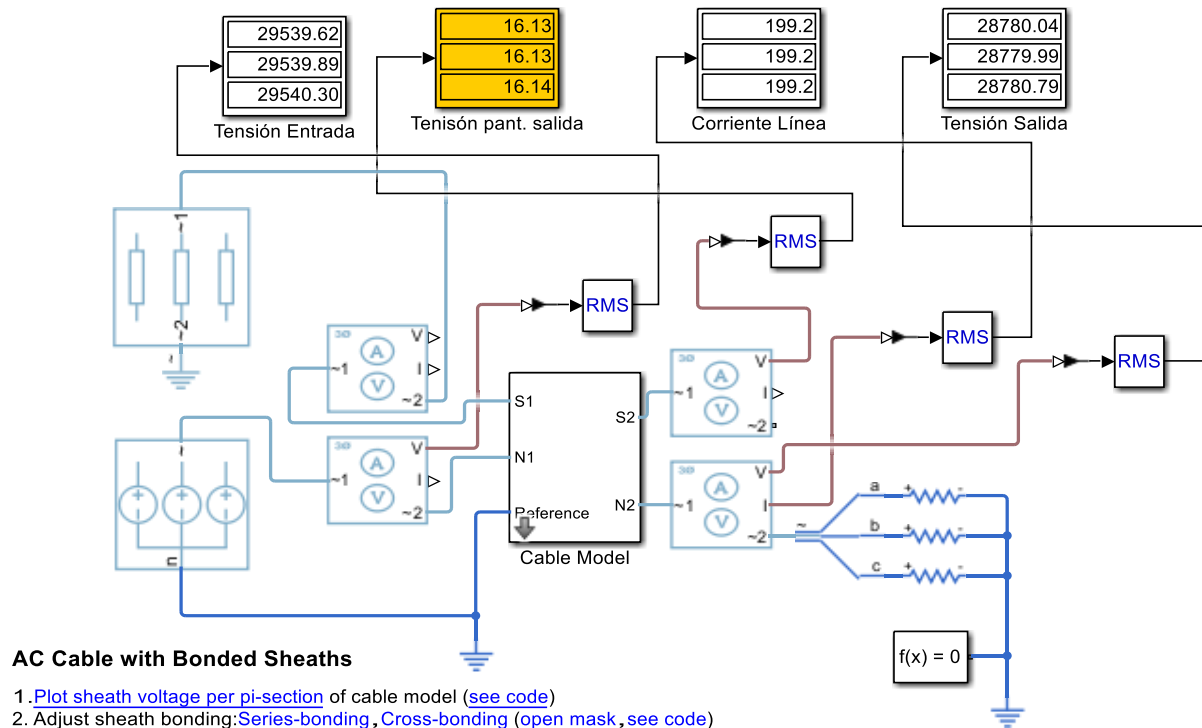


Fuente: Elaboración propia.

³² Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, Voltage Source (Three-Phase). [Consulta: 8 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R2025a/sps/ref/voltagesourcethreephase.html>

³³ Contenido de ayuda de ATPDraw para Windows. [Sitio web]. HFS Source. [Consulta: 9 de septiembre 2025]. Disponible en: https://www.atpdraw.net/help/harmoni_source.htm

Figura 8. Escenario real versión 1 en Simulink.



AC Cable with Bonded Sheaths

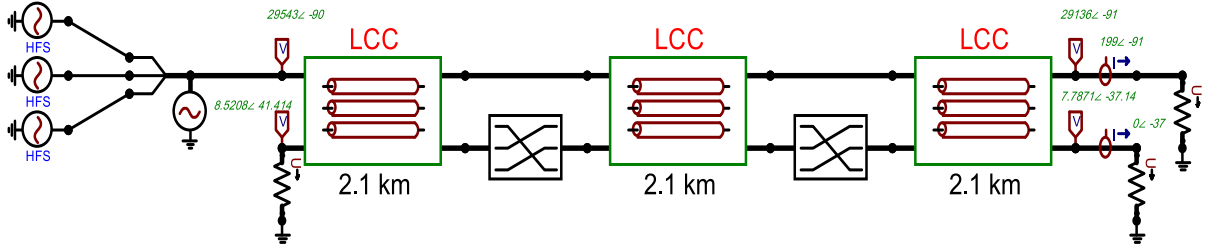
1. [Plot sheath voltage per pi-section](#) of cable model ([see code](#))
2. Adjust sheath bonding: [Series-bonding](#), [Cross-bonding](#) ([open mask](#), [see code](#))
3. [Look under mask](#) to see pi-section connections
4. Compare sheath bonding methods: [simulate](#) ([see code](#)), [plot results](#) ([see code](#))
5. [Explore simulation results](#) using [Simscape Results Explorer](#)
6. [Learn more](#) about this example

Copyright 2017-2023 The MathWorks, Inc.

Fuente: Elaboración propia.

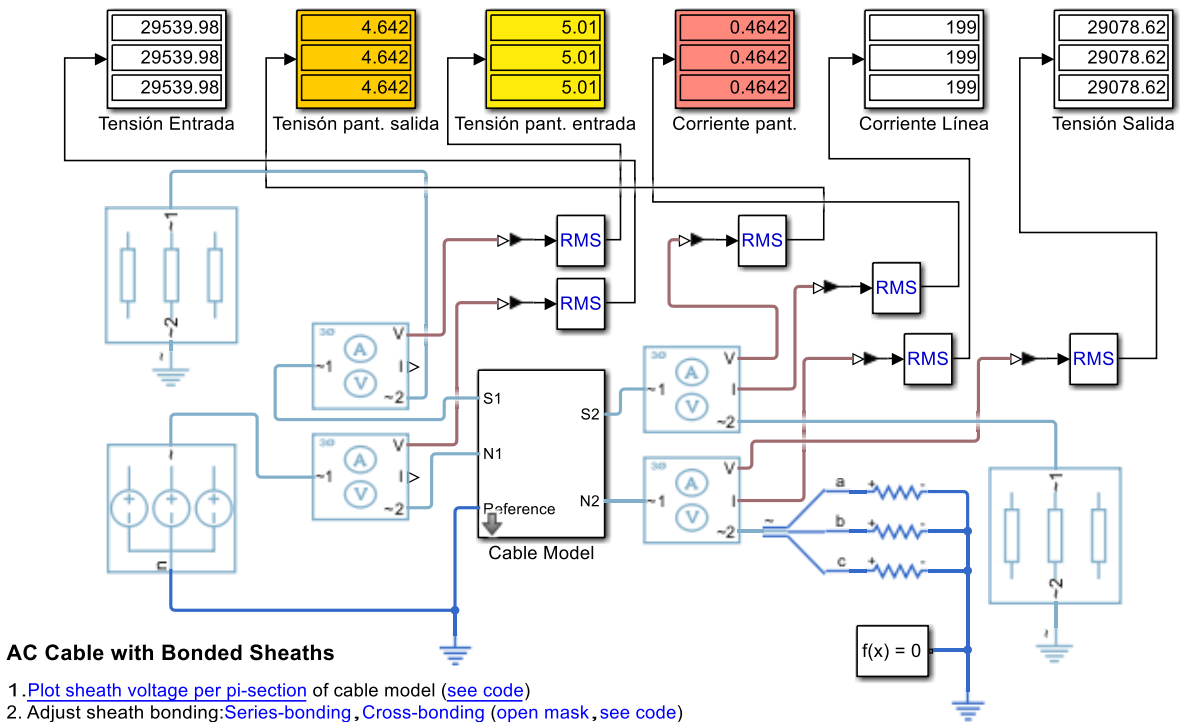
4.3.3 Versión 2. En esta versión se aterriza la pantalla en ambos extremos, igualmente seccionada en tres partes, y a continuación se puede observar en la Figura 9 la incorporación del bloque HFS source en ATPDraw como fuente de distorsión armónica. En la Figura 10 se encuentra la misma versión en Simulink, pero como se menciona anteriormente la misma fuente de alimentación permite la inyección de armónicos al sistema, por lo que el esquema solo va a variar en la conexión de la pantalla respecto a la versión anterior.

Figura 9. Escenario real versión 2 con armónicos en ATPDraw



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Escenario real versión 2 con armónicos en Simulink.



AC Cable with Bonded Sheaths

1. [Plot sheath voltage per pi-section of cable model \(see code\)](#)
2. Adjust sheath bonding: [Series-bonding](#), [Cross-bonding \(open mask, see code\)](#)
3. [Look under mask](#) to see pi-section connections
4. Compare sheath bonding methods: [simulate \(see code\)](#), [plot results \(see code\)](#)
5. [Explore simulation results](#) using [Simscape Results Explorer](#)
6. [Learn more](#) about this example

Copyright 2017-2023 The MathWorks, Inc.

Fuente: Elaboración propia

4.4 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y REGISTRO DE RESULTADOS

Para este proyecto se adopta una metodología de medición intuitiva que permite la fácil interpretación y análisis de los resultados simulados. Tanto ATPDraw como Simulink ofrecen sistemas de medida para las diferentes variables eléctricas que se deben analizar en los cables XLPE y para este caso la tensión inducida en la pantalla es la de mayor interés.

4.4.1. Medición en Simulink. La gama de herramientas que ofrece Simulink en su Toolbox de Simscape Electrical se adaptan estrechamente con la necesidad que tenga el usuario, en este caso la medición de tensión se hace utilizando el sensor “Current and Voltage Sensor (Three-Phase)”³⁴ que permite la medición de tensión y corriente en AC.

4.4.2. Medición en ATPDraw. De igual manera ATPDraw ofrece algunos elementos de medición que permiten analizar el comportamiento de los escenarios de manera numérica y gráfica a través del PlotXY, para este caso se utiliza el medidor de tensión “Voltage probe”³⁵. Una desventaja que tiene ATPDraw es que no tiene un bloque por defecto específico que calcule el valor RMS de una señal, lo que presenta una dificultad cuando la señal no es de naturaleza sinusoidal pura, como en el caso de análisis armónico del escenario real. Como solución a esto se opta por obtener una ventana de muestreo de dos ciclos en el PlotXY y a través de un vector de datos determinar el valor RMS en Matlab.

³⁴ Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, Current and Voltage Sensor (Three-Phase). [Consulta: 14 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R2025a/sps/ref/currentandvoltagegensorthreephase.html>

³⁵ Contenido de ayuda de ATPDraw para Windows. [Sitio web]. Voltage Probe. [Consulta: 14 de septiembre 2025]. Disponible en: https://www.atpdraw.net/help/open_probe.htm

5. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

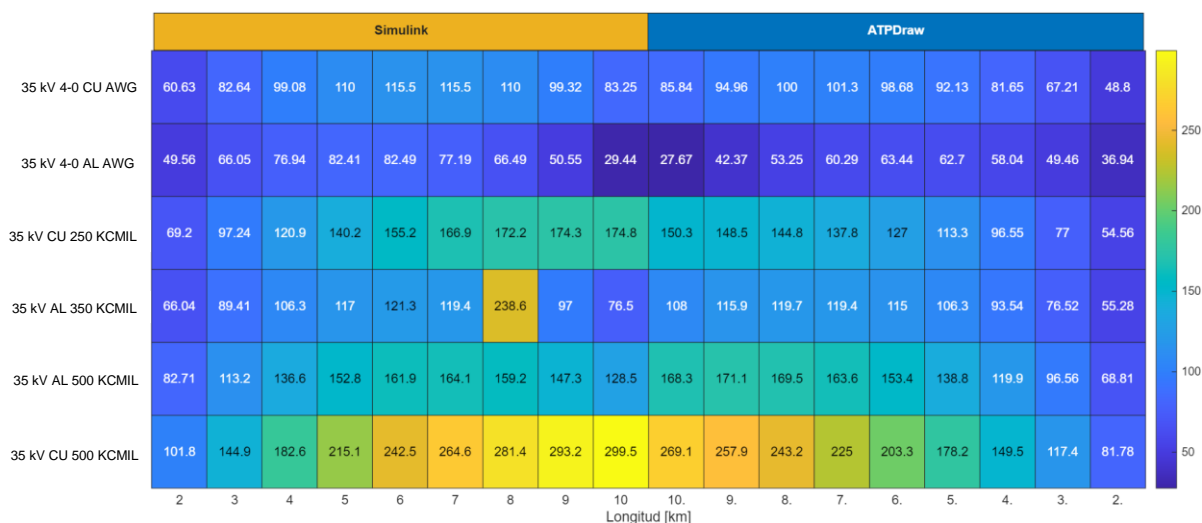
5.1 IMPACTO DE LAS CONDICIONES DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN

En esta sección, se presenta de forma visual mediante mapas de calor el registro de las mediciones de tensión inducida en la pantalla de cables XLPE, realizadas a cada uno de los escenarios mencionados en la sección anterior. Para la representación del escenario uno, se utilizó un mapa de calor donde se muestran los datos obtenidos en los dos softwares de simulación, en el lado izquierdo se ubican los datos de Simulink organizados en orden ascendente de longitud, y en el lado derecho se presentan los datos de ATPdraw, reflejados de forma simétrica para que ambos conjuntos de datos se unan en una misma longitud central. Para el escenario dos, se presentan los datos de cada software de manera individual, cada uno en un mapa de calor.

5.1.1 Escenario 1. Este escenario está compuesto de cuatro versiones, cada una con una configuración diferente, las cuales se explican en la sección anterior.

5.1.1.1 Versión 1. Los resultados registrados para esta versión se presentan en la Figura 11. La variable principal de análisis es la longitud y se ilustra claramente el impacto que tiene esta en la tensión inducida, los valores más altos de tensión inducida se presentan a mayor longitud y a medida que aumentan la capacidad del conductor.

Figura 11. Tensiones inducidas escenario uno versión uno.

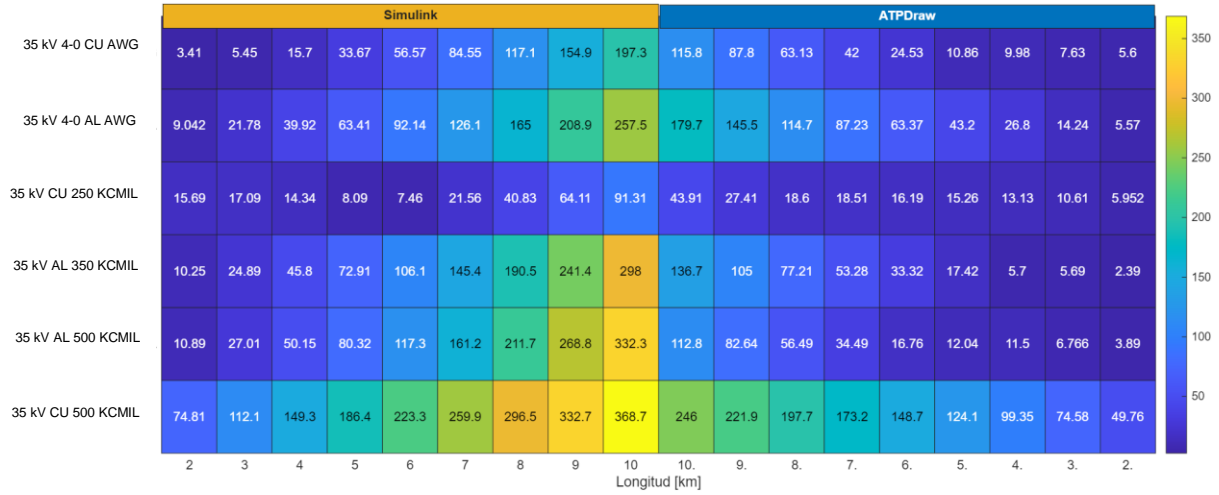


Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2 Versión 2. Los resultados registrados para esta versión se presentan en la Figura 12. La mediciones en este caso se realizan en el extremo donde está abierta la pantalla, esto en base a la IEEE 575 2014, la cual establece que "En este tipo de instalaciones, se induce una tensión en la cubierta del cable durante el funcionamiento, que aumenta progresivamente con la distancia al punto de conexión a tierra y alcanza un máximo en el punto más alejado del extremo de conexión a tierra".³⁶ La variable principal de análisis es la longitud y se ilustra claramente el impacto que tiene esta en la tensión inducida. Similar a la versión anterior, se observa que las tensiones inducidas se presentan a mayor longitud y en el conductor con más capacidad.

³⁶ IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. p. 10.

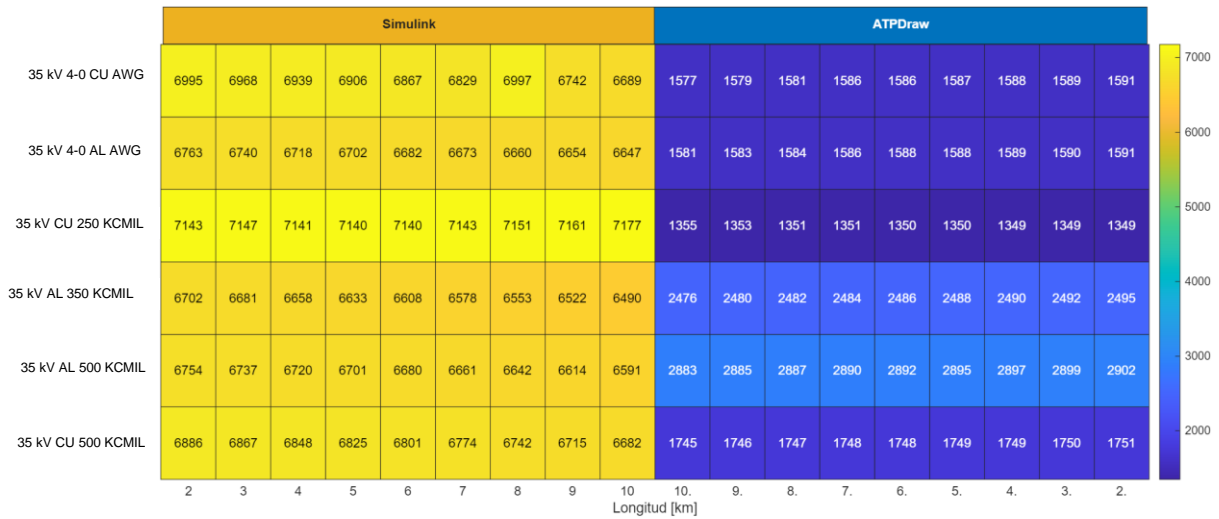
Figura 12. Tensiones inducidas escenario uno, versión dos.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3 Versión 3. Los resultados registrados para esta versión se presentan en la Figura 13. En este caso ambos extremos de la pantalla están abiertos por lo cual se realiza la medición en ambos extremos de la pantalla y se selecciona el más representativo. En este caso se evidencia de manera clara lo peligroso que es no aterrizar la pantalla en al menos un punto.

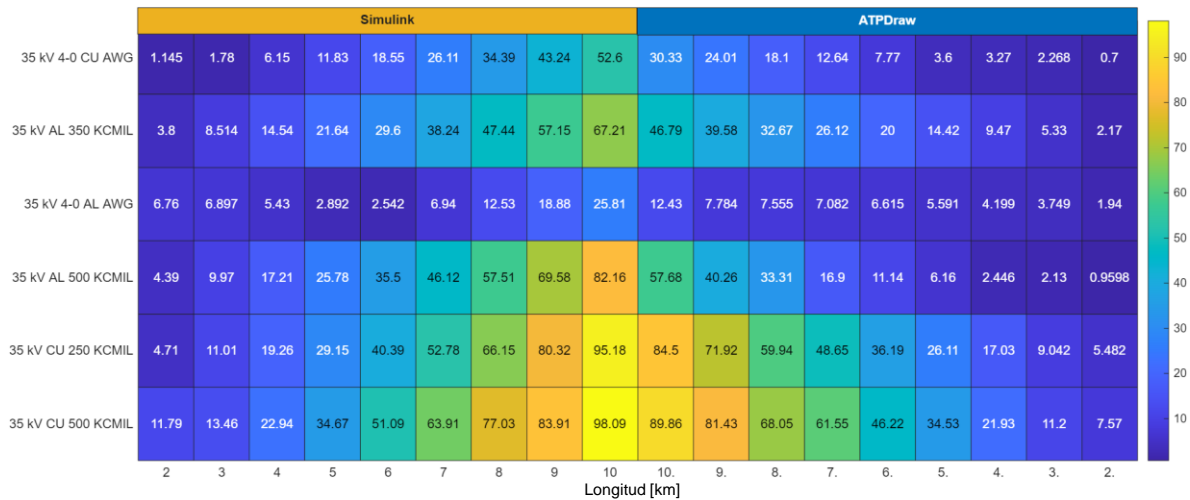
Figura 13. Tensiones inducidas escenario uno, versión tres.



Fuente: Elaboración propia

5.1.1.4 Versión 4. Los resultados registrados para esta versión se presentan en la Figura 14. En este caso se realiza la medición en ambos extremos de la pantalla y se toma el valor más representativo. Al igual que en las versiones anteriores se evidencia de manera clara el impacto que tiene la longitud en la tensión inducida de la pantalla.

Figura 14. Tensiones inducidas escenario uno, versión cuatro.



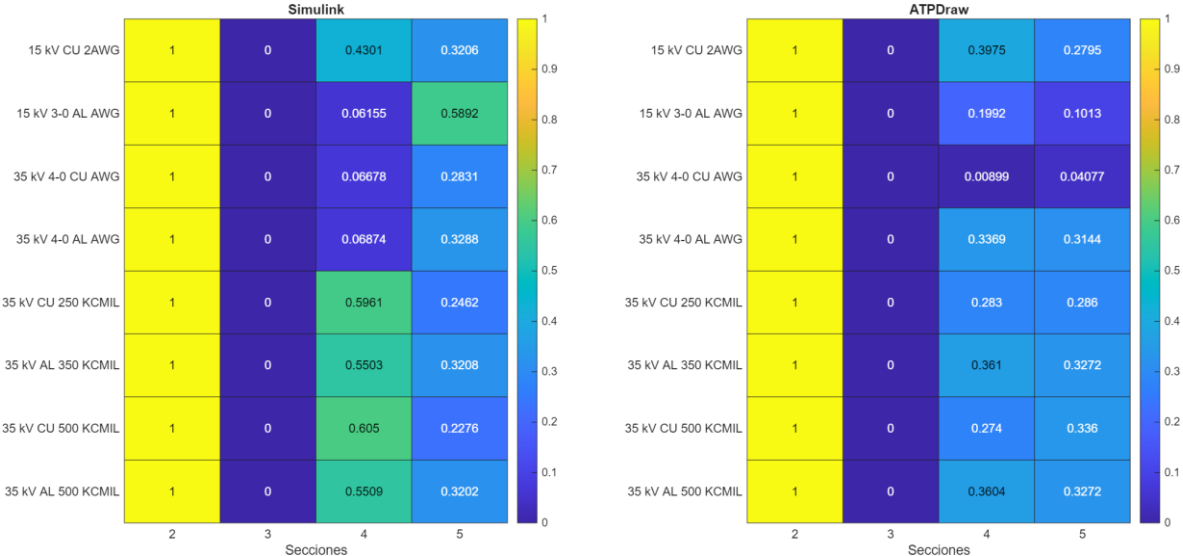
Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Escenario 2. Este escenario está compuesto de dos versiones, cada una con una configuración diferente, las cuales se explican en el capítulo anterior. En la visualización de estos datos se opta por normalizar las tensiones, es decir, la tensión máxima en cada cable va a ser representada por 1 y la mínima por 0. Se hace esto para mejorar visualmente los datos dado que la capacidad nominal de cada cable es diferente, y como se menciona anteriormente, la tensión inducida es proporcional a este aspecto.

5.1.2.1 Versión 1. En este caso se parte de la misma configuración utilizada en la versión dos del escenario uno, incorporando además la transposición de la pantalla (cross-bonding), que constituye la variable principal de análisis en esta versión. Los resultados presentados en la Figura 15, muestran que la menor magnitud de tensión inducida en la pantalla se obtiene cuando los conductores se dividen en tres secciones menores

consecutivas de igual longitud, conforman una sección principal. Este comportamiento concuerda con lo establecido en la norma IEEE 575 2014³⁷, la cual señala que en sistemas trifásicos se requieren tres secciones secundarias consecutivas para conformar una sección principal, de manera que cada fase ocupe de forma sucesiva todas las posiciones geométricas de la formación. De este modo, se logra una cancelación parcial o total de las corrientes inducidas en las pantallas y, en consecuencia, una reducción significativa de la tensión de blindaje.

Figura 15. Tensiones inducidas escenario dos, versión uno.



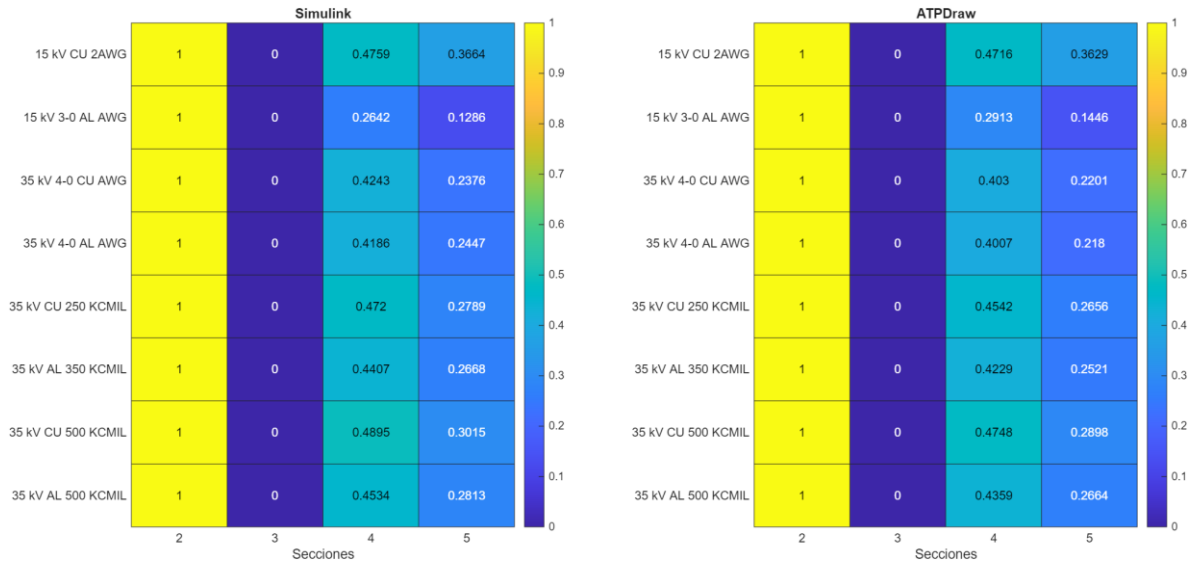
Fuente: Elaboración propia

5.1.2.2 Versión 2. Los resultados registrados para esta versión se presentan en la Figura 16. Esta versión es similar a la anterior; sin embargo, en este caso se emplea la configuración de la versión 4 del escenario uno, en la cual la pantalla se encuentra aterrizada en ambos extremos. Los resultados muestran nuevamente un comportamiento favorable cuando la sección mayor se compone de tres secciones menores consecutivas,

³⁷ IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV. p. 180.

evidenciando además una reducción adicional en la magnitud de la tensión inducida con respecto a la versión previa, debido a la puesta a tierra en ambos extremos.

Figura 16. Tensiones inducidas escenario dos, versión dos.



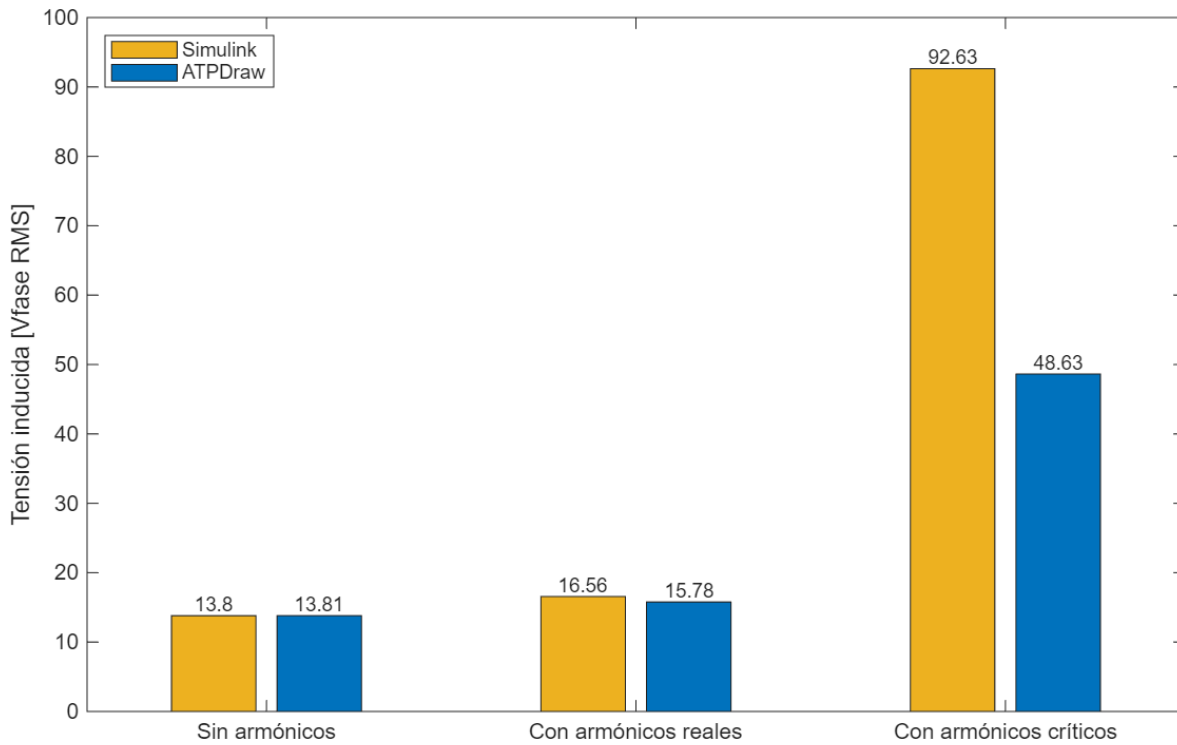
Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Escenario 3. Este escenario está compuesto de dos versiones, cada una con una configuración diferente, las cuales se explican en el capítulo anterior. La visualización de estos datos está dada por un diagrama de barras el cual contiene los datos registrados en Simulink y ATPdraw en distintas condiciones de operación.

5.1.3.1 Versión 1. En este caso se parte de la misma configuración empleada en la versión uno, escenario dos, considerada una de las más favorables, con un seccionamiento de 3 partes, incorporando la presencia de armónicos como variable principal de análisis, que constituye la variable principal de análisis en esta versión. Los resultados presentados en la Figura 17, muestran que la presencia de armónicos influye de manera directa en la magnitud de la tensión inducida en la pantalla, tal como lo establece la teoría. En condiciones normales, el incremento es moderado; sin embargo, bajo escenarios críticos de distorsión armónica los valores pueden crecer de forma

considerable. Este aumento significativo representa un riesgo para la integridad del aislamiento y la confiabilidad del sistema eléctrico.

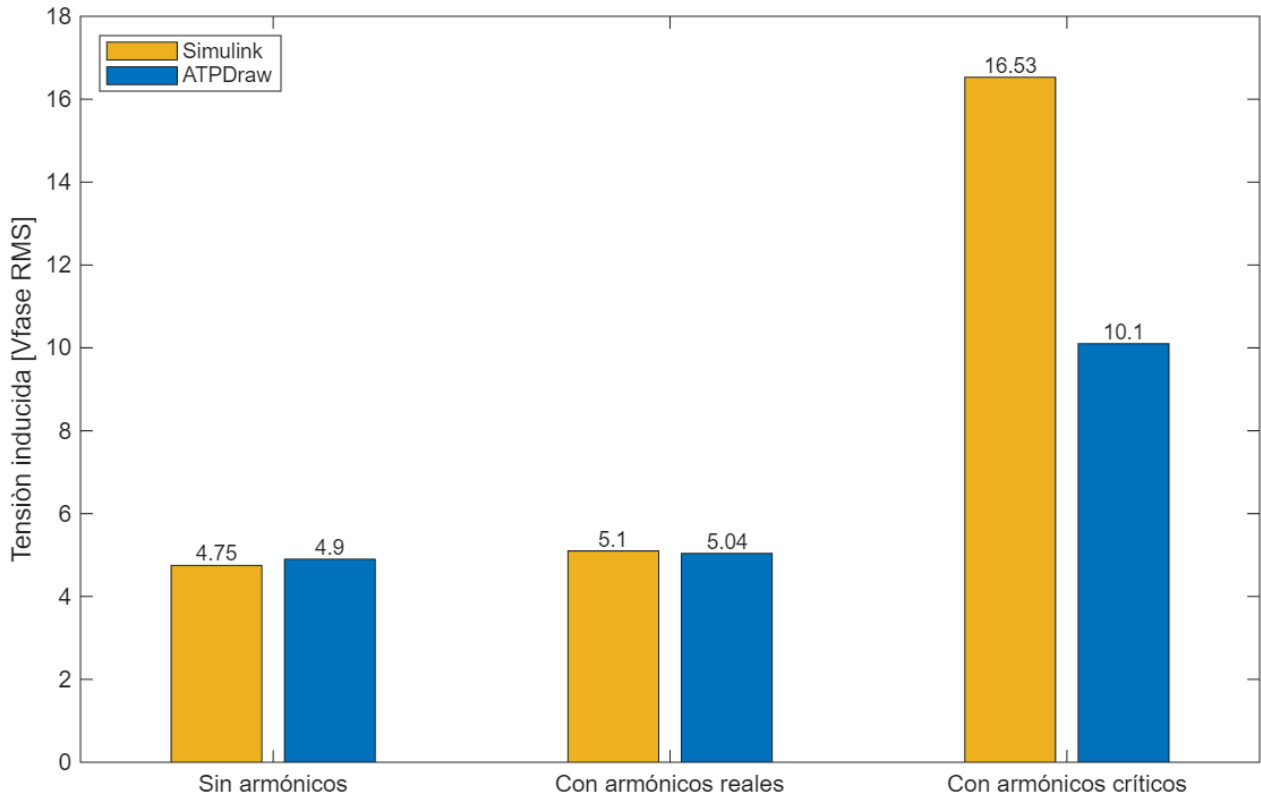
Figura 17. Tensiones inducidas escenario tres, versión uno.



Fuente: Elaboración propia

5.1.3.2 Versión 2. Para esta versión se implementa un cambio en la configuración, en la cual la pantalla se encuentra aterrizada en ambos extremos, manteniendo las mismas condiciones de operación. Los resultados presentados en la Figura 18, evidencian una disminución de la tensión inducida debido al doble aterrizamiento, no obstante, bajo condiciones críticas de distorsión armónica se observa igualmente un incremento considerable en la magnitud de dicha tensión.

Figura 18. Tensiones inducidas escenario tres, versión dos.



Fuente: Elaboración propia

5.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MODELOS (ATPDRAW VS. SIMULINK)

Como se evidencia en la sección anterior, los datos obtenidos por los dos simuladores no son en algunos casos muy similares entre sí, hay una desviación en los valores de tensión inducida en la pantalla de los cables XLPE. En la Figura 19 se puede observar la discrepancia promedio en voltios que hay entre las mediciones tomadas en Simulink y ATPDraw.

Figura 19. Diferencia promedio en voltios de la tensión inducida entre ATPDraw y Simulink.

15 kV 2 CU AWG	1.59	0.03	4071.56	0.06	0.02	0.41
15 kV 3-0 AL AWG	16.91	30.26	1554.22	12.59	0.67	0.72
35 kV 4-0 CU AWG	11.71	33.48	5309.78	10.35	1.48	2.15
35 kV 4-0 AL AWG	14.11	33.73	5106.56	10.18	2.88	3.30
35 kV CU 250 KCMIL	24.57	12.32	5802.57	3.53	9.34	6.37
35 kV AL 350 KCMIL	13.54	77.61	4116.89	24.14	2.11	5.59
35 kV AL 500 KCMIL	0.42	102.47	3785.56	32.90	8.06	6.68
35 kV CU 500 KCMIL	33.34	74.27	5045.22	4.16	9.52	9.56
	Esc1 V1	Esc1 V2	Esc1 V3	Esc1 V4	Esc2 V1	Esc2 V2
	Escenario					

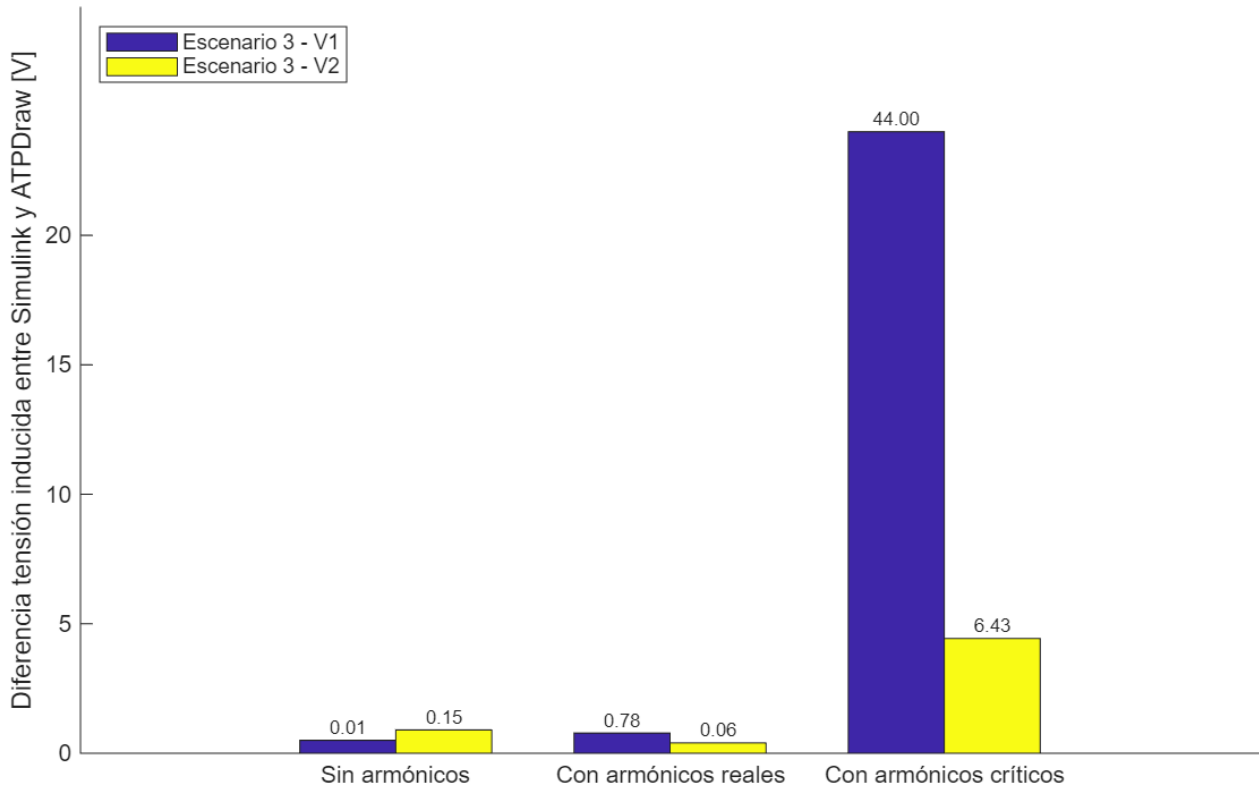
Fuente: Elaboración propia

La versión tres del escenario uno destaca dado que es donde la pantalla del cable se encuentra abierta en ambos extremos. En este caso la tensión en la cubierta depende netamente de la FEM inducida en la pantalla de cada conductor, dado que los modelos de cable en ATPDraw y Simulink no trabajan con la misma base matemática para calcular este efecto, se obtiene datos tan alejados entre sí.

Para el escenario tres la discrepancia de estos valores se reduce en sus dos versiones, algo importante que destacar es que como se ve en la Figura 20 la discrepancia más grande se presenta en la situación de armónicos críticos, esto se debe a que diferencia de Simulink el modelo PI de ATPDraw “utiliza parámetros calculados a una frecuencia fija y con la admitancia en derivación concentrada en cada terminal”³⁸, quiere decir que para análisis de amplio espectro armónico el modelo PI de ATPDraw no es el más adecuado.

³⁸ HØIDALEN, Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025, p. 196.

Figura 20. Diferencia en voltios de la tensión inducida entre ATPDraw y Simulink para el escenario tres.



Fuente: Elaboración propia

5.3 CONDICIONES DE RIESGO

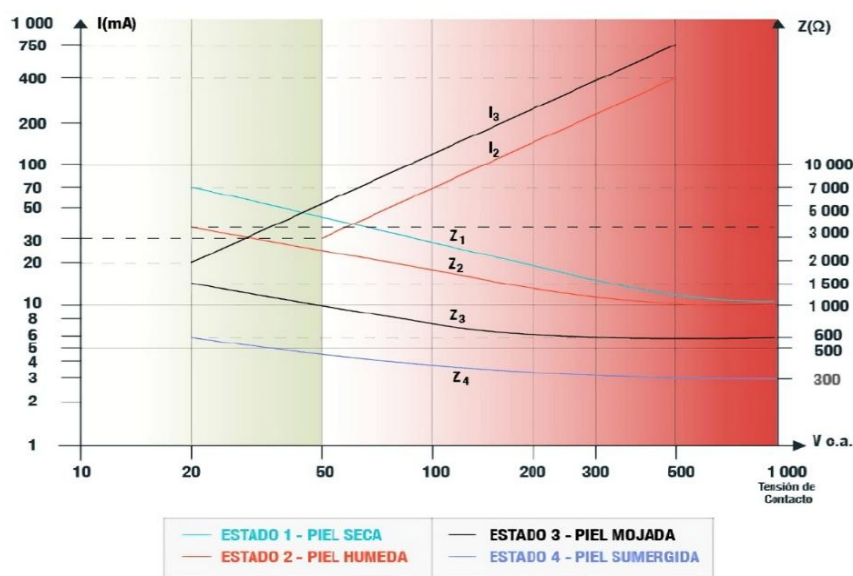
En Colombia actualmente no se establece un estándar que regule la tensión inducida en la pantalla de cables subterráneos, lo que representa un riesgo inherente tanto para la integralidad del sistema como para las personas que interactúen con él.

El factor de riesgo que más prevalece en este caso es la tensión de contacto, que según establece el RETIE se puede presentar por “Rayos, fallas a tierra, fallas de aislamiento,

violación de distancias de seguridad”³⁹. Para efectos de este proyecto la principal fuente de riesgo es la falla en el aislamiento del cable, lo que permite la presencia de descargas eléctricas. Este fenómeno representa un riesgo en la pérdida de confiabilidad del sistema, lo que podría generar fallas e interrupciones en este. Además, representa una amenaza para los seres vivos que estén en contacto con esta infraestructura, lo cual puede presentar accidentes graves, electrocuciones y en el peor de los casos la muerte.

En la Figura 21 se muestran los niveles de corriente a los que puede estar expuesto el cuerpo humano al entrar en contacto con una infraestructura eléctrica. Estos niveles dependen de las condiciones de la piel: son menores cuando está seca, debido a su mayor resistencia al paso de la corriente, y aumentan significativamente cuando está mojada o sumergida, ya que en ese caso la resistencia es menor.

Figura 21. Impedancia del cuerpo humano.

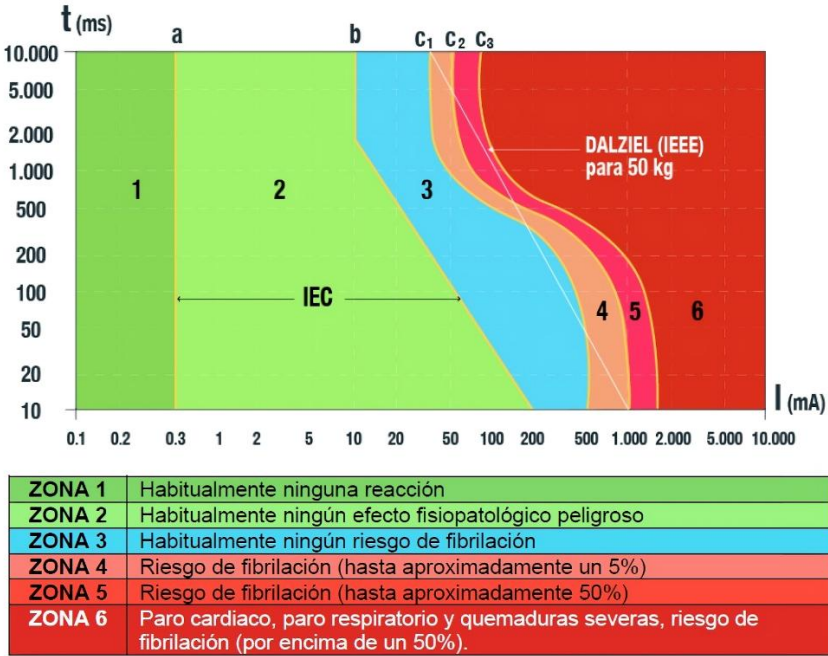


Fuente: COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 1, Disposiciones Generales. p. 38.

³⁹ COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 1, Disposiciones Generales.

En la Figura 22 se puede observar los efectos que tiene la circulación de corriente eléctrica al paso por el cuerpo humano por un determinado periodo de tiempo, lo que implica una razón de análisis al fenómeno de la tensión inducida en la pantalla de cables subterráneos.

Figura 22. Zonas de tiempo/corriente de los efectos de las corrientes alternas de 15 Hz a 100 Hz



Fuente: COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 1, Disposiciones Generales. p. 36.

Para garantizar la seguridad en cables XLPE, donde la normativa colombiana no fija límites para la tensión inducida en pantalla, se establece un umbral máximo de 50 V. Este valor se justifica en la protección humana: según la Figura 21 (Impedancia del cuerpo humano), una piel húmeda reduce drásticamente la resistencia, aumentando el riesgo de corriente.

Un límite de 50 V asegura que, incluso en estas condiciones, la corriente se mantenga en la "Zona 1" de la Figura 22 (Zonas de tiempo/corriente de los efectos de las corrientes alternas de 15 Hz a 100 Hz), donde los efectos son imperceptibles y no dañinos. Superar este umbral podría llevar a la "Zona 2" o "Zona 3", con riesgo de contracciones musculares o daños graves. Así, este límite no solo protege al personal y la integridad del sistema, sino que sienta un precedente para futuras regulaciones en Colombia, promoviendo instalaciones eléctricas subterráneas más seguras y eficientes.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El estudio confirma que la magnitud de la tensión inducida en la pantalla de los cables XLPE está determinada por una combinación de factores físicos y operativos. Se concluye que esta tensión es directamente proporcional tanto a la longitud del tendido como al orden de los armónicos presentes en el sistema. Las componentes de alta frecuencia no solo incrementan el acoplamiento electromagnético y la impedancia del sistema, sino que también elevan el estrés térmico sobre el conductor, acelerando la degradación del aislamiento.

Adicionalmente, las prácticas de instalación son críticas para el control de este fenómeno. La configuración de la puesta a tierra de la pantalla influye directamente en los niveles de tensión: mientras que una conexión en ambos extremos la mitiga eficazmente, las configuraciones con un solo punto de tierra o sin conexión a tierra provocan una acumulación peligrosa de potencial. Para contrarrestar estos efectos, la transposición de pantallas (cross-bonding), especialmente al seccionar la línea en tres partes, demuestra ser la estrategia de mitigación más eficiente y práctica al equilibrar los acoplamientos electromagnéticos.

Desde el punto de vista metodológico, las herramientas de simulación presentaron capacidades distintas. El modelo PI de ATPDraw, al basarse en una frecuencia fija, es adecuado para análisis básicos en estado estable, pero muestra limitaciones en estudios con alto contenido armónico. Por el contrario, Simulink ofrece una representación más precisa al considerar parámetros dependientes de la frecuencia, consolidándose como la herramienta preferente para análisis de distorsión armónica.

6.2 RECOMENDACIONES

Es indispensable realizar un análisis detallado previo a la instalación, utilizando herramientas de simulación como ATPDraw y Simulink. Este análisis debe evaluar de forma integral factores como la longitud del cable, la configuración de la puesta a tierra, la transposición y la posible presencia de armónicos para optimizar el diseño y prevenir riesgos operativos.

Se debe garantizar la aplicación de buenas prácticas durante la instalación física de los cables subterráneos. Esto incluye respetar los radios de curvatura mínimos, asegurar la integridad de las conexiones de puesta a tierra y ejecutar correctamente los esquemas de transposición con personal calificado, para asegurar la seguridad, eficiencia y durabilidad del sistema.

6.2.1 Futuras investigaciones. Ampliar el alcance del análisis para incluir escenarios de transitorios y el espectro de supra armónicos (2-150 kHz). Estas condiciones, no abordadas en estado estable, pueden generar sobretensiones significativamente mayores y representan un riesgo adicional para la seguridad y confiabilidad del sistema.

De igual manera, validar los hallazgos de este trabajo empleando plataformas de simulación alternativas (por ejemplo, PSCAD o EMTP-RV). Esto permitiría realizar un análisis comparativo más amplio sobre las capacidades y limitaciones de los diferentes entornos de modelado.

6.2.2 Propuesta regulatoria. Dada la ausencia de una normativa nacional específica sobre la tensión inducida en pantallas de cables XLPE de media tensión, se recomienda adoptar de manera preventiva un límite conservador de 50 V en condiciones normales de operación. Esta medida priorizaría la seguridad del personal técnico y la integridad del sistema eléctrico hasta que se establezca una regulación formal en Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

A. Ametani. A General Formulation of Impedance and Admittance of Cables. En: IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS. vol. PAS-99, no. 3, p. 902 – 910.

Agencia Europea de Medio Ambiente. [Sitio web]. Unión Europea: Climate-ADAPT, Reemplazo de líneas aéreas por cables subterráneos en Finlandia. [Consulta: 25 de mayo 2025]. Disponible en: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/metadata/case-studies/replacing-overhead-lines-with-underground-cables-in-finland>

Centelsa, Boletín Técnico, Cables y Tecnología, 2008.

Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, AC CABLE (Three-Phase). [Consulta: 8 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/sps/ref/accablethreephase.html>

Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, Current and Voltage Sensor (Three-Phase). [Consulta: 14 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R2025a/sps/ref/currentandvolumesensorthreephase.html>

Centro de ayuda de Matlab. [Sitio web]. Documentación, Voltage Source (Three-Phase). [Consulta: 8 de septiembre 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/releases/R2025a/sps/ref/voltagesourcethreephase.html>

COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 3, Instalaciones Objeto del RETIE.

COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS, Resolución 40117 (2, abril, 2024) Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, Libro 1, Disposiciones Generales.

Contenido de ayuda de ATPDraw para Windows. [Sitio web]. HFS Source. [Consulta: 9 de septiembre 2025]. Disponible en: https://www.atpdraw.net/help/harmoni_source.htm

Contenido de ayuda de ATPDraw para Windows. [Sitio web]. Voltage Probe. [Consulta: 14 de septiembre 2025]. Disponible en: https://www.atpdraw.net/help/open_probe.htm

DU,Y.; WANG,X. H. y YUAN,Z. H. Induced Voltages and Power Losses in Single-Conductor Armored Cables. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009.

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A.E.S.P, Normas para el cálculo y diseño de sistemas de distribución, Proceso Gestión Expansión del Sistema.

GOURAMANIS,K. V., et al. Sheath Voltage Calculations in Long Medium Voltage Power Cables. En: IEEE, 2015.

HAYT, William H. Teoria Electromagnetica - 8b: Edicion. MC Graw Hill, 2000.

HØIDALEN,Hans Kristian, et al. ATPDraw Users' Manual version 7.7 for Windows, 2025.

IEEE 575 Std-2014. Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV.

IEEE 519 Std-2022. Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.

JEREZ MOSQUERA, Yeison Fabian. Diseño de un escudo para la atenuación de campos magnéticos de baja frecuencia producidos por cables eléctricos subterráneos.

Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2022.

MEDIA TENSIÓN Cobre 90°C XLPE 15kV 100% PC PVC. Nexans - Centelsa by Nexans | Electrificamos el futuro en Colombia [página web]. [Consultado el 8, julio, 2025]. Disponible en: <https://www.nexans.co/es/products/Redes-de-Transmisión-y-Distribución-de-Energía/Cables-de-Media>

Nasser D. Tleis, Modelling of multi-conductor overhead lines and cables, En: Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice. 1 ed. Oxford: Newnes, 2008, p. 74-199.

Nasser D. Tleis. Modelling of Multiconductor Overhead Power Lines, Underground and Submarine Cables: Elsevier, 2019.

POLIETILENO RETICULADO: características y aplicaciones | POLISANTAFE. POLISANTAFE [página web]. [Consultado el 7, julio, 2025]. Disponible en: <https://polisantafe.com.ar/poliestireno-reticulado>

QUIROGA QUIROGA, Oscar Arnulfo; ESPARZA, José David y SERNA SUÁREZ, Iván David. Induced Voltage in Cable Shielding by Harmonics and Deficiencies in Installation Procedures. *En: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA - SICEL. 2024. vol. 11.*

VARMA, Rajiv K., *et al.* Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network. *En: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016. pp. 89*