



Comité de Estudios B5 – Automatización y Control de
Subestaciones
Grupo de trabajo WG B5.8
Fecha V1: 30-12-2020
Versión No. 2 - Actualización – 17 de Noviembre de 2021



DOCUMENTO TÉCNICO

NECESIDADES, REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES EN COLOMBIA (IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850)

NOVIEMBRE 2021

CONTENIDO

1.	GENERALIDADES	6
2.	PARTICIPANTES	7
3.	ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	8
4.	INTRODUCCIÓN	10
5.	ESTADO DEL ARTE DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES	11
6.	INVESTIGACIÓN SECTORIAL	15
6.1.	METODOLOGÍA DE LA ENCUESTA	15
6.2.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ENCUESTA	15
6.2.1.	Participación por región en la encuesta	15
6.2.2.	Participantes de la encuesta	16
6.2.3.	Inversión en la digitalización de subestaciones	17
6.2.4.	Capacidad para migrar a subestación digital	18
6.2.5.	Expectativas de implementación en subestaciones digitales	19
6.2.6.	Implementación de subestaciones digitales con IEC 61850	20
6.2.7.	Dispone de guías de implementación para subestaciones digitales	22
6.2.8.	Equipos utilizados en subestaciones digitales	23
6.2.9.	Modalidad de implementación de subestaciones digitales	24
6.2.10.	Área encargada de promover la implementación de subestaciones digitales	25
6.2.11.	Digitalización de subestaciones aplicada a gestión de activos (CREG 015)	26
6.2.12.	Ventajas del gemelo digital para validación de subestaciones digitales	27
6.2.13.	Participación en elaboración de un documento técnico desde CIGRE	28
6.3.	INTERROGANTES ADICIONALES – PREGUNTAS ABIERTAS REALIZADAS EN LA ENCUESTA	28
6.3.1.	¿Qué desafíos económicos se ha enfrentado al momento de implementar una SED?	28
6.3.2.	¿Qué desafíos técnicos y tecnológicos se ha enfrentado al momento de implementar una SED?	30
6.3.3.	¿Qué desafíos regulatorios se ha enfrentado al momento de implementar una SED?	31
6.3.4.	¿Al momento de implementar SED, en cuántas de estas subestaciones se implementó el bus de estación y cuál ha sido el grado de implementación?	32

6.3.5. ¿Al momento de implementar SED, en cuántas de estas subestaciones se implementó el bus de proceso y cuál ha sido el grado de implementación?	32
6.3.6. En caso de realizar contratación externa en su empresa para la implementación de SED, ¿cuáles fueron las razones para hacerlo?	33
6.3.7. ¿Qué factores de éxito considera importantes al momento de implementar el estándar IEC 61850 en su compañía?	33
6.3.8. Durante las fases de operación y mantenimiento de las SED, ¿cuáles beneficios han percibido para la mejora en la confiabilidad operacional?	34
6.3.9. ¿Qué otros desafíos diferentes a los ya mencionados se han identificado al momento de implementar una SED?	35
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Niveles de digitalización en subestaciones Fuente: Tomado de Colombia Inteligente (2019).....	12
Figura 2. Resultados encuesta – Participación por región.	16
Figura 3. Resultados encuesta – Tipos de participantes.....	16
Figura 4. Resultados encuesta – Inversiones próximas de las empresas del sector eléctrico en SED.....	17
Figura 5. Resultados encuesta – Capacidades de migración hacia SED en las empresas del sector eléctrico.	18
Figura 6. Resultados encuesta – Implementación próxima de SED según utilities.	20
Figura 7. Resultados encuesta – Cantidad de SED con IEC 61850 implementadas por Utilities.....	21
Figura 8. Resultados encuesta – Guías de implementación de SED en utilities en Colombia	23
Figura 9. Resultados encuesta – Dispositivos típicos que hacen parte de una SED.....	24
Figura 10. Resultados encuesta – Modalidad usada por utilities para implementar SED....	25
Figura 11. Resultados encuesta – Promoción de implementación de SED en las utilities...26	
Figura 12. Resultados encuesta – Digitalización de subestaciones y gestión de activos, en utilities.	27
Figura 13. Resultados encuesta – Ventajas de gemelo digital para validación de SED	27
Figura 14. Resultados encuesta – Potencial participación en elaboración de documentos.28	
Figura 15. Resultados encuesta – Desafíos en la implementación de SEDs	29
Figura 16. Resultados encuesta – Desafíos en la implementación de SEDs (Porcentajes) 29	

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Lecciones aprendidas en Colombia. Fuente: Tomado de Colombia Inteligente [8].	13
TABLA 2. Acciones para impulsar la digitalización de las subestaciones en Colombia. Fuente: [8].....	14
TABLA 3. Resultados encuesta – Expectativas sobre inversiones futuras en SED.....	17
TABLA 4. Resultados encuesta – Capacidades de migración hacia SED.....	18
TABLA 5. Resultados encuesta – Implementación próxima de SED.....	19
TABLA 6. Resultados encuesta – Cantidad de SED con IEC 61850 implementadas.....	20
TABLA 7. Resultados encuesta – Uso de guías de implementación para SED	22
TABLA 8. Resultados encuesta – Modalidad usada por para implementar SED.....	24
TABLA 9. Resultados encuesta – Promoción de implementación de SED en las empresas	25
TABLA 10. Resultados encuesta – Digitalización de subestaciones y gestión de activos...26	
TABLA 11. Desafíos técnicos y tecnológicos al implementar SED.	30

NECESIDADES, REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES (IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850)

RESUMEN

En este documento el grupo de trabajo B.5.8 de CIGRE Colombia, recopila el estado actual de Subestaciones Eléctricas Digitales (SED) en las empresas del sector eléctrico colombiano, se plasman las necesidades, requerimientos y desafíos durante todo su proceso de implementación. En este reporte técnico el grupo de trabajo analiza cómo avanza Colombia con cada una de las experiencias adquiridas en la puesta en marcha de subestaciones eléctricas digitales y las socializa con la comunidad CIGRE, la academia y la industria. Se exponen una de las estrategias de implementación y validación desarrolladas en las utilities que permiten realizar una correcta y adecuada planeación, diseño, operación y comisionamiento de este tipo de sistemas.

PALABRAS CLAVES

Subestaciones digitales, bus de proceso, bus de estación, control, protección, comunicaciones, gemelo digital, control primario, control secundario, control terciario, interoperabilidad, IEC 61850.

1. GENERALIDADES

En este reporte técnico se realiza un análisis de cómo avanza Colombia en la implementación de subestaciones digitales de manera parcial mediante la digitalización de los sistemas de protección y control, o la digitalización en su totalidad incluyendo los equipos de patio Transformadores de Corriente y Transformadores de Potencial¹, presentando los requerimientos, desafíos y necesidades de las compañías del sector eléctrico, teniendo en cuenta el cumplimiento del estándar internacional IEC 61850. Por otro lado, el reporte aborda mediante una investigación sectorial, la manera cómo el sector industrial, se viene preparando para la implementación de SED, con el fin de lograr una correcta y adecuada planeación, diseño, operación y comisionamiento de este tipo de sistemas.

¹ En el alcance de este documento, ambos casos serán denominados como Subestación Digital Eléctrica (SED).

2. PARTICIPANTES

El grupo de trabajo estuvo conformado por las personas que se listan a continuación:

Líderes del grupo de trabajo WG B5.8

Fabio Hernández	HART E&C CONSULTING fabio.hernandez@hart-ecc.com
Juan Fernando Piñeros	XM jpineros@XM.com.co
Eduardo Gómez Luna	Universidad del Valle eduardo.gomez@correounivalle.edu.co

Integrantes del grupo de trabajo WG B5.8

Mónica Quintero	EPM monica.quintero@epm.com.co
Wilson Castillo	ISA wcastillo@isa.com.co
Oscar Andrés Tobar Rosero	Universidad Nacional de Colombia ootobarr@unal.edu.co
Juan David Molina	Colombia Inteligente juandavid.molina@colombiainteligente.org

Miguel Fuertes Bravo	PTI S.A (miguelfuertes@pti-sa.com.co)
Cristóbal Marino Giraldo Arenas	CELSIA (cmgiraldo@celsia.com)
Pedro León Hinestroza García	CELSIA (plhinestroza@celsia.com)
Manuel Urbina	ENEL – CODENSA (manuel.urbina@enel.com)

3. ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

BT: Baja Tensión

MT: Media Tensión

AT: Alta Tensión

EAT: Extra Alta Tensión

SED: Subestación Eléctrica Digital

SAMPLE VALUE: Valor Muestreado

GOOSE: Evento de subestación de tipo objeto genérico (Generic Object Oriented Substation) Event

TI: Tecnologías de la información

TO: Tecnologías de la operación



SCADA: Control supervisorio y adquisición de datos (Supervisory Control and Data Acquisition)

NCIT: Transformadores de instrumentación no convencionales (Non Conventional Instrument Transformer)

SAS: Sistema de Automatización de Subestaciones

GPS: Global Position System

LAN: Red de Área Local (LAN - Local Area Network)

PRP: Parallel Redundancy Protocol (Protocolo de redundancia paralela)

HSR: High-availability Seamless Redundancy (Redundancia sin Interrupciones de Alta Disponibilidad)

4. INTRODUCCIÓN

Las subestaciones eléctricas constituyen uno de los componentes fundamentales del sistema de potencia, considerando que en estas se efectúa el manejo de variables eléctricas que hacen operativamente viable su funcionamiento.

En la actualidad, los sistemas eléctricos de potencia se encuentran en un constante crecimiento debido a la inclusión de nuevos servicios y el aumento de la demanda, lo cual, produce una mayor exigencia a la red, requiriendo una operación más inteligente, confiable y segura. Es por ello que, hoy en día, las empresas del sector eléctrico a nivel mundial están en busca de confiabilidad, eficiencia y seguridad en las redes eléctricas. En este sentido se viene impulsando la implementación de subestaciones digitales

Las subestaciones digitales utilizan los beneficios de las tecnologías de protección, control y comunicación, eliminando las conexiones eléctricas entre los equipos de potencia y los equipos de protección y control, creando entornos de trabajo más seguros, flexibles, eficientes y confiables, reduciendo los costos de construcción, terrenos, ingeniería, puesta en servicio, operación, mantenimiento y escalabilidad [1]-[3].

Las subestaciones digitales permiten que las empresas de energía eléctrica aumenten la productividad, funcionalidad, reduzcan el espacio, mejoren la confiabilidad de los activos, y así mismo, la seguridad del personal de servicio, gracias a los niveles de control que estas poseen [1].

En los últimos años se han venido consolidando desarrollos tecnológicos en electrónica digital, tecnologías de la información, sistemas de comunicación (TIC's), conectividad de nuevas tecnologías, que permitan optimizar las maniobras de operación, la adquisición de datos y la gestión de información que dinamizan el funcionamiento del sistema eléctrico.

En este sentido se hace necesario recopilar la experiencia en la implementación de este tipo de sistemas. Como se pudo evidenciar en esta investigación, en el país, esta implementación se está realizando por etapas, desde lo convencional a lo digital, es por ello que en el presente Grupo de Trabajo de CIGRE Colombia B5.8, se viene trabajando para lograr unificar criterios, experiencias y casos de éxito, con el fin de que la industria logre minimizar tiempos, costos y riesgos, para lograr una correcta y adecuada planeación, diseño, operación y comisionamiento de este tipo de sistemas y lograr la digitalización de los activos e información que se tiene en una subestación.

Para lograr la digitalización, se han construido estándares, en busca de la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes proveedores, normalizando aspectos de comunicación, y manejo de la información, así como los criterios para diseñar, operar y mantener una subestación bajo una arquitectura tecnológica (protocolos de comunicaciones, configuraciones, modelos de datos, pruebas de conformidad, entre otros). Para ello, es importante mencionar que la digitalización implica cumplir diferentes niveles con el fin de desarrollar capacidades e integrar tecnologías que permitan la digitalización de las

subestaciones (IED, Merging Units -MU-, Non-Conventional Instrument transformer-NCIT, entre otros elementos) [4]-[11].

5. ESTADO DEL ARTE DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES

Es necesario para el desarrollo del presente documento técnico, conocer de manera general, los avances que se han realizado respecto a la incorporación de la tecnología digital en las subestaciones, para lo cual se presentan los siguientes antecedentes.

En el año 2009, como proyecto de fin de carrera para la obtención de un título como ingeniero de telecomunicaciones en la Universidad de Sevilla – España, el Ing. David Morales Hidalgo realiza una descripción general de lo que caracteriza a una subestación digital y se enfoca principalmente en las Merging unit (unidad de comunicaciones) como un paso fundamental para llegar a ellas, dando descripciones de hardware y software con las que debe contar este dispositivo para hacer parte de la subestación digital [2]. A inicios del 2011, como trabajo de grado para la obtención del título de ingeniero electricista en la Universidad de la Salle – Bogotá-Colombia, El Ing. Prieto inicia con una descripción histórica de cómo se ha desarrollado la comunicación en las subestaciones hasta el momento y como ha sido su implementación en el sistema eléctrico colombiano [3].

En 2014, se publicó un artículo de la Conferencia Internacional sobre Informática, Comunicaciones e Ingeniería Eléctrica Ecológicas (ICGCCEE), titulado “A Review on Various Standards for Digital Substation”, el cual, como su nombre lo indica hace referencia a los diversos estándares que aportan al desarrollo de las subestaciones digitales, dando características de cada uno y evidenciando la razón por la cual el protocolo IEC 61850 es el más apropiado en este campo [4].

En el año 2015, como trabajo para la obtención de un título de maestría en la Universidad de Cuenca – Ecuador, la Ing. Alba Carmita Fernández Avilés realizó una descripción general de los apartados del protocolo de comunicación IEC 61850 y su implementación en 4 bahías que hacían parte la subestación Parque Industrial, evidenciando la aplicabilidad del protocolo [5].

En abril de 2017, la revista de la IEEE (Transactions on Power Delivery), publicó un artículo titulado “Smart Substation: State of the Art and Future Development”, en el cual se aborda el concepto de subestaciones inteligentes teniendo como base las subestaciones digitales, señalando a China como un Estado que está implementando en gran magnitud el protocolo IEC 61850 y a su vez mostrando algunas debilidades que hasta ese momento tenía, debido a ausencia de estándares e incompatibilidades para lograr una completa implementación de funcionalidades inteligentes [6].

En 2018, en Trujillo-Perú, como trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecatrónico en la Universidad Nacional de Trujillo, el ing. Alan Santiago Rojas Llenera hace seguimiento de la automatización de una subestación y hace un barrido de antecedentes donde también se ha aplicado el protocolo IEC 61850 para llevar a cabo la automatización de subestaciones alrededor del mundo [7], donde se aprecia que la digitalización ha estado

presente en las subestaciones desde cierto tiempo atrás, pero no en su totalidad, punto de partida de este trabajo, el cual se trata de realizar una revisión sobre cómo se ha llevado a cabo la implementación de la digitalización hasta el nivel de proceso (equipos en patio) y como han seguido evolucionando en este aspecto las subestaciones eléctricas [7]- [15].

En el ámbito colombiano, se identifican las actividades desarrolladas por Colombia Inteligente, en donde indican que si bien, el objetivo del proceso de digitalización de las subestaciones eléctricas es llegar hasta una subestación 100% digital, es importante considerar niveles de digitalización, tanto por la existencia de activos convencionales como por el requerimiento de funcionalidades por tipo de subestación (BT, MT, AL, EAT). Por tanto, de acuerdo a lo descrito en Colombia Inteligente (2019), se identifican pasos intermedios de implementación, un Nivel I, con la aplicación del bus de estación (IEDs que cumplen con las funcionalidades de protección, automatización y control), un Nivel II con la implementación del bus de proceso con señales digitales y posteriormente digitalizando las señales análogas mediante el uso de Merging Units especializadas (Nivel III); por último, en el Nivel IV, las señales análogas se digitalizan directamente en el dispositivo mediante transformadores de instrumentación no convencionales (ver la *Figura 1*).

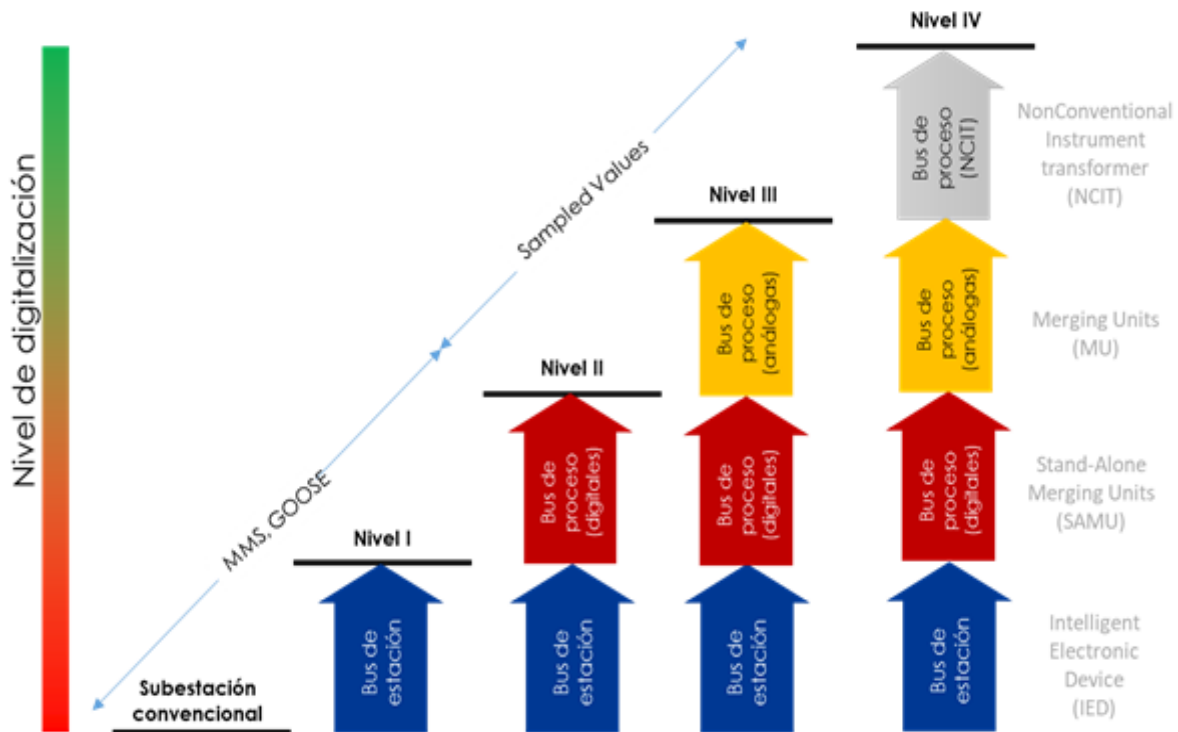


Figura 1. Niveles de digitalización en subestaciones Fuente: Tomado de Colombia Inteligente (2019)

En general, las experiencias empresariales en Colombia se centran en aplicaciones de bus de estación (Nivel I) con varias subestaciones en operación y algunos proyectos piloto en bus de proceso con señales digitales (Nivel II).

En la TABLA 1, se recopilan algunas de las lecciones aprendidas a nivel nacional, las cuales se identificaron mediante la implementación de proyectos en bus de estación y la investigación en proyectos piloto en cuanto al bus de proceso [7].

TABLA 1. Lecciones aprendidas en Colombia. Fuente: Tomado de Colombia Inteligente [7].

Temática	Lección aprendida
Bus de Estación	En el país se cuenta con experiencias en implementación de bus de estación, especialmente en subestaciones de alta tensión, para aplicaciones de control y protección utilizando mensajes GOOSE. Obteniendo buenos resultados en ahorros y desempeño de las soluciones.
Bus de Proceso	Actualmente, las empresas se encuentran en análisis de carácter técnico y económico para implementación de bus de proceso a nivel nacional. Dicha implementación dependerá de las ofertas de los fabricantes y el nivel de madurez de la tecnología.
Transformadores no convencionales (NCIT)	Aplicación de protección diferencial de una línea mixta (aéreo-subterránea) exclusiva para el tramo subterráneo, con un CT óptico en un extremo que envía la información a través de fibra óptica en el estándar IEC61850-9-2, hasta la <i>merging unit</i> en la subestación. El esquema presenta ventajas respecto a la protección distancia convencional, debido a su precisión en líneas mixtas.
Implementación	<ul style="list-style-type: none"> • Cada fabricante tiene su propia filosofía de funcionamiento en el bus de proceso. Es necesario conocer bien la oferta de los fabricantes. • Definir estrictamente el perfil de la subestación puede dejar por fuera soluciones de varios proveedores que ofrecen alternativas diferentes. • Muchas veces los integradores no tienen el conocimiento necesario de los equipos, para estos casos se prefiere trabajar directamente con los fabricantes. • Se debe trabajar de la mano con el fabricante para que la empresa se quede con el conocimiento. • Respecto al bus de proceso, inicialmente se plantea digitalizar desde las MU, ya que la comunicación entre el NCIT y la MU no está muy madura. • La verdadera interoperabilidad se evidencia en aplicaciones <i>multivendor</i>, las subestaciones <i>monovendor</i> pueden ser soluciones intermedias.

Finalmente, el levantamiento de las lecciones aprendidas también permitió la identificación de brechas para la digitalización de las subestaciones y mediante la discusión colaborativa de diferentes actores se establecieron acciones (regulatorias, empresariales, apropiación tecnológica, entre otras) para el cierre de brechas e impulsar el desarrollo de subestaciones digitales en el país [7] (Ver TABLA 2).

TABLA 2. Acciones para impulsar la digitalización de las subestaciones en Colombia. Fuente: [7]

Gestión Regulatoria	Gestión Empresarial	Apropiación Tecnológica
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Socializar definiciones y términos en digitalización de subestaciones con el regulador. ▪ Mostrar al regulador los beneficios de la digitalización de las subestaciones. ▪ Revisar aspectos que deben modificarse su remuneración en el contexto de las subestaciones digitales. ▪ Establecer reglas para infraestructura compartida por varios transmisores en la misma subestación. ▪ Definir criterios mínimos en términos de interoperabilidad para las subestaciones digitales. ▪ Definir criterios mínimos en términos de ciberseguridad para las subestaciones digitales. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Apropiar procesos en digitalización de subestaciones en las empresas. ▪ Sensibilizar la alta dirección acerca de la importancia de la digitalización de las subestaciones. ▪ Establecer sinergias entre las áreas de TI y OT en las compañías. ▪ Fortalecer el trabajo colaborativo entre las empresas del sector para compartir lecciones aprendidas. ▪ Trabajar conjuntamente con los fabricantes y proveedores para transferir capacidades. ▪ Establecer alianzas con la academia para fortalecer la formación de los profesionales. ▪ Actualizar programas curriculares teniendo en cuenta la digitalización del sector. ▪ Tener en cuenta las pruebas necesarias en los pliegos de contratación. ▪ Estandarizar los procesos de pruebas SAT y FAT en las compañías. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Monitorear aplicaciones y oferta comercial en bus de proceso a nivel internacional, especialmente en multivendor. ▪ Realizar casos de estudio en las compañías locales, con el acompañamiento de la academia y los fabricantes. ▪ Focalizar los esfuerzos en aplicaciones maduras y aplicables en el contexto colombiano. ▪ Evaluar la relación costo-beneficio de las redundancias en sincronización de tiempos. ▪ Evaluar la posibilidad de contar con relojes de alta precisión a nivel local. ▪ Apropiar estándares internacionales. ▪ Se deben construir todas las especificaciones con los detalles suficientes para la implementación de las funciones, las pruebas y las simulaciones (perfil de cada funcionalidad). ▪ Homologar la ingeniería de diseño dentro de la SE digital.

6. INVESTIGACIÓN SECTORIAL

El estado actual de la implementación de SED en Colombia, evidencia que a pesar de que ya se contaba con más de 15 años del estándar IEC 61850, la cantidad de casos de éxito a nivel nacional ha sido bajo, en comparación con las implementaciones que se vienen realizando en otros países.

Por lo anterior, se hace necesario conocer la experiencia de las distintas empresas y agentes que intervienen en los procesos de implementación de este tipo de sistemas en el sector eléctrico nacional, con el fin de identificar las brechas, dificultades, falencias u otros factores que limitan el proceso de transición de las subestaciones eléctricas tradicionales hacia un entorno digital.

6.1. METODOLOGÍA DE LA ENCUESTA

La realización de la presente encuesta se fundamentó principalmente en conocer las experiencias, requerimientos y desafíos que actualmente está enfrentado la industria nacional. Se realizaron alrededor de 20 preguntas, dirigidas a expertos y líderes en la implementación de este tipo de tecnología, la encuesta fue socializada con todos los actores y participantes en la implementación de SED como son: operadores de red, consultores, integradores, fabricantes, academia y gobierno.

A continuación, se presentan los resultados y análisis de la encuesta realizada.

6.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ENCUESTA

La investigación se realizó a nivel nacional mediante consulta virtual a diferentes actores del sector eléctrico. La investigación identifica los avances en inversión, las expectativas de implementación, la existencia de guías y tipo de equipos utilizados, la modalidad de implementación y experiencias.

6.2.1. Participación por región en la encuesta

En la Figura 2, se expone las ciudades desde donde se reportaron las respuestas contenidas en la encuesta sobre subestaciones digitales, lo cual refleja donde se encuentra concentrada la mayor participación de actores en el sector energético del país, ligados o con interés directo sobre esta temática.

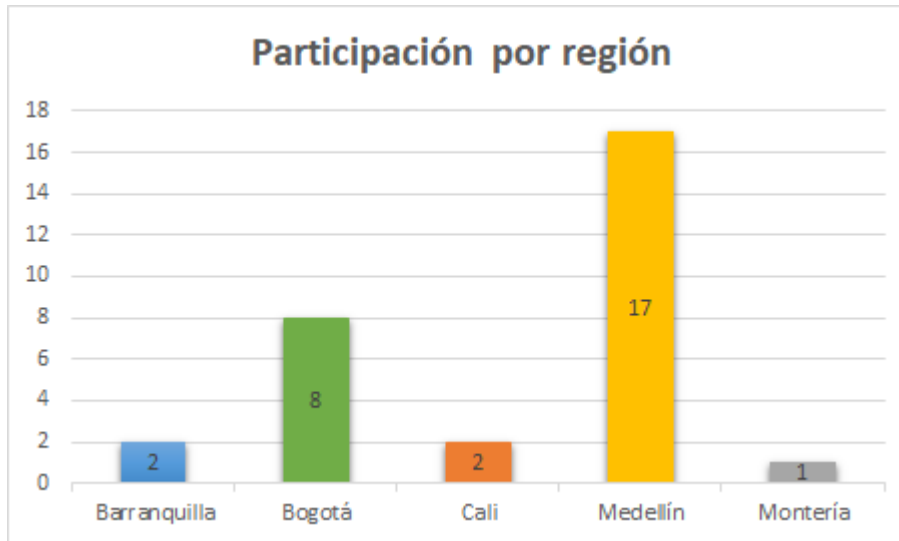


Figura 2. Resultados encuesta – Participación por región.

Se observa una mayor participación en la encuesta en Medellín posiblemente generada por la mayor presencia de empresas de ingeniería, generadoras y transportadoras de energía del país.

6.2.2. Participantes de la encuesta

La Figura 3 que se expone a continuación, refleja el grado de participación que se tuvo en el diligenciamiento de la encuesta, por diferentes actores involucrados directa o indirectamente con el sector energético nacional, como son las empresas del sector eléctrico, los proveedores de equipos e insumos, la comunidad académica y las empresas de ingeniería, como consultores, interventores u otros, que prestan servicios encaminados a la digitalización de subestaciones, tal como se indica en la Figura 3.

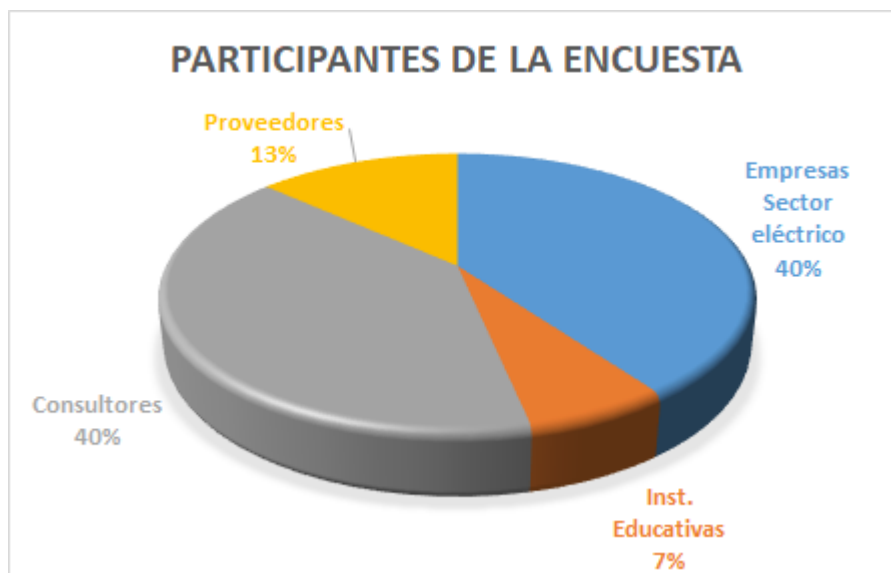


Figura 3. Resultados encuesta – Tipos de participantes.

En la gráfica se observa una participación igualitaria entre consultores y empresas del sector eléctrico y podría darse una correlación con la pregunta anterior, donde la mayor participación en la encuesta fue en Medellín.

6.2.3. Inversión en la digitalización de subestaciones

En procura de identificar las expectativas del sector eléctrico nacional, en torno a la digitalización de subestaciones eléctricas, se consultó si las entidades participantes contemplan en sus proyecciones futuras una inversión asociada a esta temática. Entre las respuestas, se evidencia que algunas de las empresas como instituciones educativas y proveedores de servicios y/o equipos, optaron por no dar una opinión al respecto, mientras que entre las empresas predomina notablemente una proyección de inversiones hacia los siguientes años. (ver TABLA 3)

TABLA 3. Resultados encuesta – Expectativas sobre inversiones futuras en SED.

INVERSIÓN EN SUBESTACIONES DIGITALES		
SI	Incierto	No aplica
60%	13%	27%

No obstante, al considerar únicamente las respuestas obtenidas desde el personal que hace parte de las empresas del sector eléctrico nacional, se tiene que únicamente un 17% de las empresas, aún considera incierta su inversión en estos sistemas, mientras que el 83% restante afirma que se llevará a cabo una inversión en sus empresas, tal como se indica en la Figura 4.

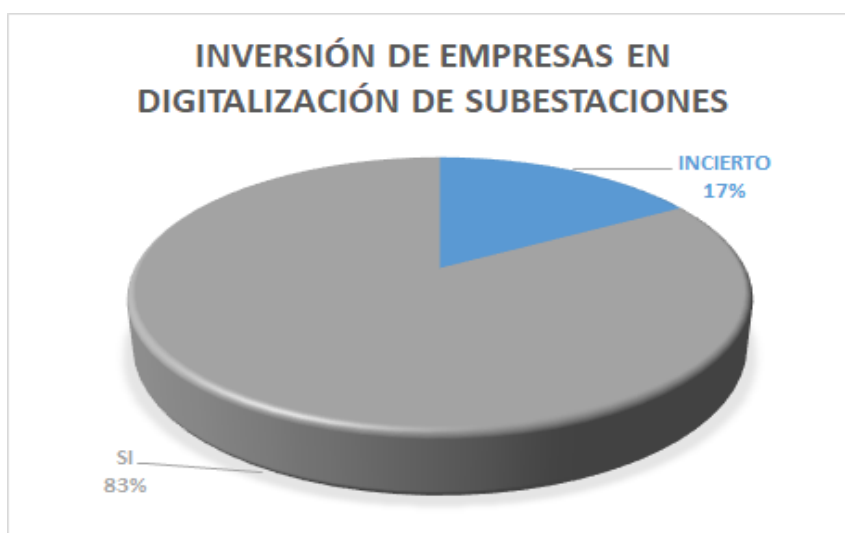


Figura 4. Resultados encuesta – Inversiones próximas de las empresas del sector eléctrico en SED.

Se observa un alto interés en las empresas por invertir en aspectos relacionados con la digitalización de subestaciones, esto puede apalancar programas en general para divulgar tecnologías, experiencias y beneficios de la digitalización.

6.2.4. Capacidad para migrar a subestación digital

Con esta interrogante, se pretendió identificar la visión y dificultades que existen desde los diferentes actores del sector eléctrico colombiano, en torno a las capacidades y/o dificultades que puedan encontrar en el proceso de transición hacia las subestaciones digitales. (ver TABLA 4)

TABLA 4. Resultados encuesta – Capacidades de migración hacia SED.

¿ESTÁ EN CAPACIDAD PARA MIGRAR A SUBESTACIÓN DIGITAL?		
Si	Incierto	No aplica
67%	13%	20%

Dado que, en el país, es de mayor relevancia conocer las capacidades para el proceso de migración de subestaciones convencionales a digitales, desde el punto de vista de las empresas que hacen parte del sector, se tiene que aproximadamente tres cuartas partes de los encuestados (76%) considera que su respectiva empresa si cuenta con las capacidades para tal proceso, mientras que el 24% restante opina que es incierto, tal como se indica en la Figura 5.

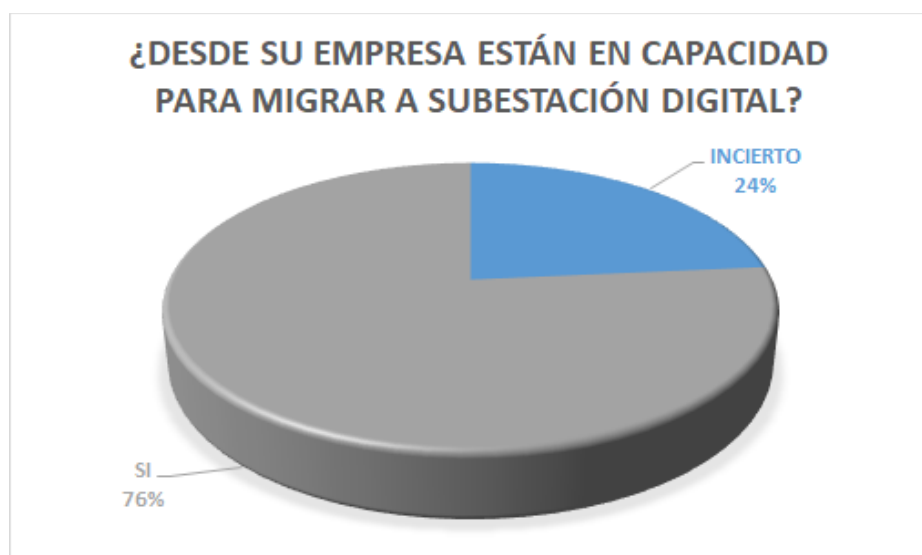


Figura 5. Resultados encuesta – Capacidades de migración hacia SED en las empresas del sector eléctrico.

6.2.5. Expectativas de implementación en subestaciones digitales

Con el fin de identificar cual es la visión de empresas y grupos de trabajo en torno a la implementación de subestaciones digitales a futuro, se consultó sobre hasta qué nivel se contempla tener subestaciones eléctricas digitales en su empresa; encontrando que solo el 17% de los participantes desconoce cómo será dicha implementación, mientras que el 31% considera que se implementarán subestaciones completamente digitales. El resto de participantes, cuentan con opiniones divididas sobre el nivel de implementación que será alcanzado, considerando que algunos se enfocan netamente en bus de estación y otros consideran que adicional a este, el bus de proceso será implementado de manera parcial. (ver TABLA 5).

TABLA 5. Resultados encuesta – Implementación próxima de SED

EXPECTATIVAS DE IMPLEMENTACIÓN EN SED			
Hasta el 70% (bus de estación)	Entre 80% y 90% (bus de proceso parcialmente)	100% (SED completa)	Desconoce
35%	17%	31%	17%

Estos resultados, expresan opiniones que incluyen proyectos o experiencias no solo en Colombia, sino en la región, principalmente en aquellas respuestas emitidas por consultores y proveedores, que manejan clientes a nivel internacional. Por ende, se analizan de manera paralela los resultados obtenidos desde las empresas con activos en el sector eléctrico nacional.

Sin embargo, las respuestas tienen cambios importantes al analizar las expectativas generadas en la empresas del sector eléctrico, encontrando que la implementación de bus de estación alcanza 59%, mientras que las SED en su totalidad, incluyendo bus de estación y bus de proceso, solo llegan a un 12% (ver Figura 6); lo cual es un porcentaje bajo, considerando el proceso de transformación que se adelanta actualmente en el país.



Figura 6. Resultados encuesta – Implementación próxima de SED según utilities.

La menor implementación del Bus de proceso se atribuye principalmente a la incertidumbre sobre el tiempo de respuesta para mitigar fallas y los cambios que se presentan en la operación y el mantenimiento de este tipo de subestaciones. Sin embargo, a pesar de estos factores, se observa disponibilidad para las implementaciones futuras, originada ésta por la estabilización, desarrollo y disponibilidad de la tecnología. Según los resultados obtenidos en la encuesta (Tabla 4) se observa que el 67% de los participantes consideran que sus empresas están en la capacidad de migrar la tecnología e implementar la subestación digital. Este resultado deja entrever el compromiso de los diferentes profesionales en el desarrollo del conocimiento requerido para la migración, operación y mantenimiento de desarrollos futuros. Sin embargo, también evidencia una brecha pendiente por reducir (33%) en relación con las empresas que declaran alguna falta de capacidad para migrar a subestación digital.

6.2.6. Implementación de subestaciones digitales con IEC 61850

Con el propósito de conocer el estado actual de implementación de subestaciones digitales en el sector eléctrico colombiano, se indaga sobre las experiencias de implementación que han tenido en sus empresas, obteniendo como resultado que solo el 7% de los participantes se encuentran en una etapa inicial con una primera experiencia de implementación, mientras que el mayor porcentaje de respuestas menciona que tiene experiencia con implementación de al menos 30 subestaciones eléctricas digitales implementadas de manera total o parcial, teniendo mayormente una implementación en bus de estación, como se indica en la TABLA 6.

TABLA 6. Resultados encuesta – Cantidad de SED con IEC 61850 implementadas

IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES CON IEC 61850

En proceso (primera)	Al menos 1	Al menos 10	Al menos 30	Al menos 50	Más de 100	No aplica
7%	13%	20%	23%	17%	7%	13%

En general, se observa que en la implementación de subestaciones digitales con el estándar IEC61850, al menos el 70% de los encuestados tienen como mínimo 10 subestaciones implementadas. Esto es indicador del alto grado de penetración del estándar en las empresas participantes de la encuesta.

No obstante, en algunos casos, como la implementación de más de 100 SED, se evidencia que dicho resultado está ligado principalmente a respuestas de empresas proveedoras de equipos o servicios de ingeniería, que a su vez tienen en cuenta experiencia internacionales. Por ende, al filtrar las respuestas obtenidas desde las utilities en el país (Figura 7), se tiene que ninguna alcanza dicha cantidad de implementaciones, y que solo el 19% de los encuestados considera que su empresa tiene más de 50 SED.

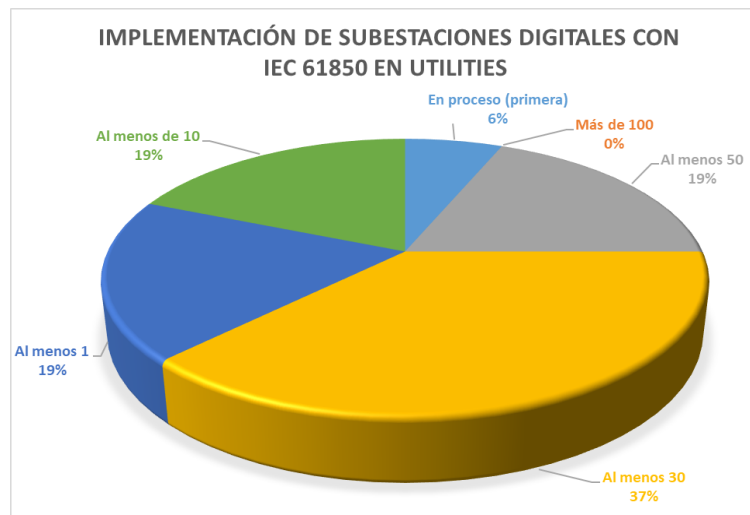


Figura 7. Resultados encuesta – Cantidad de SED con IEC 61850 implementadas por Utilities.

La penetración del estándar en las empresas del sector es atribuida a varios factores, entre los cuales se pueden destacar: el uso de gateways y concentradores que permiten la coexistencia de dispositivos compatibles con IEC 61850 y aquellos que no lo son, facilitando la migración paulatina de las subestaciones por reposición y expansión, y la definición estandarizada de un modelo de datos y un conjunto de servicios de comunicación que posibilita la implementación de soluciones multivendor, asegurando la interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes. Estas ventajas han convertido el estándar IEC 61850 en una solución atractiva para la implementación de Sistemas de Automatización de Subestaciones- SAS- en Colombia.

6.2.7. Dispone de guías de implementación para subestaciones digitales

Considerando la relevancia que tienen las subestaciones digitales y las dificultades asociadas a su desarrollo, se interroga sobre el uso de guías de implementación para sistemas con IEC 61850; encontrando que, el 60% cuentan con documentos propios que orientan al personal encargado de planeación, diseño y/o la puesta en marcha de este tipo de sistemas. No obstante, se encuentra que aún existe un 27% del total que menciona no contar con dichos documentos y a su vez, un 13% adicional, menciona tener documentación que aborda la temática de manera parcial, con enfoque en ciertas características principalmente para monitoreo y/o comunicaciones. (ver TABLA 7)

TABLA 7. Resultados encuesta – Uso de guías de implementación para SED

¿DISPONE DE GUÍAS DE IMPLEMENTACIÓN PARA SUBESTACIONES DIGITALES?		
Si	No	Parcialmente
60%	27 %	13%

La respuesta obtenida por más de la mitad de los encuestados, indica un buen grado de conocimiento del estándar al tener guías para la implementación. Sin embargo, puede generar preocupación que poco más de una cuarta parte de los encuestados, responden no tenerlas; en estos casos, se pueden presentar riesgos de puesta en operación de estos sistemas, debido a que los esquemas de recepción de las implementaciones desarrolladas no están definidos claramente.

Por otra parte, tomando como foco las empresas del sector eléctrico, denominadas utilities, se observa que hay una variación en los porcentajes obtenidos, con un 29% que afirma no contar con dichos insumos, mientras que el 71% restante, afirma hacer uso de las guías de implementación o conocerlas de manera parcial, como se indica en la Figura 8.

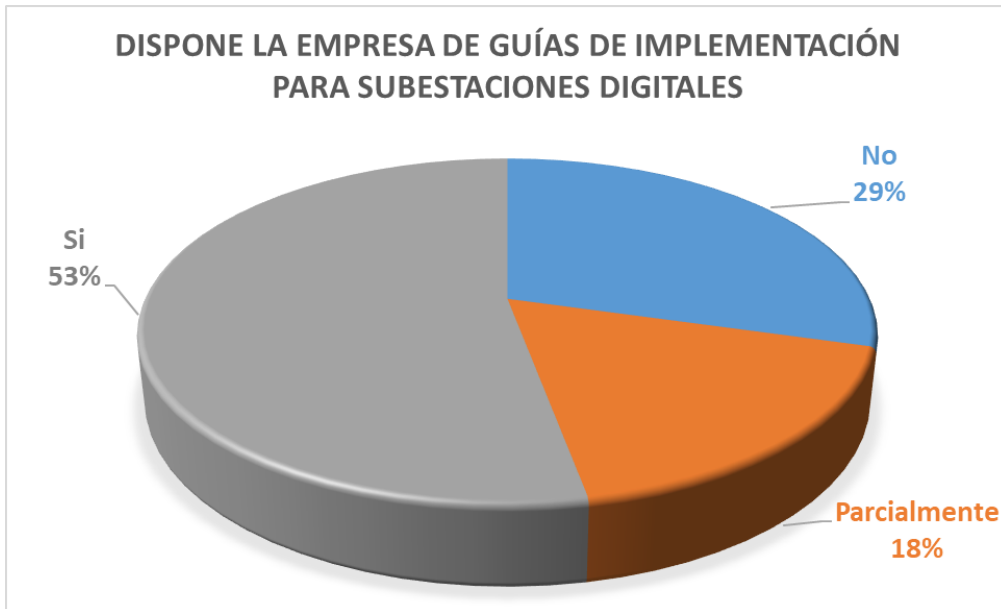


Figura 8. Resultados encuesta – Guías de implementación de SED en utilities en Colombia

El análisis de estas respuestas, indica que es necesario contar con los insumos suficientes para apoyar el proceso de transformación del sector eléctrico en torno a subestaciones digitales; lo cual, puede lograrse a partir de una diversificación y transferencia de conocimientos sobre el tema y una mayor participación de los grupos de trabajo en las utilities, en eventos, talleres y/o programas de divulgación y generación de conocimiento.

6.2.8. Equipos utilizados en subestaciones digitales

Se consultó sobre los equipos que se han implementado por parte de las empresas, en el proceso de digitalización de subestaciones eléctricas, teniendo como resultado predominante aquellos equipos usados en el nivel de control y supervisión, tal como son los Gateways y Switches de comunicación, seguido por los IEDs (relés), equipos de sincronización de tiempo y dispositivos Redbox. Se observa en menor cantidad el uso de equipos asociados a bus de proceso, tales como Merging Units o transformadores no convencionales y equipos dedicados a monitoreo de estabilidad, como las PMU, tal como se indica en la Figura 9.

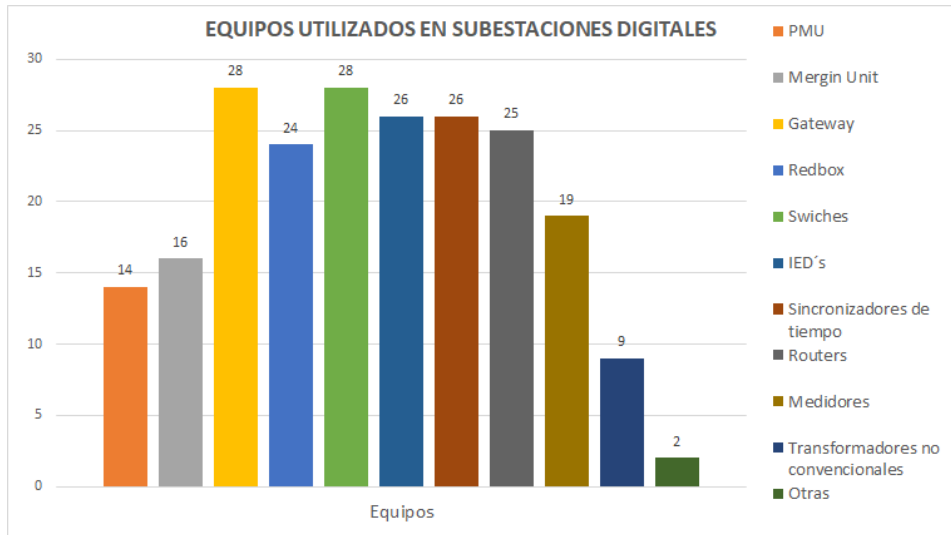


Figura 9. Resultados encuesta – Dispositivos típicos que hacen parte de una SED

Se observa un reto importante en la integración de transformadores de instrumentación no convencionales NCIT (Non Conventional Instrument Transformers) en la implementación del bus de proceso.

6.2.9. Modalidad de implementación de subestaciones digitales

Con el fin de establecer, si normalmente las empresas ponen en práctica el conocimiento en esta temática, se consultó sobre la modalidad bajo la cual se lleva a cabo el desarrollo de una subestación digital; encontrando que, el 31% de las personas que contestaron esta encuesta indica que todo el proceso se lleva a cabo al interior de la empresa, mientras que la contratación de especificaciones, ingeniería o diseño y la contratación de montaje y puesta en servicio tienen un 23% y 22% respectivamente. Por otra parte, aproximadamente la cuarta parte de las personas encuestadas, respondió que el proceso se lleva a cabo mediante contratación EPC. (ver TABLA 8)

TABLA 8. Resultados encuesta – Modalidad usada por para implementar SED

MODALIDAD DE INGENIERÍA USADA PARA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES			
Implementación interna	Contratación de especificaciones técnicas, ingeniería o diseño	Contratación de montaje y puesta en servicio	Contratación en modalidad EPC
31%	23%	22%	24%

Estos resultados, varían levemente al realizar el análisis de las respuestas entregadas únicamente por los participantes que hacen parte de las utilities encuestadas, sin embargo, la relación entre los resultados es muy semejante y distribuida de manera equitativa, con excepción de la contratación de especificaciones, ingeniería y diseño que alcanza un 31% frente a 23% que se obtuvo para el total de la muestra, tal como se expone en la Figura 10.

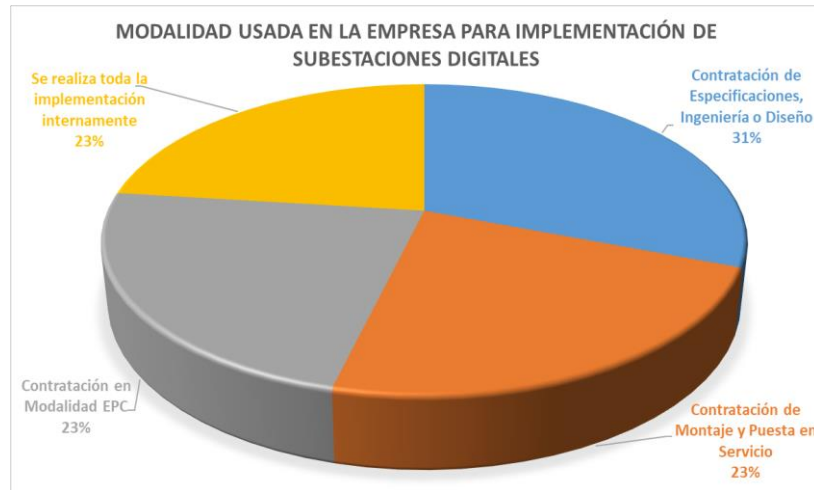


Figura 10. Resultados encuesta – Modalidad usada por utilities para implementar SED

Al observar estos resultados, se puede concluir que al menos el 54% de los encuestados realizan la implementación hasta antes de la puesta en servicio con recurso interno, lo que muestra un grado de madurez en el conocimiento e implementación del estándar IEC61850, y es por esto que el conocimiento asociado y de importancia relevante para la competitividad de las empresas es tener la implementación de los sistemas basados en IEC61850, ya que permite mayores eficiencias en los procesos de operación y mantenimiento de estos sistemas. Dado esto entonces, los procesos de montaje y puesta en servicio son la etapa final de la implementación del sistema y se decide contratar.

6.2.10. Área encargada de promover la implementación de subestaciones digitales

En la TABLA 9 se exponen los resultados obtenidos sobre el área o departamento en las empresas, encargado de promover el proceso de transición hacia subestaciones digitales. Entre estos, se destaca que en el 42% de los casos es el grupo de ingeniería el encargado de promover la implementación de estos sistemas, mientras que aproximadamente el 48% de los casos, se divide entre las áreas de planeación, mantenimiento, innovación y operaciones. El 10% restante, cuenta con áreas o departamentos tales como, comercial, ventas, u otros. Dichos resultados corresponden al análisis de respuestas obtenidas en la totalidad de los participantes.

TABLA 9. Resultados encuesta – Promoción de implementación de SED en las empresas

ÁREA ENCARGADA DE PROMOVER LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES					
INGENIERÍA	Innovación	Mantenimiento	Operaciones	Planeación	Otros
42%	12%	12%	8%	17%	10%

Sin embargo, tomando como referencia únicamente aquellas empresas prestadoras de servicios en el sector eléctrico colombiano, se evidencia una variación en los resultados;

continuando con un predominio en el área de ingeniería (38%), seguido por el área de planeación y mantenimiento (23% y 18% respectivamente), como los departamentos encargados de promover el proceso de transformación hacia subestaciones eléctricas digitales, tal como se indica en la Figura 11.

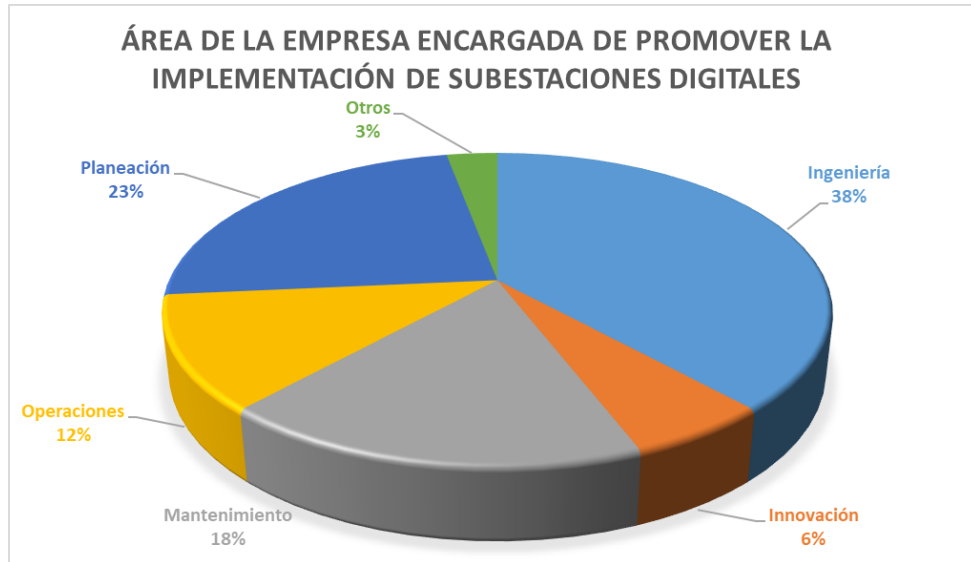


Figura 11. Resultados encuesta – Promoción de implementación de SED en las utilities

6.2.11. Digitalización de subestaciones aplicada a gestión de activos (CREG 015)

Tras los diferentes impactos que lleva consigo la digitalización de subestaciones, se interrogó a los participantes de la encuesta, sobre su conocimiento en relación al provecho que se puede sacar de este atributo, en la supervisión y monitoreo de activos, alineado con la Resolución CREG 015 de 2018, tal como se indica en la TABLA 10.

TABLA 10. Resultados encuesta – Digitalización de subestaciones y gestión de activos.

CONOCIMIENTO DE LAS EMPRESAS SOBRE RELACIÓN ENTRE SED Y GESTIÓN DE ACTIVOS (CREG 015)		
Si	No	Parcialmente
43%	40%	17

Sin embargo, considerando que los principales beneficiarios con la gestión de activos a partir de la implementación de subestaciones digitales en Colombia, son aquellas empresas con activos en el sector eléctrico; se tiene que, del total de encuestados que hacen parte de estas empresas, más de la mitad tienen conocimiento de los beneficios que lleva consigo la digitalización de subestaciones y apenas un 35% de este grupo, desconoce dichos beneficios, tal como se indica en la Figura 12.



Figura 12. Resultados encuesta – Digitalización de subestaciones y gestión de activos, en utilities.

6.2.12. Ventajas del gemelo digital para validación de subestaciones digitales

El concepto de gemelo digital ha tomado relevancia últimamente en el sector eléctrico, dadas las bondades de su aplicación previo a la puesta en marcha de un sistema. Por tal motivo, se consultó sobre el conocimiento acerca de las ventajas derivadas de su aplicación en la validación de subestaciones digitales; encontrando que, el 63% de las personas encuestadas tiene un conocimiento sobre dicho concepto y la forma como aporta en el proceso de validación previo a la implementación de una subestación digital. No obstante, el 37% restante, desconoce lo que es el gemelo digital o los beneficios que este puede conllevar para su empresa, tal como se indica en la Figura13.

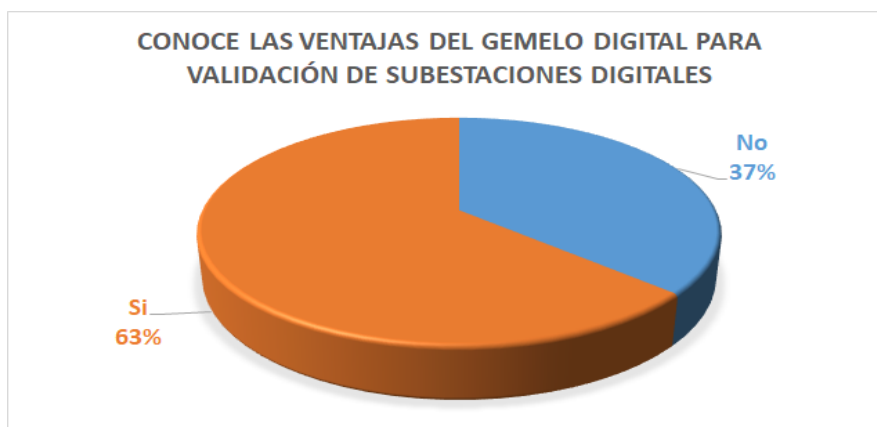


Figura13. Resultados encuesta – Ventajas de gemelo digital para validación de SED

Existe un gran porcentaje de los encuestados, 63%, que indican conocer sobre el gemelo digital. Esto podría ser un buen motivador para la introducción de las tecnologías asociadas a la implementación del gemelo digital en el sector. Hoy en día las soluciones de gemelo digital en la industria eléctrica son muy pocas o en estado de desarrollo incipiente.

6.2.13. Participación en elaboración de un documento técnico desde CIGRE

Tras recopilar los aportes, dificultades e intereses que se vislumbran de parte de los participantes en la encuesta, en torno a la digitalización de subestaciones eléctricas en Colombia, se identifica el rotundo interés por participar en la elaboración de un documento técnico que recoja experiencias, necesidades y expectativas en cuanto a la implementación de subestaciones digitales en el país, bajo la implementación del estándar IEC 61850, tal como se indica en la Figura 14.

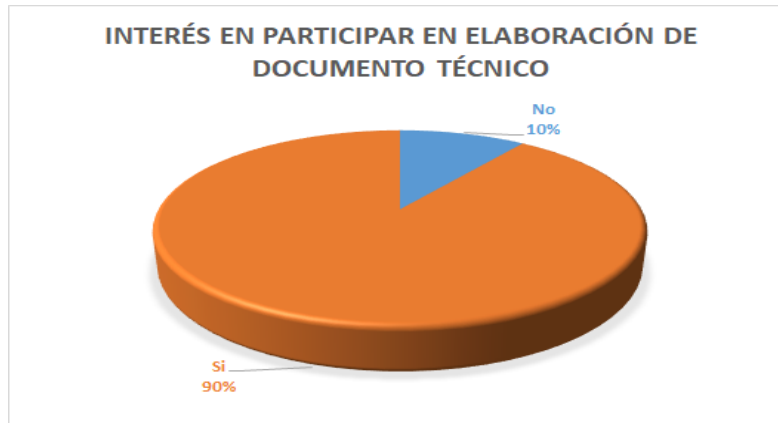


Figura 14. Resultados encuesta – Potencial participación en elaboración de documentos

6.3. INTERROGANTES ADICIONALES – PREGUNTAS ABIERTAS REALIZADAS EN LA ENCUESTA

A continuación, se presenta el análisis realizado a algunas de las preguntas formuladas en la encuesta, de manera tal que los participantes pudiesen entregar respuestas abiertas bajo los conocimientos en procesos o aspectos al interior de sus empresas.

6.3.1. ¿Qué desafíos económicos se ha enfrentado al momento de implementar una SED?

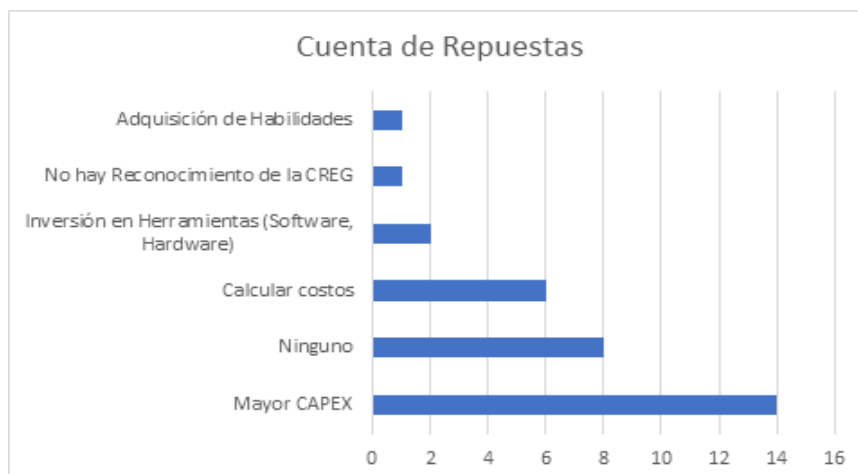


Figura 15. Resultados encuesta – Desafíos en la implementación de SEDs

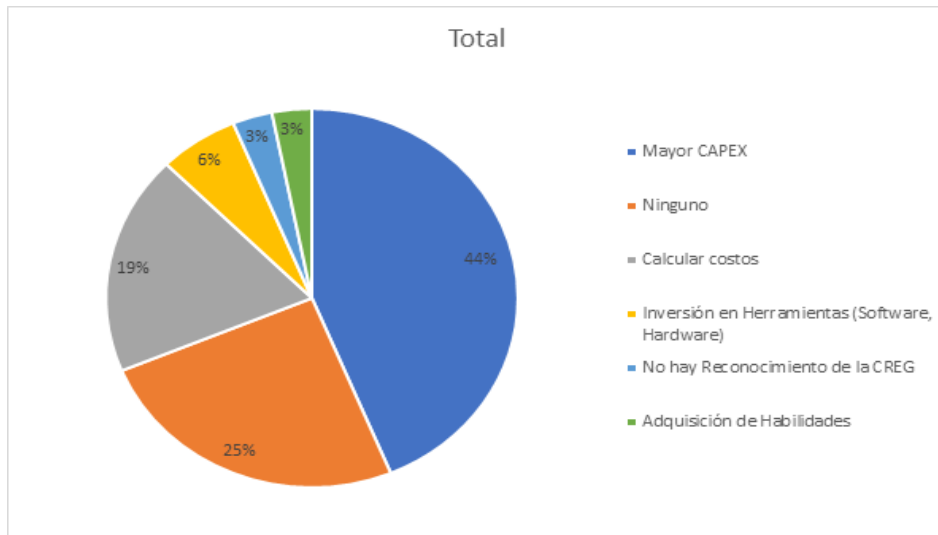


Figura 16. Resultados encuesta – Desafíos en la implementación de SEDs (Porcentajes)

Al observar las respuestas de los participantes en la Figura 15 y Figura 16 se puede concluir que los mayores desafíos en la implementación de subestaciones digitales están en el aumento de los costos de CAPEX, según el 44% de los encuestados. Las empresas participantes mencionan temas de costos altos en temas relacionados con la arquitectura y la redundancia, por el aumento en infraestructura de comunicaciones.

Por otro lado, se presentan desafíos en los costos de inversión en herramientas, tales como software y hardware para la implementación de infraestructura de laboratorio para la realización de pruebas y validaciones.

Otro aspecto importante es el reto que evidencian las empresas en el cálculo de costos para la implementación, se referencian algunas desviaciones de costos por no tener claridad en los tiempos de implementación. Esto se une a la posible falta de experiencia y habilidades reportadas por los encuestados.

Es importante resaltar que el 25% de los encuestados respondieron que no evidencian ningún reto económico en la implementación de subestaciones digitales. Este dato es importante y se asume que a medida que avance la implementación este porcentaje deberá incrementarse, apoyado por un mayor conocimiento y experiencia en estos proyectos.

Al realizar el análisis de costos se deben tener en cuenta la reducción de obras civiles al disminuir la dimensiones de canalizaciones para tendido de cables de control ya que se elimina el cableado externo entre casa de control y patio de conexiones, la disminución de áreas de la casa de control al requerirse menor cantidad de tableros (dependiendo de la implementación), la reducción de costos por eliminar equipos tales como tableros de control, controladores de bahía para gestionar el telecontrol de las bahías, borneras, accesorios, cable multiconductor, cableados internos y relés auxiliares, entre otros, en los cuales se debe buscar

el balance entre los equipos implementados en una subestación digital y los equipos que no se implementan y que hacían parte de una subestación convencional.

La inversión en equipos relacionados con las unidades constructivas especiales puede cubrir el bus de estación y depende de la cantidad de bahías, si son subestaciones con mayor cantidad de bahías, mayor cantidad de tecnología se podría implementar.

La inversión inicial de una subestación digital en bus de estación y proceso podría decirse que es alta, pero en el tiempo la cantidad de presupuesto OPEX a destinar es menor. Los costos de mantenimiento para mano de obra destinada a ir a sitio son mucho menores que una subestación convencional.

En las subestaciones con implementación de solo bus de estación, muestra disminución en costos OPEX, donde la operación ayuda a identificar de manera remota donde se encuentra alguna incidencia y puede superar la falla y/o guiar a la cuadrilla de mantenimiento a donde se encuentre exactamente la falla.

En un ejercicio de comparación de subestaciones AT con arquitectura de control digital IEC61850 en relación con una subestación MT usando arquitectura de control desactualizadas con redes seriales, los costos asociados a las cantidades de visitas por cuadrilla de mantenimiento era el 5% en subestaciones con bus de estación y el restante 95% en subestaciones con tecnologías totalmente cableadas.

6.3.2. ¿Qué desafíos técnicos y tecnológicos se ha enfrentado al momento de implementar una SED?

Según los encuestados, los principales desafíos técnicos y tecnológicos a los que se han enfrentado al momento de implementar una SED son los siguientes, según su frecuencia de identificación (ver TABLA 11).

TABLA 11. Desafíos técnicos y tecnológicos al implementar SED.

Desafío	Descripción
Poco conocimiento de la tecnología	Los encuestados coinciden en que existe poco personal con conocimiento profundo de la norma, por lo tanto, se requiere el aprendizaje de nuevas competencias. Este poco conocimiento deriva en la necesidad de capacitar el personal, en escasa apropiación de la tecnología e inadecuado soporte técnico durante la operación y el mantenimiento.

<p>Inadecuado Desarrollo de la tecnología</p>	<p>Los encuestados indican que algunos de los equipos que conforman la SED aún presentan problemas de interoperabilidad entre fabricantes o que aún no son compatibles con el bus de proceso, como es el caso de algunos medidores.</p> <p>Los encuestados identifican que la tecnología está poco probada; aún presenta falencias en el desempeño, fiabilidad y disponibilidad de las protecciones, los fabricantes e integradores tienen poca experiencia en el sector eléctrico colombiano y el soporte técnico es escaso.</p>
<p>Pruebas y laboratorios</p>	<p>En este aparte se hace referencia a la necesidad de ejecutar y mantener actualizadas pruebas de laboratorio para verificación de interoperabilidad y la necesidad de adquirir y capacitar al personal en nuevas herramientas de análisis, pruebas, gestión y mantenimiento. Es importante mencionar que uno de los entrevistados menciona la necesidad de contar con laboratorios para el desarrollo de pruebas académicas.</p>
<p>Apertura al cambio de la nueva tecnología</p>	<p>Los resultados de la encuesta permiten concluir que se presentan dificultades en la asimilación del cambio, desconfianza y recelo con respecto a la transformación digital. En este aparte es importante mencionar que uno de los encuestados hace referencia a la dificultad que presentan los clientes para entender las diferencias y desligarse de sus prácticas con los sistemas convencionales y que impiden aprovechar las ventajas de las SED.</p> <p>Con menor relevancia, según la frecuencia de aparición, se enumeran los siguientes desafíos técnicos y tecnológicos.</p>
<p>Normatividad Vigente en Colombia</p>	<p>Actualmente, se evidencia poca claridad con respecto a lineamientos y remuneración.</p>
<p>Alto Costo</p>	<p>Alto costo de los equipos requeridos para la implementación de las SEDs, lo cual conlleva a la no viabilidad de los proyectos.</p>
<p>Documentación</p>	<p>Dificultades en la trazabilidad de la información de la subestación requerida para futuras modificaciones.</p>
<p>Dificultad en la implementación de diseños prácticos y funcionales</p>	<p>Por último, es importante mencionar que sólo dos encuestados manifiestan no tener desafíos en la implementación de las SE Digitales.</p>

6.3.3. ¿Qué desafíos regulatorios se ha enfrentado al momento de implementar una SED?

Se obtuvieron 32 aportes, de los cuáles el 25% no evidenció algún tipo de desafío. Respecto al 75% restante se estableció que los desafíos están orientados principalmente al esquema convencional de la regulación, la integración operativa y la cultura digital.

Respecto, al esquema de regulación se indica que las señales actuales de la regulación no incentivan la evolución de equipos convencionales a digitales, las resoluciones o reglamentos aún no han apropiado tecnologías digitales como los transformadores no convencionales o núcleos de medida independiente, las cuales podrían ser asimiladas por medio del diseño de nuevas unidades constructivas para lograr la remuneración de este tipo de tecnologías.

A su vez, se destaca la importancia de acoger estándares internacionales en los temas de interoperabilidad (IEC 61850) y lograr que los reglamentos como el RETIE y el código de medida, resolución CREG 038 de 2014, puedan adaptar estas mejores prácticas. A nivel del desafío de integración operativa, se identificó retos respecto a las fases de diseño de los proyectos y su puesta en operación. Por ejemplo, la gestión y tiempos asociados para la coordinación de consignaciones y la configuración en campo de los dispositivos digitales.

Además, se menciona que los avances o experiencias logradas han tenido redundancia de los equipos para garantizar la regulación vigente lo que no hace costo-eficiente las soluciones y su operatividad.

Finalmente, es importante avanzar en la apropiación de la cultura digital, la evolución de las tecnologías convencionales para lograr la integración de las tecnologías asociadas a las subestaciones digitales.

6.3.4. ¿Al momento de implementar SED, en cuántas de estas subestaciones se implementó el bus de estación y cuál ha sido el grado de implementación?

Según las respuestas obtenidas, se puede inferir que la implementación de bus de estación en Colombia, tiene gran acogida, dado que menos del 15% de los encuestados afirma desconocer proyectos con bus de estación en sus respectivos grupos de trabajo, teniendo en cuenta que aquí se incluyen las respuestas de las instituciones educativas participantes. En algunos casos, se afirma que el bus de estación se implementa de manera parcial o netamente para supervisión del sistema, sin embargo, el mayor porcentaje de los encuestados afirma contar con una implementación total de este nivel de operación en las subestaciones digitales de sus empresas.

Lo expuesto aquí, refleja el grado de madurez de este concepto en el proceso de migración hacia la digitalización de subestaciones eléctricas, pero a su vez, denota que aún hay empresas que no aprovechan al máximo los atributos de este tipo de sistemas; las razones, son variadas y van desde el paradigma existente en el uso de señales eléctricas análogas, hasta el uso o apropiación de nuevas formas de supervisión y análisis en las variables de operación de estos sistemas.

6.3.5. ¿Al momento de implementar SED, en cuántas de estas subestaciones se implementó el bus de proceso y cuál ha sido el grado de implementación?

La encuesta evidencia una amplia distancia entre los encuestados que manifiestan aún no tener implementaciones de buses de procesos en sus compañías, donde el 55% manifiesta

que no los ha implementado. Sin embargo, el porcentaje de encuestados que manifiestan que tienen algo de implementación también es sorprendentemente alto con un 42% y un 3% de los encuestados manifiestan tener una totalidad de digitalización.

Sin embargo, para el caso de subestaciones de MT se puede generar confusión dado que debido a las cortas distancia no es posible implementar bus de proceso por lo que no se requiere, además el mismo relé de la celda de media tensión se convierte en un elemento digitalizador y no necesariamente empleen SV (IEC 61850-9-2) en el concepto reducido.

Por otro lado, en algunos casos se logra evidenciar que se confunde el bus de proceso con el bus de estación.

6.3.6. En caso de realizar contratación externa en su empresa para la implementación de SED, ¿cuáles fueron las razones para hacerlo?

Para este interrogante, se encuentra variedad de respuestas, partiendo de que menos del 20% de los encuestados afirman haber realizado la implementación completamente al interior de la empresa. No obstante, aquellos que realizaron contratación externa, cuentan con argumentos que van desde el “know how”, la ocupación del personal, las estrategias de desarrollo de proyectos o aspectos financieros. A pesar de la variedad de respuestas encontradas, existen cosas en común entre ellas, el no contar con el personal suficiente y a la vez, capacitado para estos procesos es un indicador del que aún hace falta mayor formación.

Los encuestados indican que, si bien la empresa cuenta con personal que tiene el conocimiento, aún hay detalles por reforzar para consolidar un proceso de ingeniería óptimo en la digitalización de subestaciones eléctricas. Aspectos como la interoperabilidad entre dispositivos y el desempeño de los mismos, con especial énfasis en bus de proceso, motiva a las empresas del sector a contratar los servicios de externos con mayor experiencia. La integración de sistemas y el conocimiento especializado, acompañado del uso o actualización de herramientas de supervisión y control, también se considera como un factor relevante para tomar la decisión de contratar el proceso de manera externa.

6.3.7. ¿Qué factores de éxito considera importantes al momento de implementar el estándar IEC 61850 en su compañía?

Se obtuvieron 30 aportes donde se evidencio que los entrevistados tenían conocimiento del tema o habían oído del mismo. El 20% consideran como factor de éxito la capacitación y entrenamiento del personal de operación y mantenimiento en el montaje de equipos, normativa y estándares lo cual fortalece su conocimiento y habilidades tecnológicas, sin embargo se observa que falta profundizar más en el tema para conocer más beneficios de cara al negocio.

Otro 20% consideran como factor de éxito la estandarización de la arquitectura de las comunicaciones y diseños de las subestaciones, lo cual está muy acorde a lo que se está buscando de cara a la integración de las tecnologías.

Otro 20% consideran como factor de éxito la interoperabilidad entre las diferentes tecnologías, lo cual es algo que se debe lograr por medio de la estandarización de protocolos de comunicación todo de cara a lograr una integración tecnológica que no afecte la operación a futuro

Otro 13 % consideran como factor de éxito la reducción de los tamaños de las subestaciones en cuanto a equipos, cableados y salas de control lo cual se está buscando en las empresas y en especial en las áreas urbanas donde se dificulta la consecución de predios para ubicar las Subestaciones en zonas de alto desarrollo.

Otro 13%consideran como factor de éxito la gestión de cambio y el apoyo de la alta gerencia en la implementación de estas nuevas tecnologías.

El 14% restante no establecieron factores de éxito concretamente y encontraron beneficios puntuales en la mejora de las comunicaciones, mejora de los protocolos, etc.

6.3.8. Durante las fases de operación y mantenimiento de las SED, ¿cuáles beneficios han percibido para la mejora en la confiabilidad operacional?

Se obtuvieron 30 aportes, de los cuáles:

- El 20% consideran dentro de los beneficios la Redundancia en la comunicación, mejor supervisión y gestión de los equipos, incremento en la disponibilidad y mayor información para el análisis.
- El 17 % reportan que por el momento no tienen subestaciones digitales implementadas, están en etapa de implementación, no hacen parte de alcance actual o no saben.
- El 13% consideran dentro de los beneficios obtenidos, la flexibilidad para realizar modificaciones y diagnósticos, la facilidad para hacer renovaciones de equipos, la compatibilidad de sistemas (interoperabilidad), la simplicidad de las configuraciones, y la confiabilidad por las redundancias que se pueden establecer. La mejora en los tiempos de respuesta gracias a la gestión remota y la posibilidad de consolidar planes de mantenimiento predictivo.
- El 3% consideran como beneficio La facilidad de diagnóstico de fallas mediante herramientas de software.
- El 27% consideran dentro de los beneficios la Seguridad en la operación, facilidades en el mantenimiento, optimización en la gestión de activos, disminución de los tiempos de mantenimiento, la fiabilidad de la operación, disminución de los riesgos de intervención; la información de las redes puede ser administrada para conocer el comportamiento del sistema; las herramientas actuales y venideras facilitan y agilizan la supervisión de la operación de los equipos de C&P.
- El 7% consideran dentro de los beneficios la gestión remota, disminución de cableado y puntos de falla, uso de menos protocolos, fácil de integración, gran disponibilidad,

mayor monitoreo, mayor disponibilidad de información remota, reducción de gastos, y posibilidad de hacer mantenimiento remoto.

- El 13% Reportan N/A, Trabajo en una empresa fabricante de equipos de Control y Protección, No aplica a nuestra actividad como proveedor.

Notas Adicionales asociadas a la pregunta:

- ✓ Beneficio con la implementación de la gestión de cambio para el personal que realiza las pruebas
- ✓ Relacionamiento y adaptación en el uso de las nuevas herramientas tecnológicas para el desarrollo de las pruebas en el ámbito digital.
- ✓ Documentación de procedimientos, hojas de ruta para las pruebas de concepto, de recepción, puesta en servicio y mantenibilidad de las subestaciones digitales.

6.3.9. ¿Qué otros desafíos diferentes a los ya mencionados se han identificado al momento de implementar una SED?

- Se evidencian riesgos importantes desde el punto de vista de ciberseguridad y el grado de madurez de la tecnología, dado que se requiere muchas actualizaciones de versiones que en muchos casos son incompatibles, de igual manera se evidencia que no existe una estandarización y normalización de los equipos de automatización y telecomunicaciones a nivel nacional, por lo tanto se debe fortalecer en buenas prácticas de cableado estructurado, estandarización de programación, estandarización de nombres, entre otros aspectos.
- El temor al cambio de parte del personal técnico encargado de los sistemas de operación y mantenimiento, es decir la gestión del cambio con los operadores y el personal de mantenimiento, no ha sido un tema fácil, ya que lo que se concibe es que esta "nueva" tecnología elimina sus labores, cuando debe cambiar son los perfiles y actividades de quienes operan y mantienen las SE.
- Riesgo de interoperabilidad. No es tan fácil como muchas veces se presenta y se debe tratar mucho la información y parametrización de los equipos para lograr que operen sistemas de diferentes fabricantes.
- Convencer a los clientes finales del funcionamiento de la tecnología. Uno de los encuestados manifestó que en el año 2015 y 2017 tuvieron que invertir en la construcción de 2 proyectos digitales para poder mostrar a los clientes casos de éxito de la tecnología completamente digital y aumentar su credibilidad en la tecnología.
- Costo de integración por parte de diferentes fabricantes.
- Colombia debe adoptar laboratorios acordes con la infraestructura, tecnología y conocimiento actual, con el fin de planear, diseñar y validar SED en tiempo

real (gemelo digital), antes de ser implementadas en campo, esto ayudaría a los ingenieros a validar que las tecnologías que se integran a la SED sean las adecuadas.

- La implementación de subestaciones digitales minimiza el riesgo eléctrico implícito en las actividades de montaje electromecánico, pruebas de control y protección, operación y mantenimiento dada la eliminación de cableados externos, interconexiones y equipos auxiliares con lo cual se crean entornos de trabajo más seguros, flexibles, eficientes y confiables.
- Diseños optimizados de tableros de control y protección debido a que no existen cableados internos y equipos accesorios dentro del tablero y la integración se realiza mediante enlaces de fibra óptica hacia los sistemas de bus de procesos y bus de estación.
- Menores tiempos de construcción y obras civiles dado que se requieren menores dimensiones en canalizaciones para tendido de cableados de control y menores áreas requeridas en las edificaciones de control.
- Desarrollo de actividades pre - constructivas de obras electromecánicas para ensamble de tableros de control y comunicaciones y la ejecución de pruebas pre – SAT de los sistemas de comunicaciones como lo es el bus de procesos, el bus de estación y la integración a los Gateway en sitios diferentes a la obra mediante la implementación de sistemas que simulen la operación de equipos de nivel 0. La ejecución de estas actividades permite optimizar los tiempos de puesta en servicio y resolver inconvenientes asociados a la implementación de la arquitectura de comunicaciones y la programación, configuración y parametrización de los IED, Switch de comunicaciones y equipos que hacen parte del sistema digital.
- Ahorro de cableado sobre todo en el nivel de bahía y en el nivel de proceso ya que sería por medio de redes de comunicación por fibra en vez de múltiples conductores de cobre.
- Ahorro de más de 50% en los cableados. Reducción en cables de cobre por encima del 80%.
- Ahorro de espacio en casa de control aproximado del 50% Se reduce entre el 30 y 60% del espacio para la ubicación de tableros de control y protección. Debido a la menor cantidad de IO's cableadas.
- Reducción del impacto ambiental en el patio de conexiones por encima del 50% al usar equipos digitales y conectores ópticos.
- Ahorro de espacio y minimiza las obras civiles para la construcción de cárcamos y ductos para cableados.
- Unificación de Stock de repuestos.
- Minimiza las fallas por cableados externos.

- Minimiza los riesgos asociados a la intervención de subestaciones energizadas.
- Facilitan actualización tecnológica y expansión de las subestaciones.
- Evitan los problemas causados por cables tales como la compatibilidad electromagnética, las sobretensiones o la existencia de varias tierras.
- Incrementa la automatización y el nivel de la eficiencia operacionales.
- Disminuyen los tiempos de instalación reduciendo los cortes de energía.
- Se reducen los costos de operación y mantenimiento y aumenta la confiabilidad y eficiencia del sistema, debido a la permanente supervisión de los datos intercambiados entre niveles de bahía y proceso que permite acciones rápidas y precisas en caso de fallas.
- Incremento en la seguridad y reducción del riesgo de choque eléctrico debido a la mayor utilización de equipo óptico.
- Mejora la calidad del servicio ya que es más eficiente el mantenimiento dada la rapidez y eficacia de la ubicación de las fallas siendo la operación es más confiable

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio realizado permitió conocer el estado actual del sector eléctrico Colombiano ante la implementación de subestaciones digitales. A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

- ❖ El estudio realizado permitió conocer el estado actual del sector eléctrico Colombiano ante la implementación de subestaciones digitales, encontrando los avances y desarrollos al momento de implementar el estándar IEC 61850, al igual que los desafíos, requerimientos y necesidades, desde el punto de vista técnico, económico y regulatorio, desde la visión de diferentes actores como: la academia, consultores, proveedores, fabricantes, usuarios, integradores y operadores de red.
- ❖ El estudio realizado permitió identificar una brecha entre la academia y la industria en lo relacionado con la formación e implementación de subestaciones digitales, por lo tanto, es necesario articular estos dos actores en la adecuación de los programas académicos de ingeniería, con el fin de que los nuevos profesionales tengan conocimientos amplios y suficientes que puedan aportar, al momento de integrarse a la industria de una manera eficiente y acelerada, logrando el cierre de las brechas para la implementación de subestaciones digitales en Colombia.
- ❖ Es importante que los nuevos profesionales y los actuales, tengan un conocimiento complementario en las diferentes temáticas de digitalización de subestaciones. En términos generales no solo se requieren los conocimientos básicos de la ingeniería eléctrica, electrónica, electromecánica y profesiones afines, sino también conocimientos asociados a: redes de datos, telecomunicaciones, programación, sistemas, ciberseguridad, entre otras.
- ❖ Desde el punto de vista tecnológico, es importante validar si la aplicación de la implementación del bus de proceso, aplica con las mismas ventajas y beneficios tanto para redes de transmisión, generación y distribución. En esta última, existe una percepción de que los beneficios obtenidos en la implementación del bus de proceso, para redes de distribución, no presenta grandes ventajas en relación con los costos, sin embargo, se recomienda evaluar otros factores tales como: monitoreo y gestión de activos.
- ❖ El desarrollo de conocimiento alrededor de las tendencias actuales en el sector eléctrico es un objetivo común para la sociedad, ya que permitirá establecer mejores prácticas para la automatización de subestaciones eléctricas, aumentando la calidad y confiabilidad del servicio que prestan las compañías colombianas de cara a sus clientes.
- ❖ La llegada del estándar IEC 61850 en el año 2005, marcó un importante hito en el acelerado desarrollo de los Sistemas de Automatización de Subestaciones alrededor del mundo, en el caso colombiano este hito marco la apertura para el uso de nuevas

tecnologías empleadas en subestaciones eléctricas, las cuales han venido evolucionando considerablemente, lo que ha resultado en la integración de un número creciente de funciones, logrando mejoras significativas en disponibilidad, seguridad y operación en tiempo real.

- ❖ La evolución de la norma IEC 61850 ha jugado un papel importante en el desarrollo de la subestación digital, asegurando la interoperabilidad para intercambio de datos entre los equipos de la subestación. Si bien, gran parte de la norma es ampliamente adoptada e integrada por los diferentes integradores y proveedores en Colombia y el bus de estación ha sido adoptado y desplegado con éxito como se observa en los resultados arrojados por la encuesta, a la fecha, el despliegue del aparte 9.2 de la norma o bus de proceso no se ha implementado en igual medida, por lo cual sigue siendo un reto para el sector eléctrico colombiano.
- ❖ La implementación del estándar IEC 61850 supone un reto en la gestión del capital humano; la implementación de la subestación digital abarca mucho más allá del conocimiento del estándar. El conocimiento en áreas como Redes de comunicación, sincronización, ciberseguridad y digitalización de la red, cobran cada vez mayor importancia. Debido a esto, es necesario ampliar cada vez más el mapa de conocimiento del personal que interviene en el diseño, montaje y puesta en servicio de estas subestaciones. Este cambio deja entrever un solapamiento de fronteras y responsabilidades de las diferentes profesiones y equipos de trabajo.
- ❖ Para lograr un avance significativo en la implementación de subestaciones digitales se debe trabajar en la elaboración de Unidades Constructivas (UUC) que incluyan los nuevos elementos para que sean reconocidas sus inversiones vía tarifa tal como se hace actualmente en las subestaciones convencionales, esto se puede justificar como mejoras en la calidad del servicio y supervisión y monitoreo en tiempo real.
- ❖ Colombia debe prepararse en la adopción de laboratorios acordes con las necesidades y requerimientos que imponen las SED haciendo uso de los gemelos digitales, con el fin de planear, diseñar y validar las nuevas tecnologías que se integran al sistema, esto ayudaría a los ingenieros en este campo, a reducir los riesgos, tiempo y costos al momento de hacer cualquier tipo de implementación de SED.

8. AGRADECIMIENTOS

CIGRE Colombia agradece enormemente al trabajo en conjunto realizado por el sector productivo y la academia en la generación del presente reporte técnico “NECESIDADES, REQUERIMIENTOS Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE SUBESTACIONES DIGITALES EN COLOMBIA (IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850)”, por las contribuciones y aportes realizados:

CELSIA

ISA

XM

EPM

ENEL-CODENSA

HART E&C CONSULTING

PTI

UNIVERSIDAD DEL VALLE

UNIVERSIDAD NACIONAL

COLOMBIA INTELIGENTE

REFERENCIAS

- [1] Red Eléctrica de España, “Sistema Eléctrico,” 2016. <https://www.ree.es/sites/default/files/ficheros/memoria/images/sistemaElectrico.png> (accessed Jan. 25, 2020).
- [2] D. Morales Hidalgo, “Estudio de la configuración de un equipo de medidas basado en la norma IEC 61850 para subestaciones de media/baja tensión,” Universidad de Sevilla, 2009.
- [3] J. Prieto, “Aplicabilidad De La Norma Iec 61850 En Sistemas Scada En La Red De Transmisión Eléctrica De Colombia,” Universidad de la Salle, 2011.
- [4] V. Bhardwaj, M. I. Singh, S. Pardeshi, and R. Arora, “A review on various standards for digital substation,” Proceeding IEEE Int. Conf. Green Comput. Commun. Electr. Eng. ICGCCEE, 2014, doi: 10.1109/ICGCCEE.2014.6922364.
- [5] A. C. Fernández Avilés, “El protocolo IEC 61850 en la automatización de Subestaciones,” Universidad de Cuenca, 2015.
- [6] Q. Huang, S. Jing, J. Li, D. Cai, J. Wu, and W. Zhen, “Smart Substation: State of the Art and Future Development,” IEEE Trans. Power Deliv., vol. 32, no. 2, pp. 1098–1105, 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2598572.
- [7] A. S. Rojas Llenera, “Automatización de la Subestación Eléctrica Jesus de 138 Kv - Arequipa a Través del Protocolo de Comunicación IEC 61850,” universidad Nacional de Trujillo, 2018.
- [8] Colombia Inteligente “Subestaciones digitales – Lineamientos estratégicos”. Documento de Trabajo, Noviembre 2009.
- [9] C. Facchin., "Estamos reduciendo la brecha. Habilitando Subestaciones Digitales" Documento Técnico, ABB, pp. 1-12. 2017.
- [10] G. Ramirez y PGGA, «ABB Retrofits & Subestaciones Digitales 2018», Rev. ABB, 2018.
- [11] M. Minas y Energía de Colombia, «Reglamento Técnico De Instalaciones Eléctricas (Retie)», Resolución. 90708, p. 127, 2013.
- [12] E. Gomez-Luna, R. Franco-Manrique, L. Palacios. "Monitoring and Control System Using ETAP Real-Time on Generation Plant Emulation Using OPAL-RT", IEEE ANDESCON-SA, Santiago de Cali, Colombia, 22-24 Aug. 2018, pp. 1-6.
- [13] E. Gómez-Luna, J. E. Candelo-Becerra and E. Marlés-Sáenz " Current Status and Future Trends in Protection, Control and Communications Testing in Electrical Grids using Real-time Simulation" Journal of Engineering Science and Technology Review 11 (4) (2018) 204 – 215.



[14] E. Gómez-Luna, C. Zapata, M. Fuertes Bravo “Simulación en tiempo real como parte de la validación para la implementación de subestaciones digitales” FISE-IEEE/CIGRE CONFERENCE, diciembre 4 al 6 de 2019| Plaza mayor convenciones| Medellín-Colombia.

[15] G Ramirez," ABB Retrofits & Subestaciones Digitales" 2018, pp 1-80.