UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de escalabilidad en subestaciones eléctricas digitales a partir de un indicador basado en la transmisión de datos con valores muestreados en el bus de proceso acorde a IEC 61850

Juan Manuel Posada Corrales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática
Medellín, Colombia

2025

Análisis de escalabilidad en subestaciones eléctricas digitales a partir de un indicador basado en la transmisión de datos con valores muestreados en el bus de proceso acorde a IEC 61850

Juan Manuel Posada Corrales

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería – Automatización Industrial

Director:

Ph. D., Germán Darío Zapata Madrigal

Codirector (a):

M. Ing., Óscar Andrés Tobar Rosero

Línea de Investigación:

Subestaciones digitales y estándares para interoperabilidad

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Teleinformática y Teleautomática

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2025

Agradecimientos

A mi mamá, mi primera y más grande maestra, mi mejor ejemplo y mi mayor apoyo.

A la doctora Sanín, por su amor, por todo lo que he aprendido a su lado que no se encuentra en ningún libro, por su presencia en mi vida y lo especiales que hace mis días.

Al profe Germán Zapata, por su acogida y apoyo desde el comienzo de este proceso; a Jair Vargas por la inspiración y motivación para llevar sus ideas a campos vecinos y al profe Óscar Tobar por su orientación en cada etapa de este trabajo y su valioso apoyo en el desarrollo técnico.

A los profes Freddy Bolaños, Ernesto Pérez y Rosa Correa, por compartir sus saberes conmigo desde el pregrado, por esos aportes que cada quien hizo desde su área de especialidad no solo a este documento sino a mi formación técnica e investigativa.

A las profes Mónica Reinartz y Eliana Arango, por su compromiso y vocación, por dejarme coquetear de nuevo con la docencia, y por inspirarme a abordar varios puntos de este trabajo movido por principios didácticos, a pesar de tratarse de un asunto técnico.

A HMV, por la oportunidad laboral que me dio la empresa cuando la Automatización Industrial era algo muy ajeno a mí, a mis compañeros con los que he crecido y de quienes también he aprendido mucho, a los proyectos y a quienes han participado de ellos, que también han sido maestros.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido. Las figuras y tablas empleadas son de elaboración propia y las capturas de pantalla contienen la referencia del software asociado.

_____

Juan Manuel Posada Corrales

28 de febrero de 2025

Resumen

Análisis de escalabilidad en subestaciones eléctricas digitales a partir de un indicador basado en la transmisión de datos con valores muestreados en el bus de proceso acorde a IEC 61850

Este trabajo aborda el entorno de operación en bus de proceso de la subestación digital, tomando como referencia el tráfico de *Sampled Values* y analiza la influencia de este a partir de la ocupación del ancho de banda, latencia, *jitter* y pérdida de paquetes de datos, como factores determinantes para evaluar la escalabilidad en subestaciones digitales. El objetivo de este estudio es identificar cómo evolucionan estas variables a medida que se agregan equipos como las *Merging Units*, con el fin de determinar el nivel de tolerancia en buses de proceso configurados a 100 Mbps y dimensionar las capacidades para conformar bus de proceso de 1 Gbps.

El proceso investigativo tuvo el apoyo del Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales (LACI) de la Facultad de Minas, donde se desarrollaron los ensayos que sustentan esta investigación. Para esto, se plantearon casos de estudio que incluyen equipos reales y software para emulación y simulación de acuerdo con las guías de aplicación de sistemas de comunicaciones bajo el estándar IEC 61850. Como principal conclusión se identifica que el mayor impacto en la escalabilidad del bus de proceso lo tiene el uso de ancho de banda, a partir de lo cual se determina que es posible conformar buses de proceso de 100 Mbps con 8 y hasta 10 suscripciones de *Sampled Values*, resaltando la importancia de ejecutar pruebas de saturación con todo el tráfico del bus de proceso como la mensajería GOOSE y los MMS.

Palabras clave: Subestaciones digitales, Bus de proceso, Escalabilidad, *Sampled Values*, IEC 61850, *Merging Unit*, Comunicaciones, Pruebas de saturación de red.

Abstract

Scalability of digital substation process bus using an indicator for Sampled Values data transmission according to IEC 61850

This study examines the operational environment of the process bus in digital substations, focusing on Sampled Values traffic. It analyzes the influence of factors like bandwidth occupancy, latency, jitter, and data packet loss to evaluate scalability. The goal is to observe how these variables evolve as devices like Merging Units are added, determining the tolerance level in process buses configured at 100 Mbps, and to size the capabilities for establishing 1 Gbps process buses.

The research was supported by the Laboratory of Automation and Industrial Communications (LACI) of the Faculty of Mines, where the tests supporting this work were conducted. For this, case studies including real equipment and software for emulation and simulation were designed according to the application guidelines of communication systems under the IEC 61850 standard. The main conclusion highlights that the greatest impact on the scalability of the process bus is bandwidth utilization, concluding that it is possible to establish 100 Mbps process buses with 8 to 10 subscribers of Sampled Values publishers. It also emphasizes the importance of performing saturation tests considering all process bus traffic, including GOOSE and MMS protocols.

Keywords: Digital substations, Process bus, Scalability, Sampled Values, IEC 61850, Merging Unit, Communications, Network saturation test.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **VII**

Abstract ..... **VIII**

Lista de figuras ..... **XI**

Lista de tablas ..... **XIII**

Lista de ecuaciones ..... **XIV**

Lista de símbolos y abreviaturas ..... **XV**

Introducción **1**

1. Contexto **3**
1.1 Antecedentes 3
1.2 Planteamiento del problema 7
1.3 Justificación 7
1.4 Objetivos 8
1.4.1 Objetivo general 8
1.4.2 Objetivos específicos 8

2. Definiciones **9**
2.1 Comunicaciones en subestaciones digitales 9
2.2 Datos muestreados en el bus de proceso 17
2.2.1 Digitalización de señales 19
2.2.2 Trama de datos de *Sampled Values* 22
2.2.3 Flujo de datos de *Sampled Values* 25
2.3 Comunicaciones digitales en el bus de proceso 27
2.4 Ancho de banda 30
2.5 Latencia 34
2.6 *Jitter* 35
2.7 Pérdida de paquetes de datos 36
2.8 Escalabilidad 37
2.9 Sincronización de tiempo 39
2.10 Redundancia 41

3. Metodología **49**
3.1 Generalidades 49
3.2 Indicador de escalabilidad 51

3.2.1 Índice de ancho de banda 51
3.2.2 Índice de latencia 52
3.2.3 Índice de fluctuación o *jitter* 53
3.2.4 Índice de pérdida de paquetes de datos 53
3.3 Protocolo de pruebas 54
3.3.1 Caracterización de *Merging Units* 54
3.3.2 Pruebas de escalabilidad 55
3.4 Procedimiento 57
3.5 Casos de estudio 57
3.5.1 Reporte de pruebas 58
3.6 Software 61
3.6.1 Herramientas de configuración 61
3.6.2 Analizador de paquetes de datos 61
3.6.3 Emulador de *Sampled Values* 62
3.7 Exclusiones 64

4. Resultados 67
4.1 Resultados de caracterización 67
4.2 Resultados de pruebas de escalabilidad 69

5. Conclusiones y recomendaciones 77
5.1 Conclusiones 77
5.2 Recomendaciones 79

A. Registro de pruebas 81

B. Evaluación de índices e indicador de escalabilidad 83

C. Protocolo sugerido para pruebas de saturación 85

Referencias y bibliografía 87

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1. Arquitectura general de comunicaciones en subestaciones digitales 10
Figura 2-2. Multidifusión en el bus de proceso 18
Figura 2-3. Conversión analógica-digital en las MU 19
Figura 2-4. Conversión A/D - Paso 1: Muestreo 20
Figura 2-5. Conversión A/D - Paso 2: Cuantificación 20
Figura 2-6. Conversión A/D - Parte 3: Codificación 21
Figura 2-7. Comunicación cliente/servidor vs. publicador/suscriptor 27
Figura 2-8. Uso de cobre y fibra óptica en patio de subestaciones 28
Figura 2-9. Analogía – transmisión de datos y flujo de agua 31
Figura 2-10. Analogía – Capacidad del canal como límite del flujo 32
Figura 2-11. Analogía – Porcentaje de ocupación del canal 33
Figura 2-12. Analogía – Retardo en flujo de agua 35
Figura 2-13. Analogía – Variación en el retardo del flujo de agua 36
Figura 2-14. Analogía - Pérdidas de información 37
Figura 2-15. Analogía - Concepto de escalabilidad 38
Figura 2-16. Flujo de información red doble estrella – red anillada 43
Figura 2-17. Contingencia N-1 MU red doble estrella – red anillada 44
Figura 2-18. Contingencia N-2 MU red doble estrella – red anillada 45
Figura 2-19. Contingencia N-2 MU y SW red doble estrella – red anillada 46
Figura 3-1. Arquitectura de red para caracterización de MU 54
Figura 3-2. Parametrización del AT61 SV Publisher 55
Figura 3-3. Arquitectura de pruebas de escalabilidad 56
Figura 3-4. Diagrama de flujo pruebas de escalabilidad 57
Figura 3-5. Interfaz del software para captura de datos Wireshark [22] 61
Figura 3-6. Vista General del software AT61 SV Publisher [23] 63
Figura 3-7. Vista ASDU del software AT61 SV Publisher [23] 64
Figura 4-1. Tasa de bits de las MU durante la caracterización 67
Figura 4-2. Tasa de bits simulación tráfico del 40% 68
Figura 4-3. Indicador de escalabilidad en pruebas con tráfico simulado 69
Figura 4-4. Tasa de bits en pruebas de escalabilidad sin tráfico simulado 70
Figura 4-5. Tasa de bits en pruebas de escalabilidad con tráfico simulado 70
Figura 4-6. Latencia en pruebas de escalabilidad sin tráfico simulado 71
Figura 4-7. Latencia en pruebas de escalabilidad con tráfico simulado 71
Figura 4-8. Paquetes de datos recibidos en prueba con 15 SV y tráfico simulado 72

Figura 4-9. Muestras por segundo ISA DRTS 66 en pruebas sin tráfico simulado..... 73
Figura 4-10. Muestras por segundo ISA DRTS 66 en pruebas con tráfico simulado..... 73

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1. Conversión A/D - Ejemplo de codificación 21
Tabla 2-2. Equivalencia decimal – binaria 3 bits 23
Tabla 2-3. Equivalencia hexadecimal – binaria 4 bits 23
Tabla 2-4. Trama de datos de *Sampled Values* 24
Tabla 2-5. Estructura de bloque APDU *Sampled Values* 25
Tabla 2-6. El modelo OSI y los *sampled values* 26
Tabla 2-7. Denominaciones de ancho de banda y medios asociados 34
Tabla 2-8. Resumen - Analogía transmisión de datos y flujo de agua 38
Tabla 2-9. Comparativa de protocolos de sincronización de tiempo 40
Tabla 2-10. Protocolos de redundancia 42
Tabla 3-1. Casos de estudio en pruebas de escalabilidad 58
Tabla 3-2. Formato de reporte de pruebas 60
Tabla 3-3. Evaluación del indicador de escalabilidad 60
Tabla 4-1. Comparativa de *streams* de SV generados en caracterización 68
Tabla 4-2. Estimación teórica de escalabilidad del bus de proceso de 100 Mbps 75
Tabla 4-3. Estimación práctica de escalabilidad del bus de proceso de 100 Mbps 75

Lista de ecuaciones

Pág.

Ecuación 2-1. Equivalencia decimal - binaria 22
Ecuación 3-1. Indicador de escalabilidad 51
Ecuación 3-2. Índice de ancho de banda 52
Ecuación 3-3. Índice de latencia 52
Ecuación 3-4. Índice de *jitter* 53
Ecuación 3-5. Índice de pérdida de paquetes de datos 53
Ecuación 3-6. Cálculo de muestras esperadas por captura 59

Lista de símbolos y abreviaturas

Subíndices

Subíndice	Término
$disp$	Disponible
i	Indicador de caso evaluado
max	Máximo
tol	Tolerable

Abreviaturas

Abreviatura	Término
AB	Ancho de Banda
E	Indicador de Escalabilidad
GB	Gigabyte
GOOSE	*Generic Object Oriented Substation Event* (Evento de subestación orientado a objetos genéricos)
GPS	*Global Positioning System* (Sistema de Posicionamiento Global)
HSR	*High-availability Seamless Redundancy* (Redundancia de alta disponibilidad sin fisuras)
IHM	Interfaz Humano-Máquina
J	*Jitter* (variación en la Latencia)
kB	Kilobyte
L	Latencia
LACI	Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales
LAN	*Local Area Network* (Red de área local)
MB	Megabyte
MMS	*Manufacturing Message Specification* (Especificación de fabricación de mensajes)
MU	*Merging Unit* (Unidad de fusión)
PC	*Personal Computer* (Ordenador)
PPD	Pérdida de Paquetes de datos
PRP	Protocolo de Redundancia Paralela
SW	Switch

Introducción

La transformación digital en el sector eléctrico trae consigo retos de asimilación tecnológica y de conocimientos, sumado a la necesidad de establecer las condiciones necesarias para garantizar la seguridad y estabilidad de los nuevos sistemas [1], además de asegurar su integración con sistemas convencionales. Como caso particular, las subestaciones eléctricas, ahora en un contexto digital, han representado un gran reto para la asimilación de tecnologías y conceptos que requieren una innovación de procesos y servicios al interior de las empresas [2]. El uso de señales digitales para el intercambio de información entre los diferentes dispositivos de una subestación digital y la operación correspondiente ante eventos que requieran acciones de maniobra, demandan un exhaustivo estudio en procura de garantizar la confiabilidad de los procesos de supervisión, control y automatización, pero la gestión de tráfico de los nuevos sistemas digitales toma gran importancia en otros aspectos como la ciberseguridad [3].

La componente de bus de proceso en subestaciones eléctricas digitales es determinante en los procesos de diseño e implementación, siendo fundamental considerar y analizar la capacidad de crecimiento, a futuro, de acuerdo a las necesidades del sistema eléctrico, considerando a su vez el menor impacto en el sistema actual. Un sistema con alto grado de escalabilidad, indica que tiene un buen nivel de crecimiento, ampliación o adaptación, acorde a lo que pueda requerir la demanda. Dicho esto, para garantizar un bajo impacto futuro en una subestación digital con bus de proceso, es necesario realizar una previsión adecuada y la implementación de tecnologías o sistemas con potencial de adaptabilidad, que puedan crecer sin afectar su desempeño. Por ende, es deseable que las soluciones propuestas e implementadas sean analizadas previamente bajo condiciones que vayan más allá de los requerimientos iniciales del sistema, teniendo en cuenta su capacidad de crecimiento o situaciones extremas del sistema eléctrico que pudieran requerir atención.

Lo anterior se puede conseguir a través de la evaluación de desempeño de la transmisión de datos en bus de proceso de la subestación digital mediante el desarrollo de un indicador de escalabilidad que permita establecer el número máximo de equipos que podrán interactuar en un determinado sistema sin que esto represente afectación alguna en las comunicaciones y los requerimientos de desempeño establecidos por el estándar IEC 61850 y demás normativas globales o empresariales aplicadas a este tipo de sistemas.

En el presente trabajo se exponen todos los aspectos relacionados a la transmisión de datos de valores muestreados en el bus de proceso, partiendo desde las bases de las comunicaciones digitales, como el concepto de bit; y se abordan los conceptos de ocupación de ancho de banda, latencia, *jitter*, pérdida de paquetes de datos y escalabilidad a través de analogías con sistemas físicos cotidianos para facilitar a adopción de los conceptos, constituyendo una propuesta didáctica fácil de socializar con personas relacionadas a las comunicaciones y a los sistemas eléctricos de potencia desde cualquier punto de su entendimiento de subestaciones digitales, incluso si este es nulo.

Desde el enfoque técnico, se presenta la validación del indicador obtenido mediante el análisis de pruebas de saturación del bus de proceso en condiciones críticas, donde no solo se tenga en cuenta el tráfico de valores muestreados para medidas eléctricas sino también el tráfico asociado a eventos, reportes, lectura o escritura de información en los dispositivos. Se espera que el resultado aquí expuesto sirva como insumo para empresas y grupos de ingeniería en los procesos de diseño, análisis e implementación de subestaciones digitales con un potencial de crecimiento, considerando a su vez las recientes tendencias tecnológicas sobre sistemas de protección y control centralizados y virtualizados.

1. Contexto

En este capítulo se presentan los principales aspectos que motivan al estudio de la escalabilidad del bus de proceso en las subestaciones digitales a través de un indicador, considerando como antecedentes (1.1) una recopilación de reportes y trabajos relacionados con la evaluación de desempeño y la escalabilidad en redes de comunicaciones dentro y fuera del contexto del estándar IEC 61850, el planteamiento del problema (1.2) basado en los resultados de otros trabajo y la justificación para aplicar un indicador normalizado a la evaluación de desempeño (1.3) y, finalmente, los objetivos que tiene este trabajo de grado (1.4).

1.1 Antecedentes

El Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos (CIGRE) realizó un sondeo sobre las necesidades, requerimientos y desafíos de la implementación de subestaciones digitales en Colombia, enfocado en la implementación del estándar IEC 61850; estos resultados se presentan en [2]. Allí se indica que, a pesar de contar con un estándar de más de quince años de antigüedad, la implementación en el país ha estado por debajo de lo que se ha conseguido a nivel internacional.

En la encuesta de [2] participó un grupo de consultores, proveedores, empresas del sector eléctrico e instituciones educativas, donde se muestran los siguientes puntos:

- Hay gran interés en invertir en la digitalización de subestaciones
- En las subestaciones existentes se tienen condiciones adecuadas para la migración a subestaciones digitales
- Se espera digitalizar, por lo menos, el bus de estación de las subestaciones
- Cerca de un tercio de los encuestados se interesa en la digitalización total.

Un punto interesante en la encuesta del CIGRE es el porcentaje del uso de guías para la implementación de subestaciones digitales, ya que un 60% de los encuestados dispone de guías, mientras el 40% no cuenta con ellas, o solo lo hace parcialmente. Los resultados de este trabajo de grado pueden ser integrados a ambas partes, ya sea como base para quienes no han estructurado guías, o como punto de comparación para quienes sí las tienen.

En relación con la implementación del estándar IEC 61850, se encuentran trabajos con análisis técnico-económicos de casos particulares [4], y alternativas de propuestas de implementación de nuevos sistemas de automatización y mejoras o actualizaciones totales o parciales de sistemas existentes, como lo es la migración de subestaciones convencionales a subestaciones digitales, enfocándose en la aplicación del estándar y los diferentes beneficios que puede traer a nivel administrativo [5], sin profundizar en los requerimientos técnicos que aseguren su implementación ni en la evaluación de desempeño con miras a la escalabilidad de los sistemas

Muchos de los trabajos que pueden ser consultados respecto a la implementación del estándar IEC 61850, incluyendo los mencionados anteriormente, abordan en algún punto rangos de desempeño seguro del sistema de comunicaciones y valores estandarizados, entre otros aspectos. Entre estos están los trabajos desarrollados en [6], donde se registran los datos de comunicaciones entre subestaciones, comparando: tiempos de transmisión de datos en redes de diferentes capacidades; presentando tiempos límite de transmisión de datos según la funcionalidad de protección o medida; indicando el tamaño de mensajes en diferentes funciones y protocolos, sin concluir de forma concreta los límites técnicos de las variables medidas. Otro estudio que presenta tiempo límite de transmisión de datos según los tipos de mensajes, sincronización, transferencia de archivos y más, es el presentado en [7], donde, a pesar de contemplar las variables anteriormente mencionadas, no se concluye acerca de la confiabilidad en estos aspectos sino desde el punto de vista de topologías de red.

En general es escasa la cantidad de trabajos enfocados en el análisis de desempeño desde interoperabilidad, escalabilidad y seguridad en la forma en que se aborda en [8] para

el caso de las microrredes, donde se plantea una metodología de pruebas y se propone el cálculo de tres indicadores de desempeño y seis índices que representan el estado de la microrred para diferentes escenarios en los que se miden y evalúan de forma cuantitativa el ancho de banda, la latencia, la fluctuación de la latencia y la pérdida de paquetes de datos.

Todos los aspectos tratados en [8] pueden ser empleados como base para la evaluación de desempeño y la determinación de criterios mínimos en el diseño de sistemas de automatización de subestaciones eléctricas aplicándose en el caso de datos de valores muestreados del estándar IEC 61850; considerando todas las particularidades de esta aplicación en contraste con la aplicación en microrredes desarrollada allí. Incluso se invita a la evaluación con otros protocolos de comunicación y a la introducción de nuevos índices que permitan fortalecer los indicadores desarrollados, como lo es la implementación del indicador de escalabilidad al bus de proceso de subestaciones digitales que se propone en este trabajo de grado.

En un nivel más particular, se encuentran trabajos como [9], donde se desarrolló una metodología para evaluar los aspectos de pérdida y retraso de información de valores muestreados para las principales variables eléctricas en los dispositivos electrónicos inteligentes que se emplean en los sistemas de automatización de subestaciones digitales bajo la técnica *hardware in the loop*. En este trabajo se invita a utilizar la metodología en el estudio de dispositivos electrónicos inteligentes de diferentes referencias para la caracterización de respuestas en tiempo real; determina que el retraso presentado no afecta la función de protección evaluada y que los algoritmos de compensación de pérdida de paquetes son exitosos, sin embargo, no se concluye con criterios mínimos de retraso o pérdida de paquetes para que la funcionalidad de las comunicaciones sea óptima.

Un trabajo que tiende más a la determinación de criterios técnicos mínimos en las redes de comunicaciones en protección y automatización de sistemas eléctricos de potencia es el presentado en [10]. Allí se tratan criterios de diseño de redes de comunicaciones; se introducen cálculos de desempeño de la red; se compara el número de paquetes enviados, recibidos, perdidos, latencia, tiempos de recuperación, sin embargo, nuevamente se concluye desde un punto de vista topológico. Sobre este trabajo en especial se identifica la oportunidad de tomar su metodología, cálculos y comparativas, en conjunto con lo

identificado en [8], y presentar conclusiones más actualizadas de acuerdo con las tecnologías más recientes, ya que se trata de un trabajo con una antigüedad mayor a 10 años.

Para el desarrollo de esta propuesta se toma como base trabajos que ya han abordado las redes de comunicaciones del bus de proceso para datos muestreados, como el que se presenta en [7]. Aquí se evaluó el flujo de datos desde los dispositivos de recopilación de datos hacia los switches en diferentes escenarios con el uso de uno o varios switches, el espaciado uniforme entre tramas de datos, y el uso de hasta 23 equipos enviando datos en un intento de saturar la red y la evaluación de pérdida de datos. En este trabajo se concluye que la red empleada (1 Gbps) es de alta confiabilidad, sin embargo, no se concluye de manera específica respecto a límites técnicos porque el bus de proceso de 1 Gbps no llega a la saturación en las condiciones propuestas. Con base en la información que contiene este trabajo, se ve la oportunidad de emplear herramientas como un emulador que permita inyectar a la red no solo el tráfico de valores muestreados sino también el tráfico equivalente a las recomendaciones que hacen las guías de aplicación como [11] para otros protocolos, y así, conseguir la saturación del ancho de banda que lleve a valores críticos de latencia y a la pérdida de paquetes de datos, y por medio de esto evaluar la escalabilidad de bus de proceso de 100 Mbps.

Debido a su experiencia en el campo de las subestaciones digitales, y la importancia que tiene para el desarrollo del trabajo que se propone, es preciso hablar del Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales [12], donde por más de 10 años se ha realizado, entre otras labores, la validación y certificación de infraestructura y equipos de los sistemas de automatización que se implementan en las subestaciones eléctricas, con el fin de dar solución a los inconvenientes que puedan presentarse en los procesos de implementación de estándares como el IEC 61850, siendo un referente técnico en la transformación digital del sector eléctrico colombiano y a nivel mundial.

1.2 Planteamiento del problema

El sector eléctrico en general está enfocado en el diseño y construcción de nuevas subestaciones bajo el concepto de subestaciones digitales, las cuales tienen sistemas de comunicaciones de mejores prestaciones, con interoperabilidad entre equipos de diferentes fabricantes, protocolos de comunicación más eficientes y bajo uso de cableado en cobre, incorporando en su lugar la transmisión de datos digitales por medio de fibra óptica.

Además del foco en la construcción de nuevas subestaciones como subestaciones digitales, se tiene una amplia disposición para la digitalización de subestaciones eléctricas existentes debido a los múltiples beneficios que trae en comparación con las tecnologías mencionadas anteriormente, todo esto con el fin de contar con sistemas de medida, supervisión, control y protección de mayor confiabilidad. Sin embargo, se evidencia que aspectos como los criterios mínimos para un desempeño óptimo en las comunicaciones de subestaciones automatizadas bajo el estándar IEC 61850 no se han estudiado en una amplia proporción, limitando el diseño e implementación de sistemas de comunicaciones a recomendaciones muy conservadoras que hace la guía de aplicación basada en ejemplos típicos [11], sin tener en cuenta criterios de diagnóstico y pruebas específicas relacionadas a la cantidad de equipos que puedan ser instalados en ampliaciones, o los que estén presentes en las subestaciones.

1.3 Justificación

En los sistemas de comunicaciones existen variables que determinan la calidad de la transmisión de datos, como son la pérdida de paquetes de datos, los tiempos de envío y recepción de paquetes, también algunas características propias de los canales como el ancho de banda. La medición y análisis de estas variables se vuelve una herramienta muy importante a la hora de establecer criterios que sirvan como soporte en la especificación técnica de los elementos, equipos y sistemas que intervienen en las adecuaciones que se realizan a subestaciones digitales; ampliación de sistemas existentes, la migración a tecnologías más modernas o instalación de nuevos sistemas desde cero.

Para la ampliación de sistemas de comunicaciones existentes, es importante establecer, de manera precisa, cuán escalable es el sistema y cuán escalable será una vez realizadas

las modificaciones. Esto con el fin de determinar si es necesario un cambio de equipos en alguna etapa del crecimiento de las subestaciones eléctricas o si la infraestructura de comunicaciones existente es adecuada para recibir los cambios proyectados.

Para la instalación de nuevos sistemas, establecer límites mínimos y rangos operativos que garantice un correcto desempeño de las redes de comunicaciones permite, entre otras cosas, un adecuado dimensionamiento de los sistemas que garanticen la correcta operación y que use de manera eficiente los recursos y las prestaciones de equipos de acuerdo a las necesidades del sistema, trayendo así beneficios que pueden impactar positivamente, tanto en lo técnico como en lo económico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Determinar criterios mínimos para la implementación y ampliación del bus de proceso en subestaciones eléctricas digitales por medio de la aplicación de un indicador de escalabilidad en escenarios de pruebas emulados que permitan el análisis bajo estrés de las redes de comunicaciones.

1.4.2 Objetivos específicos

- Establecer escenarios de pruebas que permitan analizar bajo estrés las redes de comunicaciones del bus de proceso, mediante emulación, con el fin de evaluar su desempeño en condiciones que no se han considerado en trabajos anteriores.
- Aplicar un indicador de escalabilidad en el diagnóstico de redes de comunicaciones, en el contexto de automatización de subestaciones eléctricas digitales confirme al estándar IEC 61850.
- Determinar criterios de diseño mínimos que garanticen el adecuado diagnóstico y desempeño de las redes de comunicaciones del bus de proceso en subestaciones eléctricas nuevas o modificadas.

2. Definiciones

En este capítulo se explican los conceptos clave en el entendimiento de las comunicaciones en subestaciones digitales, a modo de marco teórico, en tres bloques; un primer bloque (2.1) donde se explican, por medio de definiciones concisas, los principales aspectos de las comunicaciones en subestaciones digitales y la importancia de las *Merging Units* a través de los niveles de una arquitectura típica de control y supervisión; un segundo bloque (2.2, 2.3) donde se introduce el proceso de digitalización de las variables analógicas que sucede en las *Merging Units* y se exponen las ventajas que tiene el uso de un bus de proceso digital. Un bloque donde se definen los conceptos de ancho de banda (2.4), latencia (0), *jitter* (2.6) y pérdida de paquetes de datos (2.7) por medio de una analogía que permite entender y diferenciar sus efectos en la escalabilidad de un sistema (2.8). Finalmente, un bloque donde se detallan los conceptos de sincronización de tiempo (2.9) y redundancia (2.10) como justificación de las características específicas aplicadas a las pruebas en cuando a estos dos aspectos.

2.1 Comunicaciones en subestaciones digitales

En la **Figura 2-1** se presenta una arquitectura de comunicaciones general típica de las subestaciones digitales con el fin de dar a entender, de forma simplificada, los componentes esenciales más comunes de los sistemas de automatización y comunicaciones en estas subestaciones. Junto a las definiciones de los componentes del sistema de comunicaciones se explican algunos conceptos que están estrechamente relacionados:

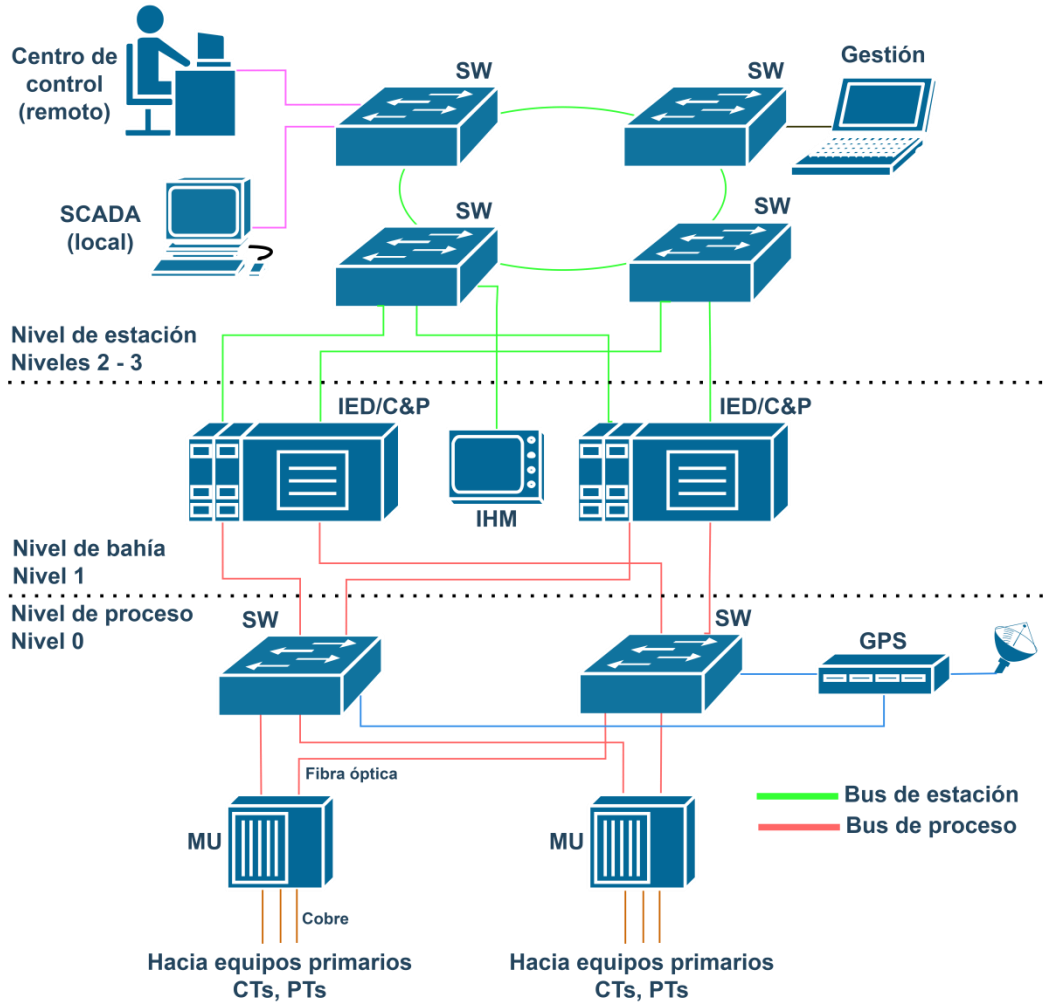


Figura 2-1. Arquitectura general de comunicaciones en subestaciones digitales

Subestación: Según [13] “es la exteriorización de un nodo de un sistema eléctrico que incluye principalmente la llegada de líneas de transmisión o distribución, patios de conexiones y edificaciones; puede contener también equipos tales como transformadores y equipos de compensación reactiva. Generalmente incluye las instalaciones necesarias para la seguridad y el control del sistema eléctrico”. En la subestación se recibe el flujo de energía eléctrica proveniente de las centrales de generación, u otras subestaciones, y se transforma para transportar dicha energía largas distancias o llevarla sistemas eléctricos más pequeños y distribuidos (como los residenciales).

Subestación digital: “Digital” es un adjetivo que se le da a las subestaciones que aprovechan las tecnologías de digitalización de las variables de los equipos de patio gracias al uso de *Merging Units*, fibra óptica, estándares de interoperabilidad, y protocolos de comunicación abiertos y normalizados como es el caso de los propuestos en el estándar IEC 61850.

IEC 61850: Es una norma propuesta por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC por sus siglas en inglés) que establece un conjunto de reglas para el intercambio de información en subestaciones eléctricas, proporcionando un marco común para la comunicación entre los dispositivos de la subestación y los sistemas de automatización y control. Este marco común evita el uso de protocolos propietarios y permite que dispositivos de diferentes fabricantes puedan comunicarse sin inconvenientes bajo el concepto de interoperabilidad; así, en la **Figura 2-1**, cada dispositivo (MU, SW, IED, IHM) puede pertenecer a diferentes marcas y la comunicación podrá ser exitosa siempre que estén configurados bajo el mismo estándar. En [14] se hace énfasis en que el estándar IEC 61850 no es un protocolo, y no debe ser visto o mencionarse como uno, ya que verlo como tal sería desaprovechar las múltiples ventajas que ofrece un entendimiento amplio de este marco común más allá de los protocolos que tiene asociados.

Sistema de comunicaciones: Es el conjunto de programas, equipos, elementos, protocolos y dispositivos que operan de acuerdo a condiciones preestablecidas para la comunicación y permiten el intercambio de información entre emisores y receptores ubicados en diferentes lugares. En el alcance de este trabajo, el sistema de comunicaciones de la subestación digital está conformado por las tarjetas de comunicación de cada equipo, los switches, y los enlaces pasivos entre equipos.

Sistema de control: Es el conjunto de programas, lógicas y dispositivos que se emplean para realizar la medición, registro, señalización, aplicación de consignas operativas y ejecución de comandos, ya sea de forma manual, automática, local o remota, en los equipos de la subestación. En la **Figura 2-1** se presentan como parte del sistema de control los dispositivos electrónicos inteligentes o dispositivos de control y protección (IED/C&P) que suelen ser actuadores en el control de subestaciones, las interfaces humano-máquina (IHM), el sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) y el centro de control, desde los cuales se pueden configurar variables operativas (aumentar, disminuir,

fijar) y enviar comandos (abrir/cerrar, habilitar/deshabilitar), entre otras funciones. La adquisición de datos que se da en el bus de proceso alimenta la operación de lógicas de control preconfiguradas y la visualización de las variables del sistema eléctrico en las diferentes pantallas (panel de los IED, IHM, SCADA, centro de control) y así se tomen las decisiones para modificar consignas y enviar comandos.

Sistema de protección: Es el conjunto de dispositivos que opera siguiendo condiciones preestablecidas para garantizar la integridad de las personas, circuitos, equipos y sistemas de la subestación (o disminuir el impacto de los eventos que se presenten), realizando, en la mayoría de casos, la interrupción del flujo eléctrico para evitar la exposición a condiciones que puedan causar daños importantes, basado en la información adquirida por las *Merging Units*. En la **Figura 2-1** se presentan como parte del sistema de control los dispositivos electrónicos inteligentes o dispositivos de control y protección (IED/C&P) que suelen ser actuadores en los esquemas de protección de las subestaciones. La adquisición de datos que se da en el bus de proceso permite que en los IED/C&P se ejecuten lógicas automáticas cuando las variables del sistema exceden los límites operativos.

Nivel 0 – Nivel de proceso: El concepto de Nivel 0 está más asociado al control clásico, mientras que el término Nivel de proceso es empleado con mayor frecuencia al referirse a las subestaciones digitales; ambos pueden asociarse y definirse, esencialmente, como los equipos de patio, entre los cuales se incluyen los interruptores, seccionadores, transformadores, bancos de capacitores, equipos de servicios auxiliares y equipos de instrumentación y medida, entre otros. En la **Figura 2-1** se muestran como ejemplo de elementos del Nivel de proceso las *Merging Units* y su conexión en cobre hacia los transformadores de corriente (CT) y los transformadores de tensión (PT). No debe confundirse el Nivel de proceso con el Bus de proceso.

Campo de conexión (bahía, módulo, celda): Es el conjunto de equipos de una subestación para la maniobra, protección y medida de un circuito que se conecte a ella. Dependiendo del tipo de subestación puede ser un grupo de equipos de patio, o una sección del barraje eléctrico contenida en un gabinete y se asocia a cada elemento del sistema, como líneas, transformadores, bancos de compensación, generadores, arreglos

fotovoltaicos, cargas, cuartos de potencia y centros de control de motores, entre otros. Generalmente cada campo de conexión cuenta con una o dos *Merging Units*, un medidor de energía y uno o dos IED asociados al control y protección.

CT: Son las siglas utilizadas por las palabras en inglés "*Current Transformer"*. Los transformadores de corriente son instrumentos de medida que, usualmente, aprovechando relaciones electromagnéticas convierten los valores de alta corriente (en ocasiones kiloamperios) que presentan los sistemas eléctricos, en valores seguros para el personal operativo y los sistemas electrónicos (pocos Amperios y miliamperios).

PT: Son las siglas utilizadas por las palabras en inglés "*Potential Transformer"*, también llamados "VT" por "*Voltage Transformer"* o "TT" por Transformador de Tensión. Los transformadores de tensión son instrumentos de protección y medida que, usualmente, aprovechando relaciones electromagnéticas convierten los valores de alta tensión (kilovoltios) que se presentan en los sistemas eléctricos, en valores seguros para el personal operativo y los sistemas electrónicos (pocos Voltios y milivoltios).

Bus de proceso: Es la conexión y comunicación entre equipos de campo y los equipos de control y protección. Este es el enlace entre el Nivel de proceso (Nivel 0) y el Nivel de bahía (Nivel 1). En subestaciones digitales se normaliza el bus de proceso por medio del estándar IEC 61850, considerando una red redundante que concentra y direcciona las señales del nivel de proceso, evitando los robustos tendidos de cable de cobre que confirman los sistemas de control convencionales. En la **Figura 2-1** se ilustra el bus de proceso con un par de switches (SW) y sus conexiones directas a los equipos. Así recogen la información de las *Merging Units* y la envían únicamente a los IED que están asociados (suscritos) a cada una.

MU: Son las siglas en ingles de *Merging Unit*, o unidad de fusión, es el equipo encargado de producir los valores muestreados, o *Sampled Values* (SV) bajo el estándar IEC 61850, a partir de la combinación coherente de los valores analógicos de voltaje y corriente que proporcionan los CTs y PTs. Se define en [13] como la "interfaz que recibe múltiples señales digitales y análogas y genera múltiples salidas digitales para la comunicación de datos sincronizados en el tiempo vía interfaces lógicas, con el uso de conexiones punto a punto". En la **Figura 2-1** se pueden apreciar las MU como la base de los sistemas de

control, protección, automatización y comunicaciones de las subestaciones digitales, ya que es a partir de ella que los demás dispositivos pueden cumplir con sus funciones específicas. En numeral 2.2 de presente trabajo se presenta una explicación del proceso de conversión analógico-digital que se lleva a cabo en las MU.

Comunicación tipo publicador/suscriptor: Es un modelo de comunicación que permite la transmisión de datos de forma asincrónica entre varias fuentes y destinos sin necesidad de emparejarlas una a una. En este modelo el publicador es el elemento que "anuncia" los mensajes, formando y enviando los paquetes de información por un medio específico, y el suscritor es el elemento que recibe los paquetes enviados por el publicador como información de entrada para sus lógicas y procesos. Este es un modelo que permite la escalabilidad del sistema ya que no requiere conexiones uno a uno, sino que varios elementos, como los IED, pueden estar suscritos a la información de una, varias o ninguna MU, estando en la misma red sin cambios en el cableado al cambiar la suscripción de forma digital. En la **Figura 2-1** son los switches del bus de proceso los que se gestionan las comunicaciones entre las MU y los IED, pues tienen configurada internamente la relación tipo publicador/suscriptor, de forma que no necesariamente la MU1 tenga que estar asociada al IED1, sino que, por ejemplo, ambos IED puedan recibir la información de ambas MU sin estar conectados directamente.

Switch: Es un dispositivo de comunicación activo que funciona como enlace entre otros dispositivos de una red de área local, direccionando o restringiendo el flujo de datos según las reglas que tenga configuradas de forma interna. En la **Figura 2-1** se pueden observar que los dos switches están conectados a ambos IED y ambas MU, formando así dos redes idénticas redundantes, que refuerzan la confiabilidad del sistema en contingencias, como se explica en el numeral 3.

Red de área local: Típicamente denominadas LAN por las siglas del inglés *Local Area Network*, las redes de área local son un conjunto de dispositivos interconectados dentro de un área limitada; como en el caso de las subestaciones eléctricas puede ser casetas de control, cuartos eléctricos, o las mismas subestaciones contenerizadas. Estas redes permiten tener fácil acceso e intercambio de datos entre dispositivos cercanos y afines

dentro de un mismo proceso sin complejas reglas de acceso o escalamiento que agreguen tiempos de retraso; son muy útiles en el caso de las subestaciones eléctricas, donde se tienen procesos críticos de control y protección que requieren información tiempo real. El ejemplo de una LAN redundante se muestra en la **Figura 2-1** asociada al bus de proceso, conformada por los equipos del Nivel 0 y Nivel 1.

Redes LAN Virtuales - VLAN: Son un seccionamiento lógico que tiene lugar en los elementos de red como switches, aprovechando la infraestructura de las redes LAN físicas y aportando múltiples ventajas a la administración de redes. Con las VLAN se puede separar el tráfico de datos por fuente/destino, por ubicación, por protocolo de comunicación y establecer control de acceso. Son diferentes los criterios que se pueden emplear para establecer VLAN en las subestaciones digitales; algunos son: VLAN por bahía o grupos de bahías, VLAN exclusiva para *Sampled* Values, VLAN exclusiva para configuración de equipos, VLAN de nivel operativo/administrativo.

Nivel 1 - Nivel de bahía: El concepto de Nivel 1 está más asociado al control clásico, mientras que el término Nivel de bahía es empleado con mayor frecuencia al referirse a las subestaciones digitales; ambos pueden asociarse y definirse, esencialmente, como todos los sistemas y equipos de control que permiten operar una bahía de forma local, como relés de control y protección, dispositivos electrónicos inteligentes, diagramas mímicos (con botones, perillas e indicadores en tablero) y en este se concentran los registros de eventos, las alarmas, estados y comandos que se generan y requieren los equipos de la bahía. En la **Figura 2-1** está representado por los IED/C&P y la IHM.

Bus de estación: Es la conexión entre el Nivel 1 o Nivel de bahía y el nivel de control superior, Nivel 2, Nivel 3 o Nivel de estación. Este bus permite llevar información seleccionada, más general y con menor tasa de actualización, desde los niveles operativos hacia niveles más enfocados en la supervisión del sistema. En la **Figura 2-1** está representado por los switches que se encuentran en conexión anillada entre los IED y los sistemas SCADA, Gestión y centro de control.

IED: Son las siglas del inglés *Intelligent Electronic Device*, o Dispositivo Electrónico Inteligente, que es un elemento activo con un microprocesador que permite gestionar señales de entrada y salida, de manera autónoma, en forma de medidas, comandos,

estados, alarmas, automatismos, y lógicas programadas. Como se ha dicho anteriormente, los IED en las subestaciones digitales son alimentados con información enviada desde las MU.

IHM: Interfaz Humano Máquina, o HMI por las siglas en ingles de *Human Machine Interface*. Es una interfaz física que permite la interacción visual de un operador con los estados de un sistema de control, también permite la ejecución de comandos de control, la visualización de alarmas y fallas del sistema desde un nivel de control superior sin necesidad de operar los accionamientos propios del equipo en patio o celda. Estas suelen ser pantallas táctiles, paneles con botones, o estar inmersas en la estructura física de los IED. Al igual que los IED, las IHM reciben información enviada desde las MU y procesada por equipos intermedios.

Nivel 2 - Estación: Es el sistema de control centralizado de la subestación, en este se encuentran los sistemas de visualización para monitoreo, supervisión, almacenamiento de datos y control, también presenta las interfaces de comunicación con los niveles de bahía y con sistemas de control remoto en centros fuera de la subestación. El grado de control que tiene este nivel puede variar según la complejidad del sistema eléctrico o los estándares de la organización que opera la subestación.

SCADA: Son las siglas del inglés *Supervisory Control and Data Acquisition System*, que es un sistema de control típico de sistemas eléctricas que, mediante hardware y software especializado, trabaja sobre redes de comunicación para la supervisión centralizada y adquisición de datos de la subestación o conjunto de subestaciones, según la aplicación, ya que en algunos casos suele tratarse de sistemas donde los niveles de control local (Nivel 1 y Nivel 2) se encuentran distribuidos geográficamente. En subestaciones eléctricas donde no hay dispersión geográfica se trata de un sistema que puede ser visualizado desde un ordenador de escritorio y cuenta con el resumen o compilado de despliegues similares a los que presentan las IHM o IED de cada bahía, por lo tanto, también el sistema SCADA es alimentado por la información procesada y enviada desde las MU.

Monitoreo: Consiste en realizar la adquisición de variables de la subestación para las funciones de supervisión o control, por medio de dispositivos independientes como los IED o funciones programadas en sistemas de mayor complejidad como los SCADA.

Gestión: Consiste en acceder a la configuración de dispositivo, desde un nivel superior, a través de las redes de comunicaciones y bajo las reglas de acceso adecuadas, con el fin de modificar parámetros y lógicas, entre otras funciones, sin tener que intervenir el dispositivo directamente, sino a través de la red de comunicaciones.

Supervisión: Consiste en vigilar las indicaciones de estado de la subestación y equipos asociados de forma general con funciones de control reducidas o nulas.

Nivel 3: Son los centros de control remotos centralizados donde se planea el despacho energético, se programan y coordinan maniobras, se gestiona la operación integrada de los nodos de un sistema eléctrico, y en caso de requerirse se efectúa control únicamente sobre los elementos principales de las subestaciones. Incluso las labores ejecutadas en este nivel de control requieren el correcto intercambio de información desde las MU a través de toda la red de comunicaciones que se muestra en la **Figura 2-1**.

Emulación: Es el proceso llevado a cabo mediante software que permite desarrollar o ejecutar un programa en un ambiente diferente al cual la contiene originalmente y que, a diferencia de la simulación, que trata de reproducir las condiciones y comportamientos de un sistema de forma aproximada, busca modelarlas de forma precisa. Para los propósitos de este trabajo, la emulación se consigue por medio del equipo ISA DRST 66 y el software AT61 SV Publisher, que replican la trama de los SV tal y como la emitiría una MU real, en contraste con la simulación, que se da en el caso de la ocupación del ancho de banda equivalente de 40 Mbps, que se crea a partir de SV cuando en la realidad está destinado a otros protocolos de comunicación. Ver **Figura 3-3**.

2.2 Datos muestreados en el bus de proceso

Los valores muestreados o *Sampled Values* (SV) son un protocolo de comunicación adoptado por el estándar IEC 61850 que consiste en la información producto de la transducción cíclica y rápida de variables eléctricas secundarias de corriente y tensión de

los dispositivos de instrumentación de las subestaciones (señales analógicas) en tramas de mensajes digitales (señales binarias) que pueden ser transmitidos por el bus de proceso mediante cableado de fibra óptica desde las *Merging Units* (MU) hacia los dispositivos inteligentes o equipos activos de comunicación, incluso con varios destinatarios simultáneamente en una forma de comunicación publicador-suscriptor llamada *multicast* o multidifusión.

La multidifusión es un protocolo de comunicaciones informáticas que permite configurar destinatarios determinados para paquetes de datos específicos (bajo el modelo de comunicación tipo publicador/suscriptor descrito en el numeral 2.1), así, cada paquete de datos único puede ser entregado simultáneamente en varios destinos, sin necesidad de ocupar ancho de banda con volúmenes de datos innecesarios al compartirlos con toda la red (*broadcast*), ni las limitaciones de la configuración punto a punto (*unicast)* que implica el envío de datos por separado a cada destino.

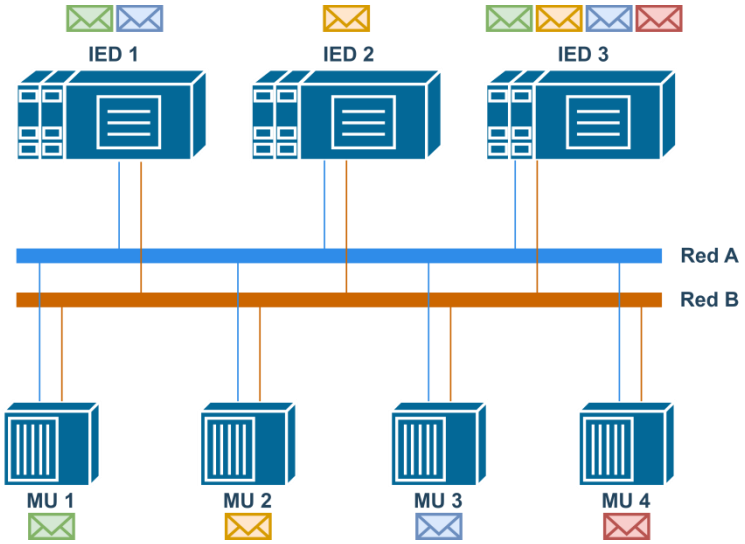


Figura 2-2. Multidifusión en el bus de proceso

En la **Figura 2-2** se puede ver cómo las MU envían cada una un dato a la red de comunicaciones y esta puede ser enviada a varios IED, como en el caso de la información de la MU 2 (naranja) que es enviado a los IED 2 y 3. Así, según las necesidades de cada dispositivo, estarán configurados para recibir la información específica de cada MU, en el

caso del IED 2, solo la información de la MU 2 y en el caso del IED 3, la información de las cuatro MU del ejemplo.

Una de las ventajas de contar con un bus de proceso digital es que las conexiones a la red son pocas; con conexiones físicas únicas a los switches pueden comunicar a todos los equipos que se encuentren en la red. Al tener una red de comunicaciones digitales se pueden cambiar los destinos de la información sin necesidad de conectar, desconectar, tender o retirar cables como sería el caso en un bus de proceso convencional (cableado en cobre).

2.2.1 Digitalización de señales

La necesidad de llevar las señales al dominio digital parte de la flexibilidad y simplicidad del tratamiento de datos digitales en software y dispositivos electrónicos, ya que su funcionamiento se basa en lógicas digitales, además de la fidelidad en la reproducción de datos que se logra al hacer copias digitales y la practicidad del almacenamiento y registro histórico de datos digitales.

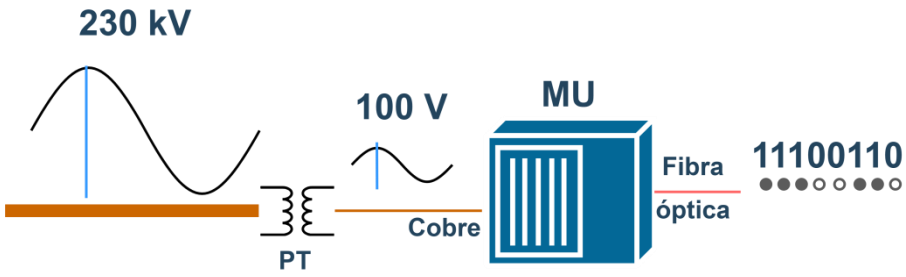


Figura 2-3. Conversión analógica-digital en las MU

Las tramas o *streams* de SV tienen como fin la reconstrucción de la onda eléctrica en el IED para monitorear que las variables eléctricas se encuentren dentro de valores adecuados y actuar según las lógicas preprogramadas cuando estas se encuentren por fuera de los valores de referencia.

La conversión analógica-digital se explica por medio de tres pasos que tienen como fin un mejor entendimiento del proceso, pero en la práctica no se identifican las etapas en la

operación de un dispositivo electrónico, ya que es un proceso interno y muy veloz comparado con los tiempos de percepción humana.

Muestreo: Es la etapa en la que se convierte el dominio continuo al dominio discreto, tomando muestras “separadas” por un intervalo igual entre una muestra y la anterior con el fin de conseguir una representación digital uniforme que sea fiel al fenómeno analógico.

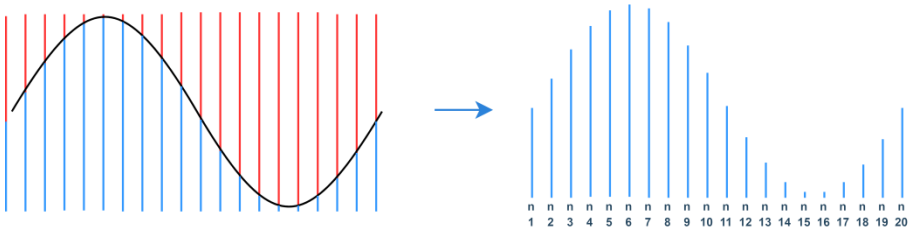


Figura 2-4. Conversión A/D - Paso 1: Muestreo

En el caso de los SV, en sistemas eléctricos de 60 Hz (60 ciclos por segundo), se toman 80 muestras por ciclo, es decir una muestra cada 208,3 µs y un total de 4800 muestras cada segundo [11].

Cuantificación: Es la etapa en la que se convierte el rango de continuo a discreto, y se hacen corresponder las muestras tomadas con un nivel en un rango discreto uniforme (números enteros separados de forma equitativa) que facilita el procesamiento y almacenamiento.

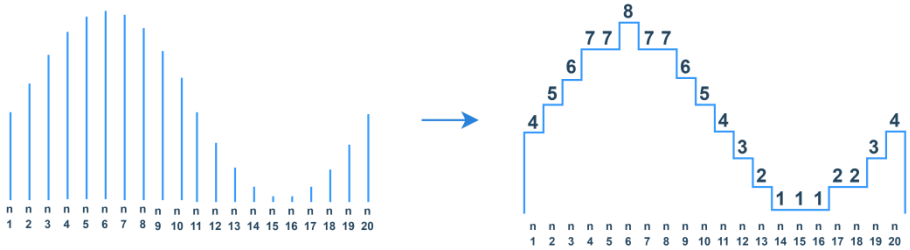


Figura 2-5. Conversión A/D - Paso 2: Cuantificación

En la práctica es más común hablar de bits, no de niveles de cuantificación, y estos están asociados a la capacidad de procesamiento de los dispositivos. La cantidad de niveles de cuantificación determinará la precisión con la que podrá representarse el fenómeno, ya que las aproximaciones que se hacen al ajustar el valor de una muestra a un nivel de cuantificación producen pérdidas irreversibles de información.

Codificación: Es la etapa en la que se asignan valores binarios a las muestras que ya se encuentran digitalizadas (discretas tanto en su dominio como en su rango) y estos se envían como una trama de datos organizada donde el número de muestra podrá asociarse a la posición dentro de la trama.

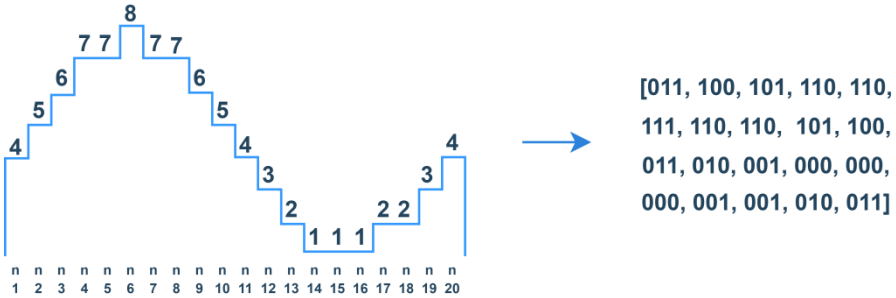


Figura 2-6. Conversión A/D - Parte 3: Codificación

En la práctica, la trama de SV tiene un bloque asociado al número de muestra (smpCnt). Es un valor entre 0 y 4799 que se reinicia exactamente cada segundo. Para el ejemplo ilustrado en la **Figura 2-6**, se podría tomar la **Tabla 2-1** como esquema de codificación para asociarlo a una subestación de 230 kV, así:

Tabla 2-1. Conversión A/D - Ejemplo de codificación

N	V secundarios	kV primarios	Codificación
1	- 100	- 230	000
2	- 71	- 164	001
3	- 42	- 98	010
4	- 14	- 32	011
5	14	32	100
6	42	98	101
7	71	164	110
8	100	230	111

En este caso, al representar el fenómeno con 8 niveles la precisión no es muy buena, pues entre niveles de medida primario hay hasta 66 kV; sin embargo, las MU comerciales cuentan con procesadores de altas prestaciones que logran precisión de varias cifras decimales. Con el ejemplo anterior se busca una representación sencilla del proceso que ocurre en las MU, sin embargo, la trama de datos que publican estos dispositivos es más compleja y precisa.

2.2.2 Trama de datos de *Sampled Values*

Para medir la cantidad de información que se inyecta a la red en la publicación de SV se debe considerar el concepto del bit; la unidad mínima de información binaria. El término "binario" se emplea porque el bit únicamente puede tener un valor de 0, o de 1; nunca un valor mayor, menor o intermedio y nunca ambos al mismo tiempo. La información binaria puede ser codificada en diferentes sistemas de información, como lo son el sistema decimal y el hexadecimal.

La relación entre el sistema binario y el decimal se puede entender a través de la **Ecuación 2-1**:

$$D = d_n.2^n + d_{n-1}.2^{n-1} + \ \dots + d_1.2^1 + d_0.2^0$$

Ecuación 2-1. Equivalencia decimal - binaria

Donde d_i representa el dígito (0 o 1) en la posición i del número digital, y n es la cantidad de bits que tiene el número binario, menos 1.

Algunos ejemplos de esta operación aritmética para componer números decimales a partir de binarios se muestran en la **Tabla 2-2**:

Tabla 2-2. Equivalencia decimal – binaria 3 bits

Decimal	(2^2)	(2^1)	(2^0)	Composición
0	0	0	0	0x(4) + 0x(2) + 0x(1) = 0
1	0	0	1	0x(4) + 0x(2) + 1x(1) = 1
2	0	1	0	0x(4) + 1x(2) + 0x(1) = 2
3	0	1	1	0x(4) + 1x(2) + 1x(1) = 3
4	1	0	0	1x(4) + 0x(2) + 0x(1) = 4
5	1	0	1	1x(4) + 0x(2) + 1x(1) = 5
6	1	1	0	1x(4) + 1x(2) + 0x(1) = 6
7	1	1	1	1x(4) + 1x(2) + 1x(1) = 7

Por otro lado, el sistema hexadecimal contempla únicamente 16 valores a partir de 4 bits:

Tabla 2-3. Equivalencia hexadecimal – binaria 4 bits

Decimal	(2^3)	(2^2)	(2^1)	(2^0)
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
A	1	0	1	0
B	1	0	1	1
C	1	1	0	0
D	1	1	0	1
E	1	1	1	0
F	1	1	1	1

Según las reglas de cada codificación o equivalencia, se obtendrán valores diferentes; así el número ***10101110*** en decimal será el **174**, mientras en hexadecimal es **AE**. Un bloque de información como el número ***10101110***, compuesto por 8 bits, es llamado *byte*, y es una unidad de información que se utiliza con frecuencia que al hablar del tamaño de paquetes de datos.

Para garantizar la completa estandarización de las comunicaciones en el bus de proceso, la trama de SV requiere integrar varios bloques de información que ocupan una cantidad de bytes definida, entre los cuales está el preámbulo de SV, un byte que marca el inicio de la secuencia de datos, las direcciones MAC (*Media Access Control*) con las que se identifican de manera única los equipos de origen y destino, algunos elementos propios del protocolo y la configuración de la red y entre otros bloques de información, los bloques APDU (*Application - Protocol Data Unit*) y ASDU (*Application - Service Data Unit*) que contienen la información asociada a la muestra específica de SV en la estructura que se describe en [15] y se muestra en la **Tabla 2-4** y la
Tabla 2-5:

Tabla 2-4. Trama de datos de *Sampled Values*

Preámbulo (7 *bytes*)	
Inicio de trama (1 *byte*)	
Encabezado MAC	Dirección de destino (6 *bytes*)
	Dirección de origen (6 *bytes*)
Marca de prioridad	TPID CLI y VLAN ID (4 *bytes*) Identificación de protocolo y red
Tipo	Ethernet – tipo – longitud (2 *bytes*) Definición del protocolo SV
Unidad de datos de protocolo tipo Ethernet	APPID (2 *bytes*) Identificación de aplicación
	Longitud (2 *bytes*)
	Espacio reservado 1 (2 *bytes)*
	Espacio reservado 2 (2 *bytes)*
	APDU Unidad de datos de protocolo
FCS (4 *bytes*) Secuencia de verificación de trama	

Tabla 2-5. Estructura de bloque APDU *Sampled Values*

savPdu (APDU)	noASDU		
	Seguridad		
	Secuencia de ASDU		
	ASDU 1	SvID	
		datset	
		smpCnt	
		confRev	
		refrTm	
		smpSynch	
		Secuencia de datos	Ia
			Ib
			Ic
			In
			Ua
			Ub
			Uc
			Un
		smpMod	
	ASDU 2		
	ASDU 3		
	ASDU 4		

El bloque APDU que se resalta contiene toda la información de los valores muestreados en una estructura ordenada por bloques ASDU, que son las unidades de datos que encapsulan los valores de corriente (I) y tensión (U) de fases (a, b, c) y neutro (n).

2.2.3 Flujo de datos de *Sampled Values*

La trama de datos de SV (también llamada *stream*) recorre las redes Ethernet bajo la capa 2 (enlace de datos) del modelo OSI de manera cíclica y rápida por multidifusión. Es decir, que únicamente hay flujo de datos en redes de área local (LAN), como lo es el bus de proceso.

El modelo OSI (*Open Systems Interconection* – Interconexión de Sistemas Abiertos) es un esquema que separa las funcionalidades de las redes de comunicaciones en una estructura de 7 capas, que no se utilizan en su totalidad en la transmisión de SV, como se muestra en la **Tabla 2-6**:

Tabla 2-6. El modelo OSI y los *sampled values*

Capa	Funciones	Relación con SV	
1 Física	Conexiones físicas Transmisión nodo a nodo	✓	Enlaces de fibra óptica Sincronización de tiempo por hardware dedicado
2 Enlace de datos	Composición de tramas Control de Acceso al Medio (MAC)	✓	Identificación única de tarjeta de red Tráfico interno en una red LAN
3 Red	Enrutamiento y conmutación de paquetes de datos	✗	Esta capa aplica conexión de varias LAN-WAN
4 Transporte	Segmentación y reconstrucción de tramas de datos	✗	Esta capa aplica conexión de varias LAN-WAN
5 Sesión	Control de inicio, soporte y fin de conexiones	✗	SV emplea multidifusión con conexión en todo momento
6 Presentación	Codificación, compresión y cifrado de datos	✗	Los SV no cuentan con presentación Cuando son procesados por los dispositivos de destino
7 Aplicación	Interacción directa con el usuario	✗	Los SV no interactúan directamente con el usuario

Aplicaciones de nivel superior como despacho, monitoreo, despliegues gráficos y registro histórico, entre otras, tienen su base en los datos muestreados del bus de proceso, pero los adquieren a través de procesamiento a protocolos más optimizados para el tráfico y representación en niveles superiores; no reciben los SV en “crudo”.

En el caso de las tramas de SV no existen paquetes de datos de reconocimiento o confirmación para entablar la comunicación como en otros protocolos (ver en la **Figura 2-7** la comparación con comunicación cliente/servidor); funciona enviando de forma cíclica y rápida, una tras otra, las tramas de datos. No se toma ninguna acción cuando un paquete de datos de SV se daña o se pierde, simplemente se recibe el siguiente paquete.

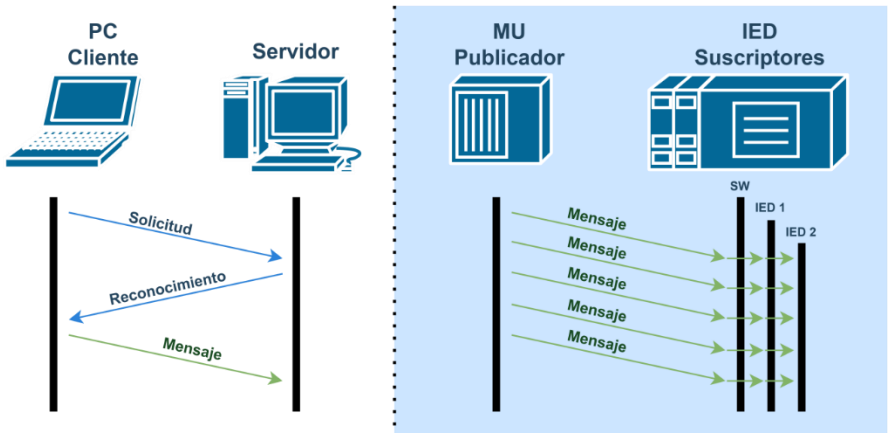


Figura 2-7. Comunicación cliente/servidor vs. publicador/suscriptor

El estándar indica que para sistemas de protección y medida se deben tomar 80 muestras por ciclo; esto en un sistema eléctrico de 60 Hz corresponde a 4800 muestras por segundo [16] con un periodo de 208,3 µs. Con una longitud máxima de 160 *bytes* (1280 bits) definida por el estándar, y 4800 muestras por segundo, el flujo de datos de SV por publicador es de máximo 6,14 Mbps, una ocupación cercana al 6% en redes de 100 Mbps [11].

La guía de aplicación [11] recomienda dedicar un ancho de banda equivalente al 60% para sampled values en el bus de proceso, dejando un 40% para el tráfico de mensajería asociada a eventos (GOOSE) y gestión de equipos (MMS). En dicha guía se sugiere respetar un límite de máximo 6 suscripciones a SV en bus de proceso de 100 Mbps.

La sobrecarga del bus de proceso (alta ocupación del ancho de banda) tiene como consecuencias el retraso y la pérdida de paquetes de datos, factores que afectan el desempeño de las redes de comunicaciones comprometiendo el éxito de la transmisión y la confiabilidad de los sistemas. Por lo anterior, se deben aplicar estrategias que permitan tener las suscripciones a SV necesarias para una óptima operación de la subestación sin exceder los límites de los componentes de red.

2.3 Comunicaciones digitales en el bus de proceso

Existen múltiples beneficios que motivan la concepción del bus de proceso digital en subestaciones eléctricas y la migración de subestaciones convencionales hacia el bus de proceso digital. La mayoría de estos beneficios son tratados en [14], donde se evidencia

la estrecha relación que tienen entre sí y se explicarán a partir de la **Figura 2-8**, donde se muestra la medida de las señales de tensión (Va, Vb, Vc) y corriente (Ia, Ib, Ic) desde dos conjuntos de transformadores de instrumentación y su camino hasta dos IED:

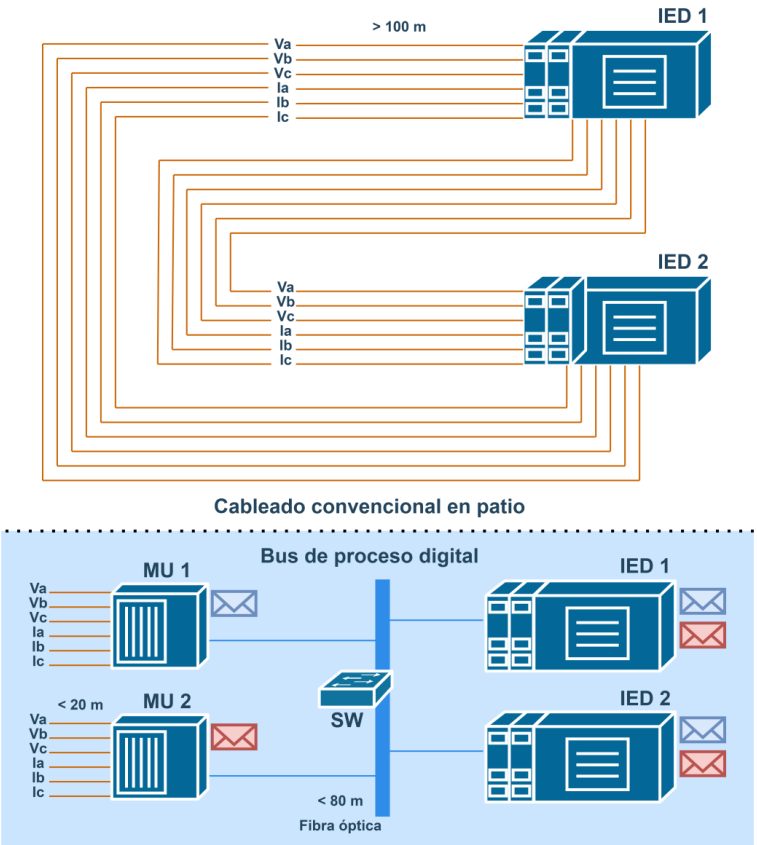


Figura 2-8. Uso de cobre y fibra óptica en patio de subestaciones

- **Reducción de cableado**

Respecto al uso convencional de cableado de cobre, la implementación de soluciones digitales en las subestaciones eléctricas trae beneficios como la disminución de costos y tiempo de construcción e implementación y puesta en servicio; implica además la construcción de menos cárcamos, o cárcamos de menor tamaño (lo que impacta positivamente en la huella de carbono de los proyectos), requiere menos canalizaciones, canalizaciones más livianas y con menores restricciones.

En la **Figura 2-8** se estima que en con cableado convencional, la solución requerirá más de 2 km de cableado de cobre para llevar las señales indicadas, además, ocupará un total de 12 terminales de conexión analógica. Por otro lado, en el caso del bus de proceso digital, solo se requieren unos cientos de metros de cobre hasta las MU y para las redes de comunicación el tendido de pocos cables de fibra óptica. Además, al estar interconectados en la misma red LAN los IED podrán compartir información entre sí y con las MU sin conexiones adicionales, lo que en la solución con cableado convencional en patio requeriría más conexiones en cobre punto a punto. Al reducir la complejidad del cableado requerido se reducen también los puntos críticos y se facilita la detección de fallas y el mantenimiento.

En uso de equipos de comunicaciones como las MU y los switches de red puede impactar los costos en análisis a pequeña escala como el ejemplo presentado, pero se optimizan los recursos a medida que la comparación se hace con un mayor número de bahías y dispositivos interconectados en red y la valoración de la flexibilidad que brinda la comunicación en redes informáticas.

- **Interoperabilidad e intercambiabilidad**

La adopción de estándares internacionales como la IEC 61850 elimina la dependencia de fabricantes para la implementación, mantenimiento, renovación y gestión de los equipos, ya que se dejan de lado los protocolos propietarios y se emplean protocolos abiertos y normalizados, con archivos de configuración estandarizados y modelos de datos definidos, que facilitan la escalabilidad de los sistemas sin dependencia del fabricante de del sistema existente y motiva a procesos de licitación más competitivos.

En el ejemplo de la **Figura 2-8**, puede tenerse las MU, los IED y el SW de fabricantes diferentes, o de un mismo fabricante, pero en diferentes versiones y siempre que sus características técnicas y configuración interna lo permitan, habrá comunicación exitosa bajo estándares normalizados como la IEC61850, eliminando los retrasos y puntos de falla que puedan generarse en equipos como *gateways*, conversores de protocolo o conversores de medio [14].

- **Sistemas flexibles y de alto desempeño**

Las comunicaciones digitales permiten un mayor flujo de datos y el aprovechamiento de las nuevas tecnologías que mejoran las prestaciones de los componentes típicos de las redes de comunicaciones.

Concentrar la mayor cantidad de datos de proceso en un bus de proceso digital libera las redes de comunicaciones hacia niveles superiores y permite que se lleven a cabo de mejor manera los procesos críticos relacionados al control y monitoreo. Además, simplifica la gestión de adquisición de datos entre dispositivos a través de la multidifusión, lo que facilita la implementación de redundancia en la red [14].

En el caso convencional de la **Figura 2-8**, los IED son los primeros dispositivos digitales, y realizan tareas de adquisición masiva de datos a la par con el procesamiento analógico a digital de señales, mientras en el bus de proceso digital se concentra la mayor parte del tráfico digital de la red de comunicaciones, y a niveles superiores podrán dirigirse señales escogidas bajo criterios específicos y con direccionamiento gestionado en la red.

Además el manejo de información en formato digital permite volúmenes de datos mayores que las comunicaciones cableadas por cobre; la fibra óptica es inmune a las interferencias electromagnéticas ya que no conduce corrientes inducidas; y a través de la fibra óptica (pulsos de luz) se puede conseguir mayor fidelidad en la transmisión de datos a partir de longitudes del orden de cientos de metros, ya que en la transmisión por cobre (señales eléctricas), además de las corrientes inducidas, existe la distorsión por pérdida de potencia gracias a la resistencia del cable.

2.4 Ancho de banda

El concepto de ancho de banda es frecuentemente utilizado como sinónimo de capacidad de las redes de comunicaciones, proporcional a la cantidad de datos que se pueden enviar y recibir. Puede hacer referencia tanto a los enlaces pasivos (cableado) como a los puntos de conexión (puertos).

Cuando se emplea este término en redes informáticas digitales, suele ser un valor expresado en bits por segundo (bit/s) o sus múltiplos, lo que es análogo al caudal de agua (litros/s o litros/min) de agua en una tubería, como se explicará a continuación para ilustrar de manera gráfica las consideraciones para el concepto de ancho de banda y los demás conceptos que harán parte de la evaluación de desempeño de transmisión de datos de SV en redes de comunicaciones de bus de proceso:

Para la analogía, se muestra en la **Figura 2-9** el sistema de impulsión para una turbina. Considerar un sistema con una fuente de agua (MU), una válvula (*switch*), tuberías (cableado), boquilla (puertos) que busca proporcionar caudal constante de agua (SV) para impulsar una turbina (IED):

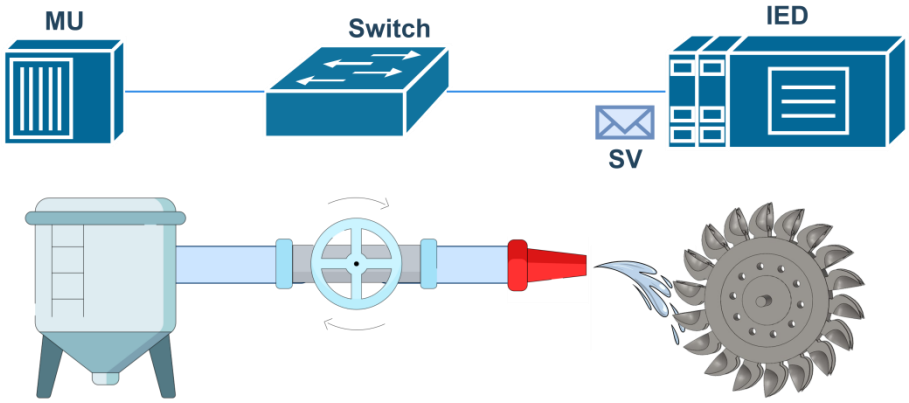


Figura 2-9. Analogía – transmisión de datos y flujo de agua

El ancho de banda limita la máxima cantidad de datos que se pueden enviar a través de un canal de comunicaciones, y se encuentra presente tanto en las características técnicas del emisor de la información, el canal y el receptor. Es por esto que en los ejemplos A, B y C de la **Figura 2-10** se limita el flujo de agua a la mínima capacidad del sistema:

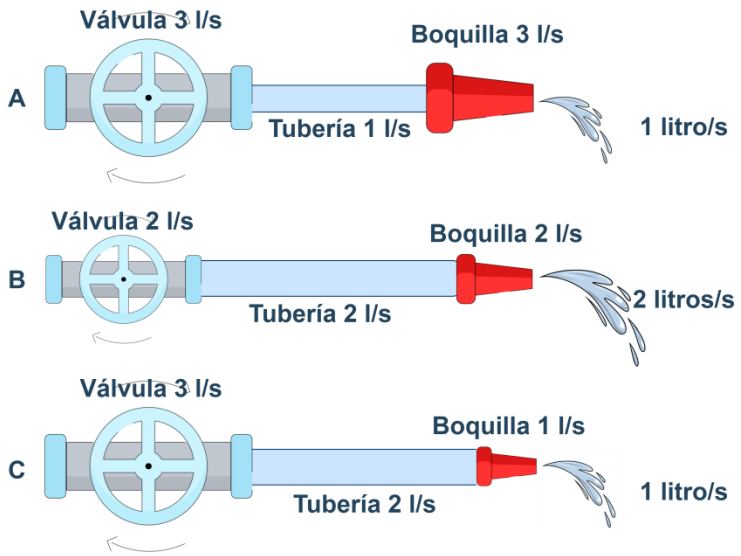


Figura 2-10. Analogía – Capacidad del canal como límite del flujo

En el ejemplo A, a pesar de contar con válvula y boquilla de 3 l/s, solo se puede conducir un caudal de 1 l/s por el caudal limitante en la tubería; algo similar ocurre en el ejemplo C por la boquilla de 1 l/s. En el ejemplo B, como todos los elementos tienen la misma capacidad de 2 l/s, se puede llevar un caudal de 2 l/s.

En los sistemas de comunicaciones no debe confundirse el ancho de banda (capacidad del canal) con la tasa de bits (velocidad de transmisión de la información), aunque ambos se midan con las mismas unidades de bits/s o sus múltiplos. La tasa de bits máxima que se podrá alcanzar en una transmisión de datos será el valor nominal del ancho de banda.

El porcentaje de ocupación del canal, el ancho de banda y la tasa de bits, pueden verse en la analogía del flujo de agua como se muestra en la **Figura 2-11**, donde se cuenta con un canal con capacidad de 10 l/s:

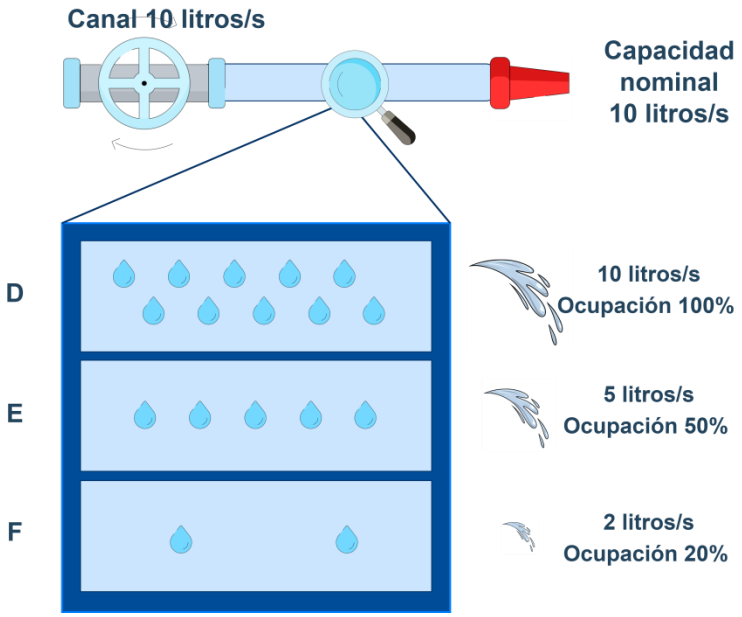


Figura 2-11. Analogía – Porcentaje de ocupación del canal

En el ejemplo D se puede ver la ocupación del 100% del canal, que en un sistema de comunicaciones implicaría una tasa de bits y ancho de banda iguales. En los ejemplos E y F se aprecia una ocupación menor del canal, lo que en un sistema de comunicaciones representa una tasa de bits mucho menor al ancho de banda nominal del enlace.

Como podría suceder en un sistema hidráulico, si se somete un canal a un caudal mayor del que soporta, se compromete la integridad del sistema debido a la presión. Así, en los sistemas de comunicaciones, cuando el flujo de información supera la capacidad del enlace, se presentan fenómenos de retraso como la latencia y el *jitter*, además la pérdida de paquetes de datos; sin que sea esta la única causa de dichos fenómenos.

La capacidad del canal, en general, depende del ancho de banda y de la relación de señal a ruido que se presenta en las comunicaciones (afectaciones por longitud y fenómenos externos). Sin embargo, por tratarse de una aplicación en redes de área local y canales de fibra óptica inmunes a la interferencia electromagnética, no se considerará el fenómeno de atenuación por ruido durante las pruebas en el bus de proceso.

En sistemas de comunicaciones se empelan códigos para definir el ancho de banda estándar en redes. Algunos se muestran en la **Tabla 2-7** como traducción de [17]:

Tabla 2-7. Denominaciones de ancho de banda y medios asociados

CLASE	TASA (Mbits/s)	MEDIO	LONGITUD DE ONDA	DISTANCIA MÁXIMA
10/100Base-TX	10/100	Cobre	N/A	100 m
10Base-FL	10	Fibra multi-modo	850 nm	300 m
100Base-SX	100	Fibra multi-modo	850 nm	300 m
100Base-FX	100	Fibra multi-modo	1300 nm	2 km
1000Base-T	1000	Cobre	N/A	100 m
1000Base-SX	1000	Fibra multi-modo	850 nm	500 m
1000Base-LX	1000	Fibra multi-modo o mono-modo	1310 nm	500 m (multi) 10 km (mono)
1000Base-ZX	1000	Fibra mono-modo	1550 nm	~ 70 km
1000Base-LH	1000	Fibra mono-modo	1550 nm	~ 70 km

2.5 Latencia

La latencia en las comunicaciones es la suma de retrasos temporales en la transmisión de datos entre el origen y el destino. Está asociada al ancho de banda, la longitud de los canales, la cantidad de datos, el número de equipos intermedios, o configuración de los mismos, y las perturbaciones externas, entre otros.

Para explicar el fenómeno de latencia por medio de la analogía con el flujo de agua, se podría considerar el canal como una tubería flexible expuesta de 1 l/s de capacidad, que admite un caudal 60 l/min. Al tratarse de una tubería expuesta se tiene el riesgo de que alguna persona camine por encima de ella; pero gracias a que es flexible soportaría la deformación momentánea por medio de un pequeño cambio de presión.

En la **Figura 2-12** se ejemplifica en el ejemplo G un canal sin perturbaciones y en el ejemplo H uno que sufre dos perturbaciones representadas por pisadas de un segundo de duración.

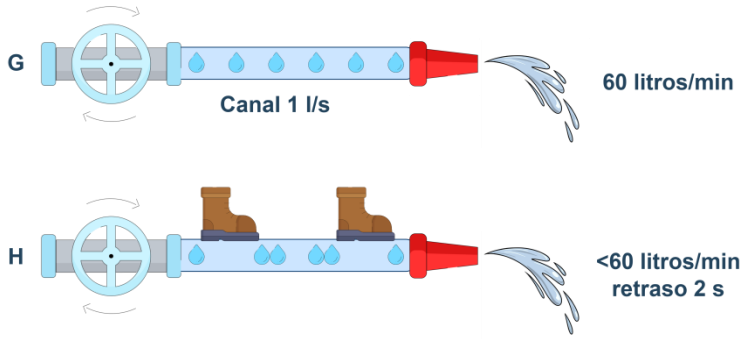


Figura 2-12. Analogía – Retardo en flujo de agua

En promedio, el caudal en el caso H se ve afectado por el retraso de 2 segundos, por lo tanto, sería menor a los 60 litros por minuto esperados. El fenómeno similar en los sistemas de comunicaciones, afectando la tasa de bits, con retrasos que suelen presentarse en la escala de milisegundos.

2.6 *Jitter*

El *jitter* es una variable que mide la fluctuación de la latencia, es decir, la variación de los en los retrasos en la transmisión de datos. Es una variable de interés debido la incertidumbre que aporta a las comunicaciones, pues si no existiera variabilidad en los retrasos, se sabría con certeza “cuánto tiempo esperar”; lo que en la práctica no es sencillo de determinar.

En la analogía de la tubería de agua, podrían contemplarse casos como el ejemplo I de la **Figura 2-13**, donde muestran dos pasos de la misma duración sobre la tubería; en este caso la variación del retraso es nula, y se podría asociar los pasos a un retraso de dos segundos en total. Sin embargo, en el ejemplo J de la **Figura 2-13** podría suponerse que la persona se detuvo unos segundos sobre la tubería en la segunda oportunidad, generando un retraso total de 5 segundos, con una variación de 3 segundos entre un evento y otro.

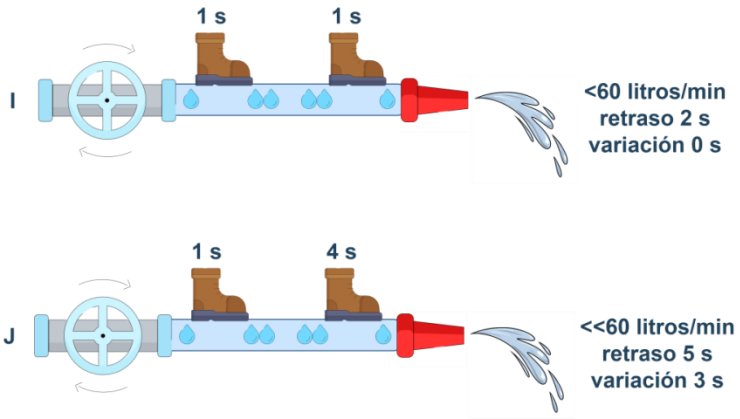


Figura 2-13. Analogía – Variación en el retardo del flujo de agua

El *jitter* puede ser causado por diversos factores, como el tráfico irregular o masivo de datos (alta ocupación del ancho de banda), eventos en el sistema de comunicaciones o problemas de configuración en los equipos activos. Es una variable muy difícil de predecir con base en los eventos ocurridos (como en la analogía, no se sabe si cada vez que alguien pisa la tubería se va a detener, ni por cuánto tiempo).

2.7 Pérdida de paquetes de datos

La pérdida de paquetes de datos en la transmisión de datos es causada por diversos factores entre los que se encuentran la degradación de la señal por la longitud del enlace o la interferencia externa, sobrecarga de la conexión, retrasos en la entrega de paquetes de datos y cortes en la transmisión por eventos en el sistema de comunicaciones, entre otros, sucede cuando los datos no llegan al destino, se corrompen en el camino, o se descartan en el destino.

En la analogía del sistema de agua, podríamos hablar de una interrupción del flujo tan significativa que envíe una parte del agua lejos de la turbina por la alta presión, o incluso que genere una fuga, como se ve en el ejemplo L de la **Figura 2-14**:

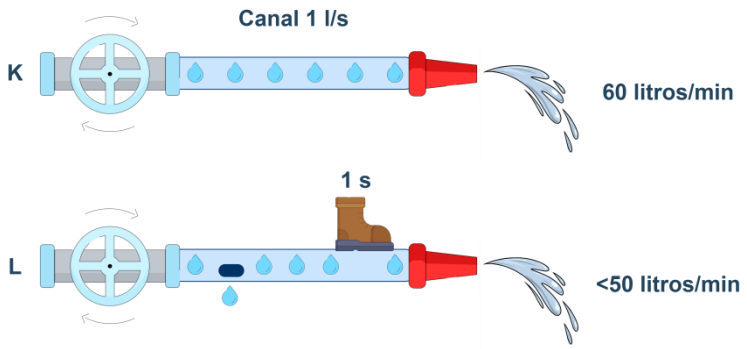


Figura 2-14. Analogía - Pérdidas de información

En los sistemas de comunicaciones alámbricos no sería tan evidente como una fuga, pues no es posible la información “salga” del canal, pero este fenómeno puede presentarse en casos en que la interferencia externa modifique la trama de datos al tal punto que no pueda ser recibida o interpretada por el destinatario, también se puede presentar la atenuación de las señales por las pérdidas en longitud o paso por equipos activos. También el retraso en la llegada y la superposición de tramas pueden causar que se descarten los paquetes de datos en el destino.

En resumen, cuando se presentan fenómenos sobre el flujo, la turbina girará con una velocidad irregular o menor a la esperada. En los sistemas de medida, control y protección de sistemas eléctricos, se tiene como ideal la lectura en tiempo real de las variables eléctricas, por eso, en el caso de los *Sampled Values* no vale la pena “esperar” información.

2.8 Escalabilidad

La escalabilidad es, en esencia, la capacidad que tiene un sistema de crecer en magnitud bajo condiciones determinadas. En los sistemas informáticos, específicamente el término de escalabilidad horizontal se refiere a la posibilidad de aumentar el flujo de información sin afectar la velocidad de respuesta. Al hablar específicamente del bus de proceso, ya que las MU publican información a una tasa fija, la escalabilidad podría tratarse en términos de la cantidad de MU que pueden agregarse al bus de proceso sin comprometer la calidad de las comunicaciones.

Para ilustrar el concepto, se tienen los ejemplos de la **Figura 2-15**:

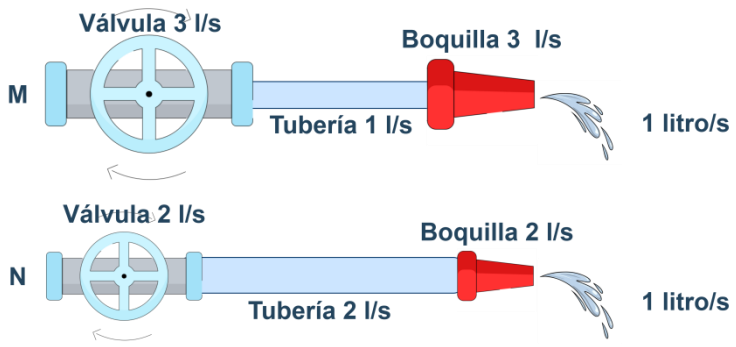


Figura 2-15. Analogía - Concepto de escalabilidad

El sistema M cuenta con un caudal actual de 1 litro/s y un caudal máximo posible de 1 litro/s debido al límite de la tubería, por lo tanto, en las condiciones actuales, no puede crecer. Sin embargo, tendría una escalabilidad de 2 litros/s adicionales si se reemplaza la tubería por una con capacidad de 3 l/s. Por su parte, en las condiciones actuales, el sistema N es escalable en 1 litro/s adicional, pues se tiene un caudal de 1 litro/s (ocupación del 50%) y el límite del sistema son 2 litros/s en todos sus componentes.

En la **Tabla 2-8** se presenta un resumen de los conceptos clave en la evaluación de desempeño y escalabilidad del bus de proceso y su analogía con el flujo de agua.

Tabla 2-8. Resumen - Analogía transmisión de datos y flujo de agua

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	ANALOGÍA
Ancho de banda	Capacidad de las redes	Caudal máximo permitido por sus elementos
Latencia	Suma de retrasos	Pisadas sobre la tubería
Jitter	Variación en los retrasos	Incertidumbre por pasos cortos sobre la tubería o una persona detenida sobre ella
Pérdida de paquetes de datos	Información que se daña o se descarta	Fugas por alta presión Agua que no alcanza la turbina
Escalabilidad	Capacidad de crecer en magnitud	Cambiar partes del sistema para aumentar el caudal

2.9 Sincronización de tiempo

La sincronización de tiempo es una parte del proceso de las comunicaciones en las que se marca en cada mensaje el momento en que se envía o se recibe y se establece una misma estampa en todos los dispositivos de la red, dentro de un margen de error. Esta sincronización se hace a través del posicionamiento respecto a redes de satélites, como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS en inglés), y es esencial en procesos de la subestación como la acción y coordinación de protecciones y el registro histórico de eventos. Existen varios protocolos de sincronización que ofrecen ventajas unos sobre otros, y dependiendo del protocolo de sincronización empleado, la precisión puede ser incluso del orden de nanosegundos.

En [11] se resumen los protocolos de sincronización de tiempo recomendados por la IEC 61850-8-1 y UCA 61850-9-2LE en el siguiente listado:

- 1 PPS (*Pulse Per Second*) – Un Pulso Por Segundo
- IRIG – B (*Inter-Range Instrumentation Group*) – Serie B de 100 PPS
- NTP (*Network Time Protocol*) – Protocolo de Tiempo de Red
- PTP (*Precision Time Protocol*) – Protocolo de Tiempo de Precisión

Debe aclararse que la norma tiene un alcance que abarca mucho más que el tráfico de S*ampled Values*, por lo que no todos estos protocolos son adecuados para la sincronización del bus de proceso. Como ejemplo está el protocolo de 1 PPS, que no sirve para imprimir las estampas de tiempo en cada muestra del bus de proceso, pero es muy útil a la hora de sincronizar sistemas que se encuentran muy dispersos geográficamente y que a nivel local cuentan con equipos maestros de sincronización diferentes.

Tanto el protocolo IRIG-B, como NTP y PTP pueden ser utilizados en el bus de proceso, y ofrecen diferentes características que son presentadas en la **Tabla 2-9** como ventajas (verde) y desventajas (rojo):

Tabla 2-9. Comparativa de protocolos de sincronización de tiempo

	IRIG-B	NTP	PTP
Precisión típica	1 – 10 ms	1 – 10 ms	0,1 – 1 ms
Conexión	Cable dedicado	Ethernet LAN - WAN	Ethernet LAN
Tipo comunicación	Maestro / esclavo	Cliente / servidor	Maestro / esclavo
Corrección de latencia	No	Sí	Sí
Intervalo de actualización	2 s	Minutos	10 ms – 1 s
Requiere hardware especializado	Sí	No	Sí

El protocolo NTP es más adecuado en la sincronización de tiempo de tiempo en niveles de control superior (Nivel 2, Nivel 3, bus de estación), ya que por su amplio intervalo de actualización afectaría los procesos críticos del bus de proceso. Este protocolo no requiere hardware adicional especializado y viaja a través de la misma red, ocupando ancho de banda que podría influir en el desempeño de las comunicaciones.

El protocolo IRIG-B es el protocolo de comunicaciones más antiguo de la lista, ya que su primera publicación fue en 1960 [19]. Aunque este protocolo cuenta con un intervalo de actualización adecuado, no es el preferido en aplicaciones del bus de proceso ya requiere hardware y cableado dedicado y no incluye corrección de latencia. Como se indica en [20], es más relacionado a aplicaciones de amplia dispersión geográfica, y es empleado cuando los equipos no permiten la sincronización por PTP o NPT de forma nativa.

Para la evaluación de desempeño que se realiza en el presente trabajo se emplea el protocolo PTP principalmente por su flexibilidad, alta precisión, corrección de latencia e intervalo de actualización reducido en comparación, muy adecuado para la estampa de tiempo en el bus de proceso.

El estándar IEEE 1588 [26] determina una estructura de PTP con un reloj principal como gran maestro, que en la aplicación de esta evaluación de desempeño va a ser el único, identificado en la **Figura 3-3** como GPS, sin relojes adicionales que actúen como esclavos o respaldo.

En la guía de aplicación de [11] se sugiere minimizar la sincronización directamente en las MU y reservarla para la coordinación de protecciones. Ya que la coordinación de protecciones no es alcance de este trabajo, la sincronización se hará por medio de islas de sincronización centralizadas en los *switches* de red de la doble estrella, como se puede observar en la **Figura 3-3**.

La integración del reloj maestro GPS tiene como fin establecer un entorno de pruebas que sea fiel a una arquitectura de comunicaciones típica en una subestación digital, sin embargo, debido a que la sincronización no se realiza directamente sobre las MU, en la captura de datos de sampled values del software Wireshark no se ve un valor referente a la estampa de tiempo del protocolo PTP, sino un tiempo de recepción de muestra relativa para cada trama de datos recibida (ver **Tabla 2-5**), que incluye el parámetro smpSynch para identificar el reloj maestro.

2.10 Redundancia

Es la característica de un sistema de comunicaciones que le permite mantener la confiabilidad del flujo de información por medio de la instalación de uno o más elementos de respaldo para la atención de contingencias. En la **Figura 2-1** se ilustra este concepto de manera física por medio del uso de dos switches en el bus de proceso. También puede emplearse por protocolos, como se explica a continuación.

Aunque la parte del estándar que especifica los SV en el bus de proceso [15] y la guía de aplicación [11] consideran diferentes topologías, en términos de confiabilidad para toma de datos para protección y medida se presentan como mejores alternativas las topologías asociadas a los protocolos PRP y HSR (ambos referenciados en la IEC 61850-9-2 [15]) ya que tienen un tiempo de reposición cero ante fallas, como se muestra en la **Tabla 2-10**, como resumen de [21]:

Tabla 2-10. Protocolos de redundancia

PROTOCOLO		TOPOLOGÍA	RECUPERACIÓN
STP	*Spanning Tree Protocol*	Malla	30 s
RSTP	*Rapid Spanning Tree Protocol*	Malla	2 s
***Optimized* RSTP**	*Optimized Rapid Spanning Tree Protocol*	Anillo	5… 20 ms por salto
CRP	*Cross Network Protocol*	Doble	< 1 s
BRP	*Beacon Redundancy Protocol*	Estrella Línea Anillo	< 8 ms
DRP	*Distributed Redundancy Protocol*	Anillo Doble anillo	< 100 ms
MRP	*Media Redundancy Protocol*	Anillo	< 200 ms
***Fast* MRP**	*Fast Media Redundancy Protocol*	Anillo	< 30 ms
HSR	*High-Availability Seamless Redundancy*	Anillo	0 ms
PRP	*Parallel Redundancy Protocol*	Doble estrella	0 ms

A pesar de contar con tiempos de recuperación cero, la topología de doble estrella asociada al protocolo PRP presenta una ventaja sobre el protocolo de redundancia HSR, en especial en aplicaciones con muchos equipos como lo es este análisis de escalabilidad del bus de proceso. Este concepto se ilustra con los siguientes ejemplos que tienen la misma cantidad de equipos ordenados en topología de doble estrella y topología anillada, empleando en ambos casos la misma cantidad de puertos de comunicación de las MU.

En la **Figura 2-16** se muestra en color verde el flujo de información proveniente de la MU 2 en cada red. En ambos casos la información publicada puede llegar a los switches A o B a través del camino establecido por los enlaces A y B.

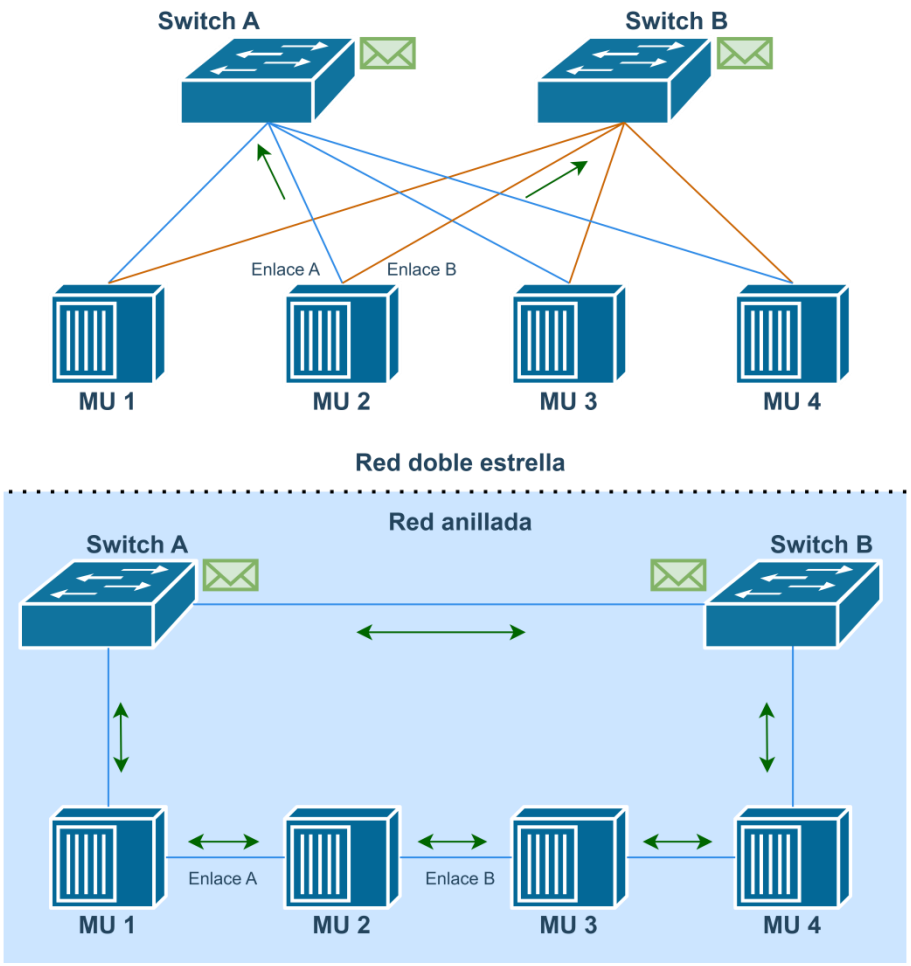


Figura 2-16. Flujo de información red doble estrella – red anillada

En el caso que presenta la **Figura 2-17**, bajo una contingencia que hace indisponible la MU 1, cuando se trata de una topología de doble estrella no se ve afectado el flujo de la información publicada por la MU 2. Sin embargo, cuando se trata de una red anillada, la información publicada por la MU 2 únicamente puede llegar al switch B a través del enlace B; y al switch A por medio del switch B, dejando un lazo del anillo completamente indisponible.

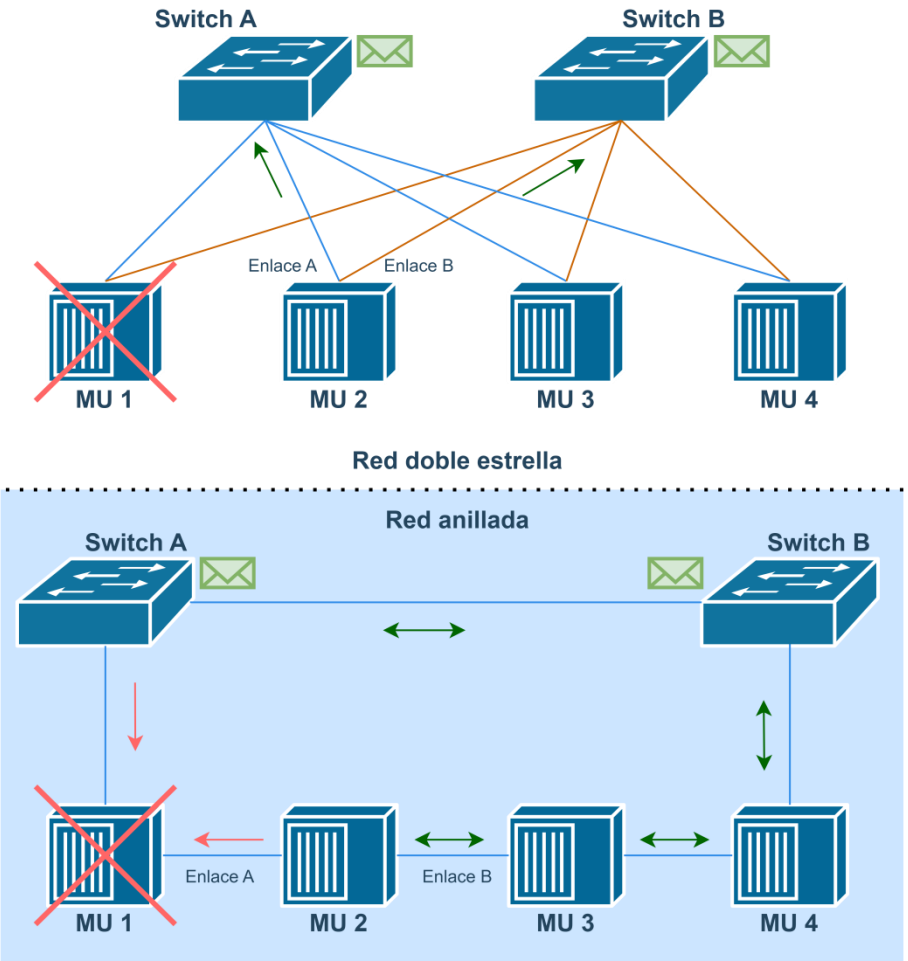


Figura 2-17. Contingencia N-1 MU red doble estrella – red anillada

En el caso en que falla uno de los dos switches, por ejemplo, el switch A, en ambas topologías la información publicada por la MU 2 tendrá un camino hacia el Switch B por medio del Enlace B.

Ahora bien, si se trata de una contingencia N-2 MU, en la topología de doble anillo se tendrá inconvenientes para recibir la información de la MU 2 si se presenta falla en MU a un extremo y otro del anillo, como se muestra en la **Figura 2-18**, que es el peor de los casos; donde quedan indisponibles ambos lazos del anillo. A partir de aquí es donde la topología de doble estrella muestra ventajas, pues a través de los enlaces A y B se puede acceder a la información de la MU 2, y únicamente se ve afectada la información de las MU falladas.

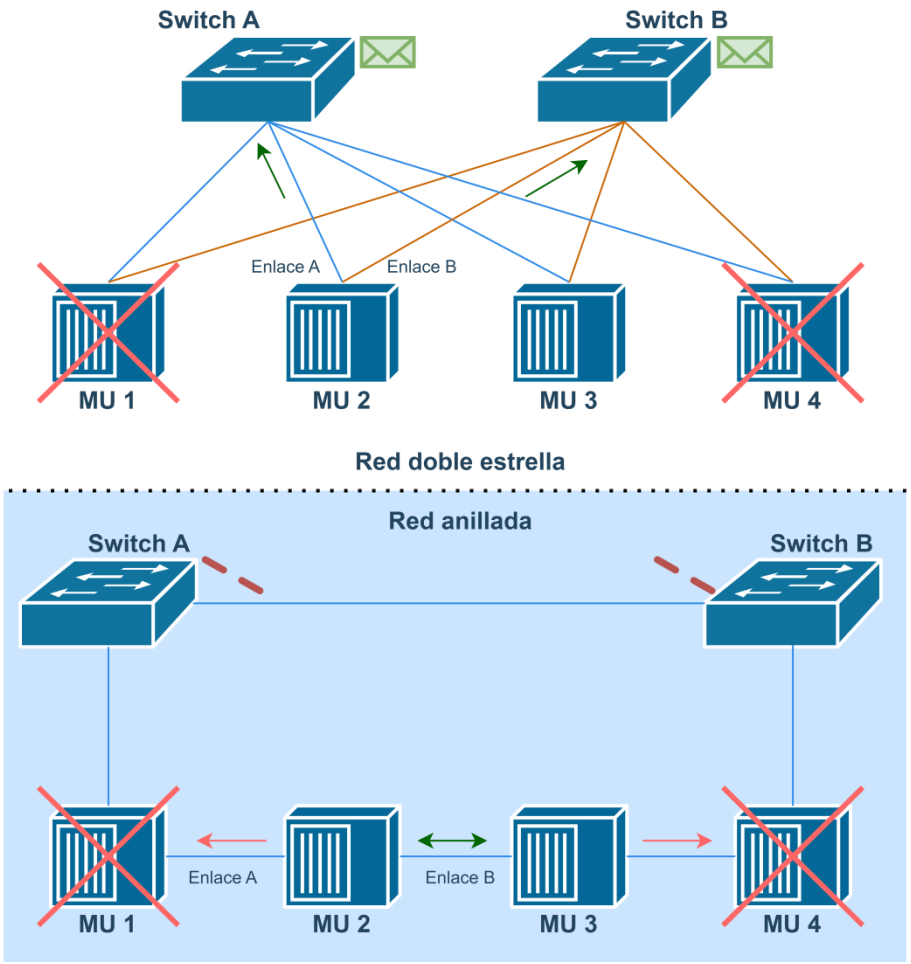


Figura 2-18. Contingencia N-2 MU red doble estrella – red anillada

En una topología anillada, los inconvenientes para recibir la información de la MU 2 serán similares si se presenta, en el peor de los casos, falla en una MU a un extremo del anillo y falla en un switch del otro extremo; situación que se ilustra en la **Figura 2-19**. Pero incluso en ese caso, en la topología de doble estrella se podrá acceder a la información publicada por la MU 2 siempre que se tenga un enlace de comunicaciones conectándola por lo menos a un switch activo.

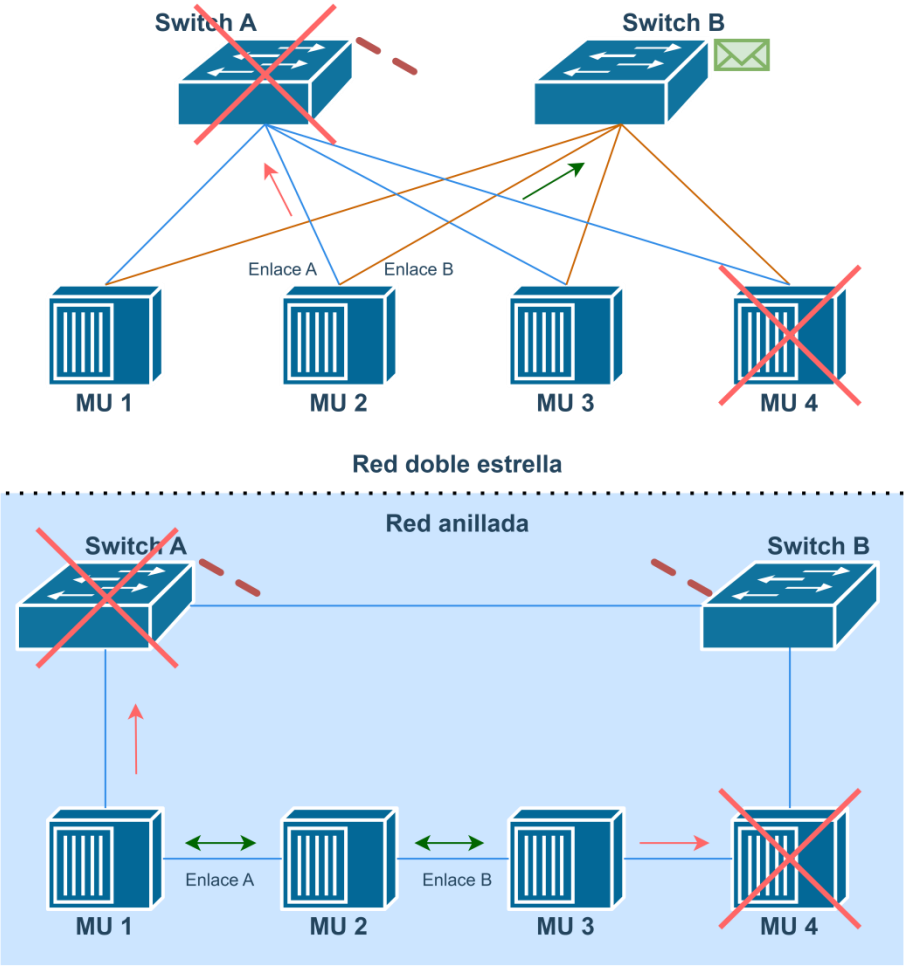


Figura 2-19. Contingencia N-2 MU y SW red doble estrella – red anillada

El caso más crítico es falla de los dos switches mostrados en las topologías, que es fatal en ambas y por esto no se considera un punto de comparación.

Debido a que el foco de este trabajo es la escalabilidad en la cantidad de equipos del bus de proceso, se tiene predilección por realizar pruebas y definir criterios de diseño para la topología que garantiza una mejor confiabilidad en la operación, es decir, la topología PRP de doble estrella.

La topología de doble estrella presenta otras ventajas como la simplicidad en la red y las conexiones, además, por tratarse de redes independientes, las características de redundancia no afectan el tráfico de datos, y por tratarse de una comunicación directa, la latencia es baja debido a que no hay equipos intermedios entre la MU y el switch de red. Según [14] la topología de doble estrella en protocolo PRP tiene desventajas en cuanto a costos debido a la necesidad de tener una red duplicada, con mayor requerimiento de material.

3. Metodología

En este capítulo se tratan los principales aspectos metodológicos de las pruebas de escalabilidad del bus de proceso, presentando las generalidades de la investigación (3.1), e introduciendo formalmente los índices que componen el indicador de escalabilidad que se emplea como registro de las pruebas (3.2). Además, se presenta el protocolo y reporte de pruebas (3.3), que se resume en un diagrama de flujo del procedimiento (3.4) y los casos de estudio (3.5) agrupados según el uso de MU, SV emulados, y tráfico simulado. También se brinda una explicación de las herramientas de software empleadas en las pruebas (3.6) y, finalmente, se indican aquellos puntos relacionados a las subestaciones digitales que no son alcance de esta investigación (3.7).

3.1 Generalidades

La metodología de investigación para este trabajo está orientada a la aplicación de resultados. Aquí, se evalúan diferentes escenarios emulados y a partir de estos se consolidan los criterios de diseño. De acuerdo con el indicador de escalabilidad presentado en [8], la metodología está basada en la aplicación de un indicador cuantificable, sin embargo, no es lo cuantitativo el foco de la investigación, sino determinar de forma cualitativa si las condiciones de prueba que simulan escenarios reales hacen que la transmisión de datos en las redes de comunicaciones del bus de proceso se lleve a cabo de manera adecuada o no.

El componente experimental de este trabajo se lleva a cabo en el Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales (LACI) de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en el cual es posible integrar tanto dispositivos físicos como emulados.

En primer lugar, se realiza la caracterización de las MU disponibles en el LACI, con el fin de comparar el tráfico de datos generado por cada MU con el tráfico generado con el software emulador. Seguido, se realiza el montaje un modelo típico de arquitectura de red de comunicaciones de bus de proceso en subestaciones eléctricas digitales, que incluye tanto equipos reales como emulados, y se incrementa uno a uno la cantidad de MU emuladas con el fin de encontrar el número S; la cantidad de MU que saturan una red de 100 Mbps.

Para el cumplimiento del primer objetivo específico se debe garantizar que el sistema de comunicaciones es completamente funcional con, al menos, un elemento emulado. Al aumentar la cantidad de dichos elementos emulados cambian las condiciones de las redes de comunicaciones en el bus de proceso, causando el estrés en las redes que permite concluir respecto a la funcionalidad y los límites del sistema de comunicaciones.

Con el fin de lograr el segundo objetivo específico, se aplica el protocolo de pruebas establecido según la arquitectura de comunicaciones conformada con los equipos del LACI y los elementos emulados en software. Se configuran los parámetros que definen cada caso de estudio y se registran los datos para la obtención del indicador de escalabilidad en cada uno de ellos. Mediante el protocolo PRP se establece una red de comunicaciones redundante que permite comparar en cada prueba la integridad de la información como si se tratara de dos redes independientes que, en principio, deben contener exactamente la misma información.

Finalmente, se consolidan los criterios de diseño, concluyendo sobre el desempeño de las redes de comunicaciones en el bus de proceso, de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas. Se sintetizan los resultados obtenidos por medio de criterios numéricos simples, que relacionen las variables propias de la red de comunicaciones incluidas en el indicador de escalabilidad con elementos propios del sistema como son el número de *Merging Units*, generando propuestas de requerimientos técnicos mínimos para diseño de nuevas subestaciones eléctricas digitales, ampliación de subestaciones eléctricas digitales existentes o la migración desde sistemas de automatización y comunicaciones convencionales a digitales.

3.2 Indicador de escalabilidad

El indicador de escalabilidad *E* es presentado por el autor de [8] para la evaluación de desempeño de comunicaciones en microrredes. Este es completamente aplicable al contexto de transmisión de SV en subestaciones digitales conforme al estándar IEC 61850 para el análisis de escalabilidad del bus de proceso, pues los índices que lo componen se obtienen a partir de variables que se pueden medir en la captura de datos de SV.

Este indicador está compuesto por una ponderación de cuatro índices unitarios asociados a los parámetros de red de ancho de banda (ABi), latencia (Li), *jitter* (Ji) y pérdida de paquetes de datos (PPi) y es descrito por la **Ecuación 3-1**:

$$E = 0{,}2(AB_i) + 0{,}3(L_i) + 0{,}3(J_i) + 0{,}2(PP_i)$$

Ecuación 3-1. Indicador de escalabilidad

La ponderación que el autor en [8] da a los índices de ancho de banda y pérdida de paquetes de datos es menor debido a su dependencia del canal físico y el protocolo de comunicación, mientras para latencia y jitter es más alta debido a que son factores críticos y variables en la transmisión de datos.

La composición de este indicador unitario a partir de los cuatro índices unitarios mencionados presenta una estructura sencilla y fácil de entender a la hora de reportar resultados en el diagnóstico de redes de comunicaciones.

La composición de este indicador y su ponderación se conservará en el desarrollo de este trabajo por considerarse un criterio adecuado para la evaluación de desempeño en el alcance que tiene el bus de proceso en las subestaciones eléctricas digitales.

3.2.1 Índice de ancho de banda

El índice de ancho de banda (ABi) [8] relaciona el ancho de banda máximo ocupado por los datos registrado durante la transmisión (ABmax) con el ancho de banda disponible o

nominal (ABdisp), que está determinado por el tipo de canal físico o las prestaciones de los equipos concentradores, como los switches. Este índice se determina según indica la **Ecuación 3-2**:

$$AB_i = 1 - \frac{AB_{max}}{AB_{disp}}, \qquad AB_{max} \leq AB_{disp}, \qquad 0 \leq AB_i \leq 1$$

Ecuación 3-2. Índice de ancho de banda

El índice de ancho de banda afecta el indicador de escalabilidad en la medida en que la ocupación del ancho de banda en la transmisión de datos puede desencadenar inconvenientes como el retraso o la pérdida de paquetes de datos.

3.2.2 Índice de latencia

El indicador de latencia (Li) relaciona la máxima latencia (suma de retrasos) [8] registrada en la comunicación (Lmax), respecto a la máxima latencia que pueda tolerarse (Ltol) antes de una falla en la comunicación. Se consigue aplicando la **Ecuación 3-3**

$$L_i = 1 - \frac{L_{max}}{L_{tol}}, \qquad L_{max} \leq L_{tol}, \qquad 0 \leq L_i \leq 1$$

Ecuación 3-3. Índice de latencia

La latencia afecta a las comunicaciones en general debido a la pérdida de información que se produce cuando llegan muestras con retrasos que pueden significar vacíos en la secuencia de datos, pérdida de datos o desorden en la información.

En [18] se indica que la máxima latencia tolerable para valores muestreados “en crudo” es de 3 ms para funciones de protección (la función más crítica). Este valor se empleará como latencia máxima tolerable en las pruebas de escalabilidad.

3.2.3 Índice de fluctuación o *jitter*

El indicador de *jitter* (Ji) relaciona el máximo *jitter* (variación en la latencia) [8] que pueda presentarse en la comunicación, respecto al *jitter* máximo que pueda tolerarse antes de presentar una apertura de la transmisión y se obtiene a partir de la **Ecuación 3-4**:

$$J_i = 1 - \frac{J_{max}}{J_{tol}}, \qquad J_{max} \leq J_{tol}, \qquad 0 \leq J_i \leq 1$$

Ecuación 3-4. Índice de *jitter*

Aunque la latencia (suma de retrasos) presentada en la adquisición de datos sea baja, una alta fluctuación en ésta podría causar tanta incertidumbre como una alta latencia.

En [18] se indica que la máxima latencia tolerable para valores muestreados “en crudo” es de 3 ms para funciones de protección (la función más crítica). La mitad de este valor, es decir 1,5 ms, se empleará como variación de latencia máxima tolerable en las pruebas.

3.2.4 Índice de pérdida de paquetes de datos

El indicador de pérdida de paquetes de datos (PPi) [8] relaciona la pérdida de paquetes de datos registrada en la comunicación, respecto a la pérdida de paquetes máxima tolerada antes de considerar que una transmisión de datos deja de ser confiable; este es producto de la **Ecuación 3-5**:

$$PP_i = 1 - \frac{PP_{max}}{PP_{tol}}, \qquad PP_{max} \leq PP_{tol}, \qquad 0 \leq PP_i \leq 1$$

Ecuación 3-5. Índice de pérdida de paquetes de datos

Para propósitos de este trabajo, se considera que un valor del 10% de los datos totales como el máximo tolerable para considerar una transmisión defectuosa, ya que se trata de un análisis de datos que podrían ser críticos para el control y protección de la subestación, y a diferencia del análisis en [8], donde se consideraba la pérdida de datos en un 40% a través de toda la red, el presente es un trabajo que trata un único nivel de control (Nivel 0) que es crítico en los procesos de control, protección y medida. Por las características que el estándar IEC 61850 define para la publicación de datos muestreados de medidas

eléctricas (SV), de 4800 muestras por segundo, se determina que una pérdida de paquetes de datos equivalente promedio a 480 muestras por segundo es suficiente para concluir que una transmisión es deficiente.

3.3 Protocolo de pruebas

3.3.1 Caracterización de *Merging Units*

El proceso de caracterización se realiza con dos de las MU disponibles en el LACI. El esquema de conexiones de comunicaciones para el proceso de caracterización es simple, utilizando una única red. Esta etapa inicial se realiza con el fin de entender el tráfico individual de SV y a través de este planear los escenarios de pruebas de escalabilidad y el manejo de los datos obtenidos. La información registrada en esta prueba se utiliza para evaluar la calidad y fidelidad en la emulación del bus de proceso.

Posterior a la conexión eléctrica, se conectan los *patchcord* de fibra óptica entre un puerto de comunicaciones de la MU y el *switch* de red. De forma independiente se conecta el *switch* al PC del laboratorio mediante cable de par trenzado, como se muestra en la **Figura 3-1**:

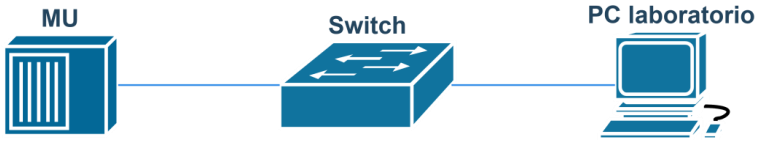


Figura 3-1. Arquitectura de red para caracterización de MU

Después de comprobar que se cumplen las condiciones iniciales para ejecutar las pruebas, se graba la información del tráfico de datos durante diez segundos. Este procedimiento se repite para cada MU y se presentan en el numeral 4.1.

En el software para emulación de MU, AT61 SV Publisher, se configura la publicación de SV desde una MU, como se muestra en la **Figura 3-2** incluyendo la mayor cantidad de componentes opcionales para ocupar el mayor número posible de elementos en la trama,

es decir incluyendo información de la VLAN y la tasa de muestreo. Mayor detalle del software AT61 se presenta en el numeral 3.6.3.

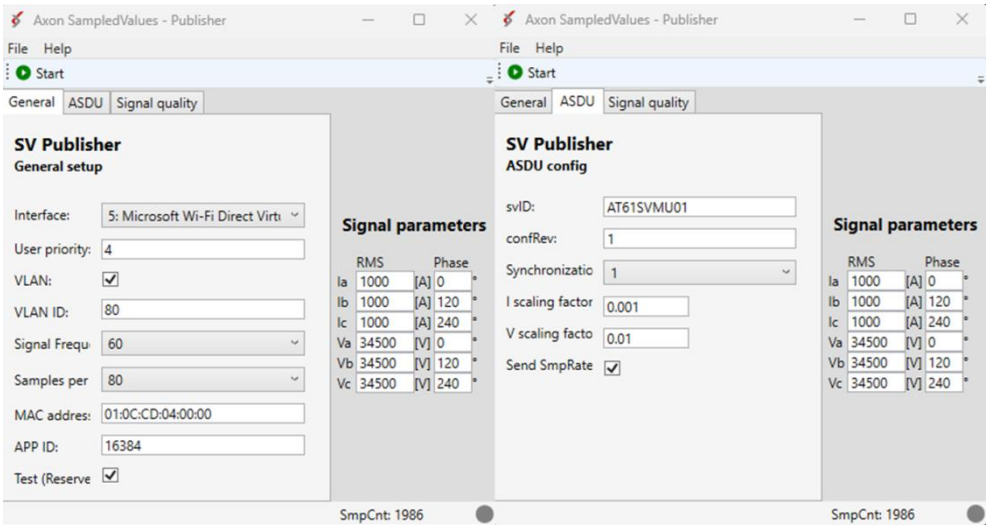


Figura 3-2. Parametrización del AT61 SV Publisher

Además, también se utiliza inyector de señales ISA DRTS 66 [27][28] como fuente de SV. Este equipo puede generar hasta tres *streams* de SV. Los resultados de la caracterización de las MU1, MU2, el AT61 SV Publisher y el ISA DRTS 66 se muestran en el numeral 4.1.

3.3.2 Pruebas de escalabilidad

La arquitectura de comunicaciones que sirve como estructura para el análisis de escalabilidad, es un bus de proceso de que hacen parte las MU caracterizadas en el numeral anterior, se muestra la **Figura 3-3**.

La arquitectura consiste en un arreglo de doble estrella en protocolo de redundancia PRP donde además de las MU1 y MU 2 se encuentran el inyector de señales ISA DRTS66, el PC emulador de MU y el PC simulador de tráfico. La simulación del tráfico del 40Mbps se realiza a través del software AT61 SV Publisher, el mismo que emula los SV y corresponde al 40% de la red *Fast* de 100 Mbps; dicho porcentaje es el que se recomienda destinar al tráfico de otros protocolos como GOOSE para eventos y MMS para gestión de equipos.

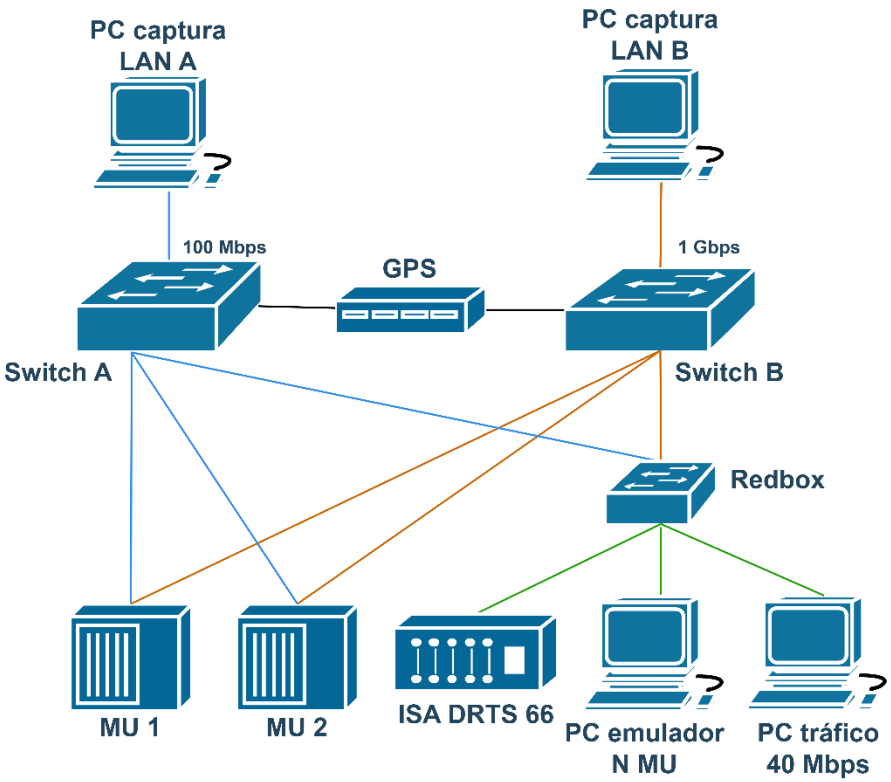


Figura 3-3. Arquitectura de pruebas de escalabilidad

En el puerto del switch de red A que conecta con el PC de captura LAN A se configura el límite de 100 Mbps y se comparará con una la red B de 1Gbps, que se tendrá como referencia en el PC de captura LAN B y donde se espera que no se presente saturación.

El flujo de datos del componente emulado (N SV) y simulado (tráfico 40Mbps) tiene como límites las capacidades de procesamiento, envío y recepción de los equipos, por lo que este componente tiene como fin aumentar el flujo de información en las redes de comunicaciones en una forma proporcional al escalar el bus de proceso, pero no evaluar la escalabilidad directamente en el componente emulado. Es por lo anterior que análisis para la obtención de los índices y el indicador de escalabilidad se realiza únicamente sobre los *Sampled Values* capturados desde las *Merging Units*, y no sobre la captura de datos de las SV emulados.

Después de comprobar que se cumplen las condiciones iniciales para ejecutar cada

prueba, se graba la información del tráfico de datos durante diez segundos. Este procedimiento se repite en cada prueba según del número de SV determinado, conforme al procedimiento del numeral 3.4 y se incluye en el formato de reporte del numeral 3.5.1.

3.4 Procedimiento

La **Figura 3-4**, presenta el procedimiento de pruebas mediante un diagrama de flujo:

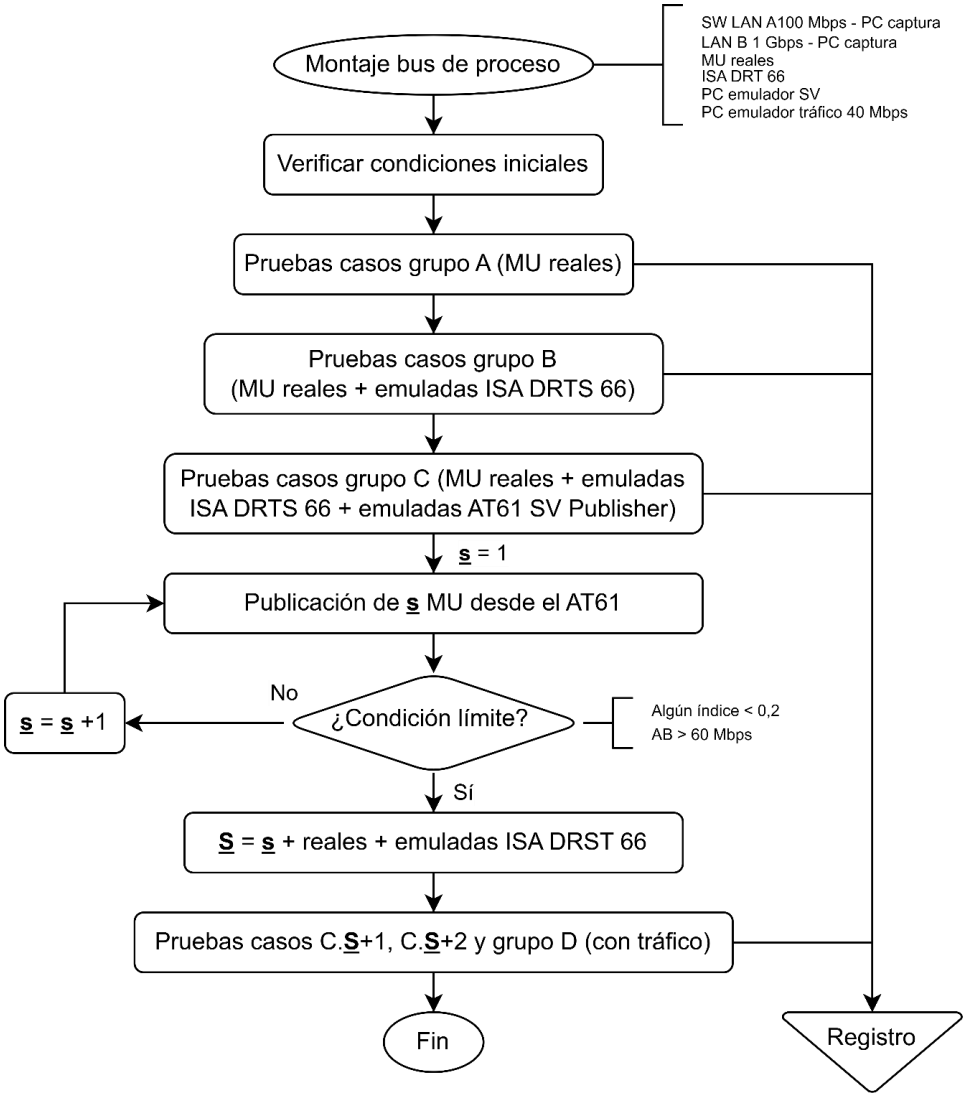


Figura 3-4. Diagrama de flujo pruebas de escalabilidad

3.5 Casos de estudio

Los casos de estudio para las pruebas de escalabilidad se explican a continuación en la

Tabla 3-1, donde **S** es el número de *streams* de SV (3 de las MU + 3 del ISA DRTS 66 + **s** emulados desde el AT61 SV Publisher) que llevarían al sistema a la saturación (teóricamente 60 Mbps). Para las pruebas de escalabilidad, se considera que el sistema está saturado cuando alguno de los cuatro índices que conforman el indicador E se hace cero.

Tabla 3-1. Casos de estudio en pruebas de escalabilidad

Caso	*SV* MU 1	*SV* MU 2	SV emulados ISA DRTS 66	SV emulados AT61 SV	Tráfico 40 Mbps simulado
A.01	1	0	0	0	NO
A.02	2	0	0	0	NO
A.03	2	1	0	0	NO
B.04	2	1	1	0	NO
B.05	2	1	2	0	NO
B.06	2	1	3	0	NO
C.06	2	1	3	1	NO
C.07	2	1	3	2	NO
…C.n…	2	1	3	…n…	NO
C.S	2	1	3	s	NO
C.S+1	2	1	3	s+1	NO
C.S+2	2	1	3	s+2	NO
D.6	2	1	3	1	SÍ
…D.n…	2	1	3	…n…	SÍ
D.S+2	2	1	3	s+2	SÍ

3.5.1 Reporte de pruebas

Previo a la captura de información, el montaje debe cumplir con un conjunto de condiciones iniciales que buscan resultados confiables en la prueba y la ejecución segura de la misma; estas son:

1. Inspección visual del estado de los equipos para garantizar que el hardware empleado en la prueba se encuentra en condiciones físicas óptimas, que tenga todas sus partes y no presente evidencias de golpes que puedan comprometer su funcionamiento.
2. Verificación de conexiones eléctricas y de comunicaciones con el fin de tener un montaje de pruebas seguro desde sus conexiones eléctricas y con enlaces de comunicaciones confiables.
3. Verificación de comunicación a través del comando *ping* o evidencia de tráfico en el software Wireshark para verificar la comunicación entre las MU, los emuladores y el PC de laboratorio en el cual se realiza la captura de datos.

Una vez comprobadas las condiciones iniciales adecuadas para las pruebas, se procede a grabar la información a través de la captura de datos durante diez segundos en el software Wireshark, tomando nota de los siguientes datos para cada prueba:

1. *Streams* de MU, dispositivos del laboratorio implicados en cada prueba
2. Número de SV simulados en software
3. Tiempo exacto de captura de datos (última muestra)
4. Verificación del número de la muestra final en cada prueba para confirmar que el volumen de datos se aproximadamente el esperado, ya que los datos no serán analizados durante las pruebas, bajo la siguiente ecuación:

$$nMuestras = \left(4800\left[\frac{muestras}{s}\right]\right)x(tiempo\ captura[s])x(nMU)$$

Ecuación 3-6. Cálculo de muestras esperadas por captura

Tabla 3-2. Formato de reporte de pruebas

Reporte de pruebas		
ítem	Descripción	Valor
1	*Streams* SV de MU	
2	Número de SV emulados	
3	Tiempo de captura de datos (ts)	
4	Número de muestras esperado	
5	Número final de muestras	
6	Muestras obtenidas/esperadas	

Un resultado mayor al 90% en ambas capturas de datos en el ítem 6 (para red A y red B) permite cerrar cada caso de estudio en laboratorio y pasar al siguiente, como se muestra en el anexo A. Durante el proceso de captura en el laboratorio no se analiza la información.

Un análisis posterior de la base de datos generada por la grabación de los valores muestreados durante el tiempo de prueba genera los datos de entrada para las ecuaciones del numeral 3.2, que permiten, en cada caso de estudio y para cada una de las redes PRP (red A y red B), completar la **Tabla 3-3**:

Tabla 3-3. Evaluación del indicador de escalabilidad

Concepto	**Valores**		
Ancho de banda	Máximo disponible	Máximo registrado	Índice AB
Latencia	Máxima tolerable	Máxima registrada	Índice L
	3 ms		
Jitter	Máximo tolerable	Máximo registrado	Índice J
	1,5 ms		
Pérdida de paquetes de datos	Paq. datos esperados	Paq. datos recibidos	Índice PPD
		Indicador de escalabilidad	

Los valores asociados a la tabla anterior, para cada caso de prueba, se recopilan en una hoja de cálculo que permita analizar la progresión de los valores en relación con la escalabilidad del bus de proceso. Este registro detallado se encuentra en el anexo B.

3.6 Software

3.6.1 Herramientas de configuración

Cada fabricante cuenta con un software propio para ajustar y cargar la configuración de *software* sobre los componentes físicos específicos del *hardware* para cada MU y el inyector de señales, también y activar o desactivar parámetros que conforman la trama de SV, por ejemplo, que se incluya o no información sobre la tasa de muestreo (80 en este caso). Entre otras funciones, estas herramientas también permiten configurar la publicación/suscripción de GOOSE, suscripción a SV en el caso de los IED/C&P y la funcionalidad de publicador de SV para las MU.

3.6.2 Analizador de paquetes de datos

Wireshark [22] es una herramienta gratuita, compatible con múltiples protocolos y ampliamente utilizada para la visualización en tiempo real, captura y análisis de los paquetes de datos que fluyen por una red de comunicaciones. Tiene la interfaz presentada en la **Figura 3-5**

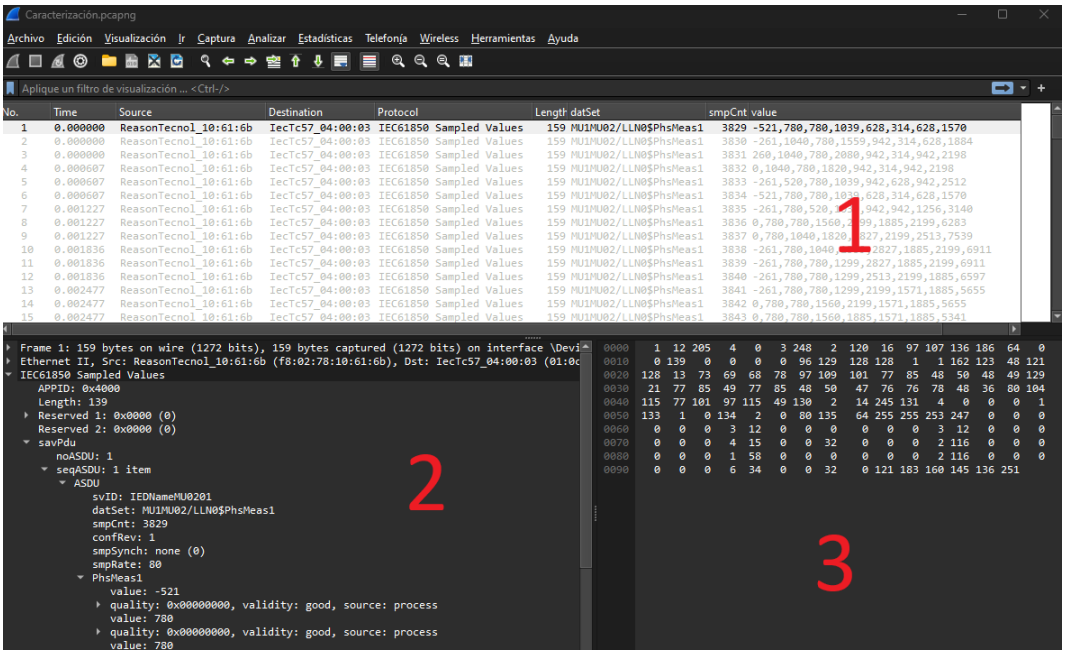


Figura 3-5. Interfaz del software para captura de datos Wireshark [22]

Su interfaz permite la visualización de los paquetes de datos desde el listado que se genera en orden de llegada en el panel 1, el detalle de un paquete de datos específico en el panel 2 y los bytes de dicho paquete en el panel 3.

La **Figura 3-5** presenta un ejemplo de la visualización y captura de datos de *Sampled Values* en Wireshark, donde se puede ver el número de paquete (No.), el tiempo relativo desde el inicio de la captura de datos (Time), la fuente de los datos (Source) el destino (Destination), el protocolo bajo el cual se envían los paquetes (Protocol), la longitud de la trama (Lenght), los parámetros propios del protocolo SV (datSet), el conteo de muestras del protocolo (smpCnt) que va de 0 a 4799 en una tasa de muestreo de 80 muestras por ciclo y se reinicia cada segundo, y finalmente los valores (value) asociados a los valores muestreados de tensión y corriente. Esta información, además de ser visualizada directamente en el programa, puede ser exportada como archivo .CSV para su tratamiento en otro software como Microsoft Excel.

Con los datos capturados en Wireshark se determinan los índices y el indicador de escalabilidad así:

- Ancho de banda a partir de la gráfica E/S del software
- Latencia y variación de latencia (*jitter*) a partir del Time en el software Excel
- Pérdida de paquetes de datos a partir del smpCnt en el software Excel

3.6.3 Emulador de *Sampled Values*

El Axon AT61 [23] es un conjunto de herramientas que soporta conexiones bajo los protocolos del estándar IEC 61850; *Sampled Values,* GOOSE y MMS, tanto en modo cliente como servidor. Soporta múltiples conexiones simultáneas con varios IED y además de la mensajería, valida archivos propios de la configuración de dispositivos y subestación.

Uno de los módulos del Axon AT61 es el AT61 SV Publisher, desde el cual se pueden asignar los valores de las variables eléctricas del sistema eléctrico simulado y configurar y

enviar los *streams* de *Sampled Values* desde una interfaz sencilla e intuitiva a través de tres pestañas: General, ASDU y Calidad.

Desde la pestaña General se puede configurar el puerto por el cual se hace la transmisión de datos, la prioridad de la mensajería SV, el uso e identificación de VLAN, la frecuencia del sistema eléctrico simulado (50 Hz o 60 Hz), el número de muestras por ciclo (80 para protección, 256 para calidad de energía), la dirección MAC para identificar la trama de SV emulada, la identificación de aplicación para SV y el marcaje para identificar equipo en pruebas.

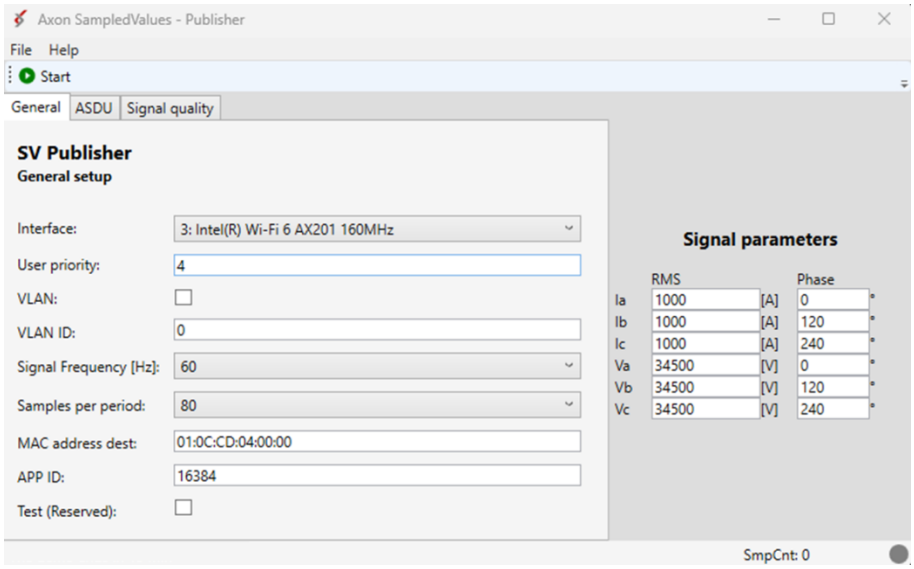


Figura 3-6. Vista General del software AT61 SV Publisher [23]

Desde la pestaña ASDU se puede configurar la identificación de la trama emulada, el número de versión configurada en el dispositivo, la referencia de sincronización (0 sin sincronizar, 1 para sincronización de red y 2 para sincronización directa), los valores de escala de las variables eléctricas y la opción de incluir en la trama de datos el valor de la tasa de muestreo.

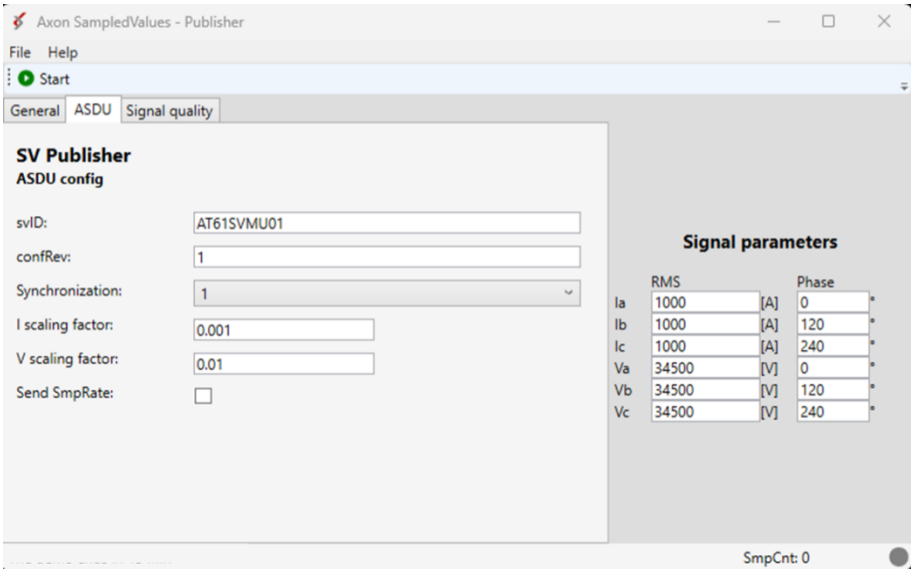


Figura 3-7. Vista ASDU del software AT61 SV Publisher [23]

3.7 Exclusiones

A continuación, se presentan algunos conceptos clave que acotan el alcance de este trabajo y permiten enfocar las pruebas en el análisis de desempeño de las redes de comunicaciones de SV en el bus de proceso de subestaciones eléctricas digitales:

- **Sistema eléctrico de potencia**

No es alcance de este trabajo la programación en software, la simulación o el desarrollo de pruebas relacionadas la configuración de subestaciones, maniobras, automatismos, estados, eventos ni otros aspectos relacionados a los sistemas eléctricos de potencia. Es por esto que se utiliza como herramienta de prueba un inyector de señales que simula la salida de los devanados secundarios (baja corriente y baja tensión) de los CT y PT.

- **Otros protocolos eléctricos**

Para la evaluación de desempeño se considera únicamente el análisis sobre paquetes de SV, y se excluye del análisis otros protocolos de comunicación del ámbito eléctrico, incluso aquellos relacionados al estándar IEC 61850 como MMS o GOOSE. El protocolo de pruebas considera una única red LAN redundante exclusiva para el tráfico sobre la cual se simula un tráfico equivalente a las sugerencias de las guías de aplicación para los protocolos GOOSE y MMS, pero que no es generado por este tipo de mensajería.

- **Funciones de control y protección**

Para la evaluación del desempeño de tráfico de datos de SV, únicamente se consideran los valores muestreados asociados a las medidas eléctricas provenientes de las MU, y no se considera el tráfico de datos generado por las funciones de control y protección. No se considera dentro del alcance de estas pruebas la acción de ninguna lógica o comando.

- **Niveles de control superior**

Como alcance de estas pruebas, únicamente se tiene el flujo de datos de SV en el bus de proceso, es decir, entre las MU, los switches de red y el IED, y como parte intrínseca de la arquitectura de pruebas, el consecuente flujo de datos entre los switches y el PC de monitoreo en el cual se va a registrar la información, que en ningún escenario actúa como controlador, servidor de aplicación o IHM. En ningún caso se considera el flujo de datos en los niveles de bahía o estación.

- **Otros equipos de comunicaciones**

Como alcance de este trabajo no se considera el uso de dispositivos de comunicación tipo *gateway*, ya que el análisis del bus de proceso se hace asumiendo una única red LAN redundante y para el cumplimiento de los objetivos planteados no se requiere la interconexión con otras redes. Tampoco se considera el uso de equipos tipo firewall, ya que no es alcance del trabajo evaluar aspectos de ciberseguridad o control de acceso.

- **Comparativa entre marcas**

Uno de los grandes objetivos de la norma IEC 61850 es la estandarización de protocolos de comunicación que permita la interoperabilidad y la intercambiabilidad entre equipos de diferentes fabricantes. Lo anterior, permite que para este trabajo se pueda conformar una arquitectura de comunicaciones con MU de diferente fabricante con las que cuenta el LACI; sin embargo, no es objetivo de este trabajo hacer comparaciones entre marcas, y por esto, no se asocia las MU 1 y 2 a una referencia específica. Tampoco orden en que son dispuestas en el montaje de prueba debe relacionarse a esta numeración.

- **Detalle de trama de datos**

Aunque la estructura misma de las tramas de datos influye directamente en la cantidad de información que se mueve por las redes de comunicaciones, al tratarse de una estructura estandarizada no será objeto de profundización la estructura interna de los paquetes SV, el modelo de datos, ni los tipos de archivos relacionados a la estructura lógica, configuración o parametrización de equipos. Por esto, se realiza una caracterización que recoge las salidas digitales de las MU como insumo para el análisis y cálculo de índices.

- **Análisis técnico económico**

No es alcance de este trabajo ningún análisis económico asociado a la escalabilidad del bus de proceso.

- **Otras topologías de red**

De acuerdo con la explicación brindada en el numeral 2.10, solo se evalúan escenarios bajo la topología de doble estrella en protocolo PRP.

4. Resultados

En este capítulo se presenta un análisis gráfico de los aspectos más destacables de la caracterización de las MU (4.1) y las pruebas de escalabilidad (4.2), cuyo detalle se encuentra tabulado en los anexos A y B.

4.1 Resultados de caracterización

Los resultados obtenidos en la caracterización de las MU 1 y 2, en comparación con la emulación de MU desde el ISA DRST 66 y el AT61 SV Publisher se presentan, en una muestra de 10 segundos, en términos de la tasa de bits, en la **Figura 4-1**:

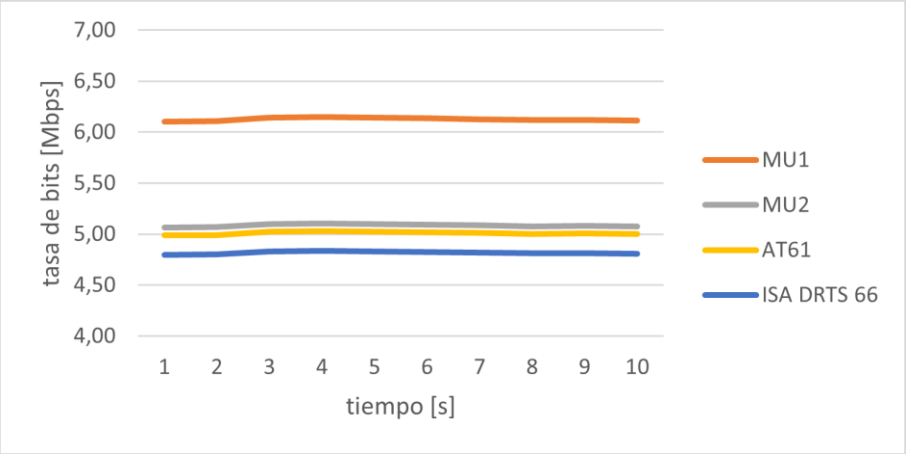


Figura 4-1. Tasa de bits de las MU durante la caracterización

Al comparar la tasa de bits que presentó cada MU durante la caracterización, se aprecia que el tráfico emulado por el AT61 SV Publisher y el ISA DRTS 66 son muy similares al tráfico generado por la MU 2, lo que valida el uso del software para los propósitos de este trabajo. El tráfico generado por la MU 1 es significativamente mayor debido a que la

configuración de esta MU emplea más bloques de la trama de SV que la MU 2 y las tramas emuladas. El resumen de las propiedades de los *streams* generados por cada elemento se presenta en la **Tabla 4-1**:

Tabla 4-1. Comparativa de *streams* de SV generados en caracterización

	MU 1	MU 2	AT 61	ISA DRTS 66	Máximo teórico
Longitud (bytes)	159	132	130	125	< 160
Tasa de bit (Mbps)	6,13	5,08	5,01	4,82	< 6,14

Además de emular el tráfico de datos de *Sampled Values* en la escalabilidad del bus de proceso, se simula el tráfico aproximado de 40% recomendado para otros protocolos (reserva de ancho de banda 40 Mbps para redes de 100 Mbps) mediante la publicación de tres *streams* de SV de calidad de energía (256 muestras por ciclo) desde el AT61. La tasa de bits de esta simulación se muestra en la **Figura 4-2**:

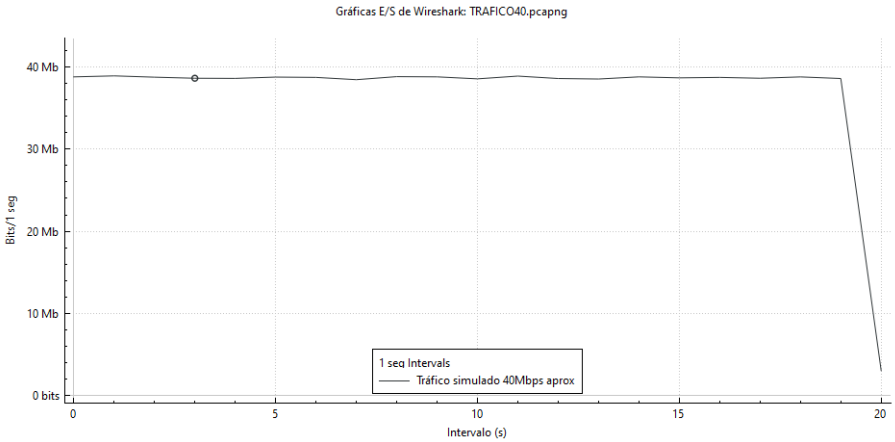


Figura 4-2. Tasa de bits simulación tráfico del 40%

El propósito de esta aplicación basada en SV de calidad de energía es generar tráfico al que se pueda suscribir el IED y que ocupe el ancho de banda que se espera reservar para otros protocolos ajenos a SV. Se determina que el ancho de banda ocupado por la simulación propuesta es adecuado para representar el porcentaje de reserva propuesto por la guía de aplicación [11] y se implementa así en la arquitectura de pruebas de escalabilidad.

4.2 Resultados de pruebas de escalabilidad

El reporte completo del ancho de banda ocupado, la latencia, *jitter* y pérdida de paquetes de datos para cada *stream* de SV de las MU, junto a los índices asociados a cada variable y el indicador de escalabilidad, en cada caso de estudio, se presenta en el anexo B. A continuación, en la **Figura 4-3** se presenta un resumen gráfico del indicador de escalabilidad en los casos de estudio con tráfico simulado, casos en los que se pudo evidenciar saturación en la red limitada a 100 Mbps:

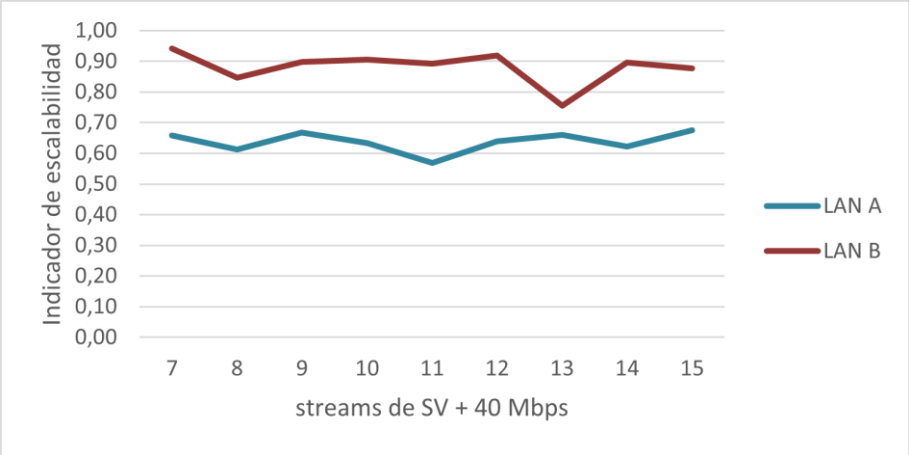


Figura 4-3. Indicador de escalabilidad en pruebas con tráfico simulado

El indicador de escalabilidad empleado no muestra una tendencia ni permite concluir respecto a la escalabilidad del bus de proceso por los siguientes motivos:

- La latencia promedio en la transmisión de SV de las MU fue uniforme en la progresión de escalabilidad, así mismo su variabilidad (*jitter*).
- La latencia máxima registrada en la transmisión de SV de las MU no superó el límite de 3 ms en ninguno de los casos de estudio de escalabilidad; el *jitter* tampoco superó el valor límite definido en ninguno de los casos.
- En ninguno de los casos ocurrió una pérdida de paquetes de datos que hiciera que la transmisión de SV de las MU fuera interrumpida. Únicamente en dos casos se presentó la pérdida de paquetes de datos en las MU, D.08 y D.11, donde se perdió 1 y 3 muestras respectivamente, sin representar una falla en las comunicaciones, ya que la tolerancia era superior a las 9600 muestras.

- Ya que un indicador compuesto por los índices propuestos no arroja resultados concluyentes, se debe analizar el comportamiento de cada índice.

El ancho de banda ocupado por los *streams* de SV en todos los casos de estudio se presenta en las siguientes gráficas. En los grupos de casos de estudio A y B se tomó nota del ancho de banda ocupado por los *streams* de SV hasta una ocupación superior al 60% del ancho de banda de la LAN A (60 Mbps); el número **S** de 13 MU. Se tomó registro de dos casos más, llegando a 15 MU, que ocupan poco más de 70 Mbps.

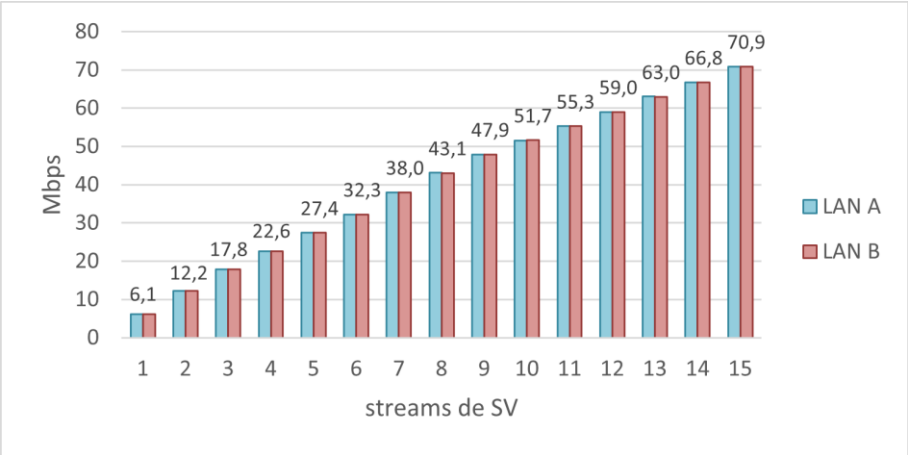


Figura 4-4. Tasa de bits en pruebas de escalabilidad sin tráfico simulado

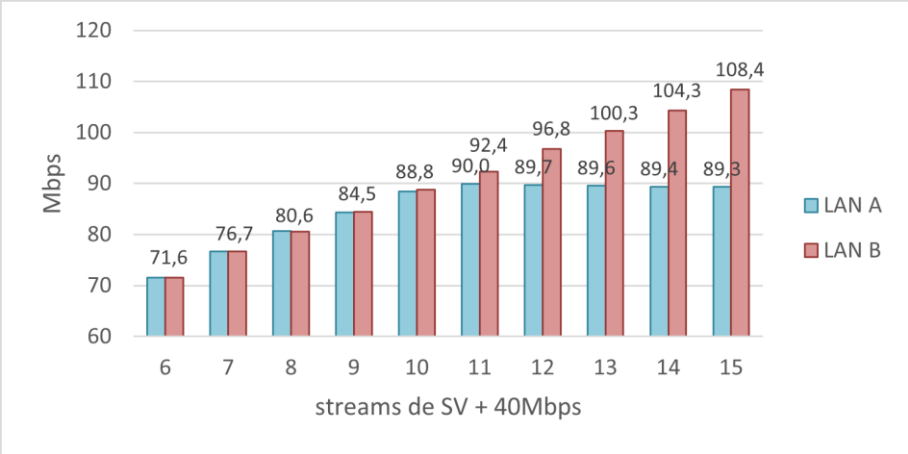


Figura 4-5. Tasa de bits en pruebas de escalabilidad con tráfico simulado

En los casos de estudio D, con tráfico simulado de 40 Mbps se registró la información de 6 a 15 MU con el fin de comparar la información con los casos sin tráfico. El resultado más destacado es que al limitar a 100 Mbps el puerto del *switch* asociado a la captura existe un factor de uso que aparentemente es el 90%, pues los paquetes de datos recibidos por el PC de captura en la LAN A no superaban los 90 Mbps, y es en este punto donde se dio la saturación de esa red.

Por parte del índice de latencia, se presenta en las siguientes gráficas el valor de latencia máxima y latencia promedio en cada caso de estudio, para ambas redes LAN.

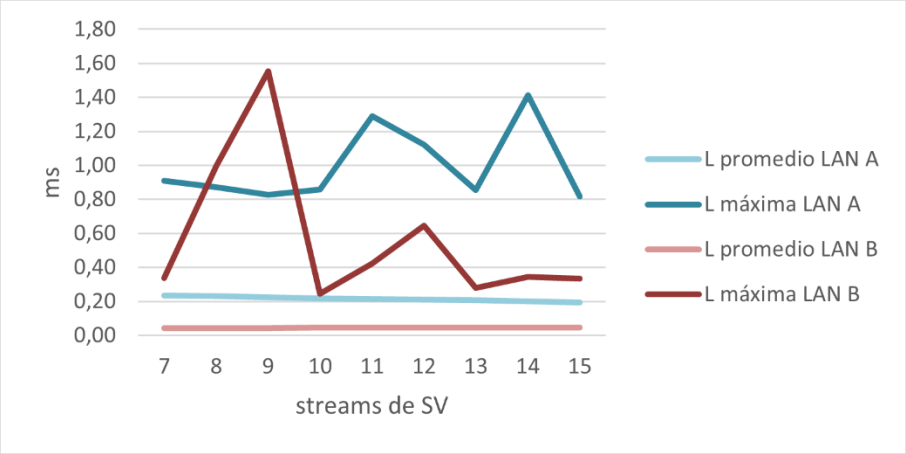


Figura 4-6. Latencia en pruebas de escalabilidad sin tráfico simulado

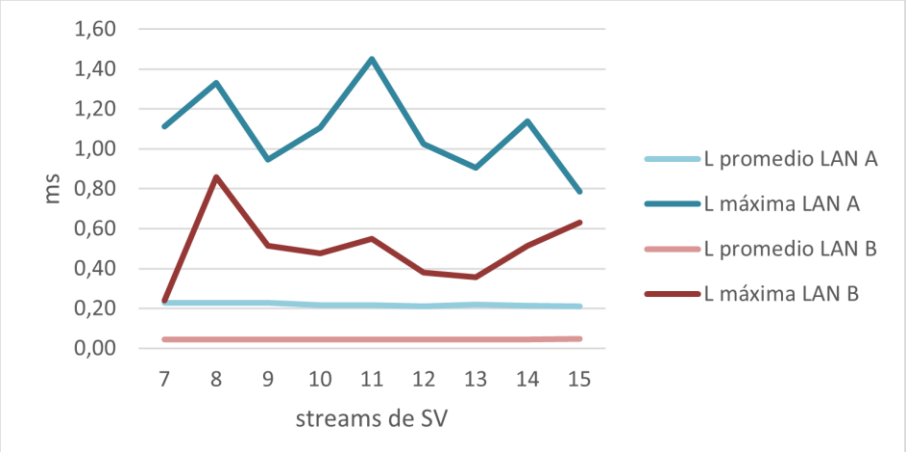


Figura 4-7. Latencia en pruebas de escalabilidad con tráfico simulado

En las gráficas se pueden apreciar varios puntos:

- La latencia promedio no depende del número de MU en el bus de proceso y es uniforme a lo largo de todas las pruebas.
- La latencia promedio de la LAN A es mayor en todos los casos a la latencia promedio de la LAN B. Esto es debido a que la captura en la LAN B se hizo mediante un PC de escritorio con tarjeta de red y la captura en la LAN A se hizo con un PC portátil mediante adaptador a USB 3.0.
- La latencia máxima en ningún caso de estudio superó los 1,6 ms, permaneciendo muy por debajo de los 3 ms que la guía de aplicación [11] recomienda considerar como límite en las aplicaciones más estrictas.

En cuando a la pérdida de paquetes de datos, este fenómeno se analiza mediante el conteo de muestras, teniendo como referencia lo indicado por el estándar de 4800 muestras por segundo. En la **Figura 4-8** se muestra el conteo de paquetes de datos (muestras por segundo) para el caso más crítico, el escenario D.15, con tráfico de 40 Mbps en una red LAN A de 100 Mbps, saturado por 15 MU, en comparación con la red LAN B de 1 Gbps, durante 10 segundos de captura:

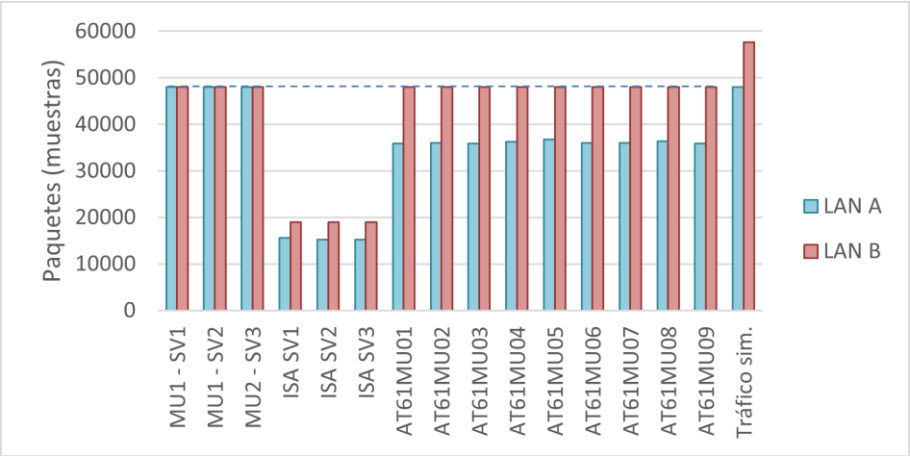


Figura 4-8. Paquetes de datos recibidos en prueba con 15 SV y tráfico simulado

El número de muestras esperado para cada *streams* de SV, tanto de las MU como emulados, en una captura de 10 segundos es de 48.000 muestras. Esta cifra se consiguió

para las MU en todos los casos y para los SV emulados desde el AT61 SV Publisher en la LAN B. En la LAN A, para los casos de estudio donde hubo saturación, hubo pérdida de paquetes de datos tanto en los SV emulados desde el ISA DRTS 66, como en los SV emulados desde el AT61 SV Publisher y el tráfico simulado de 40 Mbps en comparación con la LAN B.

Algo que llama la atención de la gráfica de la **Figura 4-8** es el reducido número de muestras recibidas desde el ISA DRTS 66, que fue mucho menor al esperado, incluso en la LAN B sin saturación. Por eso se hace el seguimiento de los paquetes de datos recibidos desde el ISA DRTS 66 en los casos de estudio a partir de 7 tramas de SV:

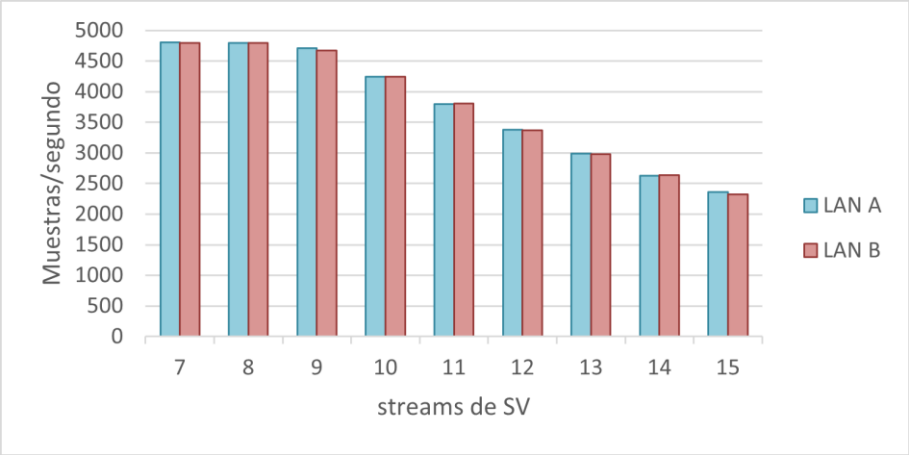


Figura 4-9. Muestras por segundo ISA DRTS 66 en pruebas sin tráfico simulado

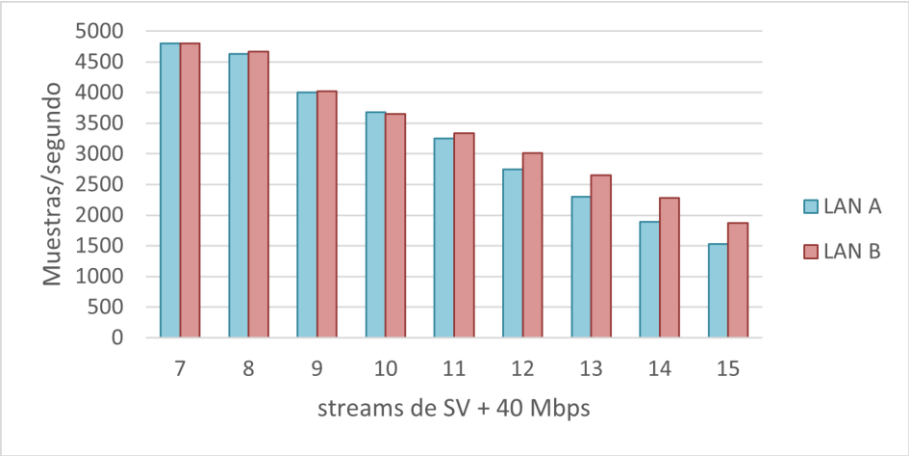


Figura 4-10. Muestras por segundo ISA DRTS 66 en pruebas con tráfico simulado

En el caso de las pruebas sin tráfico simulado, se recibió un promedio cercano a las 4800 muestras por segundo esperadas hasta la prueba con 9 *streams* de SV; a su vez, en las pruebas con tráfico se obtuvo un promedio cercano a las 4800 muestras por segundo solo en la prueba con 7 *streams* de SV. A partir de estos casos, hubo un descenso paulatino en el número de muestras, sin embargo, a excepción de la saturación en la LAN A, la reducción en los paquetes de datos no se trataba de pérdida, sino en una disminución en la tasa de envío del equipo, indicando que su función de publicación de SV es adecuada para la prueba de funciones de protección con suscripciones a unas pocas MU, pero no es adecuado para el análisis de escalabilidad y la composición de buses de proceso con más de 6 MU.

La estimación de escalabilidad en el bus de proceso puede ser obtenida a partir del ancho de banda ocupado por la mensajería de SV, a partir de dos parámetros; el valor máximo teórico (6,15 Mbps por *stream* de SV), el valor medido y el valor práctico, que a partir de la caracterización de la MU 2, el AT 61 SV Publisher y el ISA DRTS 66 se propone sea de 5,5 Mbps por *stream* de SV. La caracterización de la MU 1 dio como resultado un valor muy cercano al máximo teórico (6,1 Mbps), sin embargo, es importante aclarar que este valor se consiguió intencionalmente, empleando todos los elementos de configuración que impactaran la longitud de la trama de SV, incluyendo la longitud del nombre de la MU; elementos que no se usan en su totalidad en todas las aplicaciones.

Como se pudo evidenciar al limitar la capacidad del puerto de captura asociada a la LAN A, es importante emplear factores de seguridad en el uso de redes, por lo tanto, para redes tipo *Fast*, con valor comercial de 100 Mbps, será conveniente estimar la escalabilidad a partir de una disponibilidad de 90 Mbps, considerando siempre la recomendación del 40% para otros protocolos, a menos que se tenga el valor exacto medido. La saturación de redes de 1 Gbps estuvo fuera del alcance de estas pruebas y de existir la necesidad, podrá ser evaluada en trabajos futuros.

Consolidados los criterios anteriores, se podría tomar como referencia para la escalabilidad del bus de proceso los valores indicados en la **Tabla 4-2** y la **Tabla 4-3**:

Tabla 4-2. Estimación teórica de escalabilidad del bus de proceso de 100 Mbps

***streams* de SV**	**Ocupación SV [Mbps]**	**Otros protocolos (40%) [Mbps]**	**Disponible [Mbps]**	**Escalabilidad**
1	6,2	4,1	79,8	7 SV
2	12,3	8,2	69,5	6 SV
3	18,5	12,3	59,3	5 SV
4	24,6	16,4	49,0	4 SV
5	30,8	20,5	38,8	3 SV
6	36,9	24,6	28,5	2 SV
7	43,1	28,7	18,3	1 SV
8	49,2	32,8	8,0	1 SV*
9	55,4	36,9	-2,3	0 SV

Tabla 4-3. Estimación práctica de escalabilidad del bus de proceso de 100 Mbps

***streams* de SV**	**Ocupación SV [Mbps]**	**Otros protocolos (40%) [Mbps]**	**Disponible [Mbps]**	**Escalabilidad**
1	5,5	3,7	80,8	9 SV
2	11,0	7,3	71,7	8 SV
3	16,5	11,0	62,5	7 SV
4	22,0	14,7	53,3	6 SV
5	27,5	18,3	44,2	5 SV
6	33,0	22,0	35,0	4 SV
7	38,5	25,7	25,8	3 SV
8	44,0	29,3	16,7	2 SV
9	49,5	33,0	7,5	1 SV*
10	55,0	36,7	-1,7	0 SV

Incluyendo el factor de seguridad del 90% y la consideración de uso del 40% para otros protocolos, con el cálculo teórico se podría decir que es posible establecer un bus de proceso de hasta 9 suscripciones a SV por parte de un IED con interfaz tipo *Fast*, siendo estrictos con la estimación teórica, en redes PRP. Dependiendo de la configuración de los SV, este número podría llegar a 10 de acuerdo con la estimación práctica, en PRP.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Un indicador que integre índices de latencia, *jitter* y pérdida de paquetes de datos no es adecuado para evaluar la escalabilidad del bus de proceso. Se pude evidenciar que para el protocolo de comunicación de *Sampled Values* la latencia, el *jitter* y la pérdida de paquetes de datos en MU se encuentra dentro de los valores aceptables, incluso en saturación, por lo indicador basado únicamente en el ancho de banda ocupado es más acertado y sería suficiente para la evaluación de escalabilidad.

- A lo largo de las pruebas de escalabilidad, incluso en los casos de saturación, la latencia máxima en los *streams* enviados por las MU es aleatoria. La latencia promedio en los *streams* enviados por las MU, por otro lado, es uniforme. Ambas variables se mantienen dentro de los valores aceptables, y no tienen relación con la cantidad de *streams* (o MU) en la red. Ni siquiera en los casos en los que hubo pérdida de paquetes de datos de las MU, la latencia máxima registrada se relacionaba a la pérdida de muestras. Se estima que la latencia excederá el límite de los 3 ms con una pérdida de 7 muestras consecutivas, lo que no ocurrió en los *streams* de SV de las MU en ningún caso de estudio.

- El análisis de pérdida de paquetes de datos en saturación debe hacerse únicamente en montajes de prueba con MU, pues se pudo evidenciar que en saturación los valores muestreados enviados por MU se priorizan sobre los paquetes emulados, traduciéndose en una pérdida de paquetes de datos de 0% para SV de MU y hasta un 25% para SV emulados.

- En caso de requerir el uso de streams emulados, se puede integrar el software AT61 SV Publisher para generar tráfico en redes sin saturación con el fin de analizar el ancho de banda en intervalos de segundos. Sin embargo, su latencia intrínseca depende de las prestaciones del equipo desde el cual se emula el envío de SV, por lo cual no se recomienda emplearlos en análisis relacionados al tiempo, ni en intervalos de milisegundos.

- Con la superposición de los paquetes de datos de SV de las MU sobre los SV emulados queda abierta la posibilidad de incluir emuladores en pruebas de saturación bajo el criterio de la pérdida de paquetes de datos emulados. Se evidenció que mientras no haya saturación no hay pérdida de paquetes, por otro lado, la pérdida de paquetes de datos emulados puede ser indicador de saturación.

- El uso del software Wireshark para captura de paquetes de datos es muy útil y se desempeña de manera adecuada en la captura de paquetes de datos de MU cerca de los 100 Mbps, ya que en las pruebas sin saturación se observó que el número de paquetes recibidos coincidía en un 100% con el número de paquetes esperados en los casos de las MU y los SV emulados desde el software AT 61 SV Publisher.

- El uso de la funcionalidad de publicación de SV en equipos como inyectores de señales debe ser evaluada en saturación antes de integrarlos a protocolos de prueba, ya que en el caso del ISA DRTS 66 se evidenció un aumento paulatino en el periodo de publicación de SV conforme crecía el bus de proceso. Esto puede deberse a configuración propia del equipo, ya que no está diseñado para este tipo de pruebas y en la trama de este no se observa diferencia con otros *streams* de la prueba, ni se tienen partes asociadas a confirmación, o similares, que puedan verse afectadas por la ocupación del ancho de banda.

- Por parte de equipos con interfaz tipo *Fast* (100 Mbps) y en topologías PRP, se podría hablar de suscripción hasta 8 *streams* de SV, de acuerdo con la estimación teórica. Este número puede ser de hasta 10 *streams* de SV con una configuración más ligera, según la estimación práctica y los resultados de este trabajo. En ambos casos, se trata de un número de MU mayor a las 6 que se mencionan en la guía de aplicación [11], y en esta diferencia se justifica la necesidad de realizar pruebas específicas y completas para cada aplicación en lugar de aplicar estrictamente las recomendaciones de las guías.

- Si se permite hacer una proyección lineal para redes de 1 Gbps, se podría hablar de un tráfico de hasta 80 *streams* de SV, lo que confirmaría lo expuesto en [24], donde se dice que la red Gbps es confiable más allá de las 23 MU.

5.2 Recomendaciones

- Para el desarrollo de trabajos futuros en esta línea de investigación que compartan la motivación de este trabajo de grado puede considerarse ampliar el alcance de la metodología de investigación incluyendo cualquiera de las exclusiones que se presentan en el capítulo 3. Así podrá desarrollarse un trabajo que defina criterios de diseño para la escalabilidad del bus de proceso en coherencia con la escalabilidad de las subestaciones, la interacción con otros protocolos, la acción de equipos de control y protección o la evaluación de otros indicadores como el presentado en [8] cuando se evalúa el desempeño en niveles de control superiores.

- En algunos casos, la necesidad de determinar la escalabilidad del bus de proceso en una subestación digital partirá de obras de ampliación o renovación parcial de sistemas existentes, por lo cual deberá tomarse en cuentas recomendaciones como las que se consigan en [17] respecto a la integración con sistemas más antiguos. Será fundamental en estos casos hacer levantamientos de información en campo de manera rigurosa para determinar la compatibilidad de los sistemas y equipos en aspectos como la disponibilidad de puertos, los tipos de conexión, la configuración de redundancia nativa de los IED, la longitud de onda de las señales (que determina el tipo de fibra óptica a empelarse), y los protocolos de sincronización de tiempo admitidos, entre otros. Del rigor con que se caracterice

sistema existente dependerá la fluidez de los diseños, la implementación y puesta en servicio, evitando reprocesos y costos adicionales.

- El protocolo de pruebas que se empleó en este trabajo tiene el propósito de servir como punto de partida en el complemento de la evaluación de desempeño que realizan fabricantes e integradores siguiendo las pruebas de conformidad indicadas en el estándar IEC 61850 [25], nunca reemplazarlas. Igualmente, los resultados de las pruebas no deben sobreponerse a las recomendaciones de las guías de aplicación como [11] sin la sistematización del protocolo de pruebas en consideración de las excepciones indicadas en el numeral 3.7 de este documento y que tengan impacto en el flujo de datos en los sistemas de comunicaciones.

- Para asegurar el mínimo error en el análisis de latencia y *jitter*, se recomienda el uso de equipos de altas prestaciones como PC de escritorio, con interfaces de red que no requieran el uso de convertidores, pues como se vio en el desarrollo de las pruebas, el uso de un equipo portátil con convertidor a USB 3.0 puede arrojar latencias promedio 5 veces mayores al registro en PC de escritorio con interfaz de red.

- Para lograr un mejor aprovechamiento del ancho de banda en redes de 100 Mbps se sugiere ejecutar pruebas de ocupación de ancho de banda y saturación con los valores reales del tráfico ocupado por los protocolos GOOSE y MMS, configurando la consulta de MMS en su máxima frecuencia de operación para obtener el mayor valor promedio; y analizando la información capturada durante la mayor “avalancha” GOOSE, es decir, el evento de subestación que implique mayor tráfico de esta mensajería, que suele ser la acción de la protección diferencial de barras. La ejecución de pruebas con valores de tráfico reales dará un resultado más certero que el obtenido al dejar un 40% de la red sin uso o simular un tráfico equivalente.

- Como producto de los resultados obtenidos en estas pruebas, se propone un procedimiento general para la ejecución de pruebas de saturación en el bus de proceso. Dicho procedimiento se presenta como diagrama de flujo en el anexo C.

A. Registro de pruebas

Prueba	Reporte de pruebas					
	SV reales	SV emulados	T captura [s]	N muestras esperadas	N muestras obtenidas	N muestras obtenidas/esperadas
Caract. MU1	1	0	61,8	296608	296789	100,1% / OK
Caract. MU2	1	0	63,9	306631	306630	100% / OK
Caract. AT61	0	1	18,1	86880	85855	98,8% / OK
Caract. ISA DRTS66	0	1	60,7	291178	291118	100% / OK
Caso A.01 LAN A	1	0	22,0	105600	104983	99,4% / OK
Caso A.01 LAN B	1	0	21,3	102048	102197	100,1% / OK
Caso A.02 LAN A	2	0	21,2	203042	203107	100% / OK
Caso A.02 LAN B	2	0	22,6	216918	216962	100% / OK
Caso A.03 LAN A	3	0	21,1	303552	303637	100% / OK
Caso A.03 LAN B	3	0	20,7	297360	297478	100% / OK
Caso B.04 LAN A	3	1	20,5	394176	394320	100% / OK
Caso B.04 LAN B	3	1	21,1	405120	405208	100% / OK
Caso B.05 LAN A	3	2	21,3	512376	512408	100% / OK
Caso B.05 LAN B	3	2	20,8	500369	500388	100% / OK
Caso B.06 LAN A	3	3	21,8	626774	615692	98,2% / OK
Caso B.06 LAN B	3	3	21,7	626064	615123	98,3% / OK
Caso C.07 LAN A	3	4	20,0	672281	672354	100% / OK
Caso C.07 LAN B	3	4	20,1	675519	675568	100% / OK
Caso C.08 LAN A	3	5	20,0	768411	768486	100% / OK
Caso C.08 LAN B	3	5	20,1	772054	772117	100% / OK
Caso C.09 LAN A	3	6	20,0	864512	857877	99,2% / OK
Caso C.09 LAN B	3	6	20,1	868206	861404	99,2% / OK
Caso C.10 LAN A	3	7	20,0	960870	927739	96,6% / OK
Caso C.10 LAN B	3	7	20,1	964666	931467	96,6% / OK
Caso C.11 LAN A	3	8	20,1	1061530	1001164	94,3% / OK
Caso C.11 LAN B	3	8	20,1	1061611	1001090	94,3% / OK
Caso C.12 LAN A	3	9	20,0	1152675	1065922	92,5% / OK
Caso C.12 LAN B	3	9	20,1	1158326	1071028	92,5% / OK
Caso C.13 LAN A	3	10	20,0	1248087	1141728	91,5% / OK
Caso C.13 LAN B	3	10	20,3	1266699	1147194	90,6% / OK
Caso C.14 LAN A	3	11	20,0	1345135	1215125	90,3% / OK
Caso C.14 LAN B	3	11	20,1	1350543	1219718	90,3% / OK
Caso C.15 LAN A	3	12	20,0	1440119	1292431	89,7% / NO
Caso C.15 LAN B	3	12	20,1	1447562	1299404	89,8% / NO

Prueba	Reporte de pruebas					
	SV reales	SV emulados	T captura [s]	N muestras esperadas	N muestras obtenidas	N muestras obtenidas/esperadas
Caso D.06 LAN A	3	3	20,0	691460	691523	100% / OK
Caso D.06 LAN B	3	3	20,1	694764	694818	100% / OK
Caso D.07 LAN A	3	4	20,0	787458	775612	98,5% / OK
Caso D.07 LAN B	3	4	20,1	791301	777210	98,2% / OK
Caso D.08 LAN A	3	5	20,0	883806	836599	94,7% / OK
Caso D.08 LAN B	3	5	20,1	887461	841130	94,8% / OK
Caso D.09 LAN A	3	6	20,0	979665	901186	92% / OK
Caso D.09 LAN B	3	6	20,1	984309	905687	92% / OK
Caso D.10 LAN A	3	7	20,0	1075486	1005614	93,5% / OK
Caso D.10 LAN B	3	7	20,1	1080756	1012884	93,7% / OK
Caso D.11 LAN A	3	8	20,0	1171820	1051877	89,8% / NO
Caso D.11 LAN B	3	8	20,1	1177279	1088113	92,4% / OK
Caso D.12 LAN A	3	9	20,0	1267573	1075379	84,8% / NO
Caso D.12 LAN B	3	9	20,1	1273796	1165857	91,5% / OK
Caso D.13 LAN A	3	10	20,0	1363810	1096017	80,4% / NO
Caso D.13 LAN B	3	10	20,1	1369934	1239394	90,5% / OK
Caso D.14 LAN A	3	11	20,0	1459818	1113767	76,3% / NO
Caso D.14 LAN B	3	11	20,1	1466729	1315046	89,7% / NO
Caso D.15 LAN A	3	12	20,0	1556404	1129907	72,6% / NO
Caso D.15 LAN B	3	12	20,1	1563326	1388326	88,8% / NO
Caso E.15 LAN A	3	12	20,0	1594393	1059684	66,5% / NO
Caso E.15 LAN B	3	12	20,1	1602200	1421309	88,7% / NO

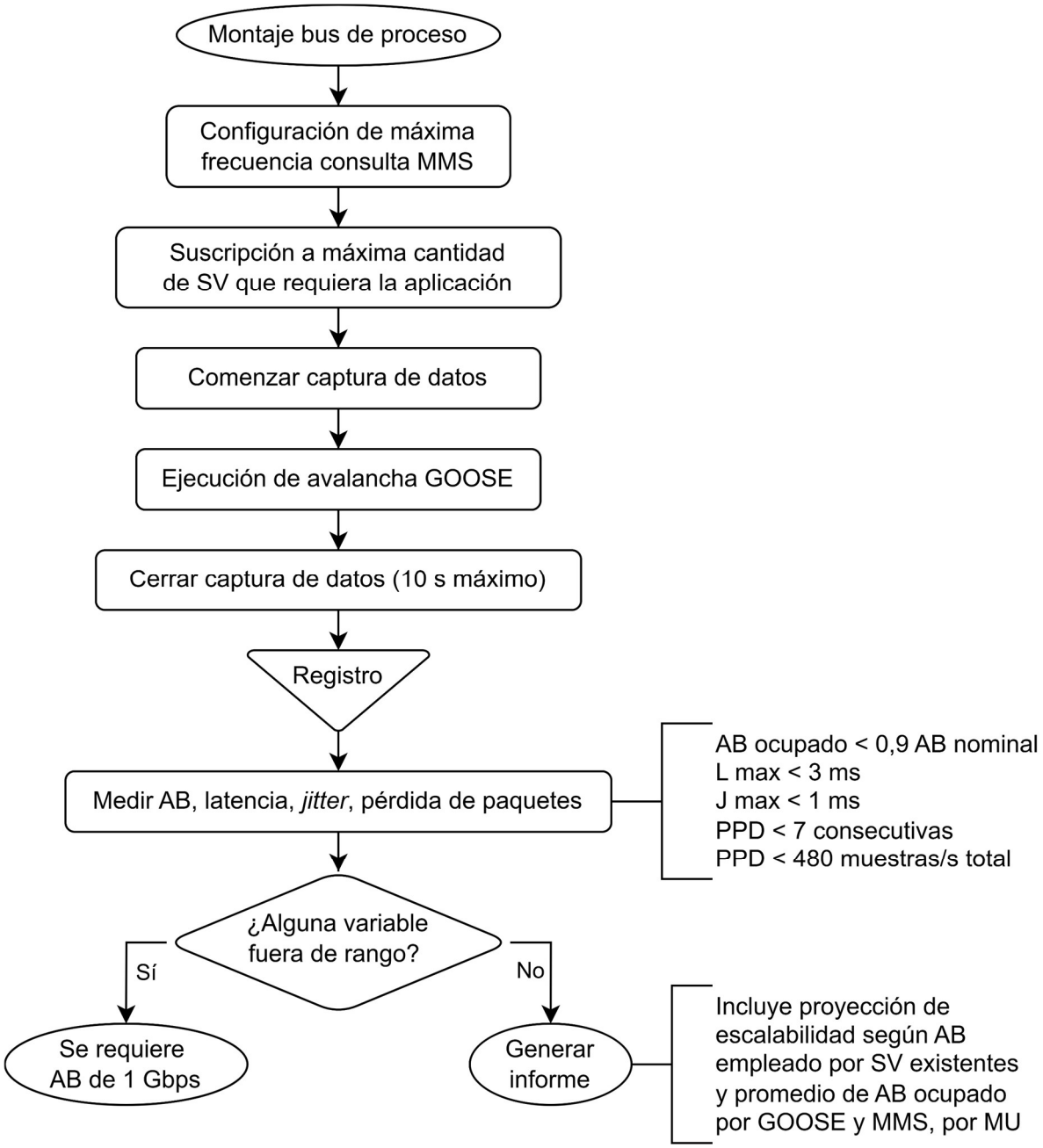
B. Evaluación de índices e indicador de escalabilidad

Prueba		AB [Mb]		L [ms]		J [ms]		PD		Índice AB	Índice L	Índice J	Índice PPD	Indicador E
		Disp.	Máx.	Tol.	Máx.	Tol	Máx.	Tol.	Perd.					
Caracterización MU1		1000	6,29	3,00	1,40	1,50	0,39	29661	0	0,99	0,53	0,74	1,00	0,78
Caracterización MU2		1000	5,10	3,00	1,08	1,50	0,33	30663	0	0,99	0,64	0,78	1,00	0,82
Caracterización AT61		1000	4,99	3,00	14,56	1,50	4,69	8688	0	1,00	0,00	0,00	1,00	0,40
Caracterización ISA66		1000	4,80	3,00	1,32	1,50	0,36	29118	0	1,00	0,56	0,76	1,00	0,79
Caso A.01 LAN A	SV1	90	6,11	3,00	1,20	1,50	0,35	10560	0	0,93	0,60	0,77	1,00	0,80
Caso A.01 LAN B	SV1	1000	6,11	3,00	1,15	1,50	0,34	10205	0	0,99	0,62	0,77	1,00	0,82
Caso A.02 LAN A	SV1	90	12,22	3,00	1,22	1,50	0,33	10152	0	0,86	0,59	0,78	1,00	0,78
	SV2	90	12,22	3,00	1,24	1,50	0,34	10152	0	0,86	0,59	0,78	1,00	0,78
Caso A.02 LAN B	SV1	1000	12,22	3,00	1,23	1,50	0,35	10846	0	0,99	0,59	0,77	1,00	0,81
	SV2	1000	12,22	3,00	1,24	1,50	0,35	10846	0	0,99	0,59	0,77	1,00	0,80
Caso A.03 LAN A	SV1	90	17,83	3,00	1,40	1,50	0,38	10118	0	0,80	0,53	0,75	1,00	0,74
	SV2	90	17,83	3,00	1,40	1,50	0,38	10118	0	0,80	0,53	0,75	1,00	0,74
	SV3	90	17,83	3,00	1,40	1,50	0,38	10118	0	0,80	0,53	0,75	1,00	0,74
Caso A.03 LAN B	SV1	1000	17,83	3,00	1,15	1,50	0,31	9912	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
	SV2	1000	17,83	3,00	1,15	1,50	0,32	9912	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
	SV3	1000	17,83	3,00	1,14	1,50	0,32	9912	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
Caso B.04 LAN A	SV1	90	22,63	3,00	1,09	1,50	0,31	9854	0	0,75	0,64	0,79	1,00	0,78
	SV2	90	22,63	3,00	1,08	1,50	0,31	9854	0	0,75	0,64	0,79	1,00	0,78
	SV3	90	22,63	3,00	1,09	1,50	0,31	9854	0	0,75	0,64	0,80	1,00	0,78
Caso B.04 LAN B	SV1	1000	22,63	3,00	1,14	1,50	0,32	10128	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
	SV2	1000	22,63	3,00	1,14	1,50	0,32	10128	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
	SV3	1000	22,63	3,00	1,13	1,50	0,32	10128	0	0,98	0,62	0,79	1,00	0,82
Caso B.05 LAN A	SV1	90	27,43	3,00	0,84	1,50	0,28	10248	0	0,70	0,72	0,82	1,00	0,80
	SV2	90	27,43	3,00	0,84	1,50	0,28	10248	0	0,70	0,72	0,81	1,00	0,80
	SV3	90	27,43	3,00	0,84	1,50	0,28	10248	0	0,70	0,72	0,81	1,00	0,80
Caso B.05 LAN B	SV1	1000	27,43	3,00	1,43	1,50	0,40	10007	0	0,97	0,52	0,73	1,00	0,77
	SV2	1000	27,43	3,00	1,44	1,50	0,40	10007	0	0,97	0,52	0,73	1,00	0,77
	SV3	1000	27,43	3,00	1,15	1,50	0,32	10007	0	0,97	0,62	0,79	1,00	0,82
Caso B.06 LAN A	SV1	90	32,25	3,00	0,85	1,50	0,26	10446	0	0,64	0,72	0,82	1,00	0,79
	SV2	90	32,25	3,00	0,86	1,50	0,27	10446	0	0,64	0,71	0,82	1,00	0,79
	SV3	90	32,25	3,00	0,86	1,50	0,27	10446	0	0,64	0,71	0,82	1,00	0,79
Caso B.06 LAN B	SV1	1000	32,25	3,00	0,78	1,50	0,25	10434	0	0,97	0,74	0,83	1,00	0,86
	SV2	1000	32,24	3,00	0,80	1,50	0,25	10434	0	0,97	0,73	0,83	1,00	0,86
	SV3	1000	32,24	3,00	1,10	1,50	0,30	10434	0	0,97	0,63	0,80	1,00	0,82
Caso C.07 LAN A	SV1	90	38,00	3,00	0,89	1,50	0,30	9604	0	0,58	0,70	0,80	1,00	0,77
	SV2	90	38,00	3,00	0,91	1,50	0,31	9604	0	0,58	0,70	0,80	1,00	0,76
	SV3	90	38,00	3,00	0,91	1,50	0,31	9604	0	0,58	0,70	0,80	1,00	0,76
Caso C.07 LAN B	SV1	1000	37,99	3,00	0,33	1,50	0,11	9650	0	0,96	0,89	0,93	1,00	0,94
	SV2	1000	37,99	3,00	0,34	1,50	0,11	9650	0	0,96	0,89	0,93	1,00	0,94
	SV3	1000	37,99	3,00	0,33	1,50	0,10	9650	0	0,96	0,89	0,93	1,00	0,94
Caso C.08 LAN A	SV1	90	43,07	3,00	0,87	1,50	0,24	9605	0	0,52	0,71	0,84	1,00	0,77
	SV2	90	43,07	3,00	0,87	1,50	0,23	9605	0	0,52	0,71	0,84	1,00	0,77
	SV3	90	43,07	3,00	0,86	1,50	0,25	9605	0	0,52	0,71	0,83	1,00	0,77
Caso C.08 LAN B	SV1	1000	43,06	3,00	0,82	1,50	0,25	9651	0	0,96	0,73	0,83	1,00	0,86
	SV2	1000	43,06	3,00	0,82	1,50	0,25	9651	0	0,96	0,73	0,83	1,00	0,86
	SV3	1000	43,06	3,00	1,00	1,50	0,30	9651	0	0,96	0,67	0,80	1,00	0,83
Caso C.09 LAN A	SV1	90	47,93	3,00	0,83	1,50	0,26	9606	0	0,47	0,72	0,83	1,00	0,76
	SV2	90	47,93	3,00	0,83	1,50	0,26	9606	0	0,47	0,72	0,83	1,00	0,76
	SV3	90	47,93	3,00	0,82	1,50	0,26	9606	0	0,47	0,73	0,83	1,00	0,76
Caso C.09 LAN B	SV1	1000	47,91	3,00	1,55	1,50	0,48	9647	0	0,95	0,48	0,68	1,00	0,74
	SV2	1000	47,91	3,00	1,55	1,50	0,48	9647	0	0,95	0,48	0,68	1,00	0,74
	SV3	1000	47,91	3,00	1,55	1,50	0,48	9647	0	0,95	0,48	0,68	1,00	0,74

Prueba		AB [Mb]		L [ms]		J [ms]		PD		Índice AB	Índice L	Índice J	Índice PPD	Indicador E
		Disp.	Máx.	Tol.	Máx.	Tol	Máx.	Tol.	Perd.					
Caso C.10 LAN A	SV1	90	51,59	3,00	0,85	1,50	0,24	9609	0	0,43	0,72	0,84	1,00	0,75
	SV2	90	51,59	3,00	0,86	1,50	0,24	9609	0	0,43	0,71	0,84	1,00	0,75
	SV3	90	51,59	3,00	0,86	1,50	0,24	9609	0	0,43	0,71	0,84	1,00	0,75
Caso C.10 LAN B	SV1	1000	51,65	3,00	0,24	1,50	0,09	9647	0	0,95	0,92	0,94	1,00	0,95
	SV2	1000	51,65	3,00	0,24	1,50	0,09	9647	0	0,95	0,92	0,94	1,00	0,95
	SV3	1000	51,65	3,00	0,24	1,50	0,09	9647	0	0,95	0,92	0,94	1,00	0,95
Caso C.11 LAN A	SV1	90	55,30	3,00	1,29	1,50	0,35	9650	0	0,39	0,57	0,77	1,00	0,68
	SV2	90	55,30	3,00	1,29	1,50	0,35	9650	0	0,39	0,57	0,77	1,00	0,68
	SV3	90	55,30	3,00	1,29	1,50	0,35	9650	0	0,39	0,57	0,77	1,00	0,68
Caso C.11 LAN B	SV1	1000	55,27	3,00	0,42	1,50	0,13	9651	0	0,94	0,86	0,91	1,00	0,92
	SV2	1000	55,27	3,00	0,35	1,50	0,11	9651	0	0,94	0,88	0,93	1,00	0,93
	SV3	1000	55,27	3,00	0,38	1,50	0,12	9651	0	0,94	0,87	0,92	1,00	0,93
Caso C.12 LAN A	SV1	90	58,91	3,00	1,10	1,50	0,31	9606	0	0,35	0,63	0,79	1,00	0,70
	SV2	90	58,91	3,00	1,12	1,50	0,32	9606	0	0,35	0,63	0,79	1,00	0,69
	SV3	90	58,91	3,00	1,10	1,50	0,31	9606	0	0,35	0,63	0,79	1,00	0,70
Caso C.12 LAN B	SV1	1000	59,02	3,00	0,64	1,50	0,20	9653	0	0,94	0,79	0,87	1,00	0,88
	SV2	1000	59,02	3,00	0,64	1,50	0,20	9653	0	0,94	0,79	0,87	1,00	0,88
	SV3	1000	59,02	3,00	0,64	1,50	0,20	9653	0	0,94	0,79	0,87	1,00	0,88
Caso C.13 LAN A	SV1	90	63,03	3,00	0,85	1,50	0,23	9601	0	0,30	0,72	0,84	1,00	0,73
	SV2	90	63,03	3,00	0,83	1,50	0,23	9601	0	0,30	0,72	0,85	1,00	0,73
	SV3	90	63,03	3,00	0,85	1,50	0,24	9601	0	0,30	0,72	0,84	1,00	0,73
Caso C.13 LAN B	SV1	1000	62,97	3,00	0,25	1,50	0,09	9744	0	0,94	0,92	0,94	1,00	0,94
	SV2	1000	62,97	3,00	0,24	1,50	0,09	9744	0	0,94	0,92	0,94	1,00	0,95
	SV3	1000	62,97	3,00	0,28	1,50	0,09	9744	0	0,94	0,91	0,94	1,00	0,94
Caso C.14 LAN A	SV1	90	66,79	3,00	1,05	1,50	0,29	9608	0	0,26	0,65	0,81	1,00	0,69
	SV2	90	66,79	3,00	1,03	1,50	0,29	9608	0	0,26	0,66	0,81	1,00	0,69
	SV3	90	66,79	3,00	1,41	1,50	0,41	9608	0	0,26	0,53	0,73	1,00	0,63
Caso C.14 LAN B	SV1	1000	66,76	3,00	0,27	1,50	0,09	9647	0	0,93	0,91	0,94	1,00	0,94
	SV2	1000	66,76	3,00	0,34	1,50	0,12	9647	0	0,93	0,89	0,92	1,00	0,93
	SV3	1000	66,76	3,00	0,28	1,50	0,09	9647	0	0,93	0,91	0,94	1,00	0,94
Caso C.15 LAN A	SV1	90	70,89	3,00	0,80	1,50	0,23	9601	0	0,21	0,73	0,85	1,00	0,72
	SV2	90	70,89	3,00	0,82	1,50	0,23	9601	0	0,21	0,73	0,85	1,00	0,71
	SV3	90	70,89	3,00	0,81	1,50	0,23	9601	0	0,21	0,73	0,85	1,00	0,72
Caso C.15 LAN B	SV1	1000	70,90	3,00	0,28	1,50	0,10	9650	0	0,93	0,91	0,94	1,00	0,94
	SV2	1000	70,90	3,00	0,33	1,50	0,11	9650	0	0,93	0,89	0,93	1,00	0,93
	SV3	1000	70,90	3,00	0,33	1,50	0,11	9650	0	0,93	0,89	0,93	1,00	0,93
Caso D.06 LAN A	SV1	90	71,60	3,00	0,86	1,50	0,25	9604	0	0,20	0,71	0,83	1,00	0,70
	SV2	90	71,60	3,00	0,87	1,50	0,25	9604	0	0,20	0,71	0,83	1,00	0,70
	SV3	90	71,60	3,00	0,87	1,50	0,26	9604	0	0,20	0,71	0,83	1,00	0,70
Caso D.06 LAN B	SV1	1000	71,59	3,00	0,24	1,50	0,08	9649	0	0,93	0,92	0,94	1,00	0,94
	SV2	1000	71,59	3,00	0,24	1,50	0,08	9649	0	0,93	0,92	0,94	1,00	0,94
	SV3	1000	71,59	3,00	0,29	1,50	0,10	9649	0	0,93	0,90	0,94	1,00	0,94
Caso D.07 LAN A	SV1	90	76,69	3,00	1,09	1,50	0,30	9603	0	0,15	0,64	0,80	1,00	0,66
	SV2	90	76,69	3,00	1,09	1,50	0,30	9603	0	0,15	0,64	0,80	1,00	0,66
	SV3	90	76,69	3,00	1,11	1,50	0,30	9603	0	0,15	0,63	0,80	1,00	0,66
Caso D.07 LAN B	SV1	1000	76,67	3,00	0,22	1,50	0,08	9650	0	0,92	0,93	0,94	1,00	0,95
	SV2	1000	76,67	3,00	0,21	1,50	0,08	9650	0	0,92	0,93	0,95	1,00	0,95
	SV3	1000	76,67	3,00	0,24	1,50	0,09	9650	0	0,92	0,92	0,94	1,00	0,94
Caso D.08 LAN A	SV1	90	80,65	3,00	1,32	1,50	0,37	9607	0	0,10	0,56	0,75	1,00	0,61
	SV2	90	80,65	3,00	1,33	1,50	0,37	9607	0	0,10	0,56	0,75	1,00	0,61
	SV3	90	80,65	3,00	1,33	1,50	0,37	9607	1	0,10	0,56	0,75	1,00	0,61
Caso D.08 LAN B	SV1	1000	80,63	3,00	0,73	1,50	0,22	9646	0	0,92	0,76	0,85	1,00	0,87
	SV2	1000	80,63	3,00	0,73	1,50	0,22	9646	0	0,92	0,76	0,85	1,00	0,87
	SV3	1000	80,63	3,00	0,86	1,50	0,26	9646	0	0,92	0,71	0,83	1,00	0,85

Prueba		AB [Mb]		L [ms]		J [ms]		PD		Índice AB	Índice L	Índice J	Índice PPD	Indicador E
		Disp.	Máx.	Tol.	Máx.	Tol	Máx.	Tol.	Perd.					
Caso D.09 LAN A	SV1	90	84,34	3,00	0,94	1,50	0,25	9605	0	0,06	0,69	0,83	1,00	0,67
	SV2	90	84,34	3,00	0,95	1,50	0,25	9605	0	0,06	0,68	0,83	1,00	0,67
	SV3	90	84,34	3,00	0,95	1,50	0,25	9605	0	0,06	0,68	0,83	1,00	0,67
Caso D.09 LAN B	SV1	1000	84,48	3,00	0,51	1,50	0,16	9650	0	0,92	0,83	0,89	1,00	0,90
	SV2	1000	84,48	3,00	0,51	1,50	0,16	9650	0	0,92	0,83	0,89	1,00	0,90
	SV3	1000	84,48	3,00	0,39	1,50	0,13	9650	0	0,92	0,87	0,92	1,00	0,92
Caso D.10 LAN A	SV1	90	88,47	3,00	1,11	1,50	0,30	9603	0	0,02	0,63	0,80	1,00	0,63
	SV2	90	88,47	3,00	1,11	1,50	0,30	9603	0	0,02	0,63	0,80	1,00	0,63
	SV3	90	88,47	3,00	1,10	1,50	0,30	9603	0	0,02	0,63	0,80	1,00	0,63
Caso D.10 LAN B	SV1	1000	88,80	3,00	0,48	1,50	0,15	9650	0	0,91	0,84	0,90	1,00	0,90
	SV2	1000	88,80	3,00	0,48	1,50	0,15	9650	0	0,91	0,84	0,90	1,00	0,91
	SV3	1000	88,80	3,00	0,48	1,50	0,15	9650	0	0,91	0,84	0,90	1,00	0,91
Caso D.11 LAN A	SV1	90	89,97	3,00	1,45	1,50	0,43	9605	1	0,00	0,52	0,71	1,00	0,57
	SV2	90	89,97	3,00	1,45	1,50	0,43	9605	0	0,00	0,52	0,71	1,00	0,57
	SV3	90	89,97	3,00	0,97	1,50	0,28	9605	2	0,00	0,68	0,81	1,00	0,65
Caso D.11 LAN B	SV1	1000	92,36	3,00	0,44	1,50	0,14	9650	0	0,91	0,85	0,91	1,00	0,91
	SV2	1000	92,36	3,00	0,44	1,50	0,14	9650	0	0,91	0,85	0,91	1,00	0,91
	SV3	1000	92,36	3,00	0,55	1,50	0,17	9650	0	0,91	0,82	0,89	1,00	0,89
Caso D.12 LAN A	SV1	90	89,73	3,00	0,99	1,50	0,28	9603	0	0,00	0,67	0,81	1,00	0,65
	SV2	90	89,73	3,00	1,03	1,50	0,29	9603	0	0,00	0,66	0,80	1,00	0,64
	SV3	90	89,73	3,00	1,02	1,50	0,29	9603	0	0,00	0,66	0,81	1,00	0,64
Caso D.12 LAN B	SV1	1000	96,82	3,00	0,31	1,50	0,10	9650	0	0,90	0,90	0,93	1,00	0,93
	SV2	1000	96,82	3,00	0,31	1,50	0,10	9650	0	0,90	0,90	0,93	1,00	0,93
	SV3	1000	96,82	3,00	0,38	1,50	0,12	9650	0	0,90	0,87	0,92	1,00	0,92
Caso D.13 LAN A	SV1	90	89,55	3,00	0,91	1,50	0,25	9604	0	0,01	0,70	0,83	1,00	0,66
	SV2	90	89,55	3,00	0,91	1,50	0,25	9604	0	0,01	0,70	0,84	1,00	0,66
	SV3	90	89,55	3,00	0,91	1,50	0,25	9604	0	0,01	0,70	0,83	1,00	0,66
Caso D.13 LAN B	SV1	1000	100,30	3,00	0,36	1,50	0,11	9647	0	0,90	0,88	0,93	1,00	0,92
	SV2	1000	100,30	3,00	0,25	1,50	0,09	9647	0	0,90	0,92	0,94	1,00	0,94
	SV3	1000	100,30	3,00	0,30	1,50	0,98	9647	0	0,90	0,90	0,35	1,00	0,75
Caso D.14 LAN A	SV1	90	89,37	3,00	1,14	1,50	0,33	9604	0	0,01	0,62	0,78	1,00	0,62
	SV2	90	89,37	3,00	1,14	1,50	0,33	9604	0	0,01	0,62	0,78	1,00	0,62
	SV3	90	89,37	3,00	1,13	1,50	0,33	9604	0	0,01	0,62	0,78	1,00	0,62
Caso D.14 LAN B	SV1	1000	104,30	3,00	0,51	1,50	0,16	9650	0	0,90	0,83	0,89	1,00	0,90
	SV2	1000	104,30	3,00	0,51	1,50	0,16	9650	0	0,90	0,83	0,89	1,00	0,90
	SV3	1000	104,30	3,00	0,38	1,50	0,12	9650	0	0,90	0,87	0,92	1,00	0,92
Caso D.15 LAN A	SV1	90	89,33	3,00	0,77	1,50	0,24	9607	0	0,01	0,74	0,84	1,00	0,68
	SV2	90	89,33	3,00	0,77	1,50	0,24	9607	0	0,01	0,74	0,84	1,00	0,68
	SV3	90	89,33	3,00	0,78	1,50	0,24	9607	0	0,01	0,74	0,84	1,00	0,68
Caso D.15 LAN B	SV1	1000	108,40	3,00	0,63	1,50	0,19	9650	0	0,89	0,79	0,87	1,00	0,88
	SV2	1000	108,40	3,00	0,55	1,50	0,17	9650	0	0,89	0,82	0,89	1,00	0,89
	SV3	1000	108,40	3,00	0,63	1,50	0,19	9650	0	0,89	0,79	0,88	1,00	0,88
Caso E.15 LAN A	SV1	90	89,95	3,00	1,03	1,50	0,28	9605	0	0,00	0,66	0,81	1,00	0,64
	SV2	90	89,95	3,00	1,04	1,50	0,29	9605	0	0,00	0,65	0,81	1,00	0,64
	SV3	90	89,95	3,00	1,04	1,50	0,29	9605	0	0,00	0,65	0,81	1,00	0,64
Caso E.15 LAN B	SV1	1000	121,30	3,00	0,30	1,50	0,10	9652	0	0,88	0,90	0,93	1,00	0,93
	SV2	1000	121,30	3,00	0,30	1,50	0,09	9652	0	0,88	0,90	0,94	1,00	0,93
	SV3	1000	121,30	3,00	0,29	1,50	0,10	9652	0	0,88	0,90	0,94	1,00	0,93

C. Protocolo sugerido para pruebas de saturación


Montaje bus de proceso
Configuración de máxima frecuencia consulta MMS
Suscripción a máxima cantidad de SV que requiera la aplicación
Comenzar captura de datos
Ejecución de avalancha GOOSE
Cerrar captura de datos (10 s máximo)
Registro
Medir AB, latencia, *jitter*, pérdida de paquetes
AB ocupado < 0,9 AB nominal
L max < 3 ms
J max < 1 ms
PPD < 7 consecutivas
PPD < 480 muestras/s total
¿Alguna variable fuera de rango?
Sí
No
Se requiere AB de 1 Gbps
Generar informe
Incluye proyección de escalabilidad según AB empleado por SV existentes y promedio de AB ocupado por GOOSE y MMS, por MU

Referencias y bibliografía

Todos los casos de estudio se encuentran registrados en:

Juan Posada Corrales [2025]. “*Process bus scalability with MU and emulated SV*”. IEEE Dataport. https://dx.doi.org/10.21227/ac3r-vk66

Las obras y demás material de carácter informativo de referencia, guía y consulta para este trabajo de grado de maestría, son:

[1] CEPAL Naciones Unidas. [2021]. “Tecnologías Digitales para un Nuevo Futuro”. Repositorio CEPAL.

[2] CIGRE. [2021]. “Necesidades, requerimientos y desafíos en la implementación de subestaciones digitales en Colombia”. Documento técnico.

[3] O. A Tobar, G. D. Rueda, H. A. Flórez, E. P. González, J. F. Botero, J. W. Branch. [2024]. "Importancia de la gestión del tráfico como una primera medida de ciberseguridad en redes inteligentes". EIEI ACOFI 2024.

[4] J. A. Yepes L. [2020]. "Análisis técnico económico de la aplicación de un sistema de control y protecciones para subestaciones eléctricas bajo el estándar IEC 61850". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Nacional.

[5] T. Arias G. [2020]. "Evaluación, selección y análisis de arquitecturas de comunicación para subestaciones digitales y su aplicación en empresas del sector eléctrico". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Nacional.

[6] X. Yang, N. Das, S. Islam. [2013]. "*Analysis of IEC 61850 for a reliable communication system between substations*". Artículo de conferencia. *Australasian Universities Power Engineering Conference*, AUPEC.

[7] A. Ikbal, S. Hussain. [2014]. "*IEC 61850-7-420 based Communication Configuration to Integrate DER to Distribution System*". Artículo de investigación. Repositorio ResearchGate.

[8] J. H. Vargas D. [2022]. "Desempeño de la interoperabilidad, escalabilidad y seguridad en las comunicaciones de una microrred de energía eléctrica". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Nacional.

[9] C. A. Hernández O. [2022]. "*Metodología para evaluar la pérdida/retraso de información en dispositivos inteligentes*". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Nacional.

[10] J. C. Carreño P., D. A. López S., O. J. Salcedo P. [2012]. "Criterios y consideraciones metodológicas y tecnológicas a tener en cuenta en el diseño e implementación del protocolo IEC 61850 en la automatización y protección de sistemas de potencia eléctrica". Artículo de investigación. Repositorio Institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

[11] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). [2013]. "*IEC/TR 61850-90-4: Communication networks and systems for power utility automation – Part 90-4: Network engineering guideline*". Primera edición.

[12] Laboratorio de Automatización y Comunicaciones Industriales, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Universidad Nacional de Colombia.

[13] HMV Ingenieros Ltda. [2021] "Subestaciones de alta y extra alta tensión." Tercera edición.

[14] CIGRE. [2013]. "*Applications of IEC 61850 Standard to Protection Schemes*". Documento técnico.

[15] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). [2011]. "*IEC 61850-9-2: Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3*". Segunda edición.

[16] A. Apostolov. [2023]. "*IEC 61850 Digitizing the Electric Power Grid".*

[17] CIGRE [2015]. "*Documentations Requirements Throughout the Lifecycle of Digital Substation Automation System*". Documento técnico.

[18] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). [2011]. "*IEC 61850-5: Communication networks and systems for power utility automation – Part 5: Communication requirements for functions and device models*". Segunda edición.

[19] Inter Range Instrumentation Group – sitio oficial. [Consultado 09 junio 2024]. https://www.irig.org/

[20] J. Matson. [2013]. "*Choosing the correct Time Synchronization Protocol and incorporating the 1756-TIME module into your Application*". Rockwell Automation.

[21] J. Krachenfels. [2012]. "*New Redundancy Protocols Promise Smarter, More Reliable Power Grid*". Electric Energy Y&D Magazine, vol 16.

[22] Wireshark. [2024]. https://www.wireshark.org/

[23] Axon Group. [2022]. Simulador AT61. https://axongroup.com.co/productos/at61-simulador/

[24] D. Ingram, P. Schaub, R. Taylor, D. Campbell. [2013]. "*Performance analysis of IEC 61850 sampled value process bus networks*". IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9.

[25] Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). [2011]. "*IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation".* Segunda edición.

[26] IEEE. [2020]. "*IEEE Std 1588-2019 - Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*". Tercera revisión.

[27] Instrumentazioni Sistemi Automatici (ISA). [2011]. "Instrumento DRTS 66 para prueba de relés de protección, medidores de energía y transductores". DOC.SIS10170. Rev. 14.

[28] Altanova Group. [2021]. "DRTS 66 – Equipo Automático de Ensayo para Relés".

I. A. Vargas. [2014]. "Sistemas de Fibra Óptica". Universidad Nacional San Luis Gonzaga de ICA. Prenti Hall México. Libro.

Draw.io – software gratuito online. [Empleado entre mayo y octubre de 2024] https://www.drawio.com/

Plantilla para la presentación de Tesis UNAL. [2014]. SINAB.