



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Elección de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas mediante un modelo multicriterio

Mauricio Hernández Ossa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización
Medellín, Colombia
2022

Elección de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas mediante un modelo multicriterio

Mauricio Hernández Ossa

Trabajo de profundización presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Administrativa

Director (a):

Sergio Botero D. Sc

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2022

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.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Mauricio Hernández

Mauricio Hernández Ossa

Fecha 01/08/2022

Resumen

Elección de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas mediante un modelo multicriterio

Los sistemas de automatización de subestaciones (SAS) son cada vez más implementados en las subestaciones eléctricas en Colombia debido a la integración de nuevas tecnologías, en dichas implementaciones se puede plantear diferentes alternativas dependiendo de qué criterios se evalúen. Ahora bien, buscando evaluar los criterios y que nos indique que alternativa es la más adecuada implementar, esta investigación propone la evaluación de un modelo multicriterio, debido que se han convertido en una herramienta para soportar y apoyar la toma de decisión, que indique cual es la mejor alternativa a implementar.

En este sentido se ha realizado una revisión literaria de los métodos multicriterio y de las alternativas respecto a sistemas de automatización de subestaciones.

Posterior se realizó cuestionario a seis expertos en desarrollo y mantenimiento de los sistemas de automatización de subestaciones para definir los criterios, luego se realizaron talleres con la participación de los expertos para asignar los pesos o la ponderación y finalmente se evaluó el modelo multicriterio con la selección de la alternativa que el modelo da como resultado.

Palabras clave: Sistema de automatización de subestaciones, método AHP, métodos multicriterio.

Abstract

Choosing an automation system in electrical substations through a multicriteria model

Substation automation systems (SAS) are increasingly implemented in electrical substations in Colombia due to the integration of new technologies, in these implementations different alternatives can be proposed depending on what criteria are evaluated. Now, seeking to evaluate the criteria and to indicate which alternative is the most appropriate to implement, this research proposes the evaluation of a multi-criteria model, because they have become a tool to support and support decision-making, indicating which is the best alternative to implement.

In this sense, a literature review of multicriteria methods and alternatives regarding substation automation systems has been carried out.

Subsequently, a questionnaire was administered to six experts in the development and maintenance of substation automation systems to define the criteria, then workshops were held with the participation of the experts to assign the weights or weighting and finally the multicriteria model was evaluated with the selection of the alternative that the model results in.

Keywords: Substation automation system, AHP method, multicriteria methods.

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Lista de figuras.....	XI
Lista de tablas	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XIV
Introducción	1
Problema de investigación	3
Objetivos de investigación	5
1. Marco Teórico.....	7
1.1 Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio	7
1.1.1 Método de teoría de la utilidad de multiatributo (MAUT)	10
1.1.2 Proceso Analítico jerárquico (AHP).....	10
1.1.3 Método ELECTRE	11
1.1.4 Método PROMETHEE	11
1.1.5 Método TOPSIS.....	11
1.2 Sistemas de automatización de subestaciones	12
1.2.1 Control convencional de subestaciones.....	15
1.2.2 Sistema de automatización de subestaciones moderno.....	17
1.2.3 Sistema de automatización de subestaciones digitales.....	18
1.3 Estado del arte	21
2. Metodología	25
2.1.1 Elección del método	25
2.1.2 Selección de expertos.....	34
2.1.3 Entrevistas para definición de criterios y subcriterios.....	36
2.1.3.1 Cuestionario inicial.....	38
2.1.3.2 Reducción de criterios	42
2.1.3.3 Alternativas de solución.....	43
2.1.3.4 Descripción de criterios seleccionados	43
2.1.4 Sesión con expertos para la definición de pesos	47
2.1.5 Asignación de calificación a las diferentes alternativas.....	49
3. Caso de estudio en la subestación Sochagota.....	51
3.1 Descripción de la subestación Sochagota	51
3.2 Desarrollo de la metodología.....	55

4. Conclusiones y recomendaciones	61
4.1 Conclusiones	61
4.2 Recomendaciones	62
A. Anexo: Detalles del cálculo de los pesos de la aplicación del método AHP.....	63
B. Anexo: Detalles del cálculo de la consistencia del modelo AHP.	67
5. Bibliografía.....	69

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Clasificación de los más relevantes MCDM	9
Figura 2: Evaluación en el tiempo de los sistemas de automatización.....	14
Figura 3: Sistema de automatización convencional	16
Figura 4: Sistema de automatización con IED	18
Figura 5: Comparación entre subestación convencional y digital.....	19
Figura 6: Niveles de control de un sistema de automatización con IED en una subestación digital.....	20
Figura 7: Niveles de control de diferentes sistemas de automatización	21
Figura 8: Modelo AHP	27
Figura 9: Pesos o ponderación del Modelo AHP	29
Figura 10. Diagrama de la selección de expertos.	35
Figura 11. Diagrama de la sesión de expertos para definición de criterios y subcriterios.	37
Figura 12. Respuesta a la pregunta 1 del cuestionario	40
Figura 13. Respuesta a la pregunta 3 del cuestionario	41
Figura 14. Diagrama de la sesión de expertos para asignar pesos a los criterios.	48
Figura 15. Diagrama de la sesión de expertos para asignar pesos a los criterios.	49
Figura 16. Diagrama Unifilar subestación Sochagota	52
Figura 17. Subestación Sochagota	53
Figura 18. Diagrama Unifilar subestación Sochagota	54
Figura 19. Modelo AHP para la toma de decisión	55
Figura 20. Sistema de automatización con IED implementado en S/E Sochagota.....	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Lista de métodos de decisión multicriterio	8
Tabla 2: Métodos MCDM utilizado en con la toma de decisión en sistemas eléctricos. ...	24
Tabla 3: Tabla de escalas fundamentales	27
Tabla 4: Matriz de comparación con ponderación.	30
Tabla 5: Matriz de comparación con ponderación y suma de pesos.....	30
Tabla 6: Matriz de comparación con ponderación normalizada	31
Tabla 7: Matriz de comparación con ponderación normalizada	31
Tabla 8: Matriz de comparación con criterio 1, 3 alternativas	32
Tabla 9: Matriz de comparación con criterio y alternativas ponderación normalizada	32
Tabla 10: Índice aleatorio de consistencia	34
Tabla 11: Índice aleatorio de consistencia	34
Tabla 12: Perfil de los expertos tomadores de decisión.	35
Tabla 13: Respuesta a la pregunta 2 del cuestionario	40
Tabla 14: Criterios y subcriterios	42
Tabla 15: Alternativas método AHP	43
Tabla 16: Confiabilidad de alternativas	44
Tabla 17: Costos de alternativas	45
Tabla 18: Disponibilidad de alternativas.....	46
Tabla 19: Análisis multicriterio AHP.....	55
Tabla 20: Análisis multicriterio AHP – Normalizado	56
Tabla 21: Resultados de la evaluación AHP	57
Tabla 22: Resultados de la evaluación AHP con alternativas	57
Tabla 23: Cálculo de consistencia	57
Tabla 24: Evaluación de criterio 1, la confiabilidad respecto las alternativas	63
Tabla 25: Evaluación de criterio 1, la confiabilidad respecto las alternativas	63
Tabla 26: Evaluación de criterio 2, el conocimiento respecto las alternativas	63
Tabla 27: Evaluación de criterio 2, el conocimiento respecto las alternativas	64
Tabla 28: Evaluación de criterio 3, la experiencia respecto las alternativas	64
Tabla 29: Evaluación de criterio 3, la experiencia respecto las alternativas	64
Tabla 30: Evaluación de criterio 4, el desempeño respecto las alternativas.....	64
Tabla 31: Evaluación de criterio 4, el desempeño respecto las alternativas.....	65
Tabla 32: Evaluación de criterio 5, el costo respecto las alternativas.....	65
Tabla 33: Evaluación de criterio 5, el costo respecto las alternativas.....	65

Tabla 34. Evaluación de criterio 6, vida útil respecto las alternativas	66
Tabla 35. Evaluación de criterio 6, la vida útil respecto las alternativas	66
Tabla 36. Evaluación de criterio 7, la disponibilidad respecto las alternativas	66
Tabla 37. Evaluación de criterio 7 respecto las alternativas	66
Tabla 38. Análisis multicriterio AHP	67
Tabla 39. Vector fila total, cociente AHP	67
Tabla 40. Coeficiente de consistencia	68

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MCDM	Método de toma de decisión multicriterio
MCDA	Método de ayuda a la toma de decisión multicriterio
MODM	Método de toma de decisión con múltiples objetivos
MADM	Método de decisión con múltiples atributos
AHP	Método analítico de jerarquización
SAS	Sistema de automatización de subestaciones
SE	Subestaciones eléctricas
IHM	Interfaz Hombre-Maquina

Introducción

Las subestaciones eléctricas en Colombia existen desde comienzos del siglo XX, cuando se instalaron los primeros sistemas eléctricos. Bien, ahora una subestación eléctrica es un conjunto de dispositivos eléctricos, que conforman un sistema eléctrico de potencia, algunas de sus funciones es la transmisión, conversión, regulación y distribución de la energía eléctrica.

La subestación eléctrica tradicionalmente es operada con mano de obra de un operador o asistente que realiza las diferentes actividades en el perímetro de la subestación, para una operación adecuada.

A finales de la década de 1990 se empezaron a implementar avances tecnológicos que permitieran a las compañías de energía eléctrica responder rápidamente a las actividades operativas necesarias dentro de una subestación eléctrica para cumplir con el servicio de energía que requiere Colombia.

A partir del año 2000 se han realizado implementaciones parciales de elementos automáticos en subestaciones eléctricas hasta llegar a convertirse en un sistema de automatización de subestaciones en busca de garantizar un buen servicio y seguridad en operación entre otros.

Como lo indica Ingram & Ehlers (2007) las subestaciones eléctricas tradicionales se han convertido en procesos productivos ineficientes, que no cumplen con los estándares comerciales. El sistema energético eléctrico se ha visto obligado a integrar nuevas tecnologías en los procesos, teniendo en cuenta la optimización, creatividad, desarrollo, dando como resultado los sistemas de automatización de subestaciones.

Así pues, la investigación apunta hacia lo que propone la Unidad de Planeación Minero-Energética UPME (2020) “El PEN 2020-2050 le apunta a que la transformación energética sea habilitante para el desarrollo sostenible del país” (p.19). Lo anterior se entiende como un plan energético nacional de ser competitivos con el panorama 2020 – 2050.

Con el objetivo de contextualizar un poco al lector, La UPME es una Unidad Administrativa Especial del orden Nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, que tiene como misión planear el desarrollo minero-energético, apoyar la formulación e implementación de la política pública y generar conocimiento e información para un futuro sostenible a nivel nacional.

La Unidad de planeación minero-energética presentó el plan energético nacional 2020-2050 donde menciona (2020) varios aspectos como son “Actualización, Modernización, Inflexión y Disrupción en los que se agrupan iniciativas con grados similares de riesgo tecnológico” (p.3). en el sector energético en Colombia, y estos aspectos fueron tenidos en cuenta en (Unidad de Planeación Minero Energética, 2020) “un modelo energético integrado con cuyos resultados se puede evaluar cada camino en términos energéticos, ambientales y económicos” (p.3). De esta manera vamos articulando la importancia que tiene el sector energético y sus implicaciones y consecuencias sociales.

Para conseguir esa actualización y modernización del sistema energético se requiere de la integración de (Unidad de Planeación Minero energética, 2018) “las tecnologías de la información y las tecnologías de manufactura avanzada” (p.19). que componen lo que se denomina la industria 4.0, que la componen nueve tendencias tecnológicas que son (Unidad de Planeación Minero energética, 2018) “Simulación, Sistemas de integración horizontal y vertical, Inteligencia Artificial, Ciberseguridad, Big Data, Internet de las Cosas, Blockchain, Impresión 3D y Robótica” (p.19).

En este sentido la integración de sistemas de automatización puede presentar las siguientes configuraciones básicas, medias y altas, lo cual implica un apoyo mínimo, medio o total de un asistente en el perímetro de la subestación para que el sistema funcione bien. Implementar un sistema de automatización de subestaciones, implica hacer una formulación y evaluación sobre cómo debe ser su configuración, y como resultado se debe tomar una decisión que tenga en cuenta costos, riesgos y beneficios. Por tal razón es necesario buscar la decisión más apropiada, en este sentido se evidencia la necesidad de identificar cuál es la viabilidad.

Ahora bien, para determinar cuál es la selección se propondrá utilizar un modelo multicriterio que incluya criterios técnicos y financieros, que determine la viabilidad en las configuraciones de sistemas de automatización en subestaciones.

Por tal razón, en el presente trabajo de investigación se presenta de la siguiente forma: capítulo 2 el marco teórico donde se realiza la revisión de los métodos de decisión

multicriterio (MCDM), los sistemas de automatización de subestaciones (SAS), el capítulo 3 se presenta el estado del arte, posterior en el capítulo 4 se presentan la metodología a utilizar y el modelo propuesto, para finalizar con el capítulo 5 en donde se presenta las conclusiones y recomendaciones.

Problema de investigación

Las subestaciones eléctricas en Colombia han evolucionado desde su comienzo en el siglo pasado, iniciando con la necesidad de una persona capacitada que siempre tenía que estar presente para poder hacer control, toma de medidas y supervisión del estado general de la subestación eléctrica en tiempo real, al pasar los años, poco a poco se ha visto modificado con la integración de elementos tecnológicos que mejoran la condición de servicio, de operación y de supervisión, transfiriendo actividades que realizaba los operadores a técnicas automatizadas.

Estas técnicas automatizadas han evolucionado y se han integrado en un sistema que se conoce como el sistema de automatización de subestación (SAS), el cual se define como el sistema que permite controlar y operar de una manera más segura y eficiente, aportando la información necesaria en el momento necesario con el fin de evitar fallas en la operación de la subestación.

Implementar un sistema de automatización de subestaciones, no es una decisión simple debido que implica costos, beneficios, tiempo de implementación, vida útil, entre otros. De igual forma existen diferentes niveles de complejidad en estos sistemas, por tal razón es necesario buscar la decisión óptima, en este sentido se evidencia la necesidad de identificar cual es configuración más adecuada.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente la pregunta de investigación es:

¿Cuál es la configuración más adecuada de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas usando un modelo multicriterio; de igual forma se puede establecer la viabilidad de estos sistemas en sus distintas configuraciones al enfrentarlos a la alternativa de no implementarlos?, y ¿cómo validarlo en el caso específico de la subestación Sochagota en Paipa, Boyacá?

Algunas preguntas orientadoras de la investigación son, ¿cómo evaluar los criterios en un análisis que sirva para determinar cuál es la viabilidad de un sistema de automatización de subestaciones eléctricas para sus diferentes configuraciones?, ¿El sistema de automatización de subestaciones puede ser viable considerando la variedad de criterios

para la toma de esta decisión?, son algunas preguntas secundarias que guiaran la investigación.

La implementación de sistemas de automatización en subestaciones implica una transformación en el proceso y en el negocio, en donde se debe buscar eficiencias y operaciones seguras.

Nava & Marbelis (2009) mencionan que “actualmente el proceso de transformación que trae consigo los avances tecnológicos, la automatización de los procesos, el desarrollo económico, el crecimiento de muchas empresas, dificulta la permanencia y el progreso de los negocios en su entorno” (p.607). Así pues, la transformación de procesos se basa en innovación y avances tecnológicos, los sistemas de automatización de subestaciones es uno de ellos, y lo anterior implica que se realicen estudios de viabilidad que permitan tomar optimas decisiones, de tal forma, que se gestionen bien los recursos y permanezcan en el negocio siendo competitivos. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta los documentos técnicos sobre demanda y eficiencia energética de la UPME, como la demanda de energía eléctrica y potencia máxima en Colombia y el plan energético nacional 2050, en donde se muestra un crecimiento de la demanda de energía eléctrica lo cual genera un considerable aumento de la oferta y esto conlleva a mayor infraestructura relacionada a subestación eléctricas. Lo anterior muestra una tendencia de la necesidad de crear, ampliar y renovar el sistema interconectado nacional compuesto por subestaciones eléctricas. Por esta razón, se hace necesario realizar esta investigación para poder determinar cuál es la configuración más adecuada de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas usando un modelo multicriterio; de igual forma se puede establecer la viabilidad de estos sistemas en sus distintas configuraciones al enfrentarlos a la alternativa de no implementarlos. Los principales criterios para tener en cuenta son:

Financiero, con el aumento en la inversión del sistema de automatización en subestaciones eléctricas y la disminución en costos de operación en relación con el tiempo de uso.

Técnico, debido que el operador en subestaciones eléctricas no realizara maniobras, sino que se realizarían desde el sistema de automatización de la subestación.

Ahora bien, el análisis multicriterio como lo señala Romero (1996) “se puede visualizar como una herramienta analítica de una gran potencialidad en los procesos de ingeniería” (p.18). Por lo tanto, se considera una metodología muy apropiada para el problema en cuestión.

Objetivos de investigación

Dado el anterior planteamiento del problema, los objetivos de este trabajo son:

Determinar la configuración más apropiada de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas y su viabilidad mediante un modelo que considere diferentes criterios.

- Realizar una revisión de la literatura sobre la evaluación e implementación de los sistemas de automatización de subestaciones eléctricas y de la utilización de modelos multicriterio.
- Definir los diferentes criterios que deben ser considerados para analizar la implementación de los sistemas de automatización de subestaciones eléctricas.
- Diseñar y evaluar un modelo de análisis multicriterio para la selección de un sistema de automatización en subestaciones.
- Validar el modelo en el estudio de caso específico de la subestación Sochagota en Paipa, Boyacá, para establecer la viabilidad técnica y financiera de la misma.

1. Marco Teórico

Para la construcción del presente marco teórico se realizó una revisión literaria, en donde se expone las categorías del trabajo. Este marco teórico se construyó con la búsqueda bibliográfica en bases de datos, en tal sentido se encontró información relevante que es la materia prima, así pues, se presentan la definición de métodos multicriterio, su clasificación, también la definición de sistemas de automatización de subestaciones y su clasificación, para dar al lector un contexto de los temas principales del trabajo de investigación.

1.1 Métodos de Análisis de Decisión Multicriterio

Se inicia este referente conceptual mencionando que la toma de decisión son procesos complejos que involucra múltiples criterios, por lo cual es necesario conocer los diferentes métodos que involucren los criterios que se debe tener en cuenta y ofrezca la mejor alternativa como respuesta. Por eso es importante conocer la herramienta adecuada a implementar que tenga en cuenta los criterios seleccionados y que ofrezca seguridad del resultado.

Según lo anterior es adecuado explorar los métodos denominados análisis de decisión multicriterio (MCDM) o métodos de ayuda a la toma de decisión multicriterio (MCDA), que pueda ofrecer solución con seguridad y transparencia a la toma de decisión, permite a tomadores de decisión elegir, clasificar o ponderar alternativas teniendo en cuenta una evaluación según varios criterios o subcriterios definidos por los mismos tomadores de decisión.

Los métodos de toma de decisión con múltiples criterios o llamados multicriterio son utilizados para la toma de decisión de problemas de diferentes áreas del conocimiento, como ingeniería, administración, finanzas, etc.

Estos modelos pueden incluir criterios tanto cualitativos como cuantitativos y pueden ser categorizados como se representa en la gráfica que plantea San Cristóbal (2011).

Tabla 1: Lista de métodos de decisión multicriterio

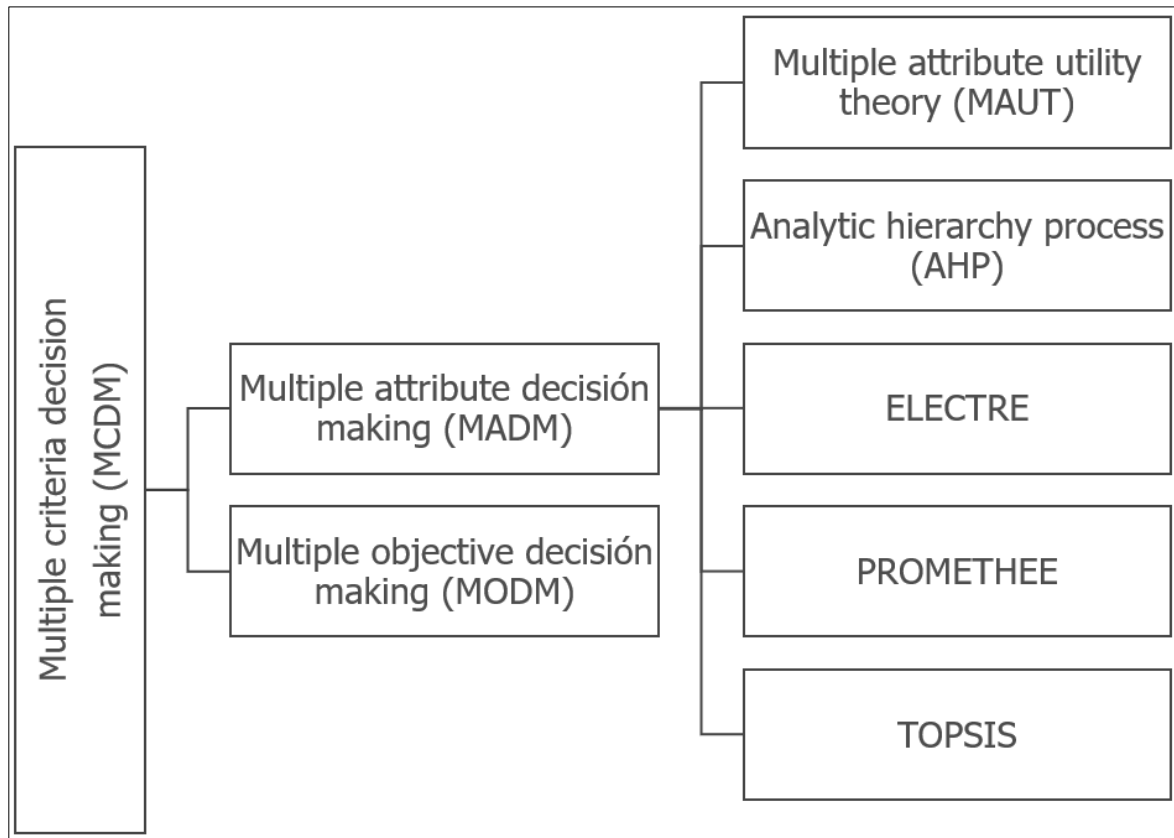
Categoría	Métodos
Métodos elementales	Suma ponderada, método lexicográfico, métodos conjuntivos, métodos disyuntivos, método maximin
Criterio de sinterización individual	TOPSIS, MAVT (Teoría de valor multi-atributo), UTA (Teoría de la utilidad aditiva), SMART (Clasificación técnica simple multi-atributo), MAUT (Teoría de la utilidad multi-atributo), AHP (Proceso analítico Jerárquico), EVAMIX, Suma ponderada difusa, maximin difuso
Métodos de clasificación	ELECTRE, PROMETHEE, MELCHIOR, ORESTE, REGIME
Métodos mixtos	QUALIFLEX, método difuso conjuntivo/disyuntivo, Método Martel y Zaras

Fuente: (San Cristóbal, 2011)

Según indica Zhou, Ang, & Leng Poh (2006), la toma de decisión multicriterio (MCDM) se divide en toma de decisión con múltiples objetivos (MODM) y en toma de decisión con atributos múltiples (MADM). Y son los métodos MCDM los utilizados en proyectos de energía eléctrica.

Los MADM se refiere a tomar decisiones de preferencia evaluando y priorizando todas las alternativas que generalmente se caracterizan por múltiples atributos en conflicto.

La figura 1 ilustra la clasificación con los más relevantes MADM.

Figura 1. Clasificación de los más relevantes MCDM

Fuente: Construcción propia basado en Zhou, Ang, & Leng Poh (2006)

Según el método de teoría de la utilidad de multiatributo (MAUT) indica a los tomadores de decisiones considerar sus preferencias en forma de funciones de utilidad de múltiples atributos. El proceso de la jerarquía analítica (AHP) es un método que consiste en estructuración, medición y síntesis, que puede ayudar a los tomadores de decisiones a hacer frente a situaciones, otorgando ponderaciones a criterios y por cálculos llegar a alguna alternativa. El método ELECTRE es un método que permite evaluar varias alternativas sin perder la integridad de cada uno de ellos. Permite jerarquizar los cursos de acción posibles y seleccionar a los que reúnen los criterios de aceptabilidad. El método PROMETHEE compara alternativas bajo diferentes criterios o diferentes ponderaciones. El método TOPSIS permite identificar una solución con la distancia más corta a la solución positiva ideal y la distancia más larga a la solución negativa ideal.

A continuación, se profundizará un poco más al lector dentro de los métodos más relevantes.

1.1.1 Método de teoría de la utilidad de multiatributo (MAUT)

Es un método que consiste en identificación y análisis de multiatributo, en donde el elemento diferenciador es la derivación de un multiatributo.

Inicialmente se debe establecer un objetivo y los atributos para conseguir la decisión. Como lo menciona Kim & Song (2009) El método más común es el cuestionario o la entrevista a expertos que estén familiarizados con los componentes asociados con el objetivo o que puedan determinar los atributos clave a través de investigaciones sobre referencias pertinentes y excluyendo atributos innecesarios.

Se debe iniciar con la asignación de rangos de los atributos, se debe definir límite superior e inferior para determinar la escala en la cual se evaluará el método.

1.1.2 Proceso Analítico jerárquico (AHP)

Este método consiste en una estructura analítico jerárquico de soporte para la toma de decisión multicriterio el cual se basa en la jerarquización y compara dos enfoques de resolución de problemas, el enfoque deductivo y el enfoque de sistema. Este método incorpora conocimiento, experiencia, acuerdos entre los tomadores de decisión debido que deben desglosar el problema en criterios y subcriterios con el objetivo de dar pesos a criterios con el objetivo de dar como resultado la mejor alternativa para la solución del problema en cuestión.

El método está basado en matrices de comparación por pares. Cada elemento de la matriz debe tener un peso, dicho peso está definido por Saaty (1990) y debe ser asignado por el o los tomadores de decisión. Este método se explicará más profundamente en la metodología.

1.1.3 Método ELECTRE

El método ELECTRE lo define Liao & Xu (2014) en los conceptos de concordancia y discordancia y el principio democrático de mayoría sin fuerte minoría que se puede interpretar como: en el caso que la alternativa a tiene un mejor rendimiento que la alternativa b en la mayoría de los criterios y no hay criterios de tal manera que b sea más fuerte que a , por lo tanto, a tiene preferencia sobre b . El método ELECTRE requiere que las entradas de los parámetros de preferencia puedan ser determinadas por el tomador de decisiones directamente o a través de inferencia a partir de las respuestas a una serie de preguntas (p. 1704-1705).

1.1.4 Método PROMETHEE

El método PROMETHEE lo define Liao & Xu (2014) como un método claro, fácil de definir e implementar y que consisten en una derivación de una clasificación de las alternativas basado en el flujo positivo, el flujo negativo y el flujo neto. Se han propuesto muchos tipos diferentes de métodos de PROMETHEE. El PROMETHEE I (Clasificación parcial), PROMETHEE II (clasificación completa), PROMETHEE III (Clasificación basada en intervalos), PROMETHEE IV (Caso continuo), PROMETHEE V propuesto para manejar problemas con limitaciones de segmentación, PROMETHEE VI se introdujo para la representación del cerebro humano. La familia de métodos PROMETHEE se ha utilizado en muchos campos como la gestión del medio ambiente, los negocios y la gestión financiera, la tecnología de la información, la selección de proyectos y así sucesivamente (p. 1705).

1.1.5 Método TOPSIS

El método TOPSIS, por sus siglas en inglés Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (Técnica para ordenar preferencias por similitud a la solución ideal).

Yalcin, Bayrakdaroglu, & Kahraman (2012) describe el método en el concepto de que la mejor elección entre diferentes alternativas es aquella que minimiza la distancia a la Solución Positiva Ideal (PIS) y a la vez maximiza la distancia a la Solución Negativa Ideal (NIS), es decir, la mejor y peor soluciones teórica (p. 356).

1.2 Sistemas de automatización de subestaciones

La automatización en subestaciones eléctricas se ha convertido en un requisito fundamental para asegurar una buena operación del sistema eléctrico. Dependiendo del nivel de automatización que se contemple en la subestación, dependerá su grado de inversión y seguridad.

Los sistemas de automatización de subestaciones permiten la innovación del transporte de energía eléctrica, en este sentido Bravo, Santana, & Rodon (Kaber y Draper, 2004, como se citó en Bravo, Santana, & Rodon, 2014) mencionando que “La esencia del rol automatizar se relaciona con la medida en que la tecnología realiza actividades reemplazando al humano” (p.269). Dando un principio de definición que consiste en que la automatización minimiza la operación que realiza el humano.

Zhiyu (2022) menciona que la automatización es ampliamente utilizada en la subestación eléctrica principalmente para llevar a cabo una serie de trabajos de gestión en el que los computadores reemplazan la operación manual en la subestación, bajo la aplicación común de tecnologías de la comunicación y soporte del computador. Para estas tareas de gestión sus contenidos son diversos e incluye control, protección, supervisión, medida entre otras.

En donde el sistema de automatización puede efectivamente garantizar la seguridad y estabilidad de la operación de la subestación y fuente de alimentación.

El sistema de automatización de la subestación tiene tres funciones principales.

- La primera función es la recopilación de datos. Para que el sistema de automatización de la subestación pueda procesar eficazmente los datos de estado, medición y recopilar los datos analógicos y datos digitales, y transmitir esos parámetros a un centro de control en tiempo real, lo cual es conveniente para todos los aspectos del trabajo.

- La segunda función es la protección. Es decir, puede recopilar eficazmente la información de actuación de un relé de protección, y también recopilar la información de estado de seccionadores, a fin de proteger mejor todos los equipos eléctricos, mostrar y registrar fallas a tiempo, y modificar y mostrar los valores fijos, entre otros.
- La tercera función es remota. Consiste en controlar y operar el sistema de automatización de subestaciones de forma remota. Es decir que se pueda realizar el control remoto de la operación del seccionador, interruptor y otros componentes, y de esta forma hacer una respuesta rápida a todas las condiciones de la operación.

El sistema de automatización de la subestación eléctrica es un conjunto integral del sistema compuesto por hardware y software, y es el encargado del control, protección, medición y comunicación con un centro de control. Y con esto garantizan la confiabilidad en el suministro de la energía eléctrica, minimiza tiempo de operación y mantenimiento, detecta, responde posibles fallas restableciendo el servicio en el menor tiempo y dejando la información a disposición para su posterior análisis por personal calificado.

Mejia Villegas (2003) lo define como: “conjunto formado por dispositivos o funciones de medida, indicación, registro, señalización, regulación, control manual y automático de los equipos y los relés de protección, los cuales verifican, protegen y ayudan a gobernar un sistema de potencia” (p. 405). En donde Arun, Lathesh, & Suhas (2016) menciona que las funciones principales son interfaz de usuario, supervisar, control y protección de equipo de la transmisión y distribución de la energía eléctrica, también intercambio de datos a los lugares en donde se necesiten como un centro de control.

Kumar, Abu-Siada, Das, & Islam (2021) mencionan que el sistema de automatización está compuesto por software y hardware en cuatro niveles de control así:

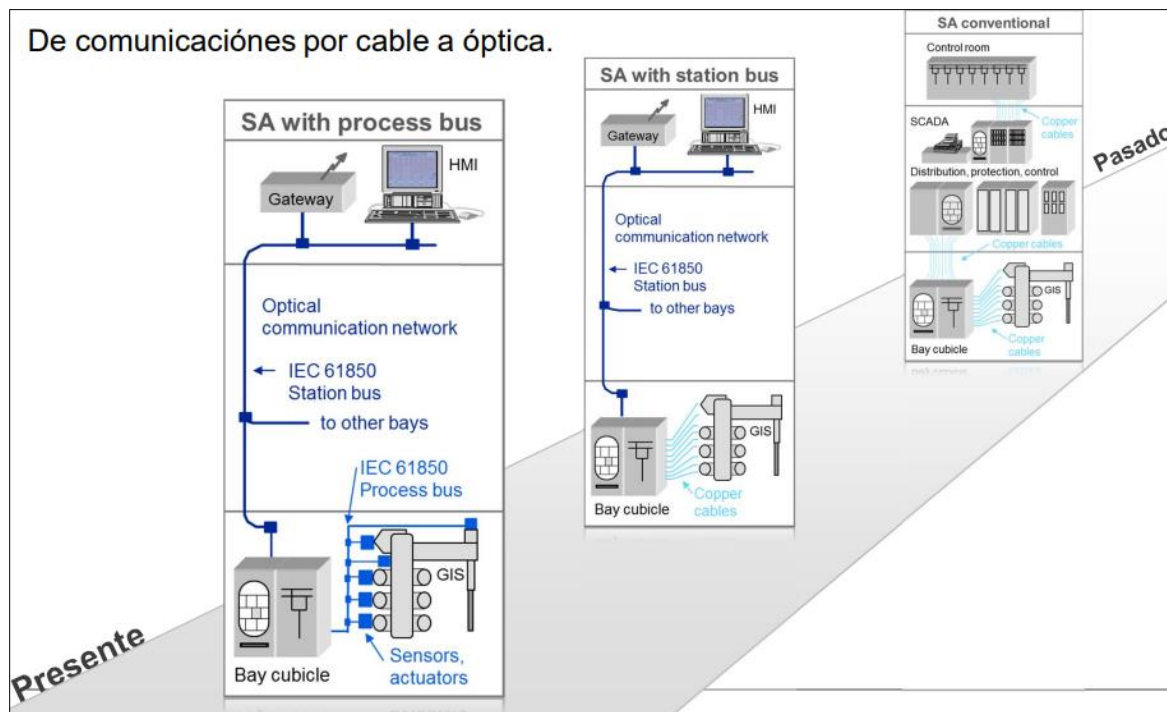
- Nivel 0: Compuesto por equipos que se encuentran en el patio de la subestación, como interruptores, seccionadores, transformadores, equipos de medida, entre otros.
- Nivel 1: Controladores, relés de protecciones, interfaz con equipos primarios, conocidos como IED por sus siglas dispositivo electrónico inteligente (Intelligent electronic device).

14 Elección de un sistema de automatización en subestaciones eléctricas mediante un modelo multicriterio

- Nivel 2: Sistema de procesamiento de datos, almacenamiento de datos, sistema de eventos, alarmas, tendencias. Es decir, es la interfaz de control local, supervisión, medida, protección entre el operador y la subestación.
- Nivel 3: Sistemas remoto de control, supervisión, medida, es decir se puede supervisar y operar la subestación desde cualquier parte contando con una conexión a internet.

La figura 2 presenta la evaluación de desarrollos de sistemas de automatización de subestaciones que se desarrollaran a continuación, presentando los diferentes sistemas en una línea de tiempo. Aquí es relevante resaltar que los tres sistemas de subestaciones se encuentran implementados en subestaciones en Colombia.

Figura 2: Evaluación en el tiempo de los sistemas de automatización



Nota: (ABB, 2018)

1.2.1 Control convencional de subestaciones

Es un sistema de control o automatización en el cual las funciones de control, medida, señalización, protección entre otras son realizadas por dispositivos independientes y automáticos que intercambian operación entre ellos y los reportan a una interfaz para el operador del sistema.

Según menciona Liang, Geng, Bao, & Jun (2013) “desde la década de 1980, los sistemas de automatización de subestaciones han adoptado la estructura centralizada basada en RTU, la estructura distribuida y la estructura funcional distribuida, que es un gran progreso en tecnología y función. Sin embargo, con la escala creciente de la red de datos, los problemas de transmisión de información que aún existen en la red de la subestación. Es importante mejorar la calidad de la transmisión de los datos en el sistema de comunicación de la subestación” (p. 586).

Este sistema de automatización de subestaciones cumple con cuatro niveles de control como se observa en la figura 3 y usualmente está compuesta por los siguientes equipos:

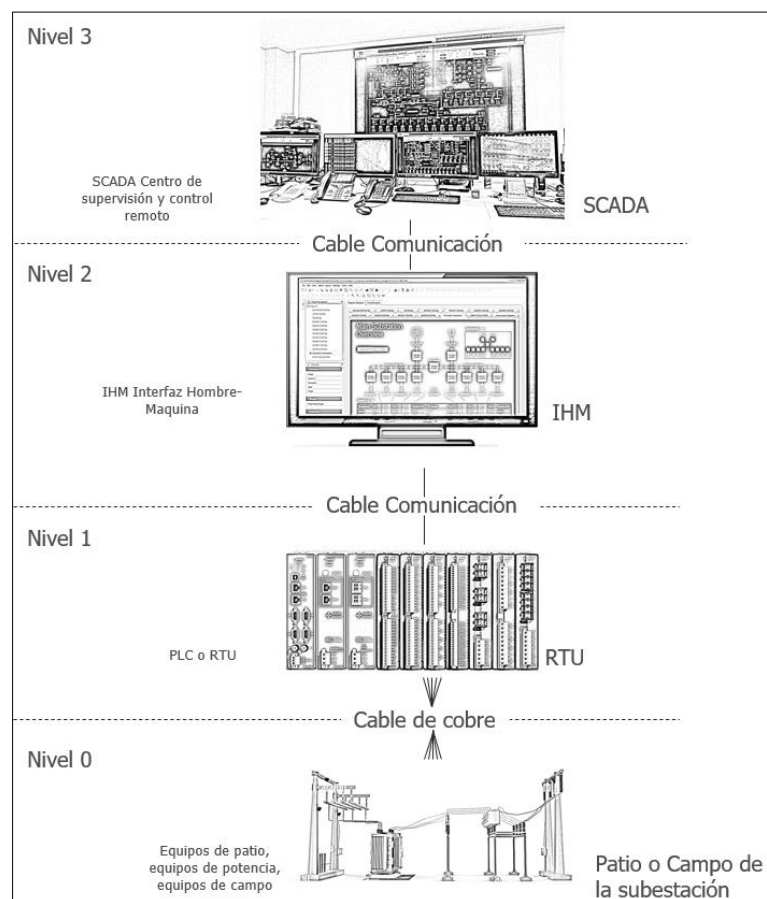
- Unidad terminal remota (RTU) o controlador lógico programable (PLC):
Equipo electrónico de control, supervisión y comunicación para diferentes equipos.
- Servidor de adquisición de datos:
Ordenador o máquina que tiene la capacidad de almacenar datos y realizar analíticas básicas.
- Interfaz hombre maquina (IHM)
Es un medio entre la información de la máquina y el entendimiento del operario del sistema.
- Sistema de supervisión
Software que permite monitorear datos de equipos en la subestación eléctrica.
- Infraestructura de comunicación que conecta todo el sistema:

Hace relación a conexiones y equipos que sirven para la conectividad de la información desde el origen hasta donde se requiera o se necesite.

- Instrumentación para medida, supervision y maniobra:
Son equipos que se utiliza para medir señales analógicas o digitales.

La figura 3 presenta un esquema de los diferentes niveles de control de una subestación convencional en donde el equipo diferenciador es el equipo RTU que su función es gestionar los equipos físicos en el nivel 0 de la subestación y a su vez comunicar con niveles superiores de control.

Figura 3: Sistema de automatización convencional



Nota: Elaboración propia

1.2.2 Sistema de automatización de subestaciones moderno

Según menciona Matsuda, y otros (2011) el SAS es un sistema que proporciona funciones de automatización para el control, monitoreo y protección dentro de una subestación y utiliza mejoras recientes en los campos de la electrónica, la información y tecnologías de la comunicación. La aplicación de SAS ha aumentado para cumplir con un requisito del mercado para disminuir el costo total, incluyendo los costos del ciclo de vida de los equipos de la subestación, proporcionando operación segura de la subestación y para realizar la optimización de los costos de mantenimiento.

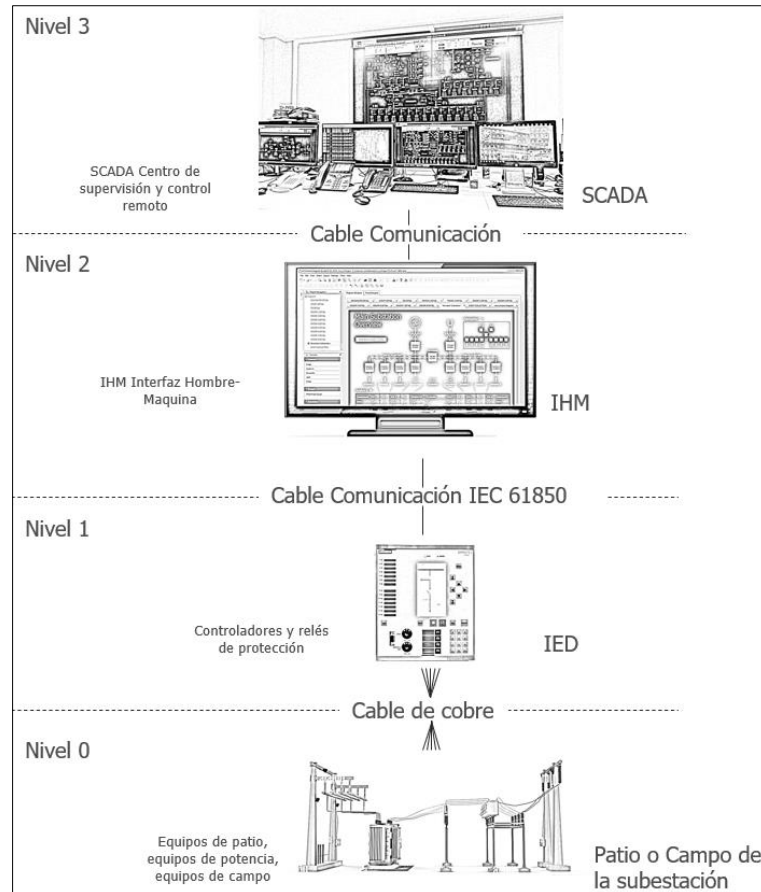
Este sistema de automatización en el cual las funciones son realizadas por dispositivos electrónicos inteligentes (IED) que intercambian operación entre ellos bajo protocolos definidos para la interoperabilidad como es la norma de comunicación IEC61850 y estos IED los reportan a una base de datos que interpreta los datos y me presentan en una interfaz para el operador del sistema.

Ahora bien, la norma internacional para la comunicación en subestaciones eléctricas es la norma IEC61850, que permite la interoperabilidad entre diferentes equipos de diferentes fabricantes dentro de la subestación, brindando un modelo de información unificado con jerarquía de nombres y dando una estructura a los datos.

Implementando la norma IEC61850 se evita que protocolos de comunicaciones propietarios de cada uno de los fabricantes limiten la integración de información entre diferentes equipos de diferentes marcas.

La figura 4 presenta un esquema de los diferentes niveles de control de una subestación convencional en donde el equipo diferenciador es el equipo IED cuya función es gestionar los equipos físicos en el nivel 0 de la subestación y a su vez comunicar con niveles superiores de control y con la implementación de la norma IEC61850 encargada de normalizar la información por su jerarquía, formato de intercambio de datos y sus tiempos de respuesta.

Figura 4: Sistema de automatización con IED



Nota: Elaboración propia

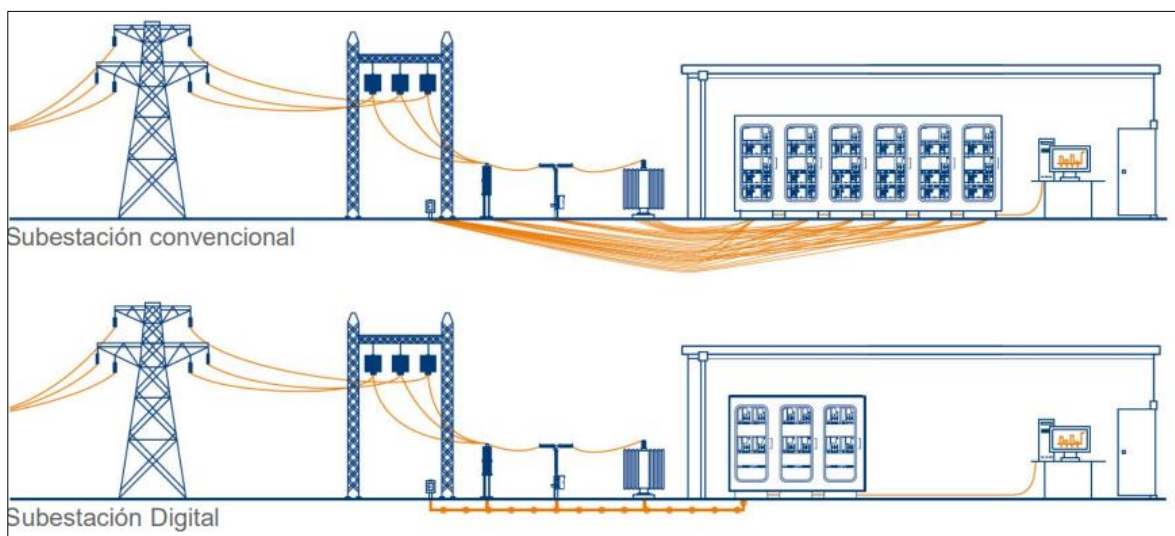
1.2.3 Sistema de automatización de subestaciones digitales

La constante actualización de la red eléctrica presenta un nuevo concepto denominado redes inteligentes las cuales necesitan mayor nivel de comunicación, mayor confiabilidad de los datos, también una necesidad de información más precisa y rápida, por lo cual es necesario digitalizar la subestación eléctrica.

Ahora bien, digitalizar una subestación eléctrica consiste en un proceso en donde se migra o se convierte señales análogas en digitales, por medio de diferentes equipos electrónicos, con el objetivo de agregar valor al sistema, en busca de eficiencias como reducción en cableado, tiempos de instalación, menor espacio utilizado e incrementando la confiabilidad en la información y en la operación de la subestación eléctrica.

La figura 5 presenta de forma gráfica una comparación en temas de cableado y espacio en la subestación eléctrica.

Figura 5: Comparación entre subestación convencional y digital



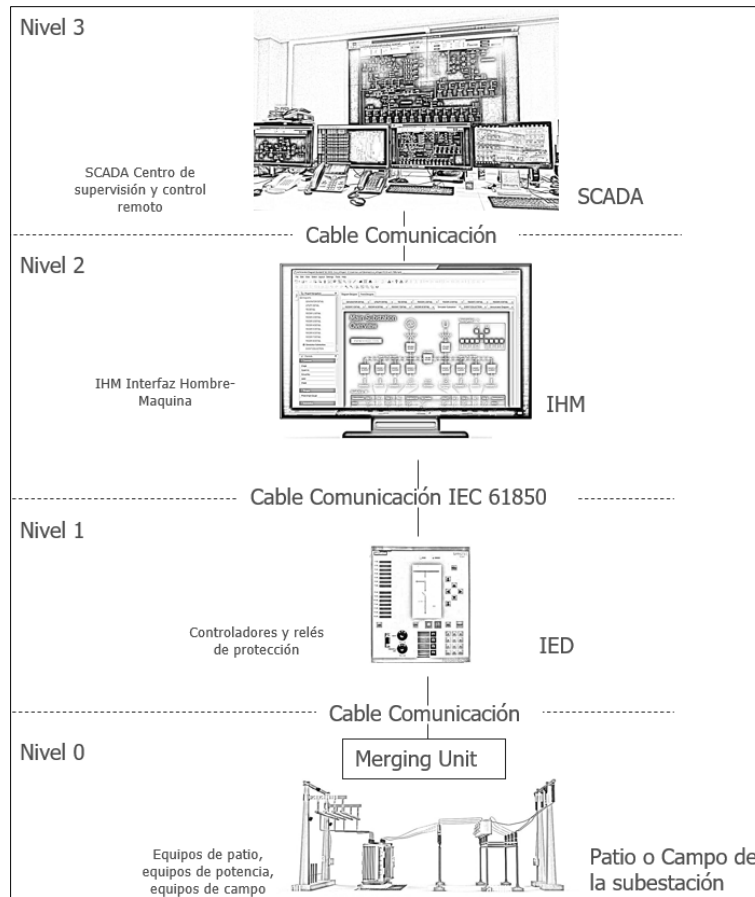
Fuente: (ABB, 2018)

Asimismo, Peña Suarez & Vanegas Restrepo (2020) mencionan que un sistema de automatización de subestaciones digitales es un sistema en donde la mayoría de los datos disponibles que controlan, supervisan y miden el flujo de energía son digitales desde su origen, es decir que al tener la mayor cantidad de señales digitalizadas su transmisión es más fácil entre los diferentes equipos que intervienen en el sistema. Adicional tiene reducción de recursos evitando la conexión de cables eléctricos por cables de comunicaciones de fibras ópticas.

La figura 6 presenta un esquema de los diferentes niveles de control de una subestación digital en donde el equipo diferenciador es el equipo Merging unit que su función es convertir las señales analógicas del sistema eléctrico que se encuentra en el nivel 0, tales como las tensiones, corrientes, potencias, en señales digitales.

El envío de la información digitalizada se realiza a través de módulos de comunicación ethernet con puertos ópticos hasta llegar los controladores y relés de protección que se encuentran en el nivel 1.

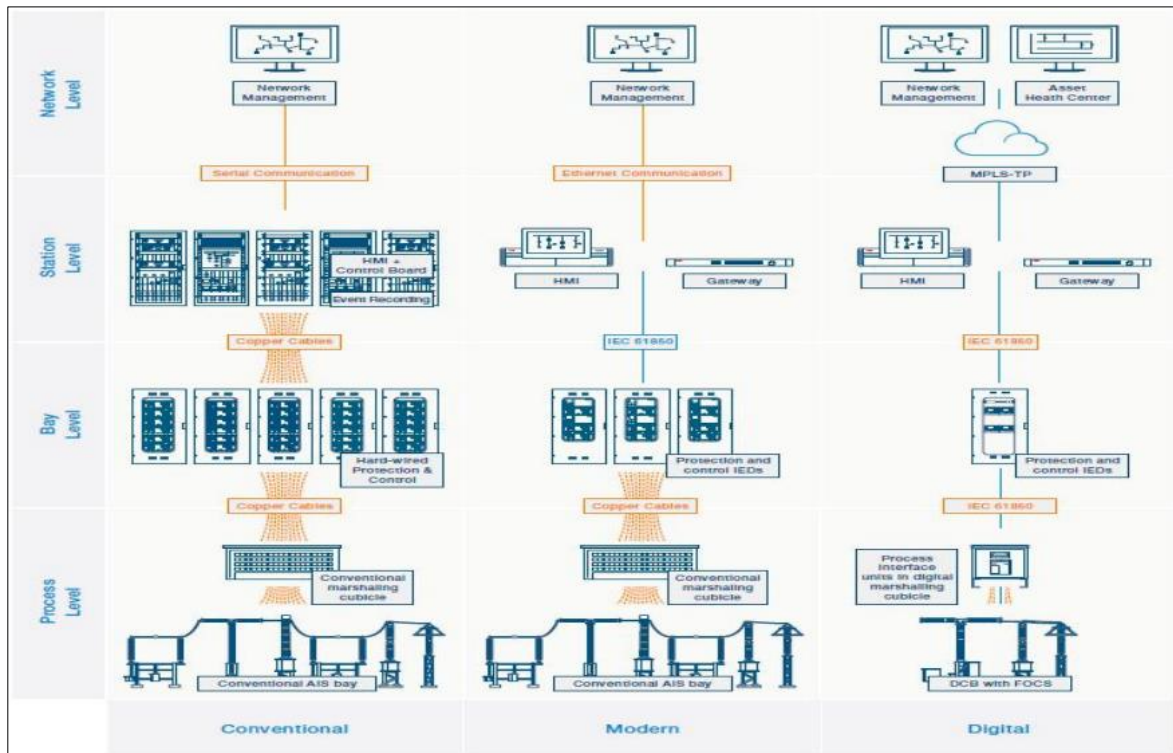
Figura 6: Niveles de control de un sistema de automatización con IED en una subestación digital



Nota: Elaboración propia

A continuación, en la figura 7 se visualiza claramente las diferencias entre los tres sistemas presentados.

Figura 7: Niveles de control de diferentes sistemas de automatización



Fuente: (ABB, 2018)

1.3 Estado del arte

El presente capítulo se presenta lo encontrado en relación a los temas de la presente investigación, se busca clasificar los temas para tener una tendencia de métodos multicriterio utilizados y las alternativas respecto a la implementación de un sistema de automatización de subestaciones.

Inicialmente Ingram & Ehlers (2007) mencionan que las subestaciones tradicionales en donde se realiza la operación con un asistente o una persona capacitada es un proceso de producción ineficiente, que no cumple con estándares comerciales. El sistema eléctrico se ha visto obligado a integrar nuevas tecnologías en los procesos a la tendencia de automatizar procesos, teniendo en cuenta la optimización, creatividad, desarrollo, dando como resultado los sistemas de automatización de subestaciones.

En el mismo sentido Bravo, Santana, & Rodon (2014) resaltan el impacto de la automatización sobre el desempeño en los sistemas de información, donde exponen la

importancia del diseño y la construcción de sistemas de información no solo debe concentrarse en brindar información de calidad sino en automatizar tareas, es ahí en donde se tiene ventajas. Debido que la automatización de procesos minimiza los errores cometidos por personal humano.

Así mismo Kezunovic (2009) realiza una investigación de los beneficios de los sistemas de automatización de las subestaciones eléctricas, como eficiencias en la operación, exactitud en la evaluación de fallas, localización de fallas e incremento en la calidad de las soluciones ante eventualidades, procesamiento de alarmas fácil y ubicación de las soluciones en tiempo real.

Por otro lado, Siphokazi & Akshay (2018) describe la modernización de un sistema eléctrico en el puerto de Durban con la integración de un sistema de automatización de subestaciones logrando beneficios para la operación. También los autores describen la implementación que realizaron con la alternativa 1 que plantea la presente investigación.

Otro aspecto que menciona Song, Yan, Wang, Wang Xiaokai, & Yang Liu (2020) es relacionado a la importancia de la tener la administración de los datos a medida que se integran archivos SCD que son archivos propios de los equipos electrónicos inteligentes de la alternativa 2 de la presente investigación.

En el caso de Madonsela, Davidson, & Mulangu (2018) expone la estructura de un sistema de subestación con IED en donde presenta las funciones, ventajas y los desafíos de los nuevos protocolos de información y que debe ser utilizados para la correcta implementación de un sistema de automatización de subestaciones.

También Liu & Zhang (2015) presentan que, en la actualidad, el desarrollo de sistemas de automatización de subestaciones ha logrado éxito, haciendo que los costos de operación se reduzcan y aumentar la probabilidad de programación y transmisión y de la red de distribución de energía eléctrica. También resalta la estrategia de control para optimizar la creciente adaptación del desarrollo energético.

Bien, ahora para la revisión de la literatura de métodos de decisión multicriterio tenemos los siguientes aspectos.

Los autores Osorio Gomez & Orejuela Cabrera (2008) resaltan que, en el ambiente competitivo actual, las organizaciones enfrentan la toma de decisiones o selección de alternativas, generalmente se tienen múltiples objetivos, que se contraponen entre ellos, haciendo más complejo éste proceso y generándose entonces la necesidad de una herramienta que permita comparar esos múltiples criterios frente a las alternativas.

El método que proponen los autores es la solución utilizando el método multicriterio de Proceso de Análisis Jerárquico AHP.

También resaltan las ventajas como son: analizar el efecto de los cambios en un nivel superior sobre el nivel inferior. Tener información sobre el sistema y permite una vista de los tomadores de decisión, sus objetivos, criterios, subcriterios y alternativas. También permite flexibilidad para cambios en los elementos de manera que no afecten la ponderación total.

En este sentido Romero (1996) presenta la estructura del proceso de decisión, el análisis multicriterio, la normalización y los aspectos básicos de modelos como AHP o ELECTREE.

Así pues, Berumen & Llamazares Redondo (2007) explora, presenta y valida el método AHP, en donde indica la eficiencia y la productividad a la que se llega, gracias al uso de la toma de decisión en alternativas con múltiples criterios.

Los autores Yajure Ramirez & Guzman (2017) presentan una interesante comparación entre métodos multicriterio con cada una de las técnicas de toma de decisiones multicriterio utilizadas en el estudio, se obtuvo una jerarquía de las tecnologías de energías renovables. Luego de realizar el estudio comparativo se puede observar que luego de aplicar tres técnicas de toma de decisiones multicriterio, son diferentes entre sí.

La jerarquía obtenida con la técnica AHP es similar a la jerarquía obtenida con la técnica PROMETHEE.

Haciendo una aplicación práctica del modelo multicriterio Lee, Hung, Kang, & Pearn (2012) busca mediante un modelo estructura integral (ISM) y un proceso de red analítica difusa (FANP) busca elegir la turbina más adecuada para un parque de generación eléctrica en donde el modelo incorpora costos y aspectos de riesgo.

Finalmente, Pohekar & Ramachandran (2004) resalta la popularidad que han ganado los MCDM en temas de energía. Se han convertido en una herramienta potente en el momento de tomar una decisión. En donde algunos métodos se basan en ponderación, pesos, promedios, prioridades, límites, principio, criterios. También realiza una revisión de la literatura sobre la planificación energética sostenible. Los métodos han sido ampliamente utilizados para múltiples criterios para llegar a mejores soluciones

A continuación, se presenta algunos métodos de decisión multicriterio empleados para temas de subestaciones eléctricas.

Tabla 2: Métodos MCDM utilizado en con la toma de decisión en sistemas eléctricos.

País	Método	Referencia	Tema
China	AHP	(Guo, 2014)	Riesgos de seguridad del SAS
USA	AHP	(Liu & Zhang, 2015)	Vulnerabilidad del SAS
China	AHP	(HUANG, 2019)	Error humano en SAS
China	AHP	(Ren, 2017)	Redes de distribución eléctrica
China	AHP	(Gao H. &., 2011)	Seguridad en SAS
China	AHP	(Long, 2018)	Estado actual del SAS
China	AHP	(Dehghanian, 2011)	eficiencia en el SAS y RTU
USA	AHP	(Zhang, 2018)	Operación de subestación eléctrica
Japón	AHP, PROMETHEE	(Gao H. D., 2014)	Riesgos en la subestación eléctrica
China	AHP	(Yan, 2016)	Subestación inteligente
Indonesia	TOPSIS	(Wiguna, 2016)	Energía Solar
Turquía	AHP, PROMETHEE	(Samanlioglu, 2017)	Energía Solar

Nota: Construcción propia

2. Metodología

Es importante saber que ningún enfoque es un camino infalible para el conocimiento, todos constituyen una propuesta racional para llegar a un objetivo, en esta investigación se plantea manejar un enfoque mixto entre cualitativo y cuantitativo, se realizó una revisión de en la literatura y la exploración de los elementos que intervienen en la pregunta de investigación, de igual forma se aplicó un método multicriterio que cuantifico los criterios bajo análisis y llego a un indicador numérico que oriente la toma de decisiones.

Con el objetivo de alcanzar los objetivos y presentar al lector de la manera más sencilla la secuencia de fases que se realizaron, se construyen las siguientes fases que ayudan a interiorizar mejor la metodología a seguir en el modelo, el cual se compone de cinco fases.

A continuación, se explicará cada una de estas fases de la metodología:

1. Elección del método
2. Selección de expertos
3. Entrevistas para definición de criterios y subcriterios
4. Sesión con expertos para la definición de pesos
5. Asignación de calificación a las diferentes alternativas

2.1.1 Elección del método

Roy & Slowinsky (2013) formula preguntas que pueden ser tomadas para la ayuda a elegir el método de decisión multicriterio más indicado, para el objetivo que se plantee, es de aclarar que las preguntas son pautas para facilitar la elección y no se deben tomar como reglas inamovibles.

Roy & Slowinsky (2013) proponen preguntas primarias y secundarias que serán las pautas para que el analista o gestor del método pueda considerar la elección del mejor método de decisión.

Las preguntas que Roy & Slowinsky (2013) propone son: “¿Qué tipo de resultados se espera que traiga el método, para permitir la elaboración de respuestas relevantes a las preguntas formuladas por el tomador de decisión?” (p.79). Esta pregunta orienta la investigación, puesto que el resultado que se busca es la elección de una alternativa de entre las demás, esta elección se considera que debe ser netamente numérica para poder darle un valor a cada alternativa y que el método sirva para la toma de decisión.

Roy & Slowinsky (2013) también orientan con las siguientes pautas, “Se asigna un valor numérico (utilidad, puntaje) a cada acción potencial” (p.79). Esta pauta como se mencionó anteriormente es la que brindara la elección de la mejor alternativa, teniendo en cuenta la evaluación de los criterios, continua Roy & Slowinsky (2013) indicando que de requerirse un puntaje los métodos más adecuados son, MAVT, MAUT, UTA, AHP, SMART, TOPSIS, aquí ya tenemos un primer filtro de los métodos que nos interesan para la investigación.

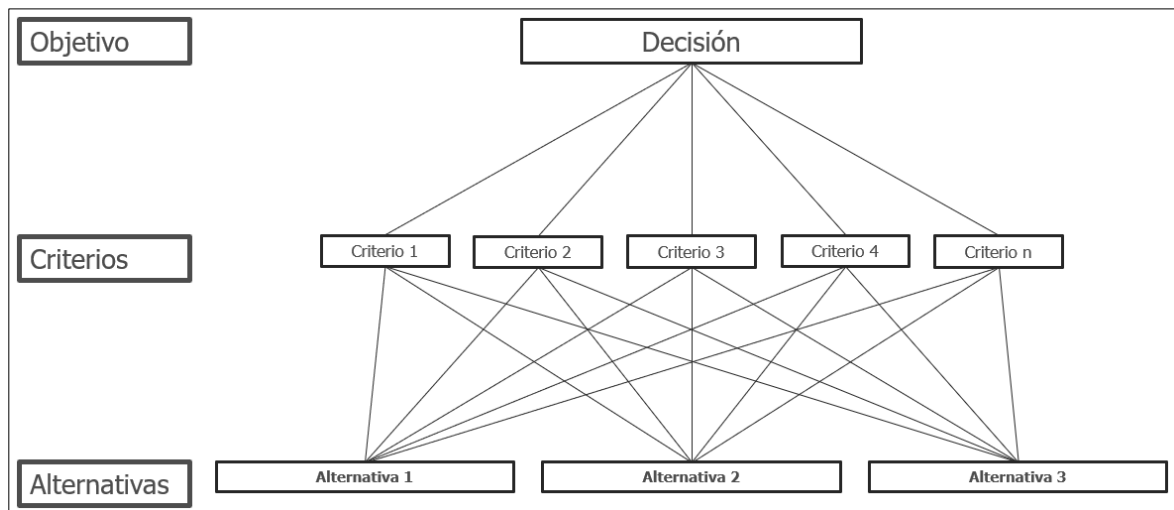
En este sentido Roy & Slowinsky (2013) indican otra pauta, “El conjunto de acciones se clasifica (sin asociar un valor numérico a cada una de ellas) como orden débil total o parcial” (p.80). En donde mencionan los métodos relevantes como son, ELECTRE, PROMETHEE I y II, RUTA, GRIP, que nos sigue indicando cuales métodos no son viables para el presente trabajo.

Otra pregunta que Roy & Slowinsky (2013) propone es, ¿Tienen las escalas de desempeño originales todas las propiedades requeridas para una correcta aplicación del método considerado?.

En este sentido se consideró que el método más apropiado para el desarrollo es el método analítico de jerarquización (AHP) un modelo que utiliza ponderaciones entre criterios y subcriterios como se expondrá a continuación, adicionalmente la revisión literaria respalda el uso del método AHP debido que es el método más utilizado en temas relacionado con energía.

La figura 8 ilustra el objetivo, criterios y las alternativas como lo plantea el método AHP.

Figura 8: Modelo AHP



Fuente: Construcción propia basado en Saaty (1990)

Saaty plantea (1980) un orden para descomponer el problema de decisión en uno pasos que deben ser consecutivos.

1. Definir el problema y determinar el tipo de conocimiento que se genera
2. Estructura de jerarquía de decisión teniendo en cuenta niveles altos, medios y bajos
3. Construcción de matrices de comparación teniendo en cuenta el nivel inmediatamente inferior
4. Utilizar las prioridades obtenidas en el punto anterior y continuar evaluando hasta llegar al nivel más bajo.

Continua Saaty (1980) indicando una escala numérica que indicara la intensidad de importancia de las comparaciones del punto 3.

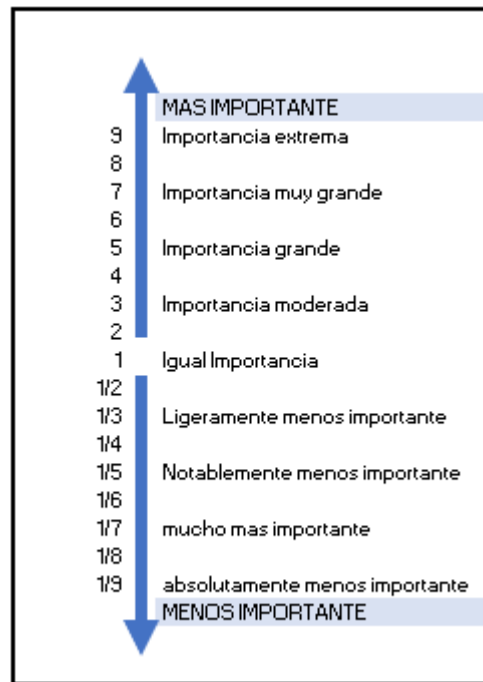
Tabla 3: Tabla de escalas fundamentales

Intensidad de importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo

3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Muy fuerte o importancia demostrada	Una actividad se ve fuertemente favorecida y su dominio se demuestra en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del orden de afirmación más alto posible.
2, 4, 6, 8	valores intermedios entre los dos juicios adyacentes	Cuando el compromiso es necesario
1/3, 1/5, 1/7, 1/9 1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Si la actividad i tiene asignado uno de los números anteriores en comparación con la actividad j, luego j tiene el valor recíproco en comparación con i.	Valores Recíprocos
Valores Racionales	rangos que surgen de la escala	Si la consistencia forzada obtiene n valores de números para abarcar la matriz.

Fuente: (Saaty, The Analytic Hierarchy Process-What it is and how it it used, 1987)

Lo anterior no indica una escala que se representa en la figura 9.

Figura 9: Pesos o ponderación del Modelo AHP

Fuente: Construcción propia

En donde una ponderación de 9 es la más importante en relación a los demás criterios y el inverso es la menor ponderación por consiguiente la menos importante en relación a los demás criterios. El valor 1 como se indica en la tabla 3 es igualdad en importancia en los criterios.

Luego se construye la matriz de tamaño $n \times n$ en donde todos los criterios definidos serán comparados entre sí.

Al tratarse de una matriz se presentara comparación entre los mismos criterios así:

Criterio 1 x Criterio 1

Y la ponderación será 1 indicando igualdad en importancia. Los tomadores de decisión que son los encargados de asignar los pesos a los diferentes criterios que se tengan.

La matriz de comparación se describe de la siguiente forma.

Tabla 4: Matriz de comparación con ponderación.

CRITERIOS	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio n
Criterio 1	1	a_{12}	...	a_{1n}
Criterio 2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2n}
...	...	...	1	$a_{...n}$
Criterio n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{...n}$	1

Fuente: Construcción propia basado en Rodas Areiza (2018)

En donde en cada comparación entre criterios se determina un peso según el nivel de importancia y en su comparación inversa tendrá una ponderación inversa.

Posterior a la ponderación dada por los tomadores de decisión se suman los valores de cada columna.

Tabla 5: Matriz de comparación con ponderación y suma de pesos

CRITERIOS	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio n
Criterio 1	1	a_{12}	...	a_{1n}
Criterio 2	$1/a_{12}$	1	...	a_{2n}
...	...	...	1	$a_{...n}$
Criterio n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{...n}$	1
\sum Ponderación	\sum Criterio 1	\sum Criterio 2	\sum Criterio ...	\sum Criterio n

Fuente: Construcción propia

$$\sum \text{Criterio 1} = 1 + \frac{1}{a_{12}} + \dots + \frac{1}{a_{1n}} \quad \text{Ecuacion 1}$$

$$\sum \text{Criterio 2} = a_{12} + 1 + \dots + 1/a_{2n} \quad \text{Ecuacion 2}$$

$$\sum \text{Criterio ...} = \dots + \dots + 1 + \frac{1}{a_{...n}} \quad \text{Ecuacion 3}$$

$$\sum \text{Criterio } n = a_{1n} + a_{2n} + a_{\dots n} + 1 \quad \text{Ecuacion 4}$$

El siguiente paso es la normalización de la matriz, es decir realizar una nueva matriz en donde se divide cada elemento de la matriz de ponderación por la sumatoria de los pesos.

Tabla 6: Matriz de comparación con ponderación normalizada

CRITERIOS	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio n
Criterio 1	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{a_{12}}{\sum \text{Criterio 2}}$	...	$\frac{a_{1n}}{\sum \text{Criterio n}}$
Criterio 2	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 2}}$	...	$\frac{a_{2n}}{\sum \text{Criterio n}}$
...	...	...	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 3}}$	$\frac{a_{\dots n}}{\sum \text{Criterio n}}$
Criterio n	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 2}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 3}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio n}}$

Fuente: Construcción propia

Posterior a la normalización se promedia los valores de cada fila, así:

Tabla 7: Matriz de comparación con ponderación normalizada

CRITERIOS	Criterio 1	Criterio 2	...	Criterio n	
Criterio 1	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{a_{12}}{\sum \text{Criterio 2}}$	...	$\frac{a_{1n}}{\sum \text{Criterio n}}$	Media C1
Criterio 2	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 2}}$	...	$\frac{a_{2n}}{\sum \text{Criterio n}}$	Media C2
...	...	...	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 3}}$	$\frac{a_{\dots n}}{\sum \text{Criterio n}}$	Media C3
Criterio n	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 2}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio 3}}$	$\frac{1}{\sum \text{Criterio n}}$	Media C4

Fuente: Construcción propia

Continuamos con la evaluación de cada criterio respecto las alternativas, las alternativas son las posibles soluciones al tema particular que se esté evaluando, dichas alternativas pueden ser cuantas sean definidas por los tomadores de decisión, para esta explicación de tomar 3 alternativas.

Tabla 8: Matriz de comparación con criterio 1, 3 alternativas

Criterio 1	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	a_{12}	a_{13}
Alternativa 2	$\frac{1}{a_{12}}$	1	a_{23}
Alternativa 3	$\frac{1}{a_{13}}$	$\frac{1}{a_{23}}$	1
\sum Ponderación	\sum Alternativa 1	\sum Alternativa 2	\sum Alternativa 3

Fuente: Construcción propia

Y los pasos siguientes son iguales a los descritos en la ecuación 1, 2, 3, 4. Luego se realiza la normalización.

Tabla 9: Matriz de comparación con criterio y alternativas ponderación normalizada

Criterio 1	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	
Alternativa 1	$\frac{1}{\sum \text{Alternativa 1}}$	$\frac{a_{12}}{\sum \text{Alternativa 2}}$	$\frac{a_{13}}{\sum \text{Alternativa 3}}$	<i>Media C1A1</i>
Alternativa 2	$\frac{\frac{1}{a_{12}}}{\sum \text{Alternativa 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Alternativa 2}}$	$\frac{a_{23}}{\sum \text{Alternativa 3}}$	<i>Media C1A2</i>
Alternativa 3	$\frac{\frac{1}{a_{13}}}{\sum \text{Alternativa 1}}$	$\frac{\frac{1}{a_{23}}}{\sum \text{Alternativa 1}}$	$\frac{1}{\sum \text{Alternativa 3}}$	<i>Media C1A3</i>

Fuente: Construcción propia

Se debe realizar el anterior procedimiento con cada uno de los criterios que los tomadores de decisión eligieron y finalmente se debe sumar la multiplicación entre las medias de la ponderación de criterios y la ponderación de criterios con las alternativas, así:

$$\begin{aligned} & \textit{Ponderación total alternativa 1} \\ & = (\textit{Media C1 x Media C1A1}) + (\textit{Media C2 x Media C2A1}) + (\textit{Media C3 x Media C3A1}) \end{aligned}$$

Ecuacion 5

$$\begin{aligned} & \textit{Ponderación total alternativa 2} \\ & = (\textit{Media C1 x Media C1A2}) + (\textit{Media C2 x Media C2A2}) + (\textit{Media C3 x Media C3A2}) \end{aligned}$$

Ecuacion 6

$$\begin{aligned} & \textit{Ponderación total alternativa 3} \\ & = (\textit{Media C1 x Media C1A3}) + (\textit{Media C2 x Media C2A3}) + (\textit{Media C3 x Media C3A3}) \end{aligned}$$

Ecuacion 7

De esa manera llegamos a la alternativa más viable que debe ser la que indica el mayor peso o mayor ponderación.

Es muy importante calcular la consistencia del método AHP. Saaty sugiere que el índice de consistencia (CI) sea denominada índice de consistencia donde λ_{max} es el máximo valor y n es la dimensión de la matriz de decisión. Para determinar la consistencia se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \textit{Indice de consistencia} \\ & CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \end{aligned}$$

Ecuacion 8

Adicional Saaty menciona que dependiendo del orden de la matriz se debe usar la razon de consistencia (CR) así:

$$\begin{aligned} & \textit{Razon de consistencia} \\ & CR = \frac{CI}{RI} \end{aligned}$$

Ecuacion 9

Donde RI es el índice aleatorio de consistencia definido así:

Tabla 10: Índice aleatorio de consistencia

Tamaño de la matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice aleatorio	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: (Aznar Bellver, 2012)

Una vez se conozca la razón de consistencia o la ratio de consistencia se verifica si se encuentra dentro de lo establecido en la siguiente tabla.

Tabla 11: Índice aleatorio de consistencia

Tamaño de la matriz (n)	Índice de consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

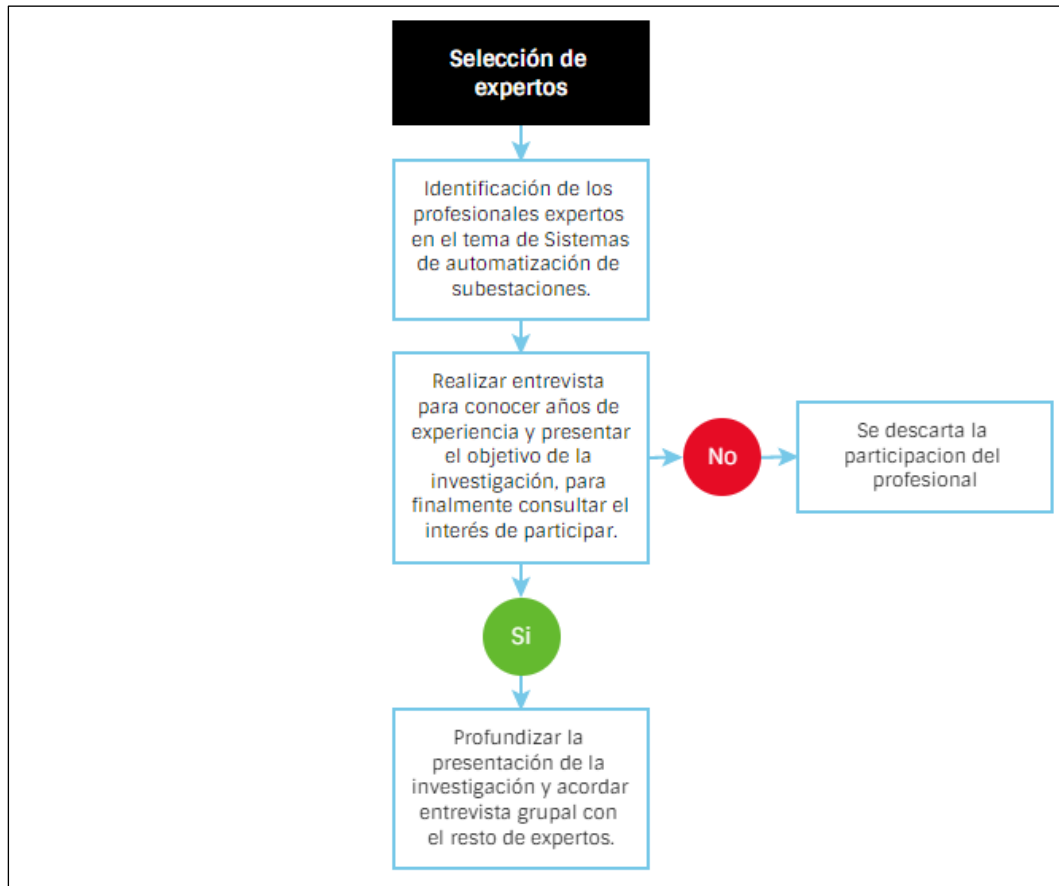
Fuente: (Aznar Bellver, 2012)

2.1.2 Selección de expertos

La selección de expertos se expone en la figura 10, el cual consiste en la búsqueda de los profesionales expertos, teniendo en cuenta que tengan amplio conocimiento y experiencia en desarrollos en sistemas de automatización de subestaciones para tener claridad en el tema. Esta búsqueda se inicia realizando consultas al interior de la empresa en las diferentes sedes en que se tenga el conocimiento, posterior a esto se realiza una comunicación para conocer el nivel y años de experiencia, su profesión, dar contexto del trabajo de investigación y consultar de la disposición para poder participar en este modelo de decisión.

En este proceso se realizó la consulta a diez profesionales expertos, de los cuales seis aceptaron participar y cuatro declinaron debido a sus funciones y al poco tiempo disponible.

Figura 10. Diagrama de la selección de expertos.



Nota: Construcción propia

El grupo está conformado por seis profesionales expertos con los siguientes perfiles:

Tabla 122: Perfil de los expertos tomadores de decisión.

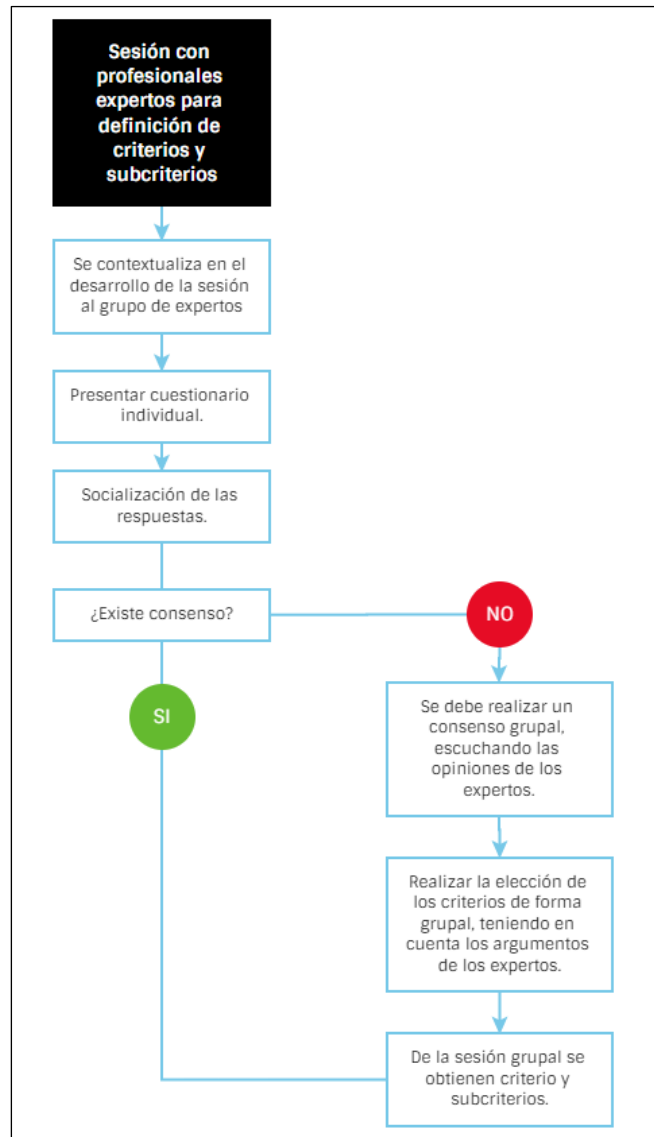
Experto	profesión	Cargo
Experto 1	Ingeniero eléctrico Ingeniero de sistemas	Especialista en sistemas de control, automatización y telecomunicaciones.
Experto 2	Ingeniero electrónico	Especialista en sistemas de automatización y protecciones.
Experto 3	Ingeniero electricista	Especialista en automatización y control
Experto 4	Ingeniero electrónico	Especialista en automatización y control
Experto 5	Ingeniero electricista	Especialista en automatización y control
Experto 6	Ingeniero electromecánico	Especialista en control

Nota: Construcción propia

2.1.3 Entrevistas para definición de criterios y subcriterios

Posterior a la definición de la participación de los profesionales expertos se realiza una sesión grupal para contextualizar el objetivo, el desarrollo, las alternativas. Esta sesión se continua con la presentación de un cuestionario para dar un primer paso en la definición de los criterios para tener en cuenta. En donde cada profesional experto responde según su experiencia y conocimiento. Posterior se realiza la socialización de las respuestas y la evaluación del consenso entre los expertos. Esta fase de la sesión es donde se debe llegar a acuerdos, debido que algunos profesionales expertos tienen en cuenta algunos subcriterios que el resto de los expertos no tuvieron en cuenta, es por esta razón que el analista que dirige la sesión debe buscar y llevar a consensos en donde se pueda definir los criterios y subcriterios.

Figura 11. Diagrama de la sesión de expertos para definición de criterios y subcriterios.



Nota: Construcción propia

Se considera que la definición de criterios y subcriterios es aplicable para todas las subestaciones de la empresa, es decir, los expertos pueden evaluar las alternativas en cualquier subestación y es por esta razón a continuación se plantea el procedimiento realizado, sin haber entrado en el caso específico de la subestación Sochagota.

2.1.3.1 Cuestionario inicial

El siguiente es el cuestionario es el que se le presento a los profesionales expertos técnicos en la primera sesión, para iniciar un acercamiento a la definición de los criterios.

Debido a no tener criterios estandarizados en la decisión en sistemas de automatización se propuso realizar un cuestionario que fue compartido a los tomadores de decisión en temas de sistemas de control en las subestaciones eléctricas.

Para iniciar se realiza la primera pregunta teniendo en cuenta criterios en la evaluación de criterios, como son: legal, técnico, financiero, organizacional, de mercado, social, ambiental.

Los anteriores criterios son un punto de partida del siguiente cuestionario y emergen de acuerdo con la revisión literaria en donde nos indican:

Legal: Según lo indica Flores Uribe (2017) consiste en el análisis y determinación de los aspectos legales que afectan la instalación y operación del plan, proyecto o empresa.

Técnico: Es el criterio que como lo señala Flores Uribe (2017) “determina si física y materialmente, con la maquinaria, el equipo y la tecnología a aplicar, se puede desarrollar” (p.17).

Financiero: Por medio de herramientas financieras evalúa si el plan, proyecto o empresa es rentable.

Organizacional: Sapag Chai n, Sapag Chain, & Sapag Puelma (2014) mencionan que consiste “en definir si existen las condiciones mínimas necesarias para garantizar la viabilidad de la implementación, tanto en lo estructural como en lo funcional” (p.27), es decir evalúa tanto la rentabilidad como la capacidad de gestión.

Mercado: Consiste en analizar el mercado comercial y evaluar la percepción y recepción del bien o proyecto que se quiera desarrollar de esta forma como lo menciona (et al. 2014) así determinar modificaciones o el rechazo de un bien o proyecto.

Social: Evalúa y determina si el plan, proyecto o empresa cumple con intereses o trae beneficios al inversionista y a la comunidad.

Ambiental: Como lo indica Sapag Chai n, Sapag Chain, & Sapag Puelma (2014) lo que busca es cumplir “con las normas impuestas en materia de regulación ambiental para prevenir futuros impactos negativos derivados de una eventual compensación del daño causado por una inversión. El cumplimiento de estas normas puede influir tanto en los costos operacionales como en las inversiones que deberán realizarse.” (p.27)

Teniendo en cuenta lo anterior se planteó el cuestionario así:

1. De 1 a 10, considerando que 1 es menos importante y 10 es más importante. Cuál de estos criterios considera que son importantes a tener en cuenta para la toma de decisión de que sistema de control implementar en una subestación eléctrica?:
 - A. Legal
 - B. Técnico
 - C. Financiero
 - D. Organizacional
 - E. Mercado
 - F. Social
 - G. Ambiental
2. ¿Considera que se debe tener en cuenta algún criterio adicional?

La pregunta 3 presenta las posibles alternativas que pueda indicar el método de toma de decisión, y se realiza para que cada experto pueda indicar cual alternativa consideran es la más factible y si llegan a un consenso y poder comparar el resultado de método multicriterio con cada una de las respuestas.

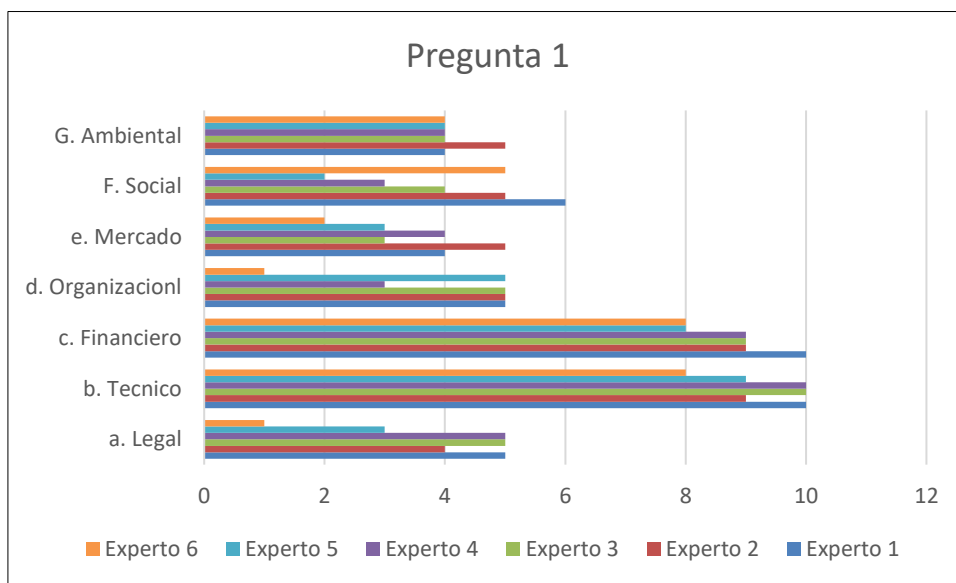
3. ¿Cuál es los sistemas de control considera que son los que se deben implementar en una subestación eléctrica?:
 - A. Control convencional (Conformado por equipos de forma tradicional, relés auxiliares, repetidores, RTU)
 - B. Control Automatizado (Conformado por Dispositivos Electrónicos Inteligentes y SAS)

C. Implementación de subestación Digital (adquisición de información, transmisión, procesamiento y salida de información de forma digital)

A continuación, presentaremos los resultados de los seis expertos.

1. Las respuestas se presentan en la siguiente gráfica, en donde se aprecia que los criterios más importantes según el grupo de expertos es el criterio técnico y financiero.

Figura 12. Respuesta a la pregunta 1 del cuestionario



Nota: Construcción propia

De las anteriores respuestas usamos los criterios más relevantes que son el criterio técnico y financiero, y posterior se realiza una entrevista con los especialistas para poder definir los subcriterios, los cuales se mencionan en la tabla 12, estos subcriterios fueron acordados con los expertos en reuniones presenciales.

2. La respuesta a la segunda pregunta fue:

Tabla 13. Respuesta a la pregunta 2 del cuestionario

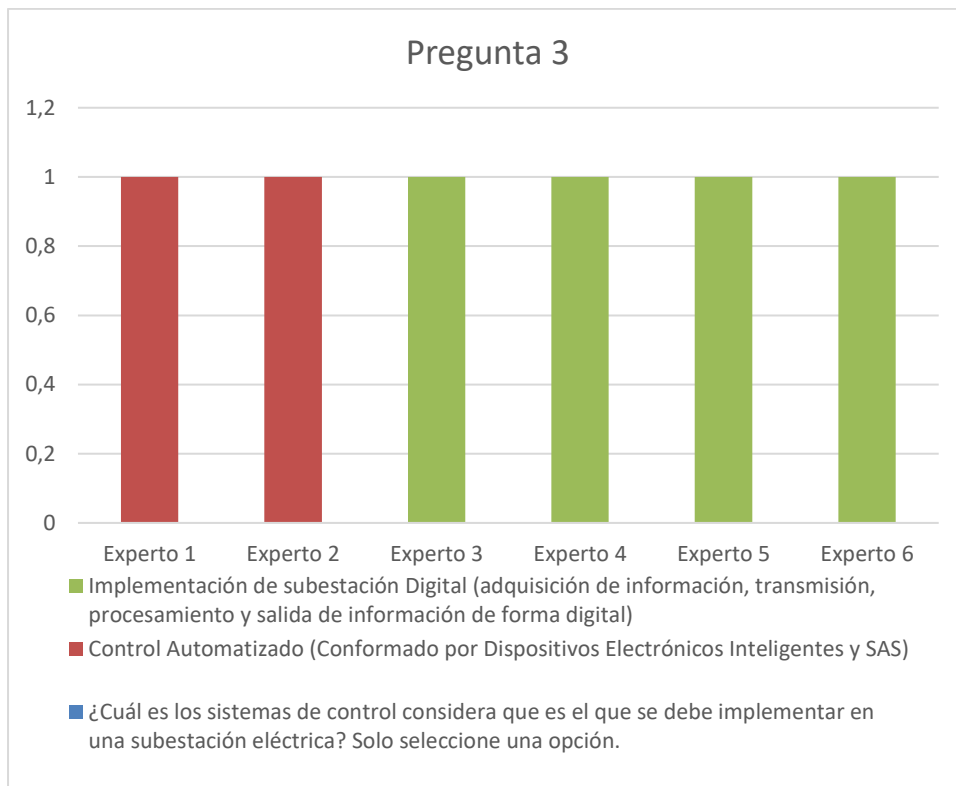
Experto 1	N/A No aplica
Experto 2	Criterio de mantenimiento o durabilidad
Experto 3	No

Experto 4	No
Experto 5	Combinación entre técnico-financiero
Experto 6	Sostenibilidad en el tiempo

Nota: Construcción propia

3. La respuesta a la tercera pregunta fue:

Figura 13. Respuesta a la pregunta 3 del cuestionario



Nota: Construcción propia

Las respuestas nos dan varios puntos de vista en los cuales se define los criterios, algunas observaciones desde otras perspectivas para tener en cuenta en el momento de realizar otra encuesta y finalmente no indica que los expertos tienen una tendencia a elegir los sistemas de automatización en subestaciones digitales.

2.1.3.2 Reducción de criterios

En la sesión con los profesionales expertos se aclara que los criterios mencionados en el cuestionario es un punto de partida, pero para el correcto desarrollo del ejercicio se debe eliminar algunos criterios y se debe considerar subcriterios, de los criterios importantes que continúen en el ejercicio.

Para cumplir con el objetivo de la investigación se considera que las alternativas que se están analizando no van a tener ninguna diferencia en los criterios ambiental, social, de mercado, organizacional y legal y por tal razón es que se descartan.

En este sentido los criterios que continúan haciendo parte del ejercicio son el técnico y el financiero, y se desprenden subcriterios como son el conocimiento y la experiencia del personal en temas de sistemas de automatización de subestaciones, la confiabilidad, la experiencia, el desempeño, la disponibilidad de servicio, el costo y la vida útil de los sistemas de automatización de subestaciones.

Entonces, los criterios que serán tenidos en cuenta en la reunión con los expertos son:

Tabla 14. Criterios y subcriterios

Criterios	Subcriterios
Técnico	Confiabilidad
	Conocimiento
	Experiencia
	Desempeño
Financiero	Costo
	Vida útil
	Disponibilidad de servicio

Nota: Construcción propia

En este sentido se aclara que los dos criterios técnico y financiero, tiene cada uno subcriterios, y para el desarrollo de la investigación es importante resaltar que la comparación pareada se realizó teniendo en cuenta los subcriterios definidos en las

sesiones con los expertos, es decir, que los subcriterios en el momento de ser evaluados en la matriz pareada serán tomados como criterios. Con lo anterior se aclara que no existirá una jerarquización adicional en el modelo.

Esta sesión se contextualizó a los expertos, se mostró el objetivo del método, se buscaba llegar a acuerdos, en donde se selecciona los criterios importantes y descartan los que según los expertos son menos importantes, y definir subcriterio que serán tomados como criterios en adelante.

En la siguiente sección, se presenta una referencia literaria de los criterios elegidos por los profesionales expertos.

2.1.3.3 Alternativas de solución

Previamente en el cuestionario en la pregunta 3 proponía las 3 alternativas existentes para la solución, dichas alternativas fueron previamente explicadas en el marco teórico.

Las alternativas son:

Tabla 15. Alternativas método AHP

Alternativa 1	Control convencional (Conformado por equipos de forma tradicional, relés auxiliares, repetidores, RTU)
Alternativa 2	Control Automatizado (Conformado por Dispositivos Electrónicos Inteligentes y SAS)
Alternativa 3	Implementación de subestación Digital (adquisición de información, transmisión, procesamiento y salida de información de forma digital)

Nota: Construcción propia

2.1.3.4 Descripción de criterios seleccionados

Confiabilidad: Según indica Mora Gutiérrez (2009) “se define como la probabilidad de que un equipo desempeñe satisfactoriamente las funciones para las cuales se diseña durante un período de tiempo específico y bajo condiciones normales de operación, ambientales y del entorno” (p.95). También Mora Gutiérrez (2009) resalta “La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas. Si no hay, el equipo es 100%

confiable; si la frecuencia es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable” (p.95).

Según indica Mora Gutiérrez (2009) la confiabilidad se calcula así:

$$\text{Confiabilidad} = \frac{MTBF}{MTBF * MTTR} \times 100 \quad \text{Ecuacion 10}$$

Donde: MTBF es el tiempo medio entre fallas y MTTF es tiempo medio para reparar.

Así mismo para obtener MTBF y MTTF se debe usar las siguientes ecuaciones.

$$MTBF = \frac{H_T}{P} \quad \text{Ecuacion 11}$$

Donde: H_T es horas trabajadas durante un periodo de evaluación.

$$MTTF = \frac{H_P}{P} \quad \text{Ecuacion 12}$$

Donde:

- H_P es horas de paradas durante el periodo de evaluación.
- P es número de paradas durante el periodo de evaluación.

De acuerdo con lo anterior se puede construir la siguiente tabla de confiabilidad de las tres alternativas así:

Tabla 16. Confiabilidad de alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Confiabilidad	100%	100%	100%

Nota: Construcción propia

Como se observa la confiabilidad es del 100% en las tres alternativas, esto debido que el número de paradas del sistema nunca ha sido mayor a una hora en la parada del sistema en su tiempo de evaluación.

Conocimiento: Davenport & Prusak (2001) define el conocimiento como “una mezcla fluida de experiencia estructurada, valores, información contextual e internalización experta que proporciona un marco para la evaluación e incorporación de nuevas experiencias e información” (p.6).

En este sentido se construye la calificación de acuerdo con el criterio de los profesionales expertos debido que el conocimiento se considera cualitativo y para este ejercicio no se puede cuantificar una cifra la capacidad de conocimiento de las diferentes alternativas.

Experiencia: Scott (2001) menciona que la experiencia es un conocimiento o saber de un acontecimiento o de un suceso de algo que paso, algo que se vivió, algo que ya se vio que sirve para diferentes actividades diarias y actividades laborales.

En este criterio se realiza algo similar al criterio del conocimiento, debido que en la fase uno de la metodología se les consulto a los expertos la experiencia y se dejara al criterio de los profesionales expertos para que sean ellos, los tomadores de decisión quienes asignen un valor al criterio de la experiencia.

Desempeño: Es una evaluación que determina si un sistema realiza bien su trabajo, que toma en cuenta competencias como calidad y tiempos de respuesta. Es decir, el equipo o sistema debe lograr un desempeño o rendimiento optimo, cumpliendo niveles de satisfacción consistente con la función para la cual fue diseñado. Según lo anterior, esta calificación es cualitativa debido que debe cumplir un nivel de satisfacción por tal razon, este criterio se deja a plena elección de los profesionales expertos.

El costo es el gasto que representa un producto o la prestación de un servicio. De acuerdo con la revisión se construyó la siguiente tabla comparativa de costos.

Tabla 17. Costos de alternativas

Criterios	Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Unidades
Costo	Bienes	69.054	64.459	82.310	USD
	Servicios	92.002	92.002	92.002	USD
	Cable	23.930	21.340	10.000	USD
	Fibra	433	430	1600	USD
	TOTAL	185.419	178.231	185.912	USD

Nota: Construcción propia

Vida útil: Acuña (2003) lo define como “el período en que una unidad de producto funciona con una razón de falla que se considera aceptable por parte del cliente” (p.21).

Período en el un producto o sistema mantiene sus características funcionales y de seguridad, aceptables con condiciones óptimas. Este criterio no cuenta con alguna fórmula que pueda ser usado, debido a varios aspectos que se deben tener en cuenta como frecuencia de operación, las condiciones en donde se tengan instalados, en donde los afecta el calor, la humedad, la limpieza, por tal razón y teniendo en cuenta que las tres alternativas son componentes de hardware electrónico y de software, se le asigna una vida útil de 15 años, para las 3 alternativas, la anterior es un consenso de equipos electrónicos al interior de la organización.

Disponibilidad de servicio: Es el grado o porcentaje en que un sistema o equipo se encuentra en condiciones de operación para realizar la tarea para la cual esta diseñado.

Costo: Sánchez Barraza (2009) la define como “el valor sacrificado de unidades monetarias para adquirir bienes o servicios con el fin de obtener beneficios presentes o futuros” (p.97). La disponibilidad viene dada por la siguiente ecuación, la cual aplicamos a tiempos de evaluación de las alternativas.

$$Disponibilidad = \frac{Horas\ totales - Horas\ de\ parada}{Horas\ totales} \times 100\% \quad Ecuacion\ 13$$

De acuerdo con lo anterior se puede construir la siguiente tabla de disponibilidad de las tres alternativas, dando un rango mínimo debido a una falla o ninguna falla en su periodo de evaluación.

Tabla 18. Disponibilidad de alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Disponibilidad	99,8 a 100%	99,8 a 100%	99,8 a 100%

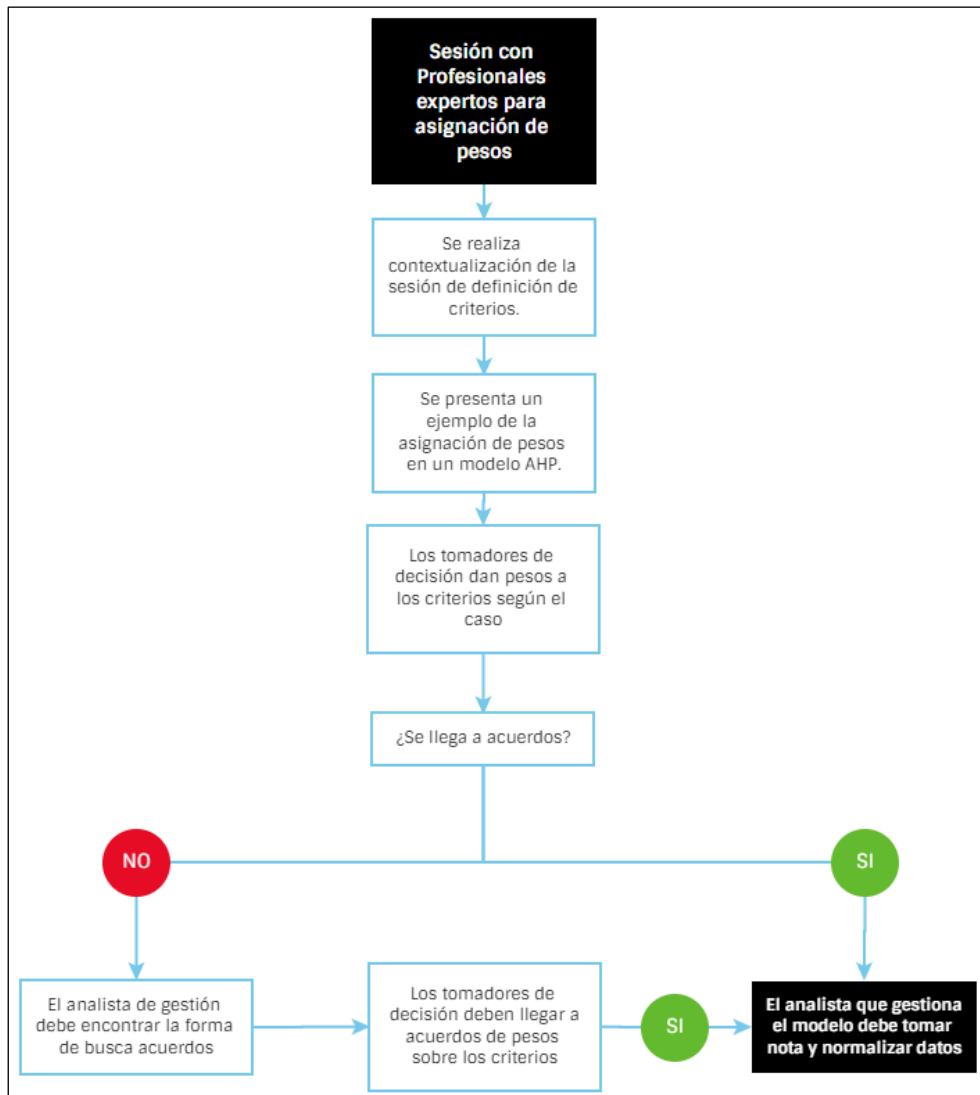
Nota: Construcción propia

Teniendo en cuenta los criterios, se acuerda otra sesión con el grupo de expertos para realizar el ejercicio del modelo AHP para apoyo a la toma de decisión y la asignación de pesos a los criterios.

2.1.4 Sesión con expertos para la definición de pesos

Luego de la selección de los criterios se acuerda una segunda sesión para la asignación de pesos. La sesión debe iniciar con una contextualización del trabajo realizado y los acuerdos alcanzados para no distraer al profesional experto. Se presenta un breve ejemplo de una asignación de pesos en un modelo AHP y posterior se realiza el ejercicio de la asignación de pesos para los diferentes criterios, de no tener consensos en la asignación de pesos, el analista que lidera el ejercicio debe buscar los mecanismos para conseguir consensos, como la experiencia vivida por los expertos o casos puntuales vividos para que el grupo de expertos estén de acuerdo en la asignación de los pesos.

Figura 14. Diagrama de la sesión de expertos para asignar pesos a los criterios.



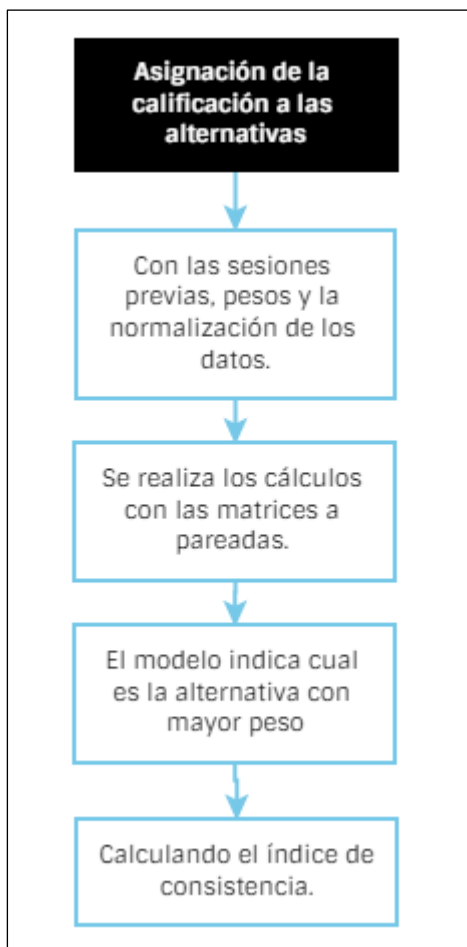
Nota: Construcción propia

En el capítulo siguiente se describirá el proceso de asignación de peso a los criterios, llegando a consensos entre los profesionales expertos, dependiendo de experiencias o casos reales que tengan conocimientos previos y se presentara en el desarrollo de la metodología, debido que es particular al caso de estudio.

2.1.5 Asignación de calificación a las diferentes alternativas

Luego de la asignación de pesos, en la figura 15 se presenta el diagrama para la evaluación de las alternativas y sus puntajes según los indica el modelo AHP, con las matrices pareadas.

Figura 15. Diagrama de la sesión de expertos para asignar pesos a los criterios.



Nota: Construcción propia

En el capítulo siguiente se presentará la asignación de la calificación para el estudio del caso en la subestación eléctrica Sochagota.

3. Caso de estudio en la subestación Sochagota

El caso de estudio se realizara en la elección de la mejor alternativa en la subestación Sochagota, para que el lector entienda mejor la capacidad de la subestación y la importancia geográfica se presentara la siguiente sección para contextualizar con una descripción de la subestación.

3.1 Descripción de la subestación Sochagota

La subestación eléctrica Sochagota se encuentra ubicada cerca al lago Sochagota en el municipio de Paipa en el departamento de Boyacá. Fue construida en el año 2000 con el objetivo de fortalecer y expandir la red interconectada nacional.

La figura 16 presenta el interconexionado nacional y la relevancia de la subestación Sochagota para el departamento de Boyacá

Figura 16. Diagrama Unifilar subestación Sochagota



Fuente: Interconectado nacional, presentación corporativa 2021 ISA. (Interconexión Eléctrica)

La subestación Sochagota maneja un voltaje de 230.000 Voltios, y es una de las más importantes del centro del país por su ubicación geográfica y su tamaño ya que está compuesta por 9 bahías, con una configuración de doble barra más transferencia, lo cual quiere decir que cualquiera de las barras puede ser aislada sin necesidad de interrumpir el servicio de los circuitos conectados.

La subestación Sochagota se puede visualizar en la imagen 17.

Figura 17. Subestación Sochagota

Fuente: Subestación Sochagota, ISA. (Interconexión Eléctrica)

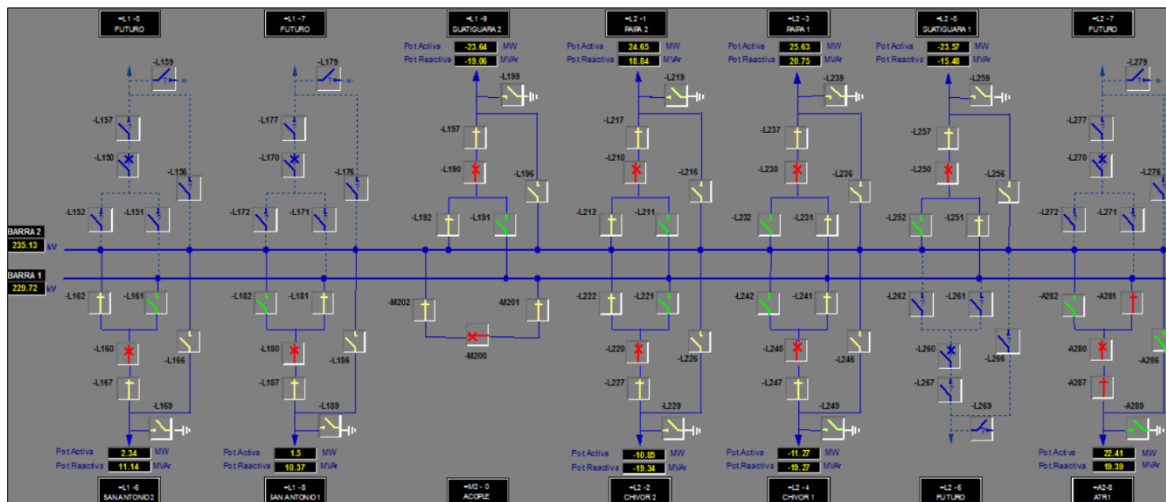
Los circuitos que se encuentran en la subestación Sochagota son:

- Paipa 1
- Paipa 2
- Chivor 1
- Chivor 2
- San Antonio 1
- San Antonio 2
- Guatiguara 1
- Guatiguara 2
- Conexión ATR1 – EBSA

Se puede ver el diagrama unifilar de los circuitos de la subestación Sochagota en la figura No. 18.

La subestación Sochagota funcionaba bajo un sistema de supervisión antiguo obsoleto con múltiples fallos, sin soporte técnico debido a la actualización de sistemas y a la implementación de la norma IEC61850, también el hardware estaba compuesto por equipos los cuales no tenían remplazo debido que no se encontraban en el mercado, por tal razón se hizo evidente evaluar qué sistema de automatización implementar para modernizar la subestación y volverla más segura, eficiente y confiable. Por tal razón se tuvieron en cuenta los criterios mencionados en la metodología y en el desarrollo del modelo.

Figura 18. Diagrama Unifilar subestación Sochagota

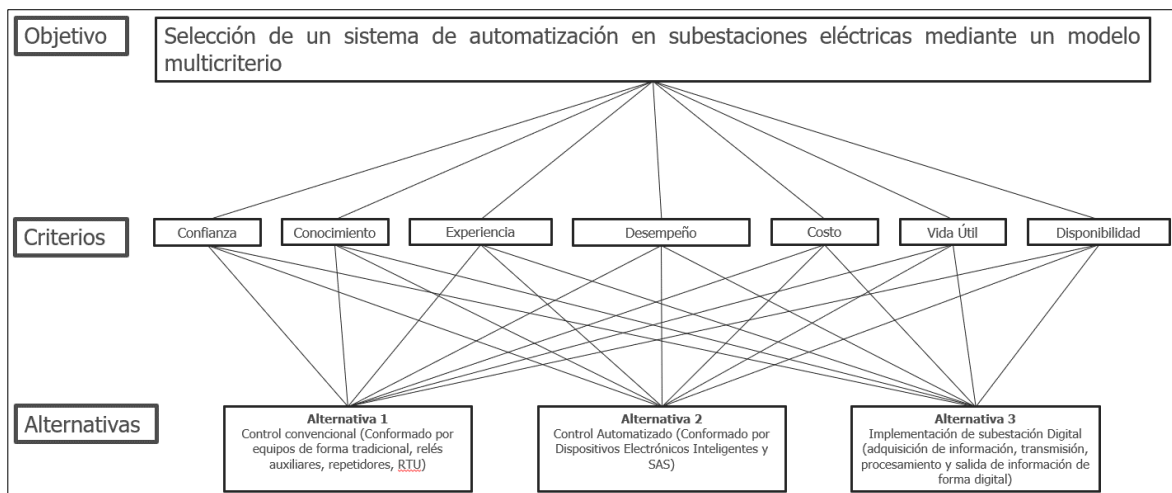


Fuente: Subestación Sochagota, ISA. (Interconexión Eléctrica)

3.2 Desarrollo de la metodología

A continuación, se presenta el desarrollo y la implementación de acuerdo con los criterios y criterios definidos con los cuales se elabora el siguiente modelo que fue el implementado en la entrevista. Nótese que, dado el reducido número de criterios, se optó por definirlos a todos como criterios, obviándose el paso intermedio de realizar una comparación pareada entre los criterios que inicialmente agrupaban a los criterios (técnico y financiero).

Figura 19. Modelo AHP para la toma de decisión



NOTA: Elaboración propia

Las dos sesiones desarrolladas con los profesionales expertos se explicaron en las secciones 2.1.3 y 2.1.4. con las cuales se llega al siguiente resultado de la asignación de pesos.

Tabla 19. Análisis multicriterio AHP

	Confiabilidad	Conocimiento	Experiencia	Desempeño	Costo	Vida Útil	Disponibilidad
CRITERIOS							
Confiabilidad	1	7	5	1	3	1	1
Conocimiento	1/7	1	1	1/5	1/5	1/5	1
Experiencia	1/5	1	1	1/5	1/3	1/5	1
Desempeño	1	5	5	1	3	1/3	1
Costo	1/3	5	3	1/3	1	1	1
Vida Útil	1	5	5	3	1	1	1

Disponibilidad	1	1	1	1	1	1	1	1
	4 2/3	25	21	6 3/4	9 1/2	4 3/4		7

Nota: Construcción propia

La anterior tabla muestra una tendencia de mayor importancia en temas de conocimiento, la experiencia, el costo y la disponibilidad. Según algunos comentarios de los expertos

Normalizando los resultados iniciales se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 20. Análisis multicriterio AHP – Normalizado

NORMALIZADO	Confiabilidad	Conocimiento	Experiencia	Desempeño	Costo	Vida Útil	Disponibilidad	MEDIA
Confiabilidad	1/5	2/7	1/4	1/7	1/3	1/5	1/7	22%
Conocimiento	0	0	0	0	0	0	1/7	5%
Experiencia	0	0	0	0	0	0	1/7	5%
Desempeño	1/5	1/5	1/4	1/7	1/3	0	1/7	19%
Costo	0	1/5	1/7	0	1/9	1/5	1/7	13%
Vida Útil	1/5	1/5	1/4	4/9	1/9	1/5	1/7	22%
Disponibilidad	1/5	0	0	1/7	1/9	1/5	1/7	13%

Nota: Construcción propia

Posterior a la definición de ponderación de los criterios debemos continuar con la ponderación de cada uno de los criterios con las alternativas, iniciando con el criterio 1 que para este caso es la Confiabilidad, el detalle de los cálculos se puede ver en el Anexo A.

En donde los resultados obtenidos son:

Tabla 21. Resultados de la evaluación AHP

Confiabilidad	MEDIA	Conocimiento	MEDIA
Alternativa 1	33%	Alternativa 1	70%
Alternativa 2	33%	Alternativa 2	23%
Alternativa 3	33%	Alternativa 3	7%

Experiencia	MEDIA	Desempeño	MEDIA
Alternativa 1	14%	Alternativa 1	33%
Alternativa 2	57%	Alternativa 2	33%
Alternativa 3	29%	Alternativa 3	33%

Costo	MEDIA	Vida Útil	MEDIA
Alternativa 1	29%	Alternativa 1	33%
Alternativa 2	57%	Alternativa 2	33%
Alternativa 3	14%	Alternativa 3	33%

Disponibilidad	MEDIA
Alternativa 1	20%
Alternativa 2	20%
Alternativa 3	60%

Nota: Construcción propia

Y los resultados de las alternativas son:

Tabla 22. Resultados de la evaluación AHP con alternativas

Alternativa 1	0,31
Alternativa 2	0,35
Alternativa 3	0,32

Nota: Construcción propia

Ahora bien, como se mencionó en la metodología se debe realizar el cálculo del índice y la ratio de consistencia.

Tabla 23. Cálculo de consistencia

CI	0,13
CR	0,10

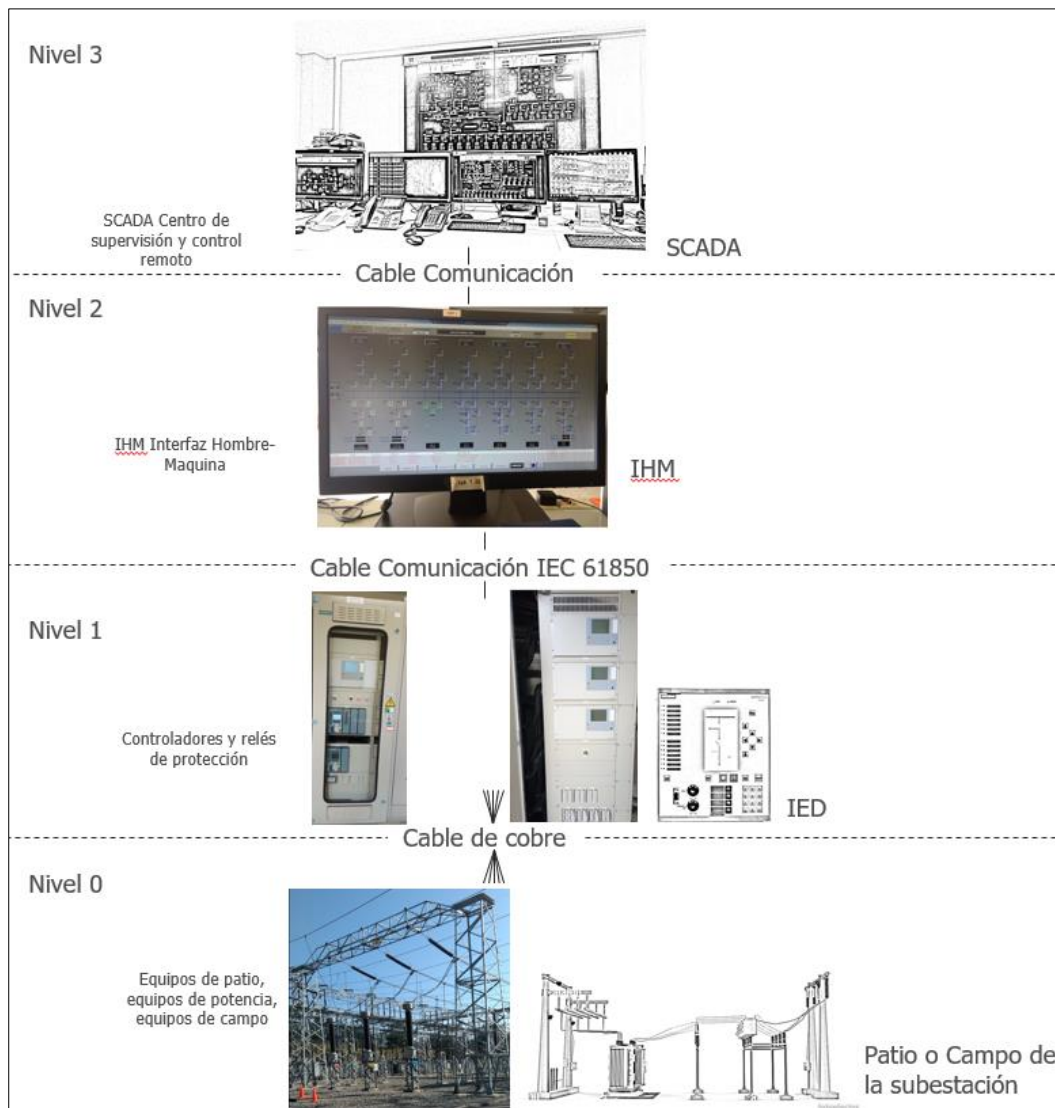
Nota: Construcción propia

Según indica la tabla 11, para una matriz de 5 o más elementos de debe manejar una ratio de consistencia de 10% lo cual indica que los datos y la alternativa es consistente con el modelo. Para ver más detalle del cálculo ver el anexo b.

En la subestación Sochagota se implementó el sistema de automatización SAS con IED, como lo presenta el modelo multicriterio AHP que se desarrolló.

La figura 20 se representa la estructura del sistema con imágenes reales de la subestación.

Figura 20. Sistema de automatización con IED implementado en S/E Sochagota



Nota: Elaboración propia

Algunos de los beneficios de esta implementación son:

- Indicación de estado de equipos de forma remota, no es necesario que un asistente se encuentre en la subestación.
- Visualización de eventos y alarmas con sonido, lo cual dispone la atención del asistente de la subestación para su posterior revisión.
- Control y maniobra sobre los diferentes equipos como interruptores y seccionadores.
- Tendencias de las medidas analogas para identificar posibles cargar o sobre cargas sobre el sistema.

- Durante la permanente supervisión del sistema, los equipos digitales reducen la necesidad de intervención manual en circuitos eléctricos y aumentan el grado de supervisión.
- Mayor cantidad de información puede ser procesada de manera digital, así como la disponibilidad de dicha información en distintas bahías de la subestación
- Flexibilidad en el análisis de la información al visualizarla en la IHM y tenerla centralizada.
- Adquisición de información sin pérdida de calidad de esta, gracias a la implementación de la norma IEC61850 se conoce lo más cercano a la fuente la calidad del dato, el dato y la estampa de tiempo de la señal.
- Se agrega seguridad al personal de operación y mantenimiento al reducir riesgo eléctrico y poder hacer supervisión o control desde nivel 2 o 3.
- Reducción en tiempos de pruebas de señalización debido que la norma IEC61850 implica una jerarquía en la estructura de los datos, con esto se consiguen pruebas normalizadas.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Como lo menciona Bravo, Santana, & Rodon (2014) un sistema de automatización puede tener dos roles, el primero es producir información y el segundo, automatizar actividades que realicen humanos. Así pues, implementar un sistema de automatización de subestación implica un mayor nivel de intervención de la tecnología y esto incrementa la utilidad y mejora el desempeño. Por tal razón se evidencia que el sistema de automatización de subestaciones eléctricas es una potente herramienta para innovar, incrementar utilidad y mejorar desempeño que se encarga de tareas repetitivas, y es el asistente de la subestación el que tiene la capacidad de improvisar y tomar decisiones cuando se requiera.

Adicional es importante resaltar la integración de nuevas tecnologías y la automatización en procesos en busca de eficiencias en el ciclo completo del proceso.

Ahora bien, contrastando el resultado de la entrevista con el modelo AHP y el personal experto se observa que es acorde a lo que se implementó en la subestación Sochagota. Adicional se observa la importancia del modelo multicriterio, en donde inicialmente se realizó un filtro de criterios gracias al cuestionario que se le realizó a los expertos y como resultado se elaboraron unos criterios.

Es importante entender la respuesta a la pregunta tres, en donde cuatro expertos indicaron que la alternativa tres era la que se debía elegir, y posterior a la entrevista con el modelo AHP se observa que el modelo priorizó como número 1 a la alternativa 2, posterior alternativa 3 y finalmente alternativa 1. Lo cual es una tendencia que el modelo multicriterio es útil y llega a grupo de expertos a pensar en asignar pesos entre los criterios y criterios y finalmente en el modelo implementado en este documento resultó ser igual a la alternativa que se implementó en la subestación.

Se puede entender que la alternativa más reciente es el sistema de automatización en subestaciones digitales con múltiples beneficios, pero eso no significó que fuera la que el

método diera como resultado. Se tuvo en cuenta faltas de experiencia, conocimiento entre otros para evidenciar que las tecnologías más recientes no son necesariamente las que se deban implementar.

4.2 Recomendaciones

Se resalta la importancia de la elección del modelo multicriterio adecuado, es importante saber qué respuesta se quiere conseguir para de esa forma orientar la búsqueda del modelo que más se acomode a las necesidades. También se sugiere que se realice entrevistas a grupos de expertos del tema, debido que si no se entrevista al experto puede recibir información errónea que no elegirá la más apropiada alternativa.

Entre las entrevistas de expertos se debe manejar grupo pequeños máximo de 6 personas como fue el caso que se presentó en este documento, debido que las decisiones grupales se vuelven una conversación larga con múltiples puntos de vistas y llegar a acuerdos puede tomar tiempo y varias sesiones.

Así mismo se debe hacer una selección de los expertos para poder hacer entrevistas con expertos dependiendo su especialidad o su experiencia, se evidencio que cada experto tenía un punto de vista diferente y los acuerdos en los pesos se dio en la segunda sesión de la entrevista.

A. Anexo: Detalles del cálculo de los pesos de la aplicación del método AHP.

Los siguientes son el detalle de los cálculos según el método AHP.

Tabla 24. Evaluación de criterio 1, la confiabilidad respecto las alternativas

Confiabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1	1
Alternativa 2	1	1	1
Alternativa 3	1	1	1
	3	3	3

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 25

Tabla 25. Evaluación de criterio 1, la confiabilidad respecto las alternativas

Confiabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 2	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 3	0,33	0,33	0,33	33%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 2, el conocimiento respecto las alternativas.

Tabla 26. Evaluación de criterio 2, el conocimiento respecto las alternativas

Conocimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	5	7
Alternativa 2	1/5	1	5
Alternativa 3	1/7	1/5	1

1 1/3

6 1/5

13

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 27

Tabla 27. Evaluación de criterio 2, el conocimiento respecto las alternativas

Conocimiento	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,74	0,81	0,54	70%
Alternativa 2	0,15	0,16	0,38	23%
Alternativa 3	0,11	0,03	0,08	7%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 3, la experiencia respecto las alternativas.

Tabla 28. Evaluación de criterio 3, la experiencia respecto las alternativas

Experiencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1/3	1/3
Alternativa 2	3	1	3
Alternativa 3	3	1/3	1
	7	1 2/3	4 1/3

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 29

Tabla 29. Evaluación de criterio 3, la experiencia respecto las alternativas

Experiencia	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,14	0,20	0,08	14%
Alternativa 2	0,43	0,60	0,69	57%
Alternativa 3	0,43	0,20	0,23	29%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 4, el desempeño respecto las alternativas.

Tabla 30. Evaluación de criterio 4, el desempeño respecto las alternativas

Desempeño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1	1

Alternativa 2	1	1	1
Alternativa 3	1	1	1
	3	3	3

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 31

Tabla 31. Evaluación de criterio 4, el desempeño respecto las alternativas

Desempeño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 2	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 3	0,33	0,33	0,33	33%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 5, el costo respecto las alternativas.

Tabla 32. Evaluación de criterio 5, el costo respecto las alternativas

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1/3	3
Alternativa 2	3	1	3
Alternativa 3	1/3	1/3	1
	4 1/3	1 2/3	7

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 33

Tabla 33. Evaluación de criterio 5, el costo respecto las alternativas

Costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,23	0,20	0,43	29%
Alternativa 2	0,69	0,60	0,43	57%
Alternativa 3	0,08	0,20	0,14	14%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 6, vida útil respecto las alternativas.

Tabla 34. Evaluación de criterio 6, vida útil respecto las alternativas

Vida Útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1	1
Alternativa 2	1	1	1
Alternativa 3	1	1	1
	3	3	3

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 35

Tabla 35. Evaluación de criterio 6, la vida útil respecto las alternativas

Vida Útil	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 2	0,33	0,33	0,33	33%
Alternativa 3	0,33	0,33	0,33	33%

Nota: Construcción propia

Continuamos con el criterio 7, la disponibilidad respecto las alternativas.

Tabla 36. Evaluación de criterio 7, la disponibilidad respecto las alternativas

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	1	1/3
Alternativa 2	1	1	1/3
Alternativa 3	3	3	1
	5	5	1 2/3

Nota: Construcción propia

Normalizando conseguimos la tabla 37

Tabla 37. Evaluación de criterio 7 respecto las alternativas

Disponibilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	MEDIA
Alternativa 1	0,20	0,20	0,20	20%
Alternativa 2	0,20	0,20	0,20	20%
Alternativa 3	0,60	0,60	0,60	60%

Nota: Construcción propia

B. Anexo: Detalles del cálculo de la consistencia del modelo AHP.

Los siguientes son el detalle de los cálculos para determinar la consistencia del modelo AHP.

Tabla 38. Análisis multicriterio AHP

CRITERIOS	Confiabilidad	Conocimiento	Experiencia	Desempeño	Costo	Vida Útil	Disponibilidad	Suma de filas	Promedio
Confiabilidad	1	7	5	1	3	1	1	1,549	0,221
Conocimiento	1/7	1	1	1/5	1/5	1/5	1	0,353	0,050
Experiencia	1/5	1	1	1/5	1/3	1/5	1	0,380	0,054
Desempeño	1	5	5	1	3	1/3	1	1,328	0,189
Costo	1/3	5	3	1/3	1	1	1	0,922	0,131
Vida Útil	1	5	5	3	1	1	1	1,556	0,222
Disponibilidad	1	1	1	1	1	1	1	0,909	0,129
	4 2/3	25	21	6 3/4	9 1/2	4 3/4	7		

Nota: Construcción propia

Posterior a la suma y promedio se procede a realizar la multiplicación de la matriz con la fila promedio, y posterior el resultado se divide por el promedio para obtener el cociente.

Tabla 39. Vector fila total, cociente AHP

Vector fila total	Cociente
1,784252855	8,06171584
0,375139441	7,41881628
0,405361111	7,4638869
1,534882023	8,08790806
1,036817002	7,86603879
1,799052206	8,09077621
1	7,70074433

Nota: Construcción propia

Luego se realiza el promedio de los cocientes y se obtiene el Lamda máximo.

$$\text{Lamda Max} = 7,812$$

Y finalmente obtenemos el coeficiente de consistencia y la ratio de consistencia.

Tabla 40. Coeficiente de consistencia

CI	0,13
CR	0,10

Nota: Construcción propia

En donde finalmente la ratio de consistencia es por redondeo 10%.

5. Bibliografía

- ABB. (03 de 09 de 2018). <https://new.abb.com>. Obtenido de https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/colombia-ecuador-docs/abb-digital-service-day-and-benefits---espa%C3%B1ol1.pdf?sfvrsn=63e3ec14_2
- Acuña, J. A. (2003). *Ingeniería de confiabilidad*. . Costa Rica: Editorial Tecnológica de CR.
- Arias Giraldo, T. (2020). Evaluación, selección y análisis de arquitecturas de comunicación para subestaciones digitales y su aplicación en empresas del sector Eléctrico.
- Arun, T., Lathesh, L., & Suhas, A. (2016). Substation Automation System. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 215-218.
- Aznar Bellver, J. &. (2012). *Nuevos métodos de valoración. Modelos Multicriterio*. Valencia, España: Editorial Universitat Politècnica de València.
- Berumen, S., & Llamazares Redondo, F. (2007). La utilidad de los metodos de decision multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de administracion*, 65-87.
- Bravo, E., Santana, M., & Rodon, J. (2014). Impacto de la automatizacion sobre el desempeño: Evaluacion en sistemas de informacion. *Revista Venezolana de Gerencia (RVG)*, 267-286.
- Commission, I. E. (2003). *Norma IEC 61850*. Obtenido de <https://iec.ch/homepage>: <https://webstore.iec.ch/publication/59652>
- Davenport, T., & Prusak, L. (2001). *Conocimiento en acción*. Brasil: Prentice Hall.
- Dehghanian, P. K.-F. (2011). Optimal RTU placement in power distribution systems using a novel method based on analytical hierarchical process (AHP). *In 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE.*, 1-4.
- Florez Uribe, J. (2017). *Proyectos de Inversión para las PYME*. Bogota: Ecoe Ediciones.

- Gao, H. &. (2011). Security assessment of communication networks for integrated substation automation systems. . *In International Conference on Information Computing and Applications.*, 448-455.
- Gao, H. D. (2014). Cyber security risk assessment of communication network of substation based on improved grey clustering. *In 2014 Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing. IEEE.*, 524-527.
- Guo, J. B. (2014). Security risk assessment and weaknesses identification of the substation automation system. *In 2014 International Conference on Power System Technology. IEEE.*, 1881-1888.
- HUANG, Y. J. (2019). Risk Assessment of Substation Automation System Failure Considering Human Reliability. *Power Generation Technology.*, 448-454.
- Ingram, M., & Ehlers, R. (2007). Toward Effective Substation Automation. *IEEE power & energy magazine*, 67-73.
- Kezunovic, M. (2009). Substation Automation Research Frontiers. *IEEE*, 1-2.
- Kim, S., & Song, O. (2009). A MAUT approach for selecting a dismantling scenario for the thermal column in KRR-1. *Annals of Nuclear Energy*, 145-150.
- Kumar, S., Abu-Siada, A., Das, N., & Islam, S. (2021). Toward a Substation Automation System Based on IEC 61850. *Electronics*, 1-16.
- Lee, A., Hung, M.-C., Kang, H.-Y., & Pearn, W. (2012). A wind turbine evaluation model under a multi-criteria decision making environment. *Energy conversion and management*, 289-300.
- Liang, M., Geng, H., Bao, X., & Jun, Y. (2013). Substation automation system integrating PMU based on multi-agent. *IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatic*, 586-590.
- Liao, H., & Xu, Z. (2014). Multi-criteria decision making with intuitionistic fuzzy PROMETHEE. . *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 1703-1717.
- Liu, N. Z. (2009). Vulnerability assessment for communication network of substation automation systems to cyber attack. *In 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE.*, 1-7.
- Liu, T., & Zhang, F. (2015). the brief technical analysis on power system automation. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering*, (págs. 1322-1325).

- Long, L. I. (2018). Substation Automation Equipment State Evaluation Method Based on Comprehensive Analysis of Interval Value Fuzzy Soft Sets. . In *2018 International Conference on Power System Technology. IEEE.*, 4015-4021.
- Madonsela, B., Davidson, I. E., & Mulangu, C. (2018). Advances in telecontrol and remote terminal units (RTU) for power substations. *IEEE*, 827-832.
- Matsuda, S., Watabe, Y., Izani Asizal, I., Katayama, S., Okuno, K., & Kasuga, K. (2011). Issues overcome in the design and application of IEC 61850-compliant substation automation systems. *International Conference on Advanced Power System Automation and Protection IEEE*, 198-202.
- Mejia Villegas. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tension. Bogota: HMV. Bogota: HMV.*
- Mejia Villegas, & HMV Ingenieros. (2003). *Subestaciones de alta y extra alta tension. Medellin: Editorial HMV Ingenieros.*
- Mora Gutiérrez, A. (2009). *Mantenimiento-planeación, ejecución y control. Mexico: Alfaomega Grupo Editor.*
- Nagles, N. (2007). La gestión del conocimiento como fuente de innovación. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 97-102.
- Osorio Gomez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). El proceos de analisis jerarquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicacion. *Scientia et Technica*, 247-252.
- Peña Suarez, J., & Vanegas Restrepo, A. (2020). Subestaciones digitales, una apuesta al futuro. *Revista EPM*, 29-47.
- Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 365-381.
- Ren, J. S. (2017). A comprehensive evaluation system of smart distribution grid based on AHP and adaptive correction. In *2017 Chinese Automation Congress (CAC) IEEE.*, 2170-2174.
- Rodas Areiza, A. (2018). *Definición y priorización de portafolios de proyectos para la asignación de recursos en una empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios. Medellin: Ingeniería Administrativa.*
- Romero, C. (1996). *Analisis de las decisiones multicriterio. Madrid: Isdefe.*

- Roy, B., & Slowinski, R. (2013). Questions guiding the choice of a multicriteria decision aiding method. *EURO Journal on Decision Processes*, 69-97.
- Saaty, T. (1987). The Analytic Hierarchy Process-What it is and how it is used. *Mathl Modelling*, 161-167.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 9-26.
- Samanlioglu, F. &. (2017). A fuzzy AHP-PROMETHEE II approach for evaluation of solar power plant location alternatives in Turkey. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 859-871.
- Sánchez Barraza, B. J. (2009). Revista de la Facultad de Ciencias Contables. *Problemática de conceptos de costos y clasificación de costos.*, 103-112.
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Scott, J. W. (2001). Experiencia. . *Revista de estudios de género: La ventana*, 42-74.
- Siphokazi, M., & Akshay, S. (2018). Implementation of Substation SCADA and Automation Systems in the Port of Durban. *IEEE*, 214-219.
- Song, W., Yan, C., Wang, M., Wang Xiaokai, & Yang Liu. (2020). Research on the Data Management and Decision-Making Method of the Intelligent Substation System Based on SCD. *IEEE*, 892-895.
- Unidad de Planeacion Minero energetica. (Julio de 2018). *Unidad de Planeacion Minero energetica*. Obtenido de Unidad de Planeacion Minero energetica:
<https://www1.upme.gov.co/Hemeroteca/Paginas/estudio-observatorio-de-energia.aspx>
- Unidad de Planeacion Minero Energetica. (Noviembre de 2020).
<https://www1.upme.gov.co>. Obtenido de Unidad de Planeacion Minero Energetica:
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf
- Vélez Gómez, L. (2009). *Aspectos economicos de los proyectos del sector publico*. Medellin: Universidad Nacional de Colombia.
- Wei, Z., Wang, X., & Guo, Q. (2011). A contractor prequalification model based on triangular fuzzy number and TOPSIS. *In 2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1-4.
- Wiguna, K. A. (2016). Optimization solar farm site selection using multi-criteria decision making fuzzy AHP and PROMETHEE: case study in Bali. *In 2016 International*

- Conference on Information & Communication Technology and Systems. IEEE.*, 237-243.
- Yajure Ramirez, C. A., & Guzman, Y. A. (2017). Estudio comparativo de tecnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquizacion de tecnologias de energias renovables a utilizar en la produccion de electricidad. *Scientia Et Technica*, 273-280.
- Yalcin, N., Bayrakdaroglu, A., & Kahraman, C. (2012). Application of fuzzy multi-criteria decision making methods for financial performance evaluation of Turkish manufacturing industries. *Expert systems with applications*, 350-364.
- Yan, X. Y. (2016). A grey correlation and topsis based evaluation method on main electric connection of new generation smart substation. *In 2016 China International Conference on Electricity Distribution. IEEE.*, 1-4.
- Zhang, F. &. (2018). Risk assessment for substation operation based on triangular fuzzy number AHP and cloud model. *In 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. IEEE.*, 1-5.
- Zhiyu, S. (2022). Research on Efficient and Safe Operation of Substation Automation System. *IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA)*, 1003-1005.
- Zhou, P., Ang, B., & Leng Poh, K. (2006). Decision analysis in energy and environmental modeling: An update. *Energy*, 2604-2622.