

Revista

epm[®]

Publicación especializada en la gestión de servicios públicos

No. 23 | Enero - Junio 2024

La importancia de las certificaciones
y las acreditaciones como soporte
de la competencia y la calidad

Transformación continua:
aplicación del método kaizen
en un proceso de EPM

**Implementación de un caso
de estudio de Sistemas de
Almacenamiento de Energía con
Baterías (SAEB) para subestaciones
de generación y de distribución**





energía | gas natural | aguas

Revista EPM No. 23
Enero – junio 2024
ISSN: 2145-1524

GRUPO DIRECTIVO EPM:

Jhon Alberto Maya Salazar

Gerente General

Gabriel Velásquez Restrepo (E)

Secretaría General

Margarita María Salazar Henao (E)

Vicepresidenta Ejecutiva Gestión de Negocios

Alejandro Jaramillo Arango (E)

Vicepresidente Ejecutivo Nuevos Negocios, Innovación y Tecnología

Adriana Janeth Pulgarín Piedrahíta (E)

Vicepresidenta Ejecutiva Proyectos e Ingeniería

Diana Rúa Jaramillo

Vicepresidenta Ejecutiva Finanzas Corporativas e Inversiones

Carlos Israel Orduz Aguilar

Vicepresidente Generación Energía

John Jairo Celis Restrepo (E)

Vicepresidente Transmisión y Distribución Energía

Diego Humberto Montoya Mesa

Vicepresidente Gas

Santiago Ochoa Posada

Vicepresidente Agua y Saneamiento

William Giraldo Jiménez

Vicepresidente Proyectos Generación Energía

Juan Felipe Valencia Gaviria

Vicepresidente Comercial

Sebastián Méndez Agudelo (E)

Vicepresidente Crecimiento Negocios

Adriana María Palau Ángel (E)

Vicepresidenta Sostenibilidad y estrategia

María Patricia Giraldo Velásquez

Vicepresidenta Experiencia del Empleado y Soluciones Organizacionales

Humberto Iglesias Gómez

Vicepresidente Suministros y Servicios Compartidos

Gabriel Jaime Velásquez Restrepo

Vicepresidente Asuntos Legales

Mónica Julieta Pinzón Bueno

Vicepresidenta Comunicación y Relaciones Corporativas

Angela Vergara Jaller (E)

Vicepresidenta Riesgos

Gustavo Alejandro Gallego Hernández

Vicepresidente Auditoría Corporativa

Edición y coordinación de la Revista EPM:

Carolina Urrea Ernotte (E)

Unidad de Talento Humano

Evelyn Correa Zabala

Profesional Desarrollo Humano

Diego León Salazar Vargas

Gerencia Comunicación Corporativa

Paola Andrea Valencia Valencia

Gerencia Identidad Corporativa

Equipo editorial Biblioteca EPM

Amparo Eliza Peña Peña

Dahianna Elisey Moreno

Alejandro Ruiz Bonilla

Stevens Aguirre Pérez

Catalina Cardona Otálvaro

Diana Marcela Ramírez Betancur

Leidy Marian Martínez Toro

Ana Lorena González García

Alejandra Acevedo Sanchez

Periodicidad: semestral

Solicitud de Canje a:

Biblioteca EPM

Carrera 54 No.44-48 Plaza de Cisneros

Teléfono: 3807500

bibliotecaepm@epm.com.co

Medellín – Colombia

Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Carrera 58 No. 42 – 125 Apartado 940

E-mail: epm@epm.com.co

Tel: 3808080

Medellín – Colombia

www.epm.com.co

Presentación

Es fundamental para EPM consolidar y enriquecer continuamente la relación con sus grupos de interés, destacando la conexión con instituciones educativas y grupos comunitarios. La Revista EPM se establece como uno de los principales medios para la difusión de saberes surgidos de la ejecución de actividades en el amplio espectro de los servicios públicos. Los contenidos de esta, la vigésima tercera edición, reflejan la labor cotidiana de los colaboradores, quienes, con el ánimo de compartir sus experiencias y aprendizajes, contribuyen al desarrollo del conocimiento colectivo en pro del bienestar social.

Como apertura de esta edición, se resalta la influencia positiva del *Eucalyptus saligna* en el artículo "Restauración ecológica utilizando *Eucalyptus saligna*: especie clave en este proceso". Este profundiza en el papel vital que juega esta especie si es utilizada correctamente en la revitalización de zonas deterioradas como en el caso del municipio de Urrao, departamento de Antioquia, Colombia, donde la siembra controlada de dicha especie aportó condiciones favorables que posibilitaron la recuperación de una zona degradada por la práctica de ganadería extensiva. Trascendiendo los estigmas se invita a la reflexión sobre lo crucial de la reforestación en un planeta marcado por el cambio climático. La restauración va más allá de la simple plantación de árboles; representa un pacto con la vitalidad de la Tierra y la conservación de su rica biodiversidad. Además, de este compromiso con el medio ambiente; en el siguiente artículo, se guía al lector a través del intrincado laberinto de las subestaciones eléctricas.

La conexión en paralelo de transformadores emerge como una coreografía precisa, un juego de equilibrio entre eficiencia y estabilidad en el artículo "Conexión de transformadores en paralelo con diferentes grupos vectoriales en las subestaciones Santa Fé de Antioquia

y San Jerónimo con validaciones en el programa Alternative Transients Program (ATP)". Donde se exploran los distintos grupos vectoriales y las validaciones en el programa ATP, descubriendo cómo cada elección técnica repercute en la red eléctrica global.

El siguiente artículo aborda el "pH En el proceso de potabilización en el contexto colombiano". Aquí, se aborda el concepto de pH asociado al equilibrio químico acuoso y relaciona su significancia dentro del proceso de potabilización. La lectura evidencia que la innovación continúa siendo un elemento fundamental en el ámbito empresarial y que el desarrollo de indicadores para la medición de esta ha experimentado un avance notable en las recientes décadas.

Y en un mundo donde la sostenibilidad es clave, el siguiente artículo nos lleva al corazón de la generación y distribución energética. Implementación de un caso de estudio de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías (SAEB) para subestaciones de generación y de distribución ilustra cómo las baterías están revolucionando el sector; no solo fortalecen la red eléctrica, sino que también contribuyen a la rentabilización y descarbonización de los negocios de generación y de distribución de energía, sentando las bases para un futuro energético más limpio, resiliente, y rentable. Este impulso hacia la eficiencia y la calidad también se observa en el ámbito de las credenciales empresariales.

En el artículo "La importancia de las certificaciones y las acreditaciones como soporte de la competencia y la calidad" se argumenta que las certificaciones son más que meros emblemas, papeles, cartones; son testimonios de competencia y excelencia; las acreditaciones, por su parte, son avales de fiabilidad profesional. Se invita a reflexionar sobre el impacto de estas credenciales y cómo comprender desde la óptica cuantitativa la importancia de los sistemas de gestión.

La filosofía Kaizen nos muestra la importancia de la mejora continua; inspirado en la filosofía japonesa del Kaizen, el artículo "Transformación continua: aplicación del método Kaizen en un proceso de EPM" explora cómo la implementación de cambios progresivos y metódicos puede catalizar mejoras sustanciales. El Kaizen trasciende la manufactura para impregnar la cultura corporativa, la administración de proyectos y la satisfacción del cliente, recordando que la adaptabilidad y la mejora continua son vitales para el triunfo a largo plazo.

Esta misma búsqueda de excelencia se aplica a la seguridad y eficiencia energética, como se detalla en el último artículo "Identificación de vegetación propensa a generar fallas de líneas de transmisión usando UVAS, Modelos digitales de elevación y analítica espacial" que introduce un factor esencial para la seguridad y eficiencia energética, la inspección de líneas de transmisión, lejos de ser una labor monótona, es una medida preventiva contra fallos y cortes de energía, vital para la continuidad del servicio.

Al cierre de esta edición de la Revista EPM, deseamos que los conocimientos y las estrategias presentadas en estas páginas enriquezcan su visión y sirvan como valiosas herramientas para fortalecer su gestión institucional; que este intercambio de sabiduría impulse su éxito y el de la organización hacia nuevos horizontes.

Comité Editorial Revista EPM



Dedicado a Luz Beatriz Rodas Guerrero



A lo largo de los años, tu compromiso y pasión han sido el corazón latente de nuestra Revista; como líder del Comité Editorial, has tejido palabras y conocimientos en un tapiz que ha inspirado, educado y conectado a nuestra gente EPM.

En cada página, en cada artículo, has dejado una huella imborrable; tu visión, tu habilidad para comunicar y tu amor por el aprendizaje han sido faros que nos han guiado en este viaje.

Hoy, al despedirte, queremos expresar nuestra gratitud: gracias por tu dedicación incansable, por dar voz a las historias y logros de cada servidor, y por mantener viva la llama del conocimiento. Tu legado perdurará en cada edición futura, en cada línea escrita y en cada lector que encuentre inspiración en tus palabras.

Que esta nueva etapa de tu vida esté llena de alegría, descubrimientos y merecido descanso.

¡Feliz jubilación!

*Con gratitud y admiración,
Comité Editorial.*

Contenido



Restauración ecológica utilizando Eucalyptus saligna: especie clave en este proceso

Ecological restoration using Eucalyptus saligna: key species in this process

PAG 8



Conexión de transformadores en paralelo con diferentes grupos vectoriales en las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo con validaciones en el programa Alternative Transients Program (ATP)

Connection of transformers in parallel with different vector groups at the Santa Fe de Antioquia and San Jerónimo substations with validations in the Alternative Transients Program (ATP)

PAG 20



pH En el proceso de potabilización en el contexto colombiano

pH In the drinking water treatment process for colombian context

PAG 35



Implementación de un caso de estudio de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías (SAEB) para subestaciones de generación y de distribución

Implementing a study-case of a Battery Energy Storage Systems (BESS) with application for both generation and distribution substations

PAG 50



La importancia de las certificaciones y las acreditaciones como soporte de la competencia y la calidad

The importance of certifications and accreditations in support of competence and the quality

PAG 68



Transformación continua: aplicación del método Kaizen en un proceso de EPM

Continuous transformation: application of the kaizen method in an EPM process

PAG 80



Identificación de vegetación propensa a generar fallas de líneas de transmisión usando UVAS, Modelos digitales de elevación y analítica espacial

Identification of vegetation prone to generating transmission line failures using UVAS, digital elevation models and spatial analytics

PAG 89



Restauración ecológica utilizando *Eucalyptus saligna*: especie clave en este proceso

Ecological restoration using *Eucalyptus saligna*: key species in this process

**David Alejandro
Marín Cartagena**
Gerencia Centros de
Excelencia Técnica, EPM

david.cartagena@epm.com.co

Resumen

Este artículo, en primera instancia, aborda de manera amplia la importancia de la restauración ecológica y algunas de sus metodologías para luego ahondar en una técnica que ha sido muy desestimada y que cuenta con variedad de opositores, la reforestación utilizando especies introducidas, en este caso *eucalyptus saligna*. Se destaca la experiencia práctica obtenida en el municipio de Urrao, departamento de Antioquia, Colombia, donde la siembra controlada de esta

especie aportó condiciones favorables que posibilitaron la recuperación de una zona degradada por la práctica de ganadería extensiva, demostrando que su estigmatización se ha producido por el mal uso de este tipo de árboles y por la implementación de malas prácticas. Esta especie desempeña un papel sumamente beneficioso cuando se utiliza adecuadamente.

Palabras clave:

Eucalyptus saligna, Eucalipto, Restauración ecológica, Especies forestales, Degradación de suelos, Árboles nativos, Especies nativas

Keywords:

Eucalyptus saligna, Eucalyptus, Ecological restoration, Forest species, Soil degradation, Native trees, Native species

Introducción

Este documento describe de manera corta una metodología de restauración ecológica que surge por la necesidad de rehabilitar áreas que en algún momento fueron bosques, selvas o entornos naturales no intervenidos o con una intervención mínima. La ganadería, los monocultivos, la deforestación para la explotación maderera, la minería, la expansión de asentamientos humanos, la invasión de especies introducidas son algunas de las prácticas que han causado la degradación de suelos y entornos que ahora requieren acciones de restauración.

Para ejecutar dichas acciones de restauración, existen metodologías que pueden variar según la ubicación del sitio, el clima, la altura sobre el nivel del mar, el nivel de degradación, la actividad o razón degradadora, las especies existentes y las que allí habitaban, etc.

El sembrado masivo y el cuidado de especies vegetales nativas, a la vez que buscar controlar o eliminar la posible existencia de especies invasoras, hacen parte de estas metodologías. Este escrito describirá las bondades de la utilización del árbol Eucalipto (*eucalyptus saligna*) en la restauración de zonas utilizadas para ganadería y que tienen pastos agresivos sembrados durante largas extensiones de suelo. (Manrique, 2004)

A pesar de que el Eucalipto es una especie introducida en el territorio colombiano y, por ende, objeto de resistencia por muchos expertos y organizaciones relacionados con el tema, su uso controlado ofrece diversos beneficios que contribuyen a la restauración de estos suelos. Este documento proporcionará argumentos que respaldan esta afirmación.

Reforestación de potrero ganadero

La restauración ecológica está adquiriendo una importancia creciente en la planificación tanto a corto como a largo plazo de todos los territorios del planeta tierra, se ha ido generando conciencia sobre la urgente necesidad de conservar y restablecer de los recursos naturales que sustentan la vida humana, animal y vegetal, así como de preservar la diversidad de especies.

Es por esta razón que en los últimos años se ha trabajado en la rehabilitación de áreas tanto grandes como pequeñas, terrenos que han sido degradados debido a la ganadería y la agricultura extensiva, la expansión humana, la minería, los incendios, entre otros factores. Una de las estrategias de restauración y rehabilitación consiste en la siembra de especies vegetales y arbóreas con el objetivo de recuperar y proteger cuencas hidrográficas, capturar dióxido de carbono, generar oxígeno, atraer fauna y posibilitar la regeneración de capas orgánicas del suelo.

Esta práctica se ha llevado a cabo de diferentes maneras, y una de ellas ha sido la siembra de especies introducidas como el eucalipto (*eucalyptus saligna*) y varios tipos de pinos. Sin embargo, estas prácticas han sido objeto de fuertes críticas porque, en varias ocasiones, los resultados no han cumplido con las expectativas. Además, estas mismas especies se han utilizado para degradar los terrenos, siendo plantadas para la producción de madera en lugar de conservar los bosques nativos, lo que resulta en la deforestación de hectáreas para la plantación de árboles que posteriormente son talados para su uso en la industria maderera.

También se busca rehabilitar zonas mediante la siembra de una única especie de las ya mencionadas, especialmente mediante el uso de eucalipto. Se considera, con la intención de evitar controversias, que ha sido una práctica bien intencionada, pero, en muchos casos, llevada a cabo

con falta de conocimiento. Esta acción no proporciona una solución real, sino que, en realidad, conduce a la creación de monocultivos, a pesar de que superficialmente el terreno se vea lleno de árboles y capa vegetal ante el observador desprevenido.

Grandes cantidades de individuos de *Eucalyptus saligna*, conocidos por su rápido crecimiento o crecimiento primario, tienen el potencial de absorber los nutrientes necesarios para otras especies vegetales. Además, su densa copa y la acumulación de hojarasca en el suelo pueden limitar la entrada de luz y alterar el equilibrio del suelo, cambiando su pH y afectando la disponibilidad de nutrientes para otras plantas. Además, debido a su capacidad de propagación, la presencia del eucalipto puede volverse descontrolada, especialmente en áreas donde ha sido introducido como especie exótica.

Sin embargo, estas especies no pueden ser estigmatizadas o juzgadas de manera equivocada debido al uso inapropiado que se les ha dado. Es importante aclarar que todos los monocultivos y prácticas agrícolas extensivas pueden causar degradación del suelo y pérdida de biodiversidad, la restauración de estos ecosistemas resulta ser un proceso complejo y lento, y en algunos casos, puede ser prácticamente imposible.

Los árboles nativos requieren de una combinación adecuada de luz y sombra para su óptimo crecimiento, así como la creación de microclimas que sean favorables para sus características particulares. La siembra de árboles en terrenos degradados los expone completamente al sol y a menudo carecen de los nutrientes necesarios para su crecimiento adecuado. Del mismo modo, los suelos necesitan recuperar su capa orgánica y la presencia de nutrientes para permitir el crecimiento de variedad de especies vegetales.

En relación con lo mencionado anteriormente, la siembra controlada de eucalipto ofrece la posibilidad de abordar todos estos aspectos fundamentales en el proceso de restauración ecológica. Gracias a su rápido crecimiento o crecimiento primario y a su capacidad de supervivencia extrema, el eucalipto puede desarrollarse en terrenos degradados, proporcionando sombra, produciendo semillas y atrayendo fauna, al mismo tiempo que compite con especies invasoras o pastos cultivados. La caída de sus hojas y ramas ayuda en la creación de

capa vegetal - orgánica sobre el suelo, aportando buena cantidad de nutrientes y su gran capacidad de absorción de agua ayuda en terrenos que se encharcan o enlodan debido a su degradación. (Lozano y Yaguana, 2021)

Se debe tener en cuenta que esta forma de restauración debe realizarse junto con la siembra masiva de especies nativas que se vean favorecidas con las ventajas que ofrece el eucalipto en esta siembra controlada. Igualmente, puede ser necesario ayudar al suelo mediante prácticas de fertilización y compostaje que permita la creación de nutrientes y capa orgánica, así como la aplicación de herbicidas y podas a especies presentes en el terreno degradado y utilizadas para el monocultivo o para la creación de terrenos pastoriles o potreros. (Alonso et al., 2008)



La siembra de eucalipto debe realizarse de una manera dispersa, con pocos individuos por hectárea, manteniendo una relación aproximada de 150 a 200 árboles por hectárea, y considerando posibles cortes o podas para control de sombra y la reproducción de esta especie.

Estas prácticas se demostraron efectivas en la restauración de una zona degradada, utilizada para la ganadería en el suroeste antioqueño, a una altitud de 1820 metros sobre el nivel del mar con extensiones de terreno pastoril o potrero, sembrado con pasto de la especie *brachiaria decumbens*.

Inicialmente, se llevó a cabo la siembra masiva de especies nativas y de algunos individuos de especies introducidas, como el eucalipto y el pino, con distancias aproximadas de 1 m a 2 m entre árboles.

Posteriormente, se aplicó herbicida de alto poder al pasto existente, específicamente *brachiaria decumbens*, teniendo sumo cuidado de no afectar las especies sembradas ni aquellas existentes que puedan competir con este pasto agresivo. Vale aclarar que este proceso se pudo realizar en primera instancia, pero formó parte del aprendizaje adquirido durante el proceso de restauración.

Los pasos siguientes, que aún se están llevando a cabo al momento de escribir este documento, incluyen el cuidado de las especies sembradas, resiembras en espacios donde no sobrevivió algún individuo, siembras en zonas rezagadas o en zonas donde la primera siembra no cubrió toda el área, así como el cuidado de especies que germinan de manera natural mediante la dispersión de semillas por parte de animales, insectos, viento, etc. Además, se contemplan posibles aplicaciones de herbicida en los pastos sobrevivientes.

Los cuidados mencionados comprenden la fertilización de los árboles utilizando productos orgánicos que pueden ser producidos en el mismo sitio, la verificación de las capas orgánicas en el suelo, la identificación de zonas más favorables para cada especie, el trasplante de individuos y la protección de estos para evitar daños causados por la ganadería que se lleva a cabo en las proximidades.

Durante el desarrollo de las actividades, se ha podido observar que en las zonas donde se sembraron individuos de *eucalyptus saligna*, los cuales han alcanzado una altura mayor a 5 metros en menos de 3 años, se han generado varios beneficios. En primer lugar, se ha conservado una mayor humedad en el suelo y se ha incrementado la capa orgánica. Además, se ha logrado controlar el crecimiento de la *brachiaria decumbens*, así como se han regulado las temperaturas extremas, mayor protección contra vientos y lluvias torrenciales, y ha propiciado un aumento significativo en la presencia de fauna silvestre en estas áreas.

Adicionalmente, se observa que las otras especies vegetales sembradas también se han beneficiado por las condiciones logradas, ya que han tenido un crecimiento más rápido y sano en comparación con las mismas especies propagadas en otras zonas sin la presencia de Eucalipto. En estas últimas áreas, la ausencia de sombra y el sometimiento a temperaturas extremas han dificultado su establecimiento. Además, el control del pasto *brachiaria* se ha vuelto más complicado en estas zonas.

En las siguientes fotografías se puede observar de manera clara las diferencias presentadas en el predio: antes de restauración/con restauración, potrero/reforestación, y zonas con individuos de *eucalyptus saligna* /zonas sin individuos *eucalyptus saligna*.



Antes potrero



Ahora restauración



Antes potrero



Ahora restauración



Antes potrero



Ahora restauración



Antes potrero



Antes potrero



Ahora restauración



Antes potrero



Aplicación de herbicida y siembra masiva



Ahora restauración



Zonas con poca o nula presencia de eucaliptus saligna.



Zonas con la presencia de eucalyptus saligna.

A modo de conclusión

Las especies arbóreas introducidas desempeñan un papel beneficioso y contribuyen a la restauración de áreas degradadas siempre y cuando su siembra se realice de manera controlada y se sigan criterios que garanticen su impacto positivo en el entorno.

El adecuado empleo de eucalyptus saligna, para la recuperación de áreas degradadas, ofrece condiciones propicias para el desarrollo de especies nativas. Esto se logra al proporcionar un equilibrio entre la cantidad de luz y de sombra

sobre los individuos sembrados, protegiéndolos de vientos y lluvias intensas, controlando el crecimiento de pastos agresivos y manteniendo la fertilidad del suelo.

La realización de una restauración ecológica mediante la siembra de una única especie en un área deforestada no crea condiciones ambientales propicias para la reproducción de otras especies, de hecho, esta práctica puede resultar en un daño igual o incluso mayor al área que se intenta recuperar.

Referencias

- Alonso, S., Asencio, V., Casaleiro, A. y Montalvo, J. (2008). Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias : innovación y efectos ecológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (28), 37-42. <https://rb.gy/o0os4k>
- Manrique, O. (2004) *Guía técnica para la restauración ecológica en áreas con plantaciones forestales exóticas en el Distrito Capital*. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente - DAMA. <https://rb.gy/mleuww>
- Lozano, D., y Yaguana, C. (2021). Funcionalidad ecológica en plantaciones de eucalipto, en el Bosque Nacional Ipanema: ¿cuál es la importancia de las plantaciones forestales en la restauración de áreas degradadas? *Bosques Latitud Cero*, 11(2), 10–31. <https://rb.gy/1ro99n>

Cómo citar este artículo:

Marín, D. (2024). Restauración ecológica utilizando *Eucalyptus saligna*: especie clave en este proceso. *Revista EPM*, (23), 08-19.



Conexión de transformadores en paralelo con diferentes grupos vectoriales en las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo con validaciones en el programa Alternative Transients Program (ATP)

Connection of transformers in parallel with different vector groups at the Santa Fe de Antioquia and San Jerónimo substations with validations in the Alternative Transients Program (ATP)

**Luis Fernando
Cano Acosta**

Unidad de Ingeniería de
Proyectos 2, EPM

luis.cano.acosta@epm.com.co

**Edwin Alberto
Giraldo Marín**

Gerencia Proyectos Subesta-
ciones y Líneas, EPM

edwin.giraldo@epm.com.co

Resumen

Este artículo presenta la metodología utilizada para la correcta conexión en paralelo de dos transformadores de potencia con grupos vectoriales diferentes. Se muestra como cambiar el grupo vectorial con el cruce, de manera externa, en las fases que llegan por el primario y secundario del transformador. Esta metodología, acompañada de pruebas, levantamientos y de simulaciones en el programa ATP, es utilizada para la toma de decisiones en la modernización

de las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo para mejorar la calidad del servicio y la operación del sistema en el occidente de Antioquia. Lo presentado en el documento se puede utilizar como guía para otras modernizaciones con equipos ya existentes donde la dinámica de la operación y el mantenimiento conllevan a que no se tengan los mismos grupos vectoriales en los equipos y se requieran cambios de conexión en los transformadores.

Palabras clave:

Transformador, Grupo vectorial, Paralelismo, Fase, Maniobra, Índice de calidad

Keywords:

Transformer, Vector Group, Parallelism, Phase, Maneuver, Quality index

Introducción

Las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo a 110/44/13.2 kV, ubicadas en el occidente de Antioquia, tienen conectadas cargas que pueden ser asumidas por cualquiera de las dos subestaciones, es decir, estas se encuentran anilladas en el nivel de tensión de 44 kV, así como en algunos circuitos del nivel de 13.2 kV. Entre ambas subestaciones se respalda gran cantidad de carga en caso de una contingencia, por tanto, es necesario realizar transferencias de carga sin necesidad de desenergizar los circuitos por los niveles de 44 kV o 13.2 kV. Sin embargo, en el inicio de los proyectos de modernización no es posible realizar estas transferencias, sin desenergizar, dado que el grupo de conexión del transformador 110/44 kV de San Jerónimo es DY5 (delta-estrella cinco) y el grupo de conexión del transformador 110/44 kV de Santa Fe es DY11 (delta-estrella once). Esto acarrea indisponibilidad del servicio, energía no suministrada, impacta los indicadores de

calidad del servicio, operativamente implica el envío de cuadrillas a sitio para realizar maniobras en elementos seccionadores y coordinar con el centro de control el cierre y apertura de interruptores para una adecuada y segura operación.

Debido a esta necesidad, durante la modernización de las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo se realizaron diferentes levantamientos y pruebas de correspondencia de fases en el corredor 110kV, Occidente San Jerónimo, Santa Fe de Antioquia, en el anillo 44 kV San Jerónimo, Santa Fe y en los circuitos de 13.2 kV, para validar que la marcación de fases concordara con la correspondencia y de esta manera proponer una adecuada conexión de las fases en ambas subestaciones, garantizando la adecuada conexión, marcación y el mismo desfase angular (paralelismo) de los transformadores entre ambas subestaciones.

1. Antecedentes

En los años anteriores al inicio de la modernización de las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo, los grupos vectoriales de los transformadores existentes en estas permitían las transferencias de carga en paralelo entre ambas subestaciones en el sistema de 13.2 kV y 44 kV. Sin embargo, con el cambio de capacidad del transformador de 110/44 kV en la subestación Santa Fe (transformador trasladado de otra subestación) con grupo vectorial diferente al transformador de la subestación San Jerónimo, iniciaron las dificultades que dan origen a esta iniciativa.

Teniendo presente que las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo son críticas para la atención de la alta demanda de energía en todo el occidente antioqueño, sumado a las altas exigencias en los índices de calidad y a la necesidad de aumentar la seguridad en la operación del sistema de transmisión y distribución

de energía, surge la iniciativa de investigación e implementación de la adecuada conexión de los transformadores de potencia 110/44 kV de ambas subestaciones.

El levantamiento de información por parte de los proyectos de modernización de ambas subestaciones y el apoyo del área de operación y mantenimiento con los registros de los eventos ocurridos e información recolectada en el sistema SCADA en el centro de control a través de los relés de protección, viabilizan la implementación de esta necesidad.

Con lo anterior se realizan diferentes trabajos de simulación, pruebas, validación de conexiones eléctricas de las líneas de transmisión en 110 kV, redes de distribución en 44 kV y 13.2 kV con el fin de definir las correctas conexiones de fases en los transformadores en cada una de las subestaciones.

2. Metodología

Para el desarrollo de esta iniciativa es necesario llevar a cabo los siguientes pasos metodológicos:

- Levantamiento de información existente en las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo.
- Identificación de correspondencia de fases R, S y T en la línea de transmisión de 110 kV Occidente-San Jerónimo-Santa Fe de Antioquia-Chorodó realizando pruebas de inyección de corriente con planta de emergencia (método alternativo que reemplaza los equipos tradicionales para inyección de corriente en líneas con alta impedancia por su longitud).
- Identificación de correspondencia de fases R, S y T en el circuito Caicedo a 44 kV que conecta la subestación Santa Fe de Antioquia con la subestación San Jerónimo, recorriendo el circuito o con realización de pruebas de inyección de corriente o pruebas de tensión entre ambas subestaciones.
- Identificación de correspondencia de fases en salida de circuitos a 13.2 kV en Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo.

- Modelado de red en el programa ATP con información actual y con la identificación de fases. De esta forma, decidir la correcta conexión de fases de los transformadores de ambas subestaciones, redes de transmisión y distribución asociadas.

2.1 Acoplamiento o paralelismo de transformadores de potencia

Los transformadores trifásicos se construyen con diferentes grupos vectoriales, donde cada uno de estos representa un desfase angular entre el devanado primario y secundario. Es necesario y obligatorio considerar esta variable para garantizar el acoplamiento (paralelismo) entre dos transformadores. Para definir la correcta conexión de los transformadores y garantizar el acoplamiento es utilizada la metodología presentada en la referencia Muñoz et al. (2016) y Carvalho (1983) y la utilización del programa de simulación ATP y sus principales referencias, Dommel (1986) y EMTP/ATP (1987).

En la figura 1 se presenta un ejemplo de la adecuada conexión entre los grupos de conexión 1, 5, 7 y 11, donde el desfase de estos sería 30° .

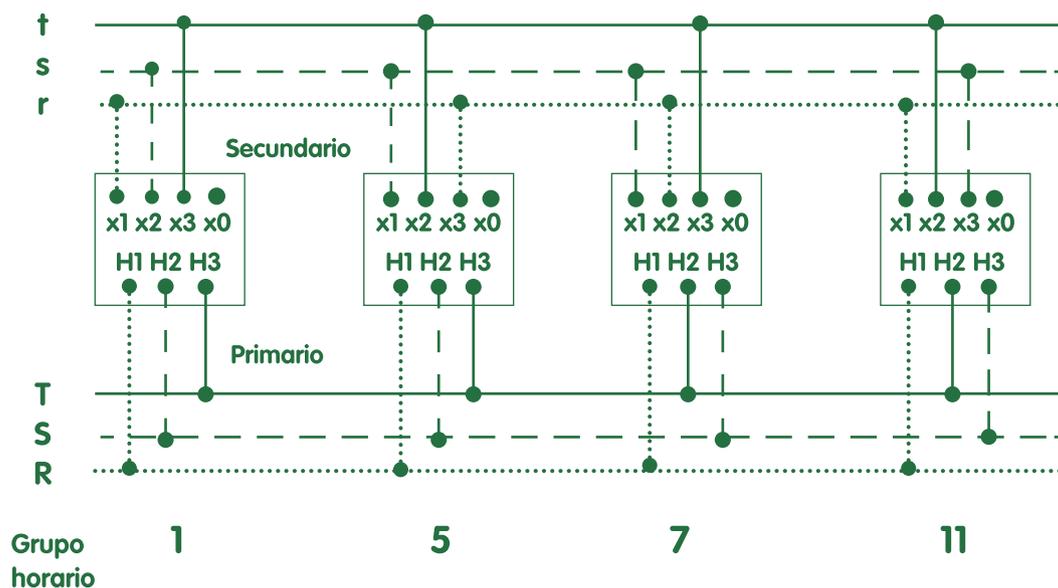


Figura 1. Conexión de transformadores en paralelo grupos de conexión 1, 5, 7 y 11. Recuperado de: (Carvalho, 1983).

2.2 Pruebas de correspondencia de fases corredor Occidente-San Jerónimo-Santa Fe-Chorodó 110 kV

Las pruebas de correspondencia de fases realizadas en el corredor Occidente-San Jerónimo-Santa Fe-Chorodó en 110 kV, realizado por el personal de

pruebas y puesta en servicio de la Dirección Montajes de EPM, dieron como resultado la correspondencia de fases presentada en el siguiente esquema:

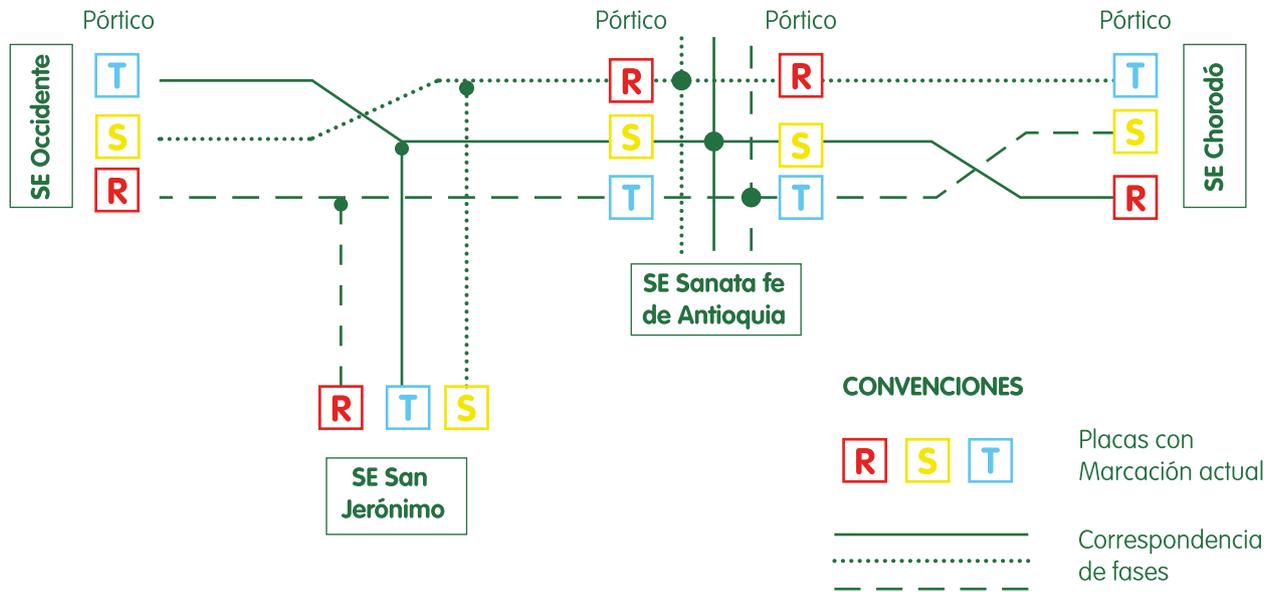


Figura 2. Esquema de correspondencia de fases en corredor occidente 110 kV sin modernización.

Como se observa en el esquema de correspondencia de fases encontrado y mostrado en la figura 2, la fase T de occidente corresponde a la fase marcada como "S" en Santa Fe. También, la fase R de Chorodó corresponde con la fase marcada como "S" en Santa Fe y la fase T de Chorodó corresponde con la fase marcada como "R" en Santa Fe.

Se encontró que se tiene una transposición₂ de fases y un giro fasorial₃ entre Occidente y Santa Fe de Antioquia de 120° en secuencia positiva₄ y entre Occidente y Chorodó de 240° en secuencia positiva. Para mayor claridad y facilidad en el entendimiento, en el siguiente esquema, se presenta los fasores de tensión en secuencia positiva y negativa:



Figura 3. Esquema de giro en secuencia positiva y negativa.

2.3 Modelado y simulaciones

Con el levantamiento realizado por el personal de la Dirección Montajes presentado en la figura 2, se implementa el modelo en ATP con el fin de definir el tipo de conexión que se debe implementar en la subestación Santa Fe de Antioquia y, de esta forma, cambiar el transformador con grupo de conexión DY11 en un DY5. Así el desfase entre el primario, 110 kV, y el secundario, 44 kV, será 150°. Del mismo modo, es posible realizar acoplamiento con la subestación San Jerónimo en el lado de 44 kV ya que el transformador de esta subestación tiene un

grupo de conexión DY5. Adicionalmente, definir la inversión de fases que se deberá realizar en el corredor de 110 kV para normalizar la conexión de este transformador entre las subestaciones Occidente, San Jerónimo, Santa Fe y Chorodó.

En la referencia Muñoz et al. (2016) se presenta la metodología para la determinación de desplazamiento angular de los transformadores trifásicos, la cual se utiliza como referencia para realizar la conexión de los transformadores, DY11 y DY5, como se muestra en la figura 4.

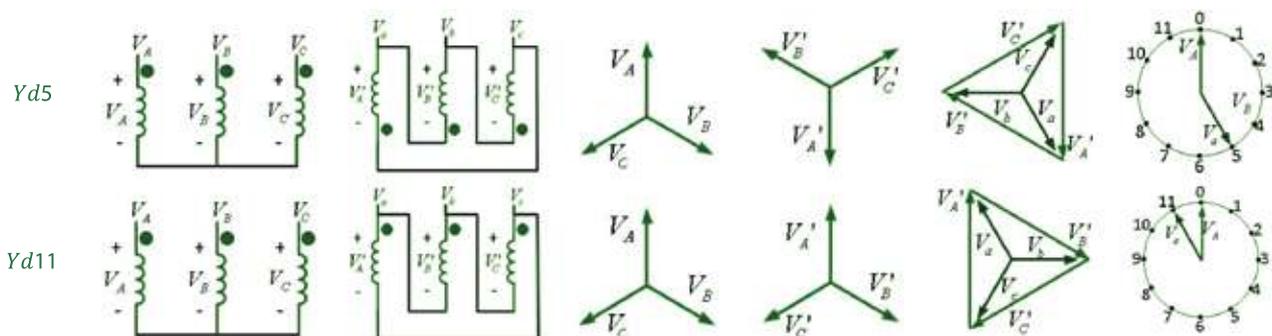


Figura 4. Conexión DY5 y DY11. Recuperado de: (Muñoz et al., 2016)

En la figura 5 se presenta el modelo general realizado en ATP, desde el cual se define la

conexión a implementar en la subestación Santa Fe y San Jerónimo:

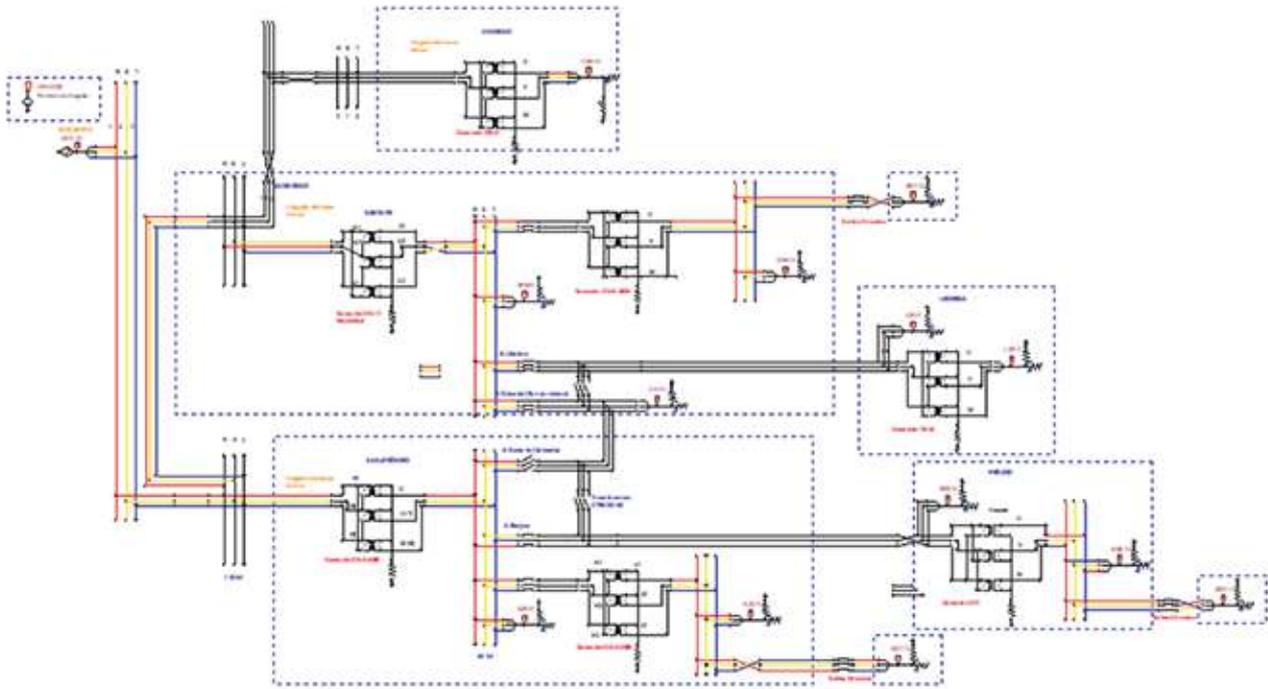


Figura 5. Modelo general ATP.

Según el grupo vectorial del transformador se utiliza un arreglo de tres transformadores monofásicos tipo SATURA y se conectan de forma

exterior de tal manera que se genere la conexión trifásica deseada, en este caso conexión DY5 y DY11. En la figura 6 se presenta el arreglo en ATP.

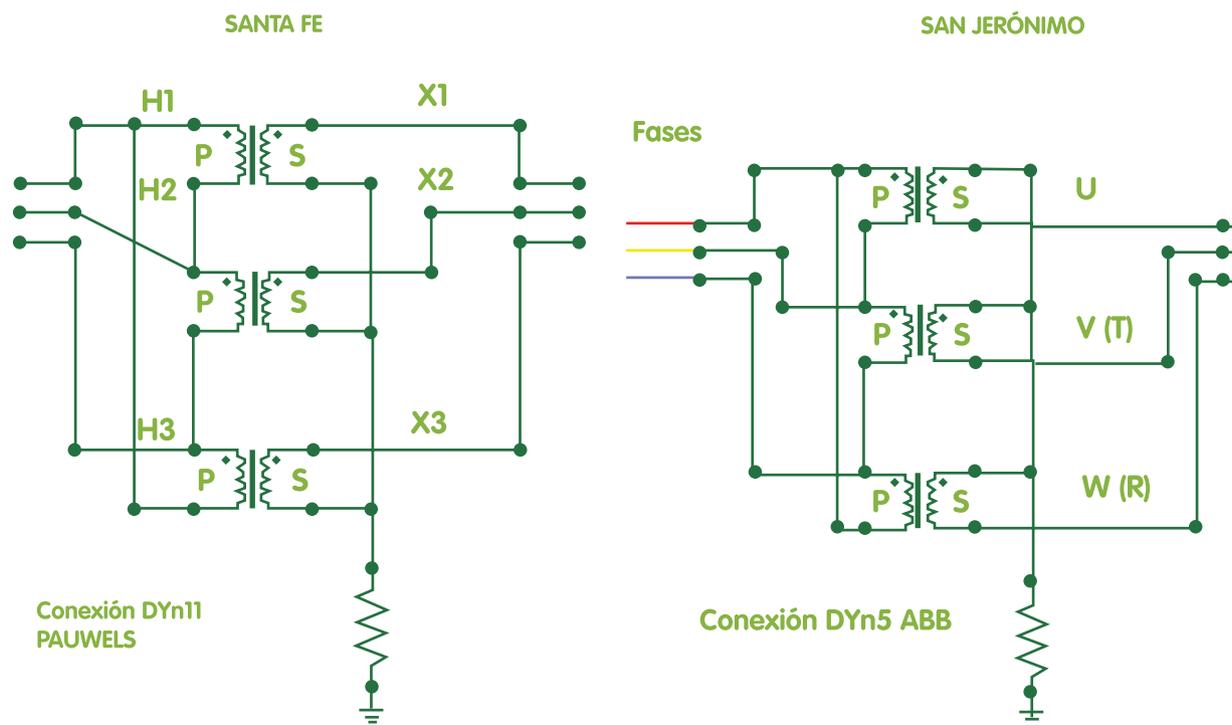


Figura 6. Conexión DY11 y DY5 en ATP.

Luego de tener la conexión original de los transformadores se toma como referencia la figura 1 de (Carvalho, 1983) para realizar las conexiones externas de las fases al transformador en el modelo de ATP y efectuar las simulaciones de tal forma que se consiga el mismo desplazamiento angular, 150° , en el lado de 44 kV en Santa Fe de Antioquia y en San Jerónimo. Lo que significa que el transformador de Santa Fe de Antioquia cambia

su grupo vectorial y pasa a ser un DY5, con la conexión adecuada de las fases externas en su primario y secundario.

Con las simulaciones realizadas se encuentran varias alternativas de conexión externa para realizar el cambio de DY11 a DY5 como se muestra en la figura 7, a continuación:

DY5 a partir de un DY11

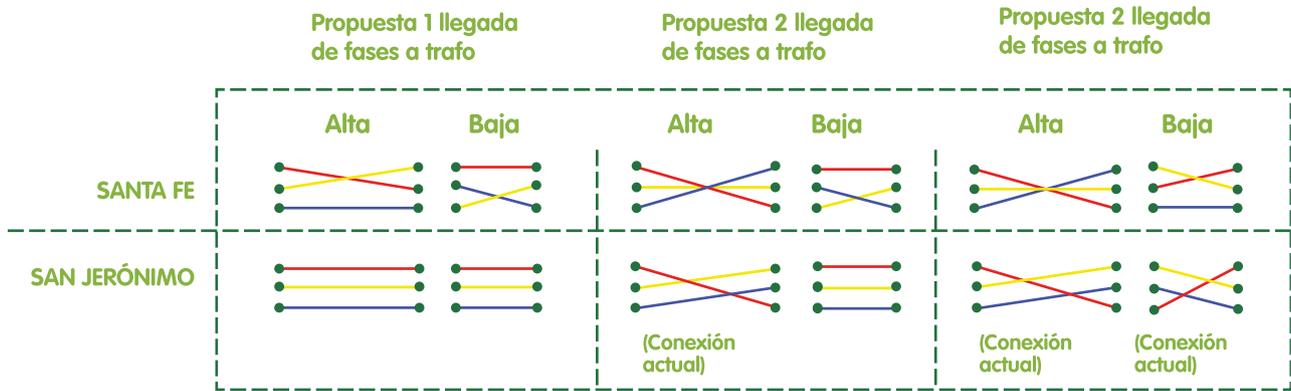


Figura 7. Conexión DY5 a partir de un DY11.

En la figura 8. se presenta la tensión secundaria, 44 kV, en las barras de Santa Fe y San Jerónimo donde se observa el desfase con respecto al lado

primario de 150° (DY5). Por tanto, se tienen los 150° (DY5) de desfase en ambas subestaciones.

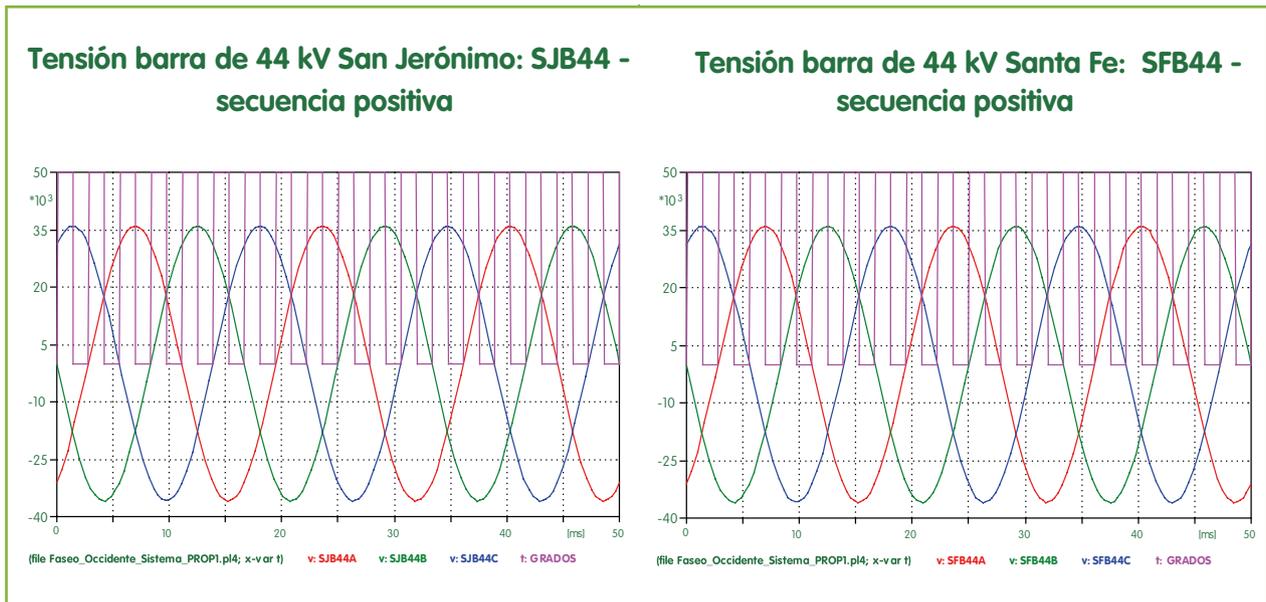


Figura 8 Tensiones en barras 44 kV San Jerónimo y Santa Fe.

3. Aplicación

La alternativa seleccionada para la conexión de fases en los transformadores de potencia en Santa Fe y San Jerónimo es la propuesta 1 de la figura 9. Esta alternativa es la que brinda más facilidades electromecánicas y físicas para la ejecución.

Para garantizar la conversión de la conexión DY11 a DY5 se deben realizar las siguientes conexiones de potencia en los transformadores de la subestación Santa Fe de Antioquia:

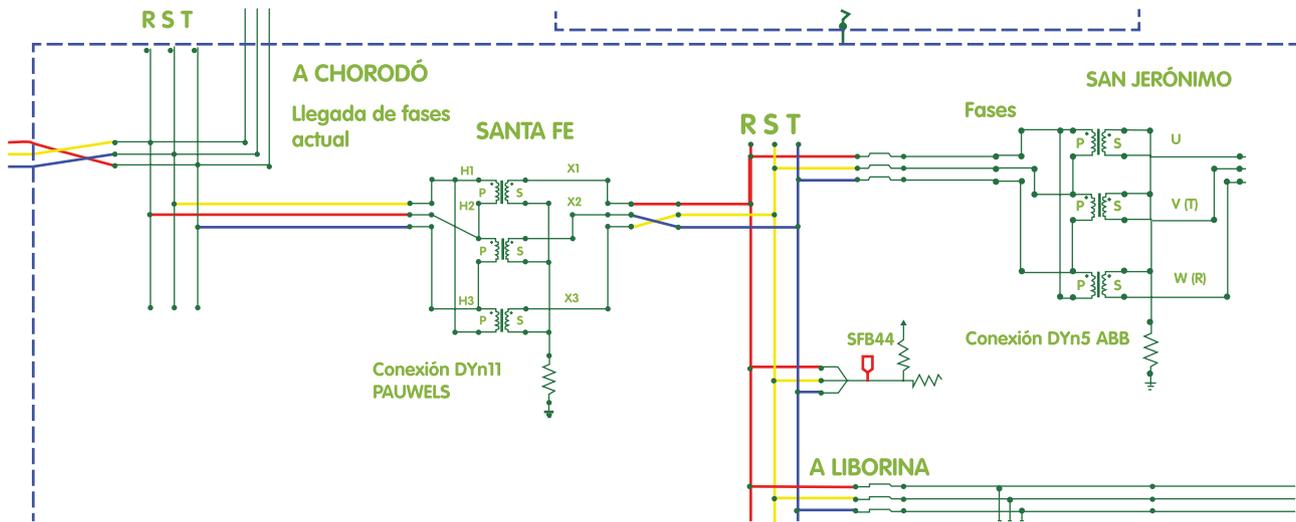


Figura 9. Conexión transformador 110/44 kV, 40 MVA, Santa Fe para cambio de grupo vectorial DY11 a DY5.

En la tabla 1, figura 10 y figura 12 se presenta físicamente como deben llegar las fases desde el barraje 110 kV y 44 kV hasta los terminales del transformador T1-110/44 kV, 40 MVA de Santa Fe de Antioquia.

Transformador T1, 110/44 kV			
Terminal 110 kV	Fase	Terminal 44 kV	Fase
H1	S	x1	R
H2	R	x2	T
H3	T	x3	S

Tabla 1. Conexión transformador T1 Santa Fe.

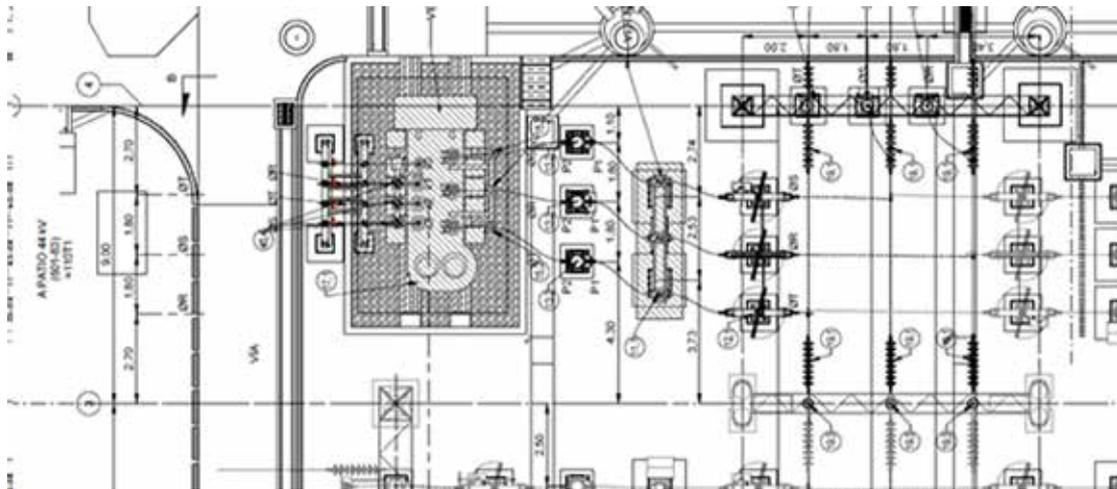


Figura 10. Conexión física transformador 110/44 kV, 40 MVA, Santa Fe para cambio de grupo vectorial DY11 a DY5.

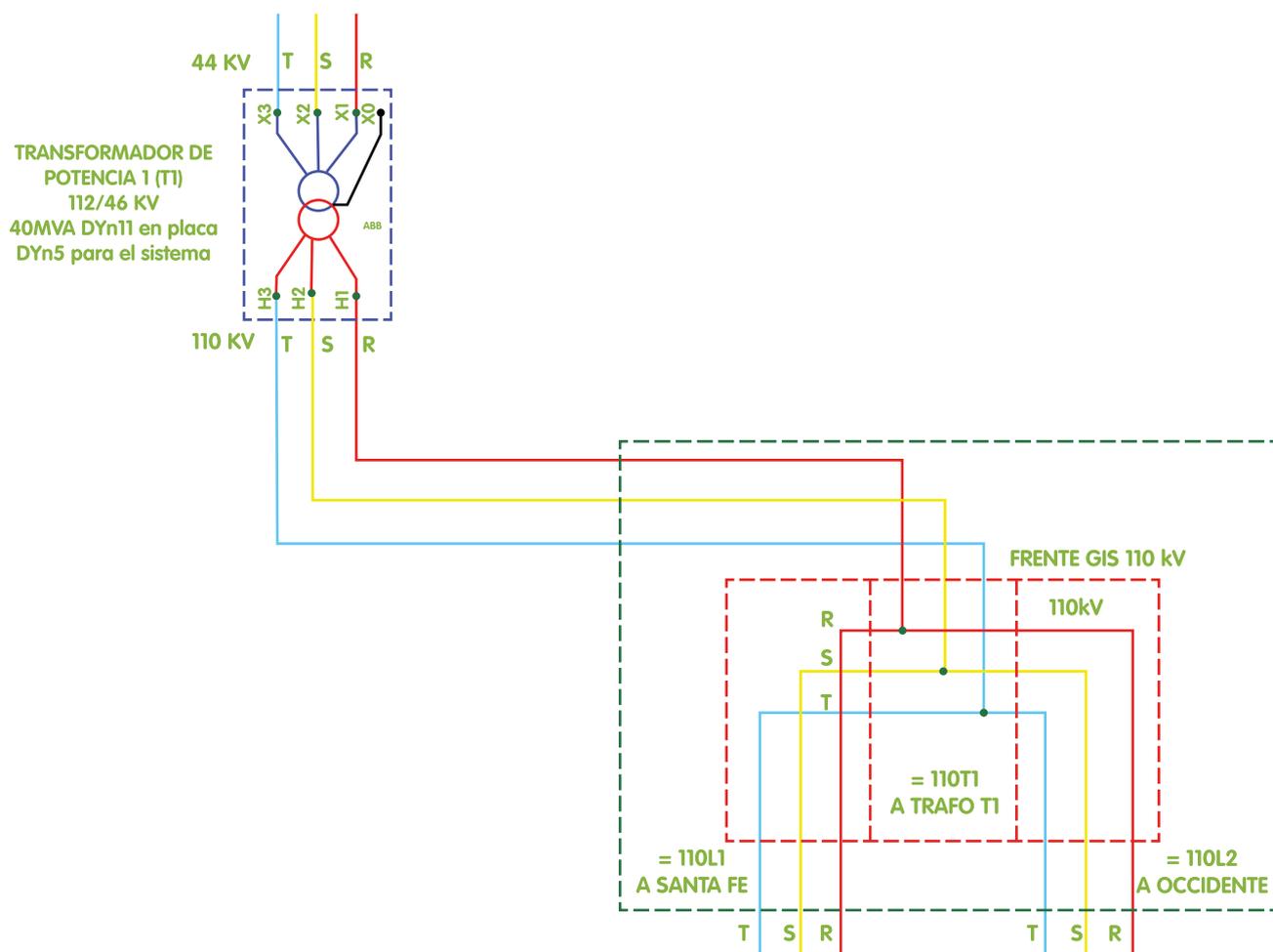


Figura 11. Esquema de correspondencia de fases 110 kV y 44 kV – Santa Fe de Antioquia.

En la figura 12 se muestra cómo se logró implementar la conexión en el lado de 110 kV del transformador de Santa Fe de Antioquia, donde el cruce de las fases se realiza comenzando desde

el barraje hacia el transformador, ya que, para el caso que el asilamiento es en aire es la alternativa más fácil de implementar.



Figura 12. Esquema de correspondencia de fases 110 kV y 44 kV – Santa Fe de Antioquia.

Con la modernización de la subestación San Jerónimo, se corrige la secuencia de fases y la conexión al transformador para un grupo vectorial DY5, por tanto, la llegada de fases por el lado primario 110 kV y secundario, 44 kV queda con

secuencia R, S, T, en los terminales H1, H2, H3 y X1, X2, X3, respectivamente. (Ver figura 7). En las figuras 13 y 14 se presenta la implementación realizada en la subestación San Jerónimo.

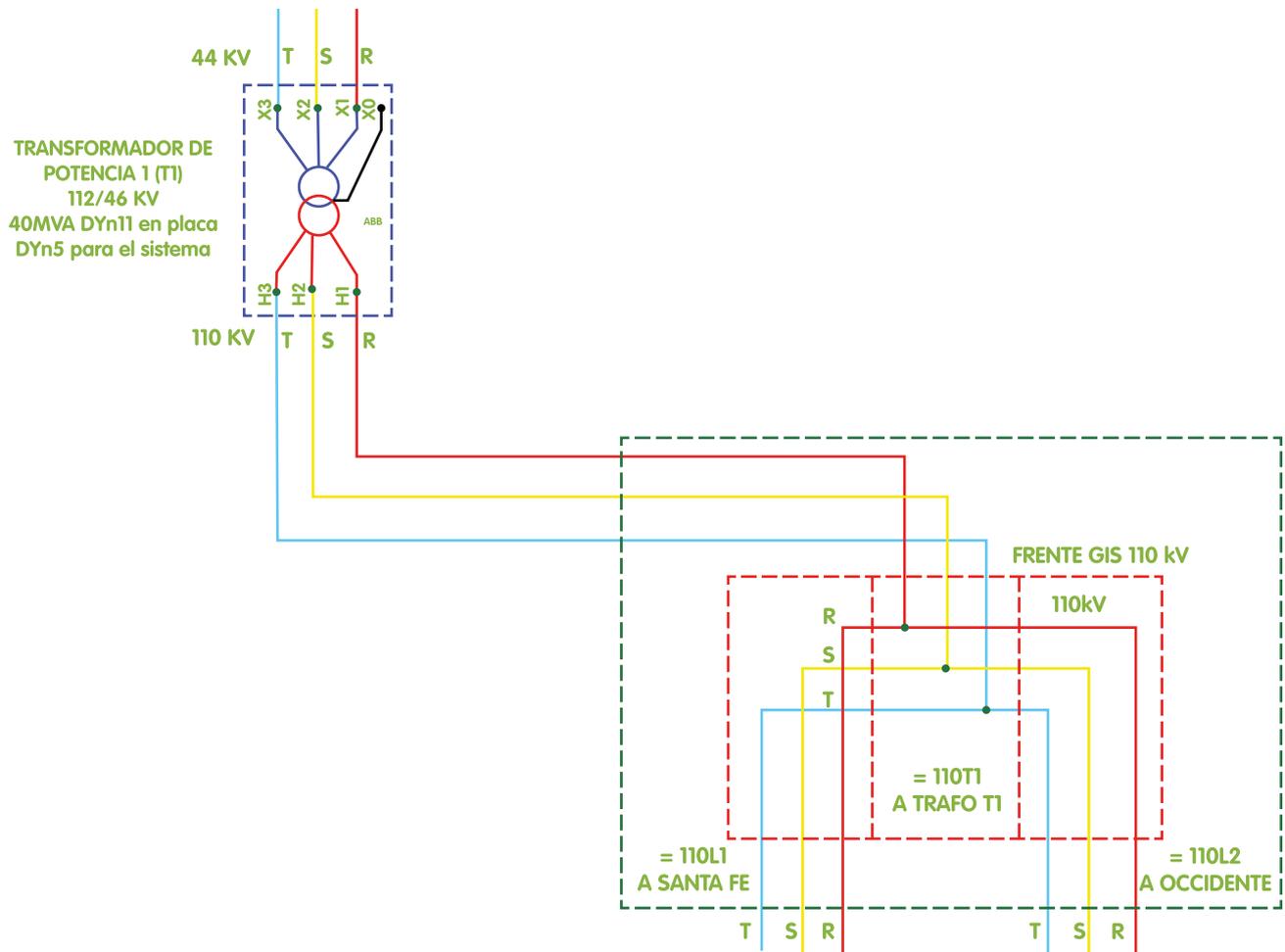


Figura 13. Esquema de correspondencia de fases 110 kV y 44 kV – San Jerónimo.



Figura 14. Implementación de conexiones en transformador 110/44 kV, 40 MVA, San Jerónimo.

Conclusiones

- Se garantiza una operación adecuada desde centro de control y maniobras para respaldo de carga entre ambas subestaciones sin necesidad de envío de cuadrillas a la zona y sin interrupción del sistema como se tenía que realizar antes de las modernizaciones.
- Esta metodología puede servir de referencia para modernizar y solucionar problemas frecuentes en la operación y mantenimiento.
- La conexión de fases primarias y secundarias de las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo quedarán en su correspondencia según la marcación de la fuente occidente.
- Para los proyectos de modernización de las subestaciones del sistema de transmisión y distribución regional, se recomienda validar siempre las conexiones de circuitos que tienen transferencias, grupos vectoriales de los transformadores y marcación de fases en la subestación. Esto con el fin de definir adecuadamente las especificaciones de nuevos equipos y la conexión definitiva, primaria y secundaria, de las fases.
- Es indispensable la marcación y registro fotográfico de estas conexiones especiales para garantizar que en mantenimientos o cambios futuros no se generen eventos por error en la conexión de las fases.

Notas al final

¹ Grupo vectorial también se conoce como grupo de conexión y grupo horario.

² Rotación física de una, dos o las tres fases en el recorrido de una línea de transmisión o circuito de distribución con el fin de disminuir el desequilibrio electromagnético entre las fases y de esta forma evitar caídas de tensión. Además, reducir pérdidas en el sistema.

³ Una vez desplazada la fase R, la fase S toma su lugar; desplazada la fase S, la fase T toma su lugar; y desplazada la fase T, la fase R toma su lugar.

⁴ Referencia del sentido de giro que normalmente toma el sistema eléctrico nacional desde los generadores.

Referencias

- Carvalho, C. (1983). *Transformadores. Faculdade de engenharia Universidade do Porto*. <https://rb.gy/560ajx>
- Dommel, H. (1986). *Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)*. Prepared for BPA.
- EMTP/ATP. (1987). *ATP Rule Book*. Leuven EMTP Center.
- Muñoz, N., López, J., y Villada, F. (2016). Metodología para la determinación del desplazamiento angular en transformadores trifásicos. *Tecnológicas* 20(38), 41-53. <https://rb.gy/6aeky8>

Cómo citar este artículo:

Giraldo, E. (2024). Conexión de transformadores en paralelo con diferentes grupos vectoriales en las subestaciones Santa Fe de Antioquia y San Jerónimo con validaciones en el programa Alternative Transients Program (ATP). *Revista EPM*, (23), 20-34.



pH En el proceso de potabilización en el contexto colombiano

pH In the drinking water treatment process for colombian context

**Wilmar Edison
Alzate Escobar**
Unidad Potabilización, EPM

Wilmar.Alzate@epm.com.co

**Rodolfo
Mira Betancur**
Unidad Potabilización, EPM

Rodolfo.Mira@epm.com.co

Resumen

El artículo aborda el concepto de pH asociado al equilibrio químico acuoso y relaciona su significancia dentro del proceso de potabilización. Se identifican y discuten con sustento referenciado y lógico, la incidencia más directa que, como parte de los diferentes subprocesos, se puedan presentar sobre el pH en relación con la operación en las plantas de potabilización y de este sobre

los subprocesos, en armonía con la normativa colombiana asociada al agua potable y las operaciones unitarias o subprocesos que pueden emplearse en el país, con base en la experiencia que surge del vínculo con el proceso a través de las plantas de potabilización de EPM. (Empresas Públicas de Medellín ESP)

Palabras Clave:

pH, Agua potable, Acidez, Basicidad, Modificación de pH

Keywords:

pH, Drinking water, Acidity, Basicity, pH modification

Introducción

El pH es una medida logarítmica en base 10 relacionada con la concentración de hidrogeniones (iones hidrógeno, H⁺) en el agua, que, definida por Sørensen en 1909 y aplicando la nomenclatura moderna, es expresada en términos de la concentración de hidrogeniones en el agua como:

$$pH = -\log\left(\frac{C_H}{C^\circ}\right)$$

Donde C_H es la concentración del ion hidrógeno en mol.dm⁻³ y C[°]= 1 mol.dm⁻³ que es una cantidad de concentración estándar, pero se acepta "que resulta más satisfactorio definirlo en términos de la actividad relativa de los iones hidrógeno en la solución" (Buck et al., 2002, p. 2172), con lo que pH se define entonces como el logaritmo negativo en base 10 de la actividad del ion hidrógeno en la solución:

$$pH = -\log a_H = -\log\left(\frac{m_H \cdot \gamma_H}{m^\circ}\right)$$

Donde a_H es la actividad relativa (con base en la molalidad), γ_H es el coeficiente de actividad molal del ion hidrógeno H⁺ en la molalidad m_H, m[°] es la molalidad estándar.

La "actividad" hace referencia a una "concentración efectiva" del ion hidrógeno, pero debe aclararse que esta no es medible por medio de un método termodinámicamente válido, haciendo que se requiera el establecimiento de una convención para evaluarse (Buck et al., 2002). Lo expuesto ofrece una definición formal de pH, sin embargo, puede decirse que para el "común" de las personas este parámetro representa una medida de la acidez o alcalinidad (basicidad), de una solución, pues como se dijo, esta medida indica la concentración de iones hidrógeno en solución o bien su equivalente de solvatación en agua H₃O⁺. Típicamente el pH tiene representación en una escala numérica que va de 0 a 14, de modo que las soluciones con valor de pH igual a 7 se consideran neutras, mientras que las soluciones con valores de pH menores a 7 unidades se

consideran ácidas y aquellas con valor mayor a 7 se consideran básicas. El rango, en principio "restrictivo" de la escala entre 0 y 14, puede sustentarse a partir de las concepciones teóricas asociadas a la autodisociación o autoionización del agua.

En armonía con los postulados asociados a las teorías "ácido-base", que como parte de su evaluación conceptual en el contexto histórico del tema con una población estudiantil, fueron abordados por Tagle (2017), inicialmente Arrhenius define que los ácidos son aquellas sustancias que pueden donar protones (H⁺) y bases aquellas que pueden donar iones hidróxido (OH⁻), pero, posteriormente Brønsted y Lowry, de manera más general, enunciaron que las sustancias que pueden donar protones son ácidos y aquellas que pueden aceptarlos son bases, esto aplicado a las soluciones acuosas, sin embargo, Lewis de manera más general, planteó que un ácido es la sustancia que puede aceptar un par de electrones y una base aquella que puede donarlos. De este modo, en concordancia con los sistemas acuosos, la ecuación de disociación del agua puede describirse como:



Una de las moléculas disociadas actúa como ácido y la otra como base, para lo cual la constante de equilibrio (k_d), de esta auto disociación puede escribirse en términos de las actividades de las especies involucradas como:

$$k_d = \frac{a_{H_3O^+} \cdot a_{OH^-}}{a_{H_2O}^2}$$

De manera práctica, debido a que la concentración y/o la actividad del agua (a_{H₂O}) en todo su conjunto permanece prácticamente constante y en la ecuación sólo se especifican las especies en equilibrio, la constante de disociación puede reescribirse en términos de una constante específica para el agua (k_w), para la cual la

actividad o la concentración del agua líquida entraría a hacer parte de la constante, lo que se emplea en general cuando se tienen equilibrios químicos heterogéneos, permitiendo “obviarlas”, en términos de lo expresado, incluyendo sus actividades o concentraciones como parte de la constante:

$$k_w = k_d \cdot a_{H_2O}^2 = k_w = a_{H_3O^+} \cdot a_{OH^-}$$

La constante de disociación del agua ha sido medida experimentalmente para amplios rangos de temperatura y presión (Bandura y Lvov, 2006), y es muy típico encontrar en prácticamente todas las referencias de química respectivas, que, para temperaturas cercanas a 25°C y presión atmosférica, esta es del orden de 10^{-14} , razón por la cual, la escala de pH, como se expresó al comienzo, “sesgó” un rango entre 0 y 14, ya que si $k_w \approx 10^{-14}$ las concentraciones de especies disociadas en el equilibrio (H_3O^+ y OH^-) son del orden 10^{-7} M cada una, dejando expresa a $k_w = a_{H_3O^+} \cdot a_{OH^-}$ acorde con las concentraciones $k_w = 10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-14}$, este hecho permite, efectuando el logaritmo negativo

a k_w , obtener una ecuación en función del pH de acuerdo con la definición expresada al comienzo:

$$-\log k_w = -(\log a_{H_3O^+}) - (\log a_{OH^-})$$

$$-\log k_w = pH + pOH \quad \text{o} \quad -\log 10^{-14} = pH + pOH$$

$$\text{o} \quad 14 = pH + pOH$$

De la ecuación última puede observarse que, para las condiciones en equilibrio la suma de pH y pOH es 14. Aunque este hecho aclara las razones del por qué se considera la escala del pH entre 0 y 14, la escala no restringe que puedan tenerse soluciones con valores de pH por fuera de ella como se reportan y han encontrado en aguas naturalmente (Lim, 2006).

Las sustancias ácidas y básicas cuando se disuelven en el agua alteran el equilibrio de la solución, de modo que si aportan protones a la solución (ácidos), luego la solución tenderá a disminuir su pH o si el aporte es de iones hidróxido (bases), al aumentar la concentración de estos el pH tenderá a aumentar.

Medición del pH

La medición recomendada es realizada con un equipo de medición de pH con su electrodo, también conocido como ph-metro. La medición con pH-metro es un método electrométrico (Baird R. et al., 2017), para el caso, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, incorpora el procedimiento de medición del pH, en la Norma Técnica Colombiana NTC:3651. El método permite medir la actividad de los iones de hidrógeno por medición potenciométrica utilizando un electrodo de hidrógeno estándar y un electrodo de referencia. El electrodo de hidrógeno consta de un electrodo de platino a través del cual se burbujea gas hidrógeno a una presión de 101 kPa. Debido a la dificultad de su uso y al potencial de “envenenamiento”, que puede entenderse como el bloqueo o desactivación del electrodo de hidrógeno, suele usarse el electrodo de vidrio, un bulbo de vidrio especial que contiene una concentración fija de HCl o una solución de

cloruro tamponado en contacto con un electrodo de referencia interno, de este modo, se aprovecha que la fuerza electromotriz (fem) producida en el sistema de electrodos de vidrio varía linealmente con respecto al pH. Esta relación lineal se construye graficando la fem, medida contra las mediciones de pH de diferentes tampones o soluciones estándar de pH, permitiendo que el pH de la muestra se determine por extrapolación. (Baird et al., 2017). En resumen, el medidor propiamente consta de un potenciómetro; un electrodo de vidrio como se dijo; un electrodo de referencia (media celda construida típicamente de Ag/AgCl o Hg/HgCl), que proporciona un potencial de electrodo constante y que se conecta por medio de un puente salino (electrolito líquido), con la membrana de vidrio, que es la que entra en contacto con las soluciones en las cuales se ha de medir el pH, afectando en esta interacción, por acción de los iones de hidrógeno de la solución, el potencial

del electrodo de referencia que proporciona un potencial de electrodo constante; el equipo debe poseer además un dispositivo de compensación de temperatura, ya que las mediciones de pH se ven afectadas por la temperatura ya sea propiciando efectos mecánicos por cambios en las propiedades de los electrodos o bien, efectos químicos dados por cambios en el equilibrio.

La medición en sí consiste en sumergir la sonda en el seno de la solución con una suave agitación, que puede ser por agitador magnético en el recipiente que contiene la muestra, el cual, así como los agitadores, se recomiendan sean de polietileno, teflón o un material equivalente (Baird et al., 2017)

pH en el agua potable

El agua potable "Es aquella que, por cumplir las características físicas, químicas y microbiológicas, es apta para consumo humano. Se utiliza en bebida directa, en la preparación de alimentos o en la higiene personal. así mismo da cumplimiento a las condiciones y normas que la reglamenten." (Decreto 1575, 2007, art 2°)

El agua potable es el objetivo principal del proceso de potabilización y como tal se establecen, entre varios aspectos, las condiciones de calidad que debe cumplir para ser potable. Dentro de los parámetros de calidad vigilados y normatizados se tiene el pH, que de acuerdo con la resolución 2115 de 2007 debe estar entre 6,5 y 9,0 unidades.

Proceso de Potabilización

En términos generales, pueden agruparse en dos los tipos de tratamiento de agua, el primero denominado convencional y el segundo No convencional, este último acude a la utilización de nuevas tecnologías y equipos más avanzados, a diferencia del convencional que refiere una serie de procesos y operaciones físicas y químicas dejando el uso de tecnologías No convencionales para los casos en que no sea factible el uso de los convencionales.

Este documento se estructura para un proceso convencional, que puede relacionarse con aquellos subprocesos "más comúnmente empleados" como parte del proceso de potabilización en EPM. Pakharuddin et al, (2021, p. 3), básicamente resumen el proceso convencional en: a. Coagulación, floculación y sedimentación; b Filtración; y c. Desinfección. planteando esquemáticamente que, posterior a la captación del agua y previo a la coagulación puede implementarse un proceso de aireación,

que se citará más adelante dentro de los procesos de oxidación como parte del "pretratamiento". Además, citando a Villamizar (2020) que "La planta convencional lleva a cabo los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección." (p. 28), pero es claro que pueden incluirse otras operaciones, pues la normatividad colombiana vigente define el "tratamiento o potabilización" como: "El conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla apta para el consumo humano." (Resolución 2115, 2007), y el agua cruda como: "El agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para potabilización" (Decreto 1575, 2007).

Los subprocesos o etapas dentro del procedimiento de potabilización que pueden citarse en un orden secuencial y que para el propósito de este documento se relacionan con el pH son:

Captación

Equivalencia a la toma directa del agua desde la fuente hasta la planta de tratamiento que dependiendo de la planta puede implicar pretratamiento (Villamizar, 2020). El transporte del agua cruda desde la captación hacia la planta se conoce como aducción. En este documento, como parte de la captación, se da preponderancia en sí al agua cruda como elemento fundamental del proceso de tratamiento.

Pretratamiento

El RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico) actual, entró en vigor normativo con la resolución 0330 de 2017, sustituyendo la versión anterior del año 2000, que, dado el grado de especificidad de sus contenidos, tiene aún validez técnica y conceptual en armonía con los diferentes referentes teóricos que pueden hallarse para el proceso de potabilización.

En el RAS de la versión anterior, (2000), se establece que dependiendo de las condiciones de las aguas crudas, llega a ser necesario realizar pretratamientos que pueden incluir: remoción de material flotante o sobrenadante, en los que suelen usarse rejillas, mallas y trampas de grasa y aceite; remoción del material suspendido, que dependiendo de los materiales a remover pueden usarse desarenadores, presedimentadores con o sin aplicación de químicos, prefiltros y microtamices; procesos de oxidación, que puede ser por aireación que busca incorporar oxígeno en la solución del agua o aplicando agentes oxidantes como cloro (Cl_2) y derivados como el hipoclorito sódico (NaClO), ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), dióxido de cloro (ClO_2) o permanganato de potasio (KMnO_4), indicando además, que la aireación y la oxidación química junto con la adsorción, ya sea sobre carbón granular o carbón activado en polvo, son los subprocesos que por recomendación “deben analizarse para el control organoléptico” (RAS, 2000)

Adsorción

La adsorción, atendiendo a Ramírez (2009), es un fenómeno de superficie que pueden presentar ciertas sustancias como el carbón activado de amplio y frecuente uso en el tratamiento de aguas,

en el que los átomos en la superficie del sólido atraen y retienen otros compuestos y se puede emplear para la remoción de especies causantes de color, sabor y olor indeseables en el agua.

Coagulación

La coagulación se lleva a cabo por la adición al agua de sustancias conocidas como coagulantes, que al entrar en la solución del agua propician que las partículas coloidales presentes en el agua cruda modifiquen las condiciones que les mantienen suspendidas de manera estable, logrando como consecuencia de su desestabilización la eliminación de las fuerzas repulsivas o actuando sobre la hidrofilia de las partículas coloidales por medio de mecanismos de agregación o de adsorción, ya que su estabilidad también depende “de una solvatación o de una acción protectora debida a ciertos cuerpos absorbidos” (Barraque, 1979; Degrémont-Suez, 2007)), para así potenciar en estas la aglomeración.

Para lograr una mejor homogenización del coagulante en la solución del agua, se busca garantizar altos gradientes de agitación, por lo que este subproceso se asocia con la “mezclarápida” (RAS, 2000) y también puede identificarse directamente como etapa de mezcla rápida (Schutte, 2006). Los coagulantes empleados suelen ser sales de metales de aluminio como sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal y aluminato de sodio, o también se pueden usar sales de hierro como cloruro y sulfato férricos. Pueden emplearse polímeros inorgánicos de hierro (III) y aluminio, de los cuales se recomienda el policloruro de aluminio para aguas blandas (RAS, 2000).

Floculación

Consiste en lograr que por la dinámica de agitación del agua se propicie la aglomeración de las partículas coloidales que fueron desestabilizadas en la coagulación, los aglomerados que se forman se conocen como “flocs” o flóculos, términos de relación con el nombre del subproceso. Esta aglomeración puede ser potenciada con la ayuda de sustancias poliméricas, ya sea naturales o sintéticas y busca que los flóculos ganen peso

Sedimentación - Decantación

La separación de los flóculos formados, gracias a su peso y mayor densidad que el agua, que normalmente conlleva la reducción de la velocidad de su flujo en las unidades, les permite precipitarse por la acción gravitacional hacia el fondo de la unidad de sedimentación, de modo que el agua decanta con la consecuente reducción de los sólidos que así se separan, la acumulación de este material sólido se convierte en el lodo que como parte del proceso es removido y algunos flóculos que no han logrado el peso suficiente para sedimentarse, en armonía con la dinámica del flujo del agua, permanecen en el agua clarificada o decantada.

Filtración

Como la remoción de los flóculos formados no es completa y persisten en el agua clarificada, el agua debe ser pasada a través de un medio poroso (lecho filtrante) de material granular, (comúnmente arena y/o antracita), que permita generar en su acomodación o empaquetamiento, en la unidades que los contengan (filtros), los intersticios o huecos entre los gránulos del material filtrante acomodado, que son encargados de permitir el flujo del agua, facilitando en su paso que los flóculos más pequeños sean retenidos como consecuencia de varios mecanismos incidentes y variados, "no sólo" por atrapamiento obstructivo en el que tamaño de floc no logre superar el tamaño de los huecos intersticiales generados en el lecho.

Desinfección

Es el subproceso que busca garantizar que no haya partículas de carácter microbiológico en el agua que puedan causar enfermedades al consumirse. El proceso de desinfección se logra mediante la acción de un agente químico o físico que logre destruir o inactivar a aquellos organismos patógenos que aún puedan persistir en el agua después de la filtración. La desinfección dependerá, como lo reseña Vargas (2004), de varios aspectos adicionales al agente desinfectante, como la naturaleza y calidad de las aguas; así mismo como las sustancias y partículas en ella

presentes que puedan inhibir o contrarrestar la acción desinfectante; el pH, el tiempo de contacto o exposición con el agente desinfectante; la temperatura; la población microbiológica tanto de especies, como de su abundancia.

Ajuste de pH

El pH del agua al final del proceso deberá garantizarse con un pH entre 6,5-9,0 unidades (Res 2115, 2007), y dadas las características más comunes de tratamiento el agua del proceso puede resultar por debajo de este rango o con sesgo hacia lo más bajo de él, por eso se implementa la adición de sustancias básicas.



Variaciones significativas del pH dentro del proceso de potabilización

No debe olvidarse que el pH como medida para el rango entre 6,5 y 9,0 unidades admitidos desde la norma en el agua potable en Colombia, implica en términos de la actividad molar de las especies, que para el ion hidrógeno fluctuaría entre 0,0000003 mol/l y 0,00000001 mol/l para ese rango de pH respectivamente, lo cual sugiere que afectar “significativamente” el pH involucra alcanzar en el equilibrio de las especies asociadas al pH, concentraciones efectivas de ion hidrógeno muy bajas, (de entre $\approx 10^{-7}$ mol/l y 10^{-9} mol/l) si las comparamos con la concentración del agua misma, (asumiéndola pura para el efecto práctico), que sería de 55.5 mol/l. Con esto se quiere advertir que tanto los parámetros de calidad como el pH o los mismos contaminantes que se puedan presentar en el agua son “significativos” a muy bajas concentraciones.

Aguas crudas

Se considera que “el pH en la mayoría de las fuentes de agua natural fluctúa entre 6,5 – 8,5” (Comunidad Andina, 2008, p. 34) y aunque no resulte posible determinar exactamente la magnitud y las causas de su fluctuación, ya que ello obedecería a hechos y efectos circunstanciales específicos, se puede mencionar algunas claramente identificadas (Environmental Protection Agency [EPA], 2021), que pueden obedecer a causas naturales o bien al desarrollo de algunas actividades antrópicas, que se pueden incluso aunar. Así pues, en lagos, embalses o ríos con poblaciones de algas y plantas acuáticas el pH tiende a aumentar durante el día debido al consumo de CO_2 por fotosíntesis y disminuir en la medida que se ausenta la luz solar, este proceso puede conferirle una capacidad amortiguadora del pH a los lagos o embalses, que cuando se presenta “Bloom” o “floración” de algas, se ha determinado que el proceso de descomposición en el fondo tanto del exceso de algas como de otros materiales, conlleva a la disminución del pH. (EPA, 2021). El pH también puede disminuir a causa de las “lluvias ácidas” (Arellano y Guzmán, 2011), esto debido a que los gases de combustión,

especialmente óxidos de nitrógeno y azufre que, aunque pueden provenir de fuentes naturales como emisiones volcánicas, se considera que la principal causa de liberación de estos a la atmósfera proviene “aún” de la combustión de combustibles fósiles (Arellano y Guzmán, 2011, pp. 115-116; Barreto, 2019, p. 3). Estos gases reaccionan con la humedad, el oxígeno y otros gases atmosféricos formando ácidos como el sulfúrico y el nítrico, los cuales son dispersados por acción de los vientos para luego ser transportados al suelo y las aguas superficiales por diferentes formas de precipitación (Barreto, 2019, p. 17). Además de algunos vertimientos de actividades como la minería, (EPA, 2021) “la geología local ayuda a controlar el pH, con ciertos tipos de lecho rocoso, como la piedra caliza, que amortiguan el agua contra las entradas de ácido.”

Como puede observarse, algunas de las condiciones específicas de afectación al pH en las aguas naturales a tratar, como parte del proceso de potabilización, también podrían estar presentes de manera particular en las plantas de tratamiento, ya que estas se encuentran normalmente expuestas a la atmósfera en la mayor parte de sus subprocesos y dependiendo por ejemplo de la zona en que se encuentren, su régimen de lluvias, la calidad atmosférica o incluso la polución cercana a la planta, las cuales pueden sumarse a condiciones específicas de diseño de las plantas que potencien procesos de intercambio gaseoso.

Es importante comprender que se pueden llegar a presentar situaciones similares no solo en las fuentes, sino también en las mismas plantas por efectos de contaminación y cambios ambientales, por lo que es viable sugerir a los operadores de los sistemas de potabilización estar atentos ya sea a la magnificación de algunos efectos evidenciados o bien a los que de manera novedosa puedan surgir, que sin ser necesariamente pesimistas, sí advierten de posibilidades de afectación como parte de un escenario ambiental más vulnerado y cambiante, pero aún incierto.

Subprocesos de incidencia en el pH

De las diferentes etapas, subprocesos u operaciones unitarias que hacen parte del proceso de potabilización, es comúnmente aceptado que en la coagulación, en la desinfección y en la alcalinización o ajuste de pH como se explicitó antes, dependiendo de los reactivos químicos empleados para ello, es donde se consiguen los efectos más significativos sobre el pH en el agua, siendo en los dos primeros una consecuencia indirecta del propósito de la aplicación de los reactivos que se emplean, aunque en el caso de la coagulación puede tratarse en el fondo, de una generalización respecto al uso extendido de coagulantes de sales de aluminio y hierro principalmente y en el caso de la desinfección (cloración), consecuencia del uso de cloro gaseoso como desinfectante; mientras que en la alcalinización o ajuste de pH, el propósito de acción sobre el pH es directo. Bueno (2014), refiere de manera específica a la coagulación y a la desinfección como los dos casos del proceso que ocasionan pérdida de alcalinidad y consecuente disminución del pH.

Coagulación

El pH es muy importante en el estudio de la coagulación y la floculación de tal modo que una parte de la carga de las partículas coloidales que han absorbido iones OH^- se destruye por aumento de la concentración de iones H^+ , disminuyendo la estabilidad de la suspensión coloidal y paralelamente es preferible que el pH quede dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado (Barraque, 1979). En este sentido, también señala Degrémont-Suez, (2007) que para sales de aluminio el mínimo de iones Al^{3+} permanece en solución a pH entre 6 y 7,4 y fuera de este margen existe el riesgo de tener una concentración más fuerte de aluminio en solución. Para el caso de las sales de hierro, se alcanza el mínimo de solubilidad cuando el pH es superior a 5 unidades. Aunque estos rangos pueden variar según diferentes autores, pues es claro que deben estimarse específicamente según el agua, un aspecto relevante además de que lejos del pH óptimo (que claramente debe existir), los resultados no sean buenos (Arboleda, 2000), como lo expresa Fontecha et al, (1999), al

tener un rango óptimo de actuación el control de pH es muy importante, (pensando además en el pH del agua al final del proceso) y se advierte que:

Fontecha et al, (1999), "si no existe la posibilidad de modificar el pH del agua a la entrada de la estación potabilizadora, será preciso ajustar al máximo la dosificación de reactivos químicos añadidos para evitar deficiencias en la decantación, ya que la adición de estos tiende a reducir el pH".

Esta tendencia a reducir el pH es un efecto que se ha atribuido a las diferentes reacciones de hidrólisis que sufren al añadirse en el agua estos coagulantes de sales metálicas formando hidróxidos metálicos que se precipitan aumentando la acidez (Arboleda, 2000). En citación que hace de Edzwald (2011), respecto a la reacción de hidrólisis y los iones hidrógeno que genera, Bueno (2014) expresa que: "reducen la alcalinidad total dependiendo del tipo de coagulante a utilizar (0.93 mg CaCO_3/L por mg/L de cloruro férrico o 0.51 mg CaCO_3/L por mg/L de sulfato de aluminio), presentando una disminución del pH" (p10), Además, si se emplea un sulfato de aluminio ácido "Producto que contiene ácido sulfúrico (acidez) que no se ha combinado como sulfato de aluminio (expresado como " H_2SO_4 libre"), (NTC 531: 2015), es claro que dicha acidez aportará al descenso del pH en concordancia con el efecto del ácido una vez se solubilice en el agua, estos coagulantes fuertemente acidulados como lo expresa Letterman (1999), "contiene de 5 a 20 por ciento (en peso) de ácido sulfúrico al 93 por ciento", indicando además que "los productos fortificados con ácidos fuertes reaccionan con más alcalinidad y reducen el pH en mayor medida que las soluciones de sales metálicas no fortificadas".

La utilización de otros coagulantes, como el policloruro de aluminio, ha demostrado tener hidrólisis menos ácida que el sulfato aluminio, lo que redundará en menor disminución del pH, en aguas de baja mineralización, como lo expresa Fontecha et al. "puede permitir, en determinados casos, la supresión del ajuste de pH a la salida de la planta", (1999).

Como alternativas de coagulantes, además de las sales de metales (ácidas en su mayoría), se tiene el aluminato de sodio con efecto básico en el agua, el cual suele combinarse con el sulfato de aluminio en aguas de baja alcalinidad (Letterman, 1999); y otros coagulantes inorgánicos prepolimerizados conocidos como PAC's que son producidos por adición de una base al cloruro de aluminio hasta lograr la fórmula empírica $Al(OH)_nCl_{3-n}$, donde n toma valores que van de 1 a 2.5. Los PAC's se tipifican por su contenido de aluminio (expresado como porcentaje de Al_2O_3), contenido de sulfatos (porcentaje de SO_4^{2-}) y contenido de hidróxido (porcentaje de basicidad), que es referida como "el número de iones hidróxido promedio por átomos de aluminio en las moléculas del PAC ($[OH^-]/[Al]$)" (Pernitsky y Edzwald, 2006; Cogollo, 2011).

Reiterando en la necesidad de un adecuado pH de coagulación, que quede dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado, el acondicionamiento del pH previo a la coagulación de acuerdo con la alcalinidad presente en el agua a tratar, se puede sugerir la utilización de un coagulante como el sulfato de aluminio u otro como el PAC. Pernitsky y Edzwald, (2006), pretendiendo generar guías para la elección de uno u otro, recomendaron al respecto que aguas de baja alcalinidad son especialmente adecuadas para PAC de alta basicidad, permitiendo mantener el pH de coagulación adecuado sin la adición de una base suplementaria como suele ser necesario cuando se usa alumbre. Así mismo las aguas de alcalinidad media se tratan mejor con PAC de basicidad media o baja, o sulfato de aluminio, pues la acidez de estos coagulantes puede consumir suficiente alcalinidad para reducir el pH hasta el deseado. En agua de alta alcalinidad, los PAC de baja basicidad y el alumbre aún pueden incluso requerir la adición de ácido para operar en condiciones de pH favorables.

Algunas sustancias como ácido fosfórico, sales de calcio o silicato de sodio son adicionados al coagulante de sal metálica como el sulfato de aluminio (Letterman, 1999), dependiendo de su naturaleza, estos aditivos potenciarán las características ácidas o básicas del coagulante. El RAS 2000, en el caso del silicato de sodio, menciona como uno de los "productos auxiliares" de la coagulación, advirtiendo que éstos deben

cumplir con lo exigido por las Normas Técnicas ANSI/AWWA B202-93 y la ANSI/AWWA B404-92.

Desinfección

De no requerirse ajuste de pH, la desinfección terminaría siendo prácticamente la última operación del proceso de tratamiento y fundamental para generar un agua verdaderamente potable, con base en su objetivo anti-microbiológico. Es de destacar que el pH tiene incidencia directa en la viabilidad de los organismos, ofreciendo un medio adverso para ellos cuando este se encuentra en niveles muy bajos o muy altos a excepción de los quistes de amebas que pueden soportar pH de 1 o 13 unidades (Vargas, 2004).

Aunque se han reseñado varias posibilidades de reactivos desinfectantes para la labor, dado el uso extendido y común, como se había citado previamente del cloro en la operación de desinfección, en este aparte se referirá su uso y su efecto sobre el pH, como "significativo", ya que como lo expresa Bueno (2014) citando a otros autores (Trejo & García, 2007; Edzwald, 2011), "sobre sus propiedades ácido-base al hidrolizar, forma el ácido hipocloroso que se disocia en iones de hidrógeno, dando lugar a una pérdida de alcalinidad y reducción del pH.

La reacción de hidrólisis que en particular se resalta al respecto del de la incidencia del cloro gaseoso cuando entra al agua en solución, es: $Cl_2 + H_2O \leftrightarrow HOCl + H^+ + Cl^-$, que como puede observarse, aporta iones hidrógeno que al aumentar su concentración disminuyen el pH y que además entrarían a reaccionar con la alcalinidad del agua, ocasionando un efecto de neutralización que conlleva también a la reducción de pH, pues en el caso de los grupos hidroxilo, que hacen parte de la alcalinidad como parámetro medible y considerado en el agua, al disminuir su concentración en solución el efecto neto en el pH será también de disminución. De hecho, es importante concebir para el caso de las aguas de baja alcalinidad, que este efecto de disminución es mayor, ya que dichas aguas tienen una amortiguación limitada frente a los cambios de pH (Letterman, 1999), asociado esto con la dinámica y equilibrio de las especies carbónicas en el agua que confieren un efecto de amortiguación y el efecto de la intensidad

de esta, está estrechamente relacionado con la precipitación de CaCO_3 , relacionado con el papel del pH y la concentración de iones bicarbonato. (Letterman, 1999)

Como se ha establecido, la cloración puede realizarse con gas cloro licuado o soluciones de hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, "cal clorada", que es una combinación de cal apagada y gas cloro (Vargas, 2004, p. 180). Las soluciones pueden prepararse a partir de los reactivos disponibles comercialmente o mediante dispositivos de generación in situ de las mismas. A modo de síntesis como lo plasma Letterman (1999), sin importar la forma en que se agregue el cloro al agua, hipoclorito y ácido hipocloroso estarán presentes, pero con una diferencia que se quiere destacar para este artículo, y es que "el cloro gaseoso produce una reacción ácida que reduce el pH. de la solución, mientras que el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio que son básicos, elevarán el pH del agua y la magnitud del cambio de pH dependerá de la alcalinidad que tenga el agua." (Letterman, 1999). Las características básicas del hipoclorito pueden explicarse en parte a las reacciones que sufren con el agua en su proceso de disociación y su interacción con esta para generar iones hidróxido que entran en solución a hacer parte de las condiciones de equilibrio. Es importante reseñar que el cloro suele generarse electrolíticamente a partir de salmuera de cloruro de sodio, este cloro generado puede disolverse en hidróxido de sodio que también es producido en la celda electrolítica, dando como resultado una solución concentrada del hipoclorito en condiciones básicas remanentes que tendrán efecto igualmente sobre el pH.

Las reacciones electroquímicas de producción de "mezclas oxidantes" operan de manera similar a la producción por estas vías del hipoclorito, con la diferencia que además de la producción catódica de ácido hipocloroso en condiciones fuertemente ácidas, en el ánodo en condiciones fuertemente básicas, se producen al parecer, además de los iones hidróxidos responsables de estas condiciones, otras reacciones de formación de ozono. Dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno y otros subproductos como cloritos, cloratos y bromatos, todo esto gracias a la separación de las corrientes de generación (catódica y aniónica) por medio de una barrera semipermeable (Letterman,

1999). Adicionalmente, el pH es determinante de la forma que predomine en la solución del agua, ya sea la forma de hipoclorito (OCl^-) o ácido hipocloroso (HOCl) y aunque ambas especies son fuertes agentes oxidantes, la experiencia evidencia que a bajo pH la desinfección es mayor, lo que permite aseverar que, de las dos especies, el ácido hipocloroso es un oxidante más fuerte que el ion, de ahí que el ácido se acostumbre a referenciar como "cloro activo".

Ajuste del pH

Esta etapa del proceso apunta a modificar el pH en el agua por medio de sustancias que al entrar en la solución del agua ayuden a modificar el equilibrio de la actividad iónica de los hidrogeniones y los iones hidróxido, de modo que, si el propósito es aumentar el pH, las sustancias que se apliquen al agua han de aumentar la concentración de iones hidróxido (bases o álcalis), ya sea por aporte directo de estos o bien por la disminución de hidrogeniones. Si se busca disminuir el pH, las sustancias aplicadas han de aumentar la concentración de los iones hidrógeno en la solución (ácidos), de manera similar a como se explicó antes, de modo que haya aporte directo de hidrogeniones a la solución del agua o por el consumo de los iones hidroxilos presentes. Esta simple descripción se convierte en la explicación del porqué se utilizan los diferentes productos y bastará con identificar sus reacciones específicas al entrar en el agua para comprender su efecto ya sea alcalinizante o acidificante, partiendo de los iones que preferentemente predominen en la solución del agua. Algunos productos que se utilizan con ese fin dentro del proceso de potabilización son: 1. El óxido de calcio o cal viva (CaO); 2. Hidróxido de calcio: Ca(OH)_2 ; 3. Carbonato de sodio: Na_2CO_3 ; 4. Hidróxido de sodio: NaOH ; 5. Gas carbónico: CO_2 ; 6. Ácido sulfúrico: H_2SO_4 y 7. Ácido clorhídrico: HCl , sus usos se orientarán con base en los preceptos del equilibrio químico -ácido_base- a sabiendas que se buscará el efecto acidificante en los tres últimos de la lista, aclarando para el caso del CO_2 , que este en su solución acuosa adopta la forma de ácido carbónico, que, aunque tendrá incidencia en el equilibrio del sistema carbonato, (Bueno, 2014), ejercerá un efecto neto de neutralización ante la presencia de iones hidroxilo causantes de basicidad.

De manera similar actuarán los alcalinizantes entre los cuales el aporte de iones hidroxilos como resultado de su disociación en el agua aportará directamente basicidad y consecuente neutralización de hidrogeniones. Por ejemplo, el hidróxido de sodio es una base fuerte muy soluble en agua y es recomendada por algunos para aguas de baja alcalinidad (Torres 2008, citado por Bueno, 2014), y el hidróxido de calcio, considerado uno de los alcalinizantes más económicos (Lozano, 2006 citado por Bueno, 2014) tiene una solubilidad más baja que el hidróxido de sodio y se obtiene de la reacción de “apagado” de la cal viva o CaO , en una reacción muy exotérmica (Lozano, 2006, citado por bueno 2014), que una vez apagada se procede a diluir para preparar las soluciones de hidróxido de calcio que se han de dosificar directamente como parte de una secuencia completa desde el apagado o bien, la cal apagada se empaqueta en polvo, previo retiro de la humedad y con esta se preparan las soluciones que han de dosificarse al agua que requiere acondicionarse.

Debe tenerse en cuenta que la baja solubilidad de hidróxido cálcico conlleva a que se alcancen las soluciones saturadas rápidamente, quedando cantidades del mismo en forma de suspensión. Por lo tanto, es ideal aplicar esas soluciones saturadas para lograr el efecto de ajuste esperado, siendo esta la causa para que Kim et al, 2008 (citado por Blanco (2014), resalten que se requieren grandes cantidades de cal hidratada (apagada), para obtener un resultado razonable. Un aspecto adicional que debe considerarse y determinarse de manera específica para comprender “sus eficiencias” de la cal apagada, especialmente cuando esta se tiene en polvo, es la incidencia del efecto de carbonatación por acción de CO_2 del ambiente, sobre la base en que la cal tiene una tendencia natural a capturar CO_2 , claramente justificado dentro del ciclo de la cal, como una fase con este nombre (European Lime Association [EULA], 2021). Por lo tanto, considérese que en polvo, la cal tiene una gran área superficial que potenciará el fenómeno de carbonatación



no sólo desde el momento de preparación de las soluciones “suspensiones” de cal apagada, cuando esta se esparza, liberándola del empaque, y entre en contacto más íntimo con el CO₂ del ambiente, sino también, desde el mismo punto de bodegaje en su empaque que no es hermético, lo que sugiere considerar el tiempo entre empaquetado, almacenamiento y el momento de su uso, que posibilitará estas reacciones de carbonatación. Además, en las unidades de preparación también han de presentarse las reacciones de carbonatación del CO₂ con el hidróxido cálcico que surge del apagado de la cal viva, tanto en la solución saturada de este, como sobre la superficie de las partículas que hacen parte de la suspensión haciendo parte de la lechada de cal y en ese caso las partículas de Ca(OH)₂ se recubrirían por una película de carbonato que inhibiría la disposición del hidróxido cálcico una vez entre en contacto con una mayor masa de agua en el punto de su aplicación al agua de proceso para entrar en solución y contribuir con aporte esperado de los iones hidroxilo.

El carbonato de sodio o incluso el bicarbonato de sodio, no se incluyeron en la lista citada aunque ejercen su efecto aumentando el pH por su capacidad de neutralizar la acidez al reaccionar con los hidrogeniones presentes en la solución del agua, ya que no aportan iones hidroxilo directamente, por lo que elevar el pH por encima de los valores alcanzados en la neutralización propiamente dicha, exigiría grandes dosificaciones de ellos, sin embargo estos productos incidirán en la alcalinidad del agua especialmente sobre el equilibrio del sistema carbonato que se ha citado previamente, para minimizar la agresividad corrosiva del agua e incidir en el efecto amortiguador en la misma.

Por lo tanto, es ideal aplicar esas soluciones saturadas para lograr el efecto de ajuste esperado, siendo esta la causa para que Kim et al, 2008 (citado por Blanco 2014), resalten que se requieren grandes cantidades de cal hidratada (apagada), para obtener un resultado razonable. Un aspecto adicional que debe considerarse y determinarse de manera específica para comprender “sus

eficiencias” de la cal apagada, especialmente cuando esta se tiene en polvo, es la incidencia del efecto de carbonatación por acción de CO₂ del ambiente, sobre la base en que la cal tiene una tendencia natural a capturar CO₂, claramente justificado dentro del ciclo de la cal, como una fase con este nombre (EULA, 2021). Por lo tanto, considérese que en polvo, la cal tiene una gran área superficial que potenciará el fenómeno de carbonatación no sólo desde el momento de preparación de las soluciones “suspensiones” de cal apagada, cuando esta se esparza, liberándola del empaque, y entre en contacto más íntimo con el CO₂ del ambiente, sino también, desde el mismo punto de bodegaje en su empaque que no es hermético, lo que sugiere considerar el tiempo entre empaquetado, almacenamiento y el momento de su uso, que posibilitará estas reacciones de carbonatación. Además, en las unidades de preparación también han de presentarse las reacciones de carbonatación del CO₂ con el hidróxido cálcico que surge del apagado de la cal viva, tanto en la solución saturada de este, como sobre la superficie de las partículas que hacen parte de la suspensión haciendo parte de la lechada de cal y en ese caso las partículas de Ca(OH)₂ se recubrirían por una película de carbonato que inhibiría la disposición del hidróxido cálcico una vez entre en contacto con una mayor masa de agua en el punto de su aplicación al agua de proceso para entrar en solución y contribuir con aporte esperado de los iones hidroxilo.

El carbonato de sodio o incluso el bicarbonato de sodio, no se incluyeron en la lista citada aunque ejercen su efecto aumentando el pH por su capacidad de neutralizar la acidez al reaccionar con los hidrogeniones presentes en la solución del agua, ya que no aportan iones hidroxilo directamente, por lo que elevar el pH por encima de los valores alcanzados en la neutralización propiamente dicha, exigiría grandes dosificaciones de ellos, sin embargo estos productos incidirán en la alcalinidad del agua especialmente sobre el equilibrio del sistema carbonato que se ha citado previamente, para minimizar la agresividad corrosiva del agua e incidir en el efecto amortiguador en la misma.

Referencias

- Arboleda J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. (3ª ed.). Mc Graw Hill.
- Arellano J. y Guzmán J. (2011). *Ingeniería Ambiental*. Alfaomega.
- Baird, R., Rice, E. y Eaton, A. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewaters*. (23 ed.). American Public Health Association.
- Bandura, A. y Lvov, S. (2006). The ionization constant of water over wide ranges of temperature and density. *Journal of physical and chemical reference data*, 35(1), 15-30. <https://rebrand.ly/79705a>
- Barraque, C. (1979). Bases teóricas de los principales procesos de tratamiento. En. Degremont. *Manual técnico del agua*. Urmo. <https://rebrand.ly/d21bd4>
- Barreto, P. (2019). *Algunos elementos básicos sobre la lluvia ácida*. IDEAM. <https://rebrand.ly/c37h4nx>
- Buck, R., Rondinini, S., Covington, A., Baucke, F., Brett, Christopher M., Camoes, M., Milton, M., Mussini, T., Naumann, R., Pratt, K., Spitzer, P. y Wilson, G. (2002). Measurement of pH. Definition, standards, and procedures (IUPAC Recommendations 2002). *Pure and Applied Chemistry*, 74(11), 2169-2200. <https://doi.org/10.1351/pac200274112169>
- Bueno K. (2014). *Evaluación del proceso de estabilización del pH del agua tratada del Río Cauca*. [Tesis doctoral, Universidad del Valle]. <https://rebrand.ly/00fdfa>
- Cogollo J. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. *Dyna*, (165), 18-27. <https://rb.gy/2xosbq>
- Comunidad Andina. (2008). *Manual de estadísticas ambientales Andinas*. <https://rebrand.ly/gllscwh>
- Decreto 1575 de 2007. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano. 9 de mayo de 2007. <https://rebrand.ly/jmiii8u>
- Degrémont-Suez. (2007). *Water treatment handbook*. (7ª ed.). Lavoisier SAS.
- Environmental Protection Agency. (2021). *Factsheet on Water Quality Parameters*. <https://rebrand.ly/24338b>
- European Lime Association. (2021). *La cal: sumidero natural de carbono*. <https://rb.gy/94bj20>
- Fontecha R., Gutierrez Y. y Rivas J., (1999). Ensayos con distintos coagulantes para reducir el aluminio residual en agua potabilizada. *Revista Tecnología del Agua*, (188). 57-64. <https://rebrand.ly/ecv0zvi>
- Letterman R. (1999). *Water quality and treatment – A handbook of Community water Supplies*. (5ª ed.). McGraw-Hill.
- Lim, K. (2006). Negative pH does exist. *Journal of chemical education*, 83(10), 1465. <https://rebrand.ly/171q9ux>
- Pakharuddin, N., Fazly, M., Ahmad, S., Tho, K. y Zamri W. (2021). Water treatment process using conventional and advanced methods: A comparative study of Malaysia and selected countries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 880, 1-11. <https://rebrand.ly/zmzgpjt>
- Pernitsky D. y Edzwald J. (2006). Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology – Aqua*, 55(2). 12-141. <https://doi.org/10.2166/aqua.2006.062>
- Ramírez C. (2009). *El Carbón activado para el tratamiento del agua*. [Tesis, Universidad de Sonora]. <https://rebrand.ly/lk2zf7h>

- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Sección II, Título C. (2000). Ministerio de Desarrollo Económico. <https://rebrand.ly/7df414>
- Resolución 2115 de 2007. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. 22 de junio de 2007. <https://rebrand.ly/j4jt2sk>
- Schutte F. (2006). *Handbook for operation of wáter treatment Works. Water research commission*. The water institute of Southern Africa. <https://rb.gy/pd1pr>
- Tagle, E. (2017). *Teorías ácido-base y conceptos relacionados, un estudio exploratorio en estudiantes universitarios de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. [Tesis doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria]. <http://hdl.handle.net/10553/54027>
- Vargas L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. CEPIS/OPS. <https://rebrand.ly/s1f4mz1>
- Villamizar I. (2020). *Tecnologías para la potabilización y tratamiento de aguas superficiales en Colombia*. [Monografía, Universidad de Pamplona]. <https://rebrand.ly/mkio431>

Cómo citar este artículo:

Alzate, W. y Mira, R. (2024). pH En el proceso de potabilización en el contexto colombiano. *Revista EPM*, (23), 35-49



Implementación de un caso de estudio de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías (SAEB) para subestaciones de generación y de distribución

Implementing a study-case of a Battery Energy Storage Systems (BESS) with application for both generation and distribution substations

**Gabriel Jaime
Correa-Henao**
Unidad Ingeniería de
Proyectos 1, EPM

gabriel.jaime.correa@epm.com.co

**Kevin Andrés
Pachón-Niño**
Unidad Estudios y Asimilación
Tecnológica, EPM

kevin.pachon@epm.com.co

Resumen

El propósito de esta contribución técnica está relacionado con la presentación de un caso de estudio para sistemas SAEB, con aplicaciones a respaldo de proyectos de energías renovables y confiabilidad para el suministro del servicio de energía eléctrica, cuyos resultados puedan ser utilizados por EPM en la identificación de

proyectos a nivel de prefactibilidad, para su posterior formulación. Con la inclusión de este tipo de proyectos se contribuye positivamente en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible con los que está comprometido EPM, sentando las bases para el futuro energético más limpio, resiliente, y rentable.

Palabras clave:

Baterías, SAEB, Almacenamiento energético, Transición energética, Arbitraje tarifario

Keywords:

Batteries, BESS, Energy storage, Energy transition, Tariff arbitrage

Introducción

El avance notable en el desarrollo de tecnologías de generación y almacenamiento de energía eléctrica, con mejores eficiencias de conversión energética, uso de materiales más amigables con el medio ambiente, y menores costos de inversión, operación y mantenimiento, en sectores de generación y distribución de energía eléctrica, constituye una oportunidad para los nuevos negocios de las empresas de servicios públicos, en beneficio de las comunidades y de la sociedad en general.

En este artículo se aborda el tema de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, con especial énfasis en los sistemas de almacenamiento de energía con baterías (SAEB). Lo anterior, dada la disponibilidad comercial de dichas tecnologías con costos más competitivos, los cuales se consideran activos valiosos para estabilizar la red eléctrica y respaldar la integración de energías renovables en el suministro de energía.

Para facilitar la lectura del artículo, se proporciona un marco teórico que ilustra la evolución del sector en los últimos años. Adicionalmente, bajo los fundamentos del rastreo de la revisión bibliográfica y de la vigilancia tecnológica, se presenta un caso de estudio con especificaciones para los SAEB, con aplicaciones a respaldo de proyectos de energías renovables y confiabilidad para el suministro del servicio de energía eléctrica, cuyos resultados puedan ser utilizados por empresas del sector de servicios públicos para la identificación de proyectos a nivel de prefactibilidad y su posterior formulación. En la última parte se concretan las conclusiones y recomendaciones asociadas al propósito del artículo.

1. Marco teórico

La transición energética constituye uno de los pilares que pretende garantizar el acceso a una energía limpia y asequible en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, en cuyo caso se manifiesta en Ortega A et al. (2023) que la tecnología de sistemas de almacenamiento de energía con baterías (SAEB) constituyen una solución esencial. Lo anterior, dado que dicha tecnología actualmente es madura y comercialmente disponible, al tiempo que facilita la integración de fuentes de energía renovable intermitente, optimización de gestión de la demanda energética, mejora la resiliencia de las redes eléctricas ante variaciones de carga y picos de consumo y en términos generales, optimiza la eficiencia energética global del sistema eléctrico.

1.1 Evolución de las tecnologías de baterías

Una batería es un dispositivo electroquímico que almacena y libera energía en forma de electricidad en corriente directa. En Bañeres-Sorinas (2019) se describe la composición del dispositivo de batería, el cual constituye un arreglo de varios “vasos” que están conectados en serie, cuya sumatoria de potencial permite obtener voltajes en bornes, y con elementos constitutivos de ánodo, cátodo, electrolito, separadores, carcasa, borneras y circuitos de protección.

En la tabla 1 se recopila información disponible en estudios de mercado de Bloomberg (2022) y de McKenzie (2023), con valores actualizados de las tecnologías de celdas de baterías disponibles comercialmente. Los estimativos de costos son referentes en los EE.UU. y se enuncian en dólares americanos.

Tecnología	Densidad Energética (Wh/kg)	Precio (USD/kWh)	Vida Útil (Ciclos)	Disponibilidad Comercial	Aplicabilidad	Fabricantes
Plomo-ácido (Pb-Ácido)	30-50	80-150	500-800	Alta	Automoción; UPS; Telecomunicaciones; Almacenamiento energía renovable	C&D; CLARIOS; CSB Energy; East Penn; EnerSys; Exide Industries; GS Yuasa; KOYO; LEOCH
Níquel-Cadmio (NiCd)	40-60	300-400	1500-2000	Alta	Aeroespacial; Equipos médicos; Herramientas eléctricas; Electrónica de consumo	Saft; Panasonic; Sanyo
Hidruro metálico de níquel (NiMH)	60-120	300-400	500-1000	Alta	Vehículos eléctricos; Electrónica de consumo	Panasonic; Duracell; Energizer; GP Batteries
Flujo Redox de Vanadio (VRFB)	15-25	250-350	10.000-20.000	Baja	Almacenamiento en red	Sumitomo Electric; Rongke Power; UniEnergy
Hierro-Níquel (NiFe)	30-50	400-500	2000-3000	Moderada	Almacenamiento en red	Oerlikon; Changhong Battery Co.; Zhejiang Electrical Appliance; Phinergy
Hierro-Aire	~1200	~50	10000 - 20000	Investigación	Almacenamiento en red	ESS; Form Energy
Ión-Litio Polimérico (Li-ion)	100-265	100-300	500-1000	Alta	Vehículos eléctricos; Electrónica de consumo	Tesla; LG Chem; Panasonic; Samsung Fronius
Ión-Sodio (SIB)	160-200	100 - 200	~5000	Investigación	Almacenamiento en red; Vehículos eléctricos	CATL; Faradion Ltd.; Natron Energy
LFP (LiFePO4)	~120	160 - 230	~5000	Alta	Almacenamiento en red; Vehículos eléctricos	BYD ; CATL; A123 Systems; Sungrow; GE Energy; Hithium; Honeywell; Roll Royce; Merus
LMFP (LiFePMn)	~240	~250	5000-10000	Baja	Almacenamiento en red; Vehículos eléctricos	Nissan; AESC; Gotium; CATL
NCM (NiCoMn) + Li	~250	100-300	~1500	Moderada	Vehículos Eléctricos; Electrónica de consumo	Samsung; LG Chem ; Panasonic; Sanyo
LCO (LiCoO4)	150-200	~250	500-1000	Baja	Vehículos Eléctricos; Electrónica de consumo	Tesla; Panasonic; Samsung
Sodio-Azufre (NaS)	~110	100-200	~4500	Baja	Almacenamiento en red	NGK; BASF SE; TEPCO; EaglePicher; GE Energy; FIAMM Group; KEMET Corporation; POSCO
Zinc-Aire	~1000	~200	~10000	Investigación	Vehículos Eléctricos; Electrónica de consumo; Almacenamiento en la red	e-Zinc; Phinergy ; Primus Power

Tabla 1. Descripción de tecnologías de celdas de baterías más comunes y su aplicabilidad.

De conformidad con los informes de US Energy Information Administration –EIA- (2023) y de Polaris (2023), cerca del 90% de los proyectos SAEB se implementan mediante tecnología de baterías LFP / LFPM y sólo 2% con tecnología de baterías NaS. Adicionalmente, con las tecnologías que se presentan en la tabla 1, también se desarrollan investigaciones, patentes y lanzamientos comerciales en baterías de flujo-vanadio, baterías de estado semisólido y baterías de estado sólido, correspondiente a innovaciones radicales que repercutirán en sectores de gestión energética, movilidad y transporte eléctrico. Por ejemplo, según Janek y Zeier (2023) para el año 2030 serán comerciales las baterías de estado sólido con densidades energéticas mayores a 400Wh/Kg y costos menores a 50 USD/kWh, que repercutirán en mejor seguridad, gran autonomía y costos óptimos para movilidad eléctrica eficiente y no contaminante en el marco de la transición energética.

1.2 Servicios de los SAEB

Los SAEB permiten mejorar la eficiencia y la estabilidad de la red eléctrica, ya que almacenan energía cuando hay excedentes y la liberan cuando

hay una mayor demanda. Según Endemaño (2016) para el almacenamiento energético se pueden utilizar diferentes tecnologías, como baterías, volantes de inercia, aire comprimido, reservas de agua en diferentes niveles de altura, apilamiento de bloques por gravedad, entre otros. Adicionalmente, en Kadam et al. (2022) se denota que los sistemas de almacenamiento energético con baterías (SAEB) se han convertido en piezas clave para integrar energías renovables intermitentes en la red eléctrica, asegurando la estabilidad y confiabilidad. Según Feldman et al. (2021) los SAEB también permiten mitigar la amenaza de interrupciones del servicio eléctrico en áreas de carga crítica, mientras mejoran la calidad de la energía y la estabilidad de la red.

A la fecha, los SAEB son ampliamente aceptados en la industria eléctrica y se identifican en función de su capacidad de potencia activa, suficiencia de almacenamiento energético y autonomía. Por ejemplo, un SAEB 1MW/2MWh corresponde a un sistema que tiene capacidad de potencia de 1 MW y suministro de energía de 2 MWh, es decir, 2 horas de autonomía. Al respecto, la tabla 2 contiene un resumen acerca de los servicios que proporcionan los SAEB para los sistemas energéticos.

Servicios despacho horario	Servicios Auxiliares	Servicios Redes T&D	Servicios Gestión Energética para Clientes	Sistemas Aislados
Arbitraje de despacho de energía horaria (*)	Regulación	Diferir inversiones	Calidad de Potencia	Sistemas solares fotovoltaicos aislados (*)
Capacidad para suministro de energía (*)	Sobrefrecuencia, subfrecuencias y servicios suplementarios	Alivios a congestiones en redes	Confiabilidad de Potencia (*)	Redes Inteligentes: servicios estabilidad (*)
	Regulación de tensión	Regulación de tensión	Despacho tiempo real (*)	Redes Inteligentes: intercambios en almacenamiento energético virtual (*)
	Arranque barra muerta		Gestión de cambio de la demanda	
			Incremento en autoconsumo solar fotovoltaica (*)	

(*) Servicios también aplicables a generación con energías renovables

Tabla 2. Gama de servicios que puede proporcionar el almacenamiento de electricidad. Recuperado de: Agencia Internacional de Energía Renovable -IRENA-(2017).

Los primeros SAEB se fundamentaban en tecnología de baterías Plomo-Ácido, pero los SAEB siguen evolucionando y comercialmente están disponibles con costos más competitivos. Por parte de Aziz et al. (2018) se enuncia que la primera implementación exitosa de un SAEB a gran escala con baterías Ión-Litio se evidenció en el proyecto eólico "Hornsedale Power Reserve", con capacidad de 150MW/193MWh, gracias a la colaboración de la empresa Tesla con el Gobierno de Australia. Actualmente, en China se han puesto en operación una gran cantidad de proyectos SAEB y ubican a dicho país como líder mundial de almacenamiento, con aumento anual de capacidad instalada de 5GW, seguido de los Estados Unidos, con 4GW. Actualmente, según reporte en Di-Chiara et al. (2022) y en National Renewable Energy Laboratory -NREL- (2023), algunos países requieren que cada proyecto de energía renovable (solar, eólica) tenga almacenamiento con autonomía de 4 horas.

En Colombia, se destaca la convocatoria STR 01/2021 expedida por la Unidad de Planeación Minero Energética -UPME- (2021) mediante la cual se adjudicó el primer proyecto para el almacenamiento de energía localizado en la ciudad de Barranquilla (S/E El Silencio 34.5kV), con capacidad de 45MW/45MWh, con la finalidad de mitigar aquellos inconvenientes dada la insuficiencia de las redes de transmisión de energía, por ejemplo, contingencias N-1. Por otro lado, se destaca la puesta en operación del proyecto de iniciativa privada para respaldar la

operación de la Central Termozipa, capacidad de 7MW/4MWh. En Chamba et al. (2022) y en Kadam et al. (2022) se explica que la finalidad de habilitar un activo de generación con un SAEB es cumplir las exigencias de despacho con los servicios de: Autorregulación (Respuesta Instantánea: 1ms ~ 1s), Regulación Primaria (Estatismo: 1s ~ 10s y Corrección 3% generación horaria programada), y Regulación Secundaria (AGC: 30s ~ 10min, Confiabilidad derrateada y Corrección frecuencia $\pm 500\text{mHz}$).

Según el informe de estudio de McKenzie (2023), el mercado mundial de SAEB se valoró en USD 44 mil millones en el año 2023. Se estima que tenga un crecimiento acumulado del 27%, hasta alcanzar los USD 150 mil millones en el año 2030, como se puede apreciar en la figura 1. Para el año 2031 se estima una capacidad instalada total mundial de 90GW/261GWh, de los cuales el 90% de dicha capacidad de almacenamiento SAEB se concentrará en solo 10 países (Estados Unidos, China, Alemania, Australia, Reino Unido, India, Japón, Corea del Sur, Italia y España), lo cual se visualiza en la figura 2. Para los países europeos, dicha capacidad de almacenamiento de energía se multiplicará por 20 hasta el año 2030. Adicionalmente, para el caso de EEUU, en el año 2050 existirá capacidad instalada de 59 GW/235 GWh en proyectos SAEB, de los cuales 38GW/153GWh se asociarán a proyectos de generación solar fotovoltaica con almacenamiento de energía.

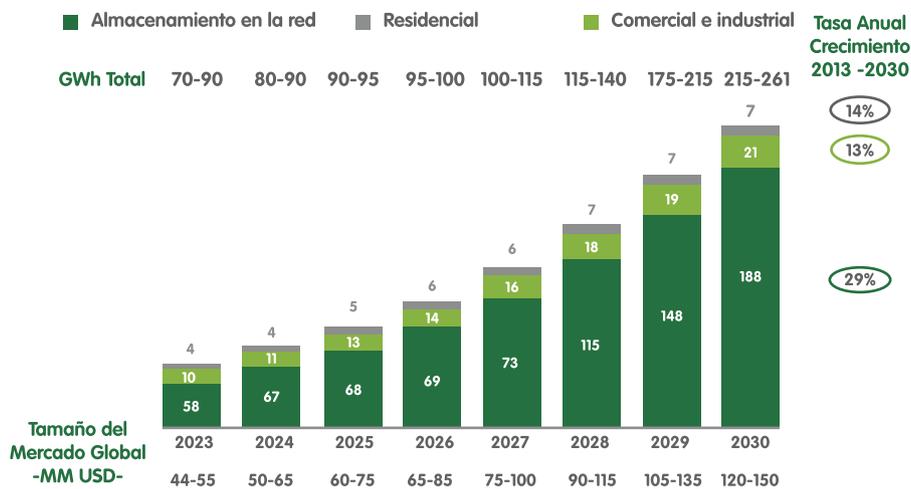


Figura 1. Crecimiento global de inversiones CAPEX en proyectos de almacenamiento energético SAEB (MM USD), según variación anual 2023-2030 por tipo de aplicación. Recuperado de: McKenzie (2023).

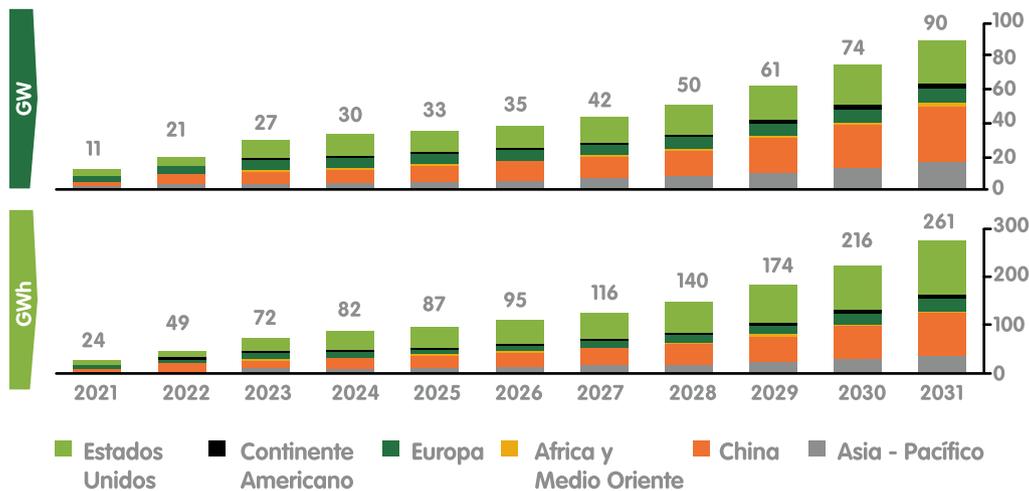


Figura 2. Crecimiento global de la capacidad instalada de sistemas de almacenamiento energético SAEB (GW/GWh), según proyección anual 2021-2031 por regiones. Recuperado de: McKenzie (2023)

Posteriormente, en la tabla 5 se proporciona información sobre los criterios básicos de

dimensionamiento de los SAEB según el tipo de aplicación.

1.3 Fabricantes y proveedores de los SAEB

En la tabla 3 se explican los componentes de un SAEB, que está compuesto principalmente por un conjunto de baterías dispuestas en módulos donde se transforma la energía química en

eléctrica. Adicionalmente, se suele contar con sistemas mecánicos asociados a la ventilación, refrigeración, supresión incendios, control de ruido, protección contra corrosión, racks, etc. para conservar las condiciones óptimas de operación del SAEB.

Acrónimo	Capa del Sistema	Componentes
SM	Módulo de almacenamiento	Clasificación principal/gabinete, sistema de administración de la batería, módulos de baterías
BOS	Balance del sistema	Container, monitoreo & control, refrigeración y gestión térmica, extinción de fuegos
PCS	Sistema de conversión de potencia	Inversor, protecciones (switches, breakers, etc), sistema de gestión de energía (EMS)
EPC	Ingeniería, Adquisición y Construcción	Administración del proyecto, estudios de ingeniería, licencias, preparación del sitio, montaje encargado, comisionamiento
Otros	No incluidos en análisis	SCADA, envíos, equipos de integración a la red, medida, tierra

Tabla 3. Componentes generales del SAEB en proyectos llave en mano. Recuperado de: Honeywell (2023).

Comercialmente, los SAEB suelen configurarse dentro de casetas o gabinetes, rack tipo imperie contenedores (10, 20 ó 40 pies), con múltiples bancadas conectadas en paralelo para obtener la corriente DC. La figura 3 proporciona la disposición física más usual para las soluciones SAEB con conexión a la red. También están disponibles otras disposiciones que no necesariamente requieren

contenedores, por ejemplo, aquellos ofrecidos por el fabricante Contemporary Amperex Technology -CATL - (2023), en gabinetes o racks, con énfasis en aplicaciones de baterías LFP con capacidad de almacenamiento < 1MWh, que están sujetas al cumplimiento de las normativas de desempeño en seguridad, refrigeración, impermeabilización y eficiencia energética.

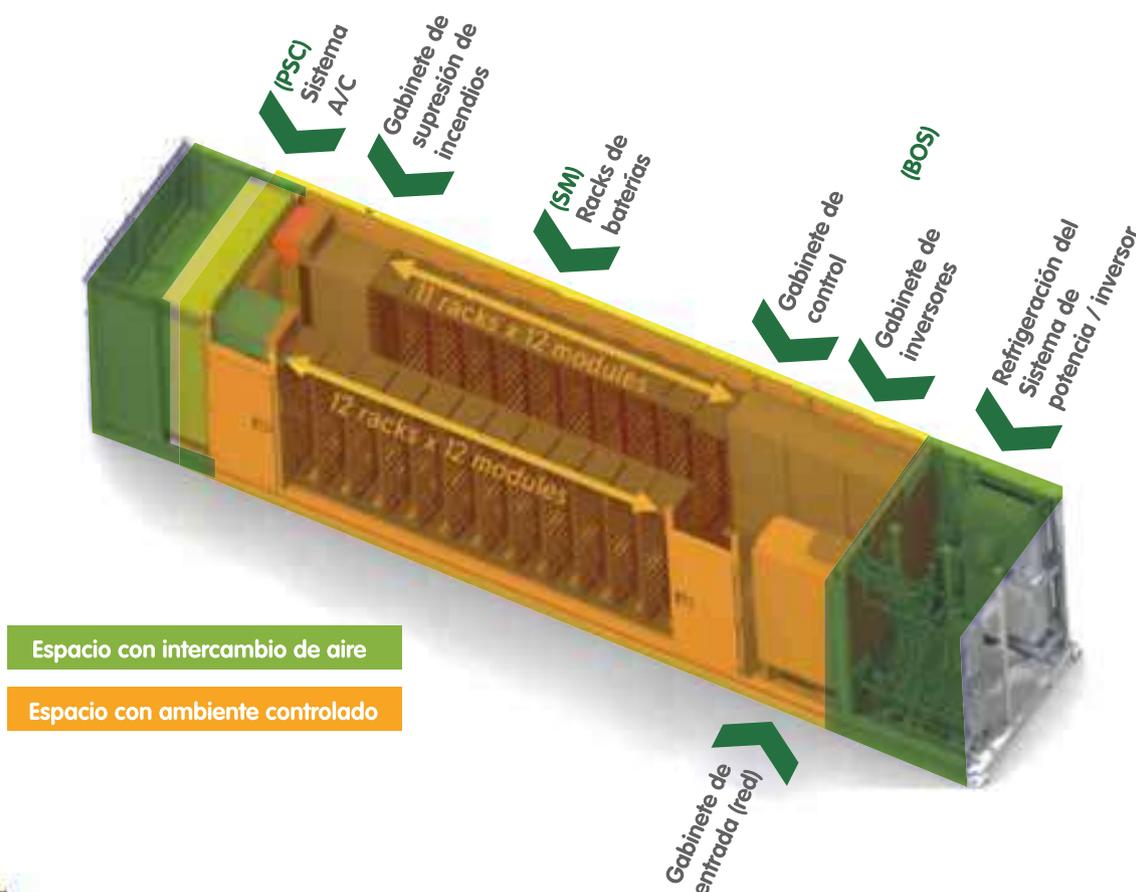


Figura 3. Disposición típica de SAEB contenedor 40 pies, capacidad 3MW / 4MWh. Recuperado de: Rolls-Royce (2022).

A continuación, la tabla 4 contiene una relación de los principales fabricantes de sistemas de almacenamiento energético con baterías SAEB/ BESS a nivel mundial, junto con sus países de origen, aunque hay muchas otras empresas en el

mercado. Esta lista no es exhaustiva y la industria de almacenamiento de energía es dinámica, por lo que nuevos fabricantes pueden surgir y otros pueden cambiar su posición en el mercado con el tiempo y con las evoluciones tecnológicas.

Empresa	País de Origen	Ciudad de la Fábrica/Sede
Tesla	Estados Unidos	Palo Alto, California
Panasonic	Japón	Osaka
LG Chem	Corea del Sur	Seúl
BYD	China	Shenzhen
Samsung SDI	Corea del Sur	Suwon
CATL (Contemporary Amperex)	China	Ningde, Fujian
ABB	Suiza	Zúrich
Saft (una subsidiaria de Total)	Francia	Levallois -Perret
EnerSys	Estados Unidos	Reading, Pennsylvania
NEC Energy Solutions	Estados Unidos	Westborough, Massachusetts
Fluence (una empresa conjunta de Siemens y AES)	Estados Unidos	Arlington, Virginia
Hitachi Energy	Japón	Tokio
Kokam (perteneciente aHanwha Group)	Corea del Sur	Seongnam
GS Yuasa	Japón	Kyoto
Toshiba	Japón	Tokio
Son nen (ahora parte de Shell)	Alemania	Wildpoldsried
SimpliPhi Power	Estados Unidos	Oxnard, California
MEPPI – Mitsubishi	Estados Unidos	Warrendale, Pensilvania
Honeywell	Estados Unidos	Charlotte, Carolina del Norte
Hithium	Suecia	Estocolmo
Sungrow	China	Hefei, Anhui
Jinko	China	Shangrao, Jiangxi
Rolls -Royce	Reino Unido	Londres
Merus	Finlandia	Pirkkalaistie

Tabla 4. Compendio de proveedores, integradores y fabricantes de soluciones SAEB a nivel global. Recuperado de: Bloomberg (2022).

Finalmente, vale la pena notificar que la ejecución de los proyectos SAEB, para cualquier aplicación: almacenamiento en la red, industrial, comercial, residencial, generación, etc., se recomienda realizarlo mediante la modalidad llave en mano o

contrato EPC, en cuyo caso se deben implementar los componentes notificados en la tabla 3.

2. Especificaciones técnicas para el caso de estudio

Al realizar las especificaciones técnicas de un SAEB se analizan las principales variables que se involucran en la viabilidad de un proyecto para considerar sus condiciones y su rentabilidad, bajo la premisa que el sistema funcione de manera eficiente y cumpla con los objetivos deseados, al tiempo que se garantizan los retornos de inversión y el buen desempeño técnico.

También, es necesario realizar unas definiciones y recopilación de datos en cuanto a la red eléctrica en que se proyecta instalar el SAEB, pues de esto dependen algunos requerimientos como: Definición de Objetivos, Estudio de Carga, Autonomía y Potencia Nominal, Selección de la Tecnología de Batería, Tamaño de la Batería, Sistema de Gestión de Energía -EMS-, Integración con la Red, Normativas de Seguridad, Mantenimiento, Evaluación Económica, Autonomía, Tipo de Refrigeración, Restricciones ambientales, prediales y de gobierno, así como la disposición final al término de la vida útil.

2.1 Criterios de dimensionamiento para un caso de estudio de un SAEB

La optimización del tamaño de un SAEB es un desafío, en cuyo caso se requiere seleccionar tanto la potencia –kW- como la energía –kWh- que depende de la autonomía y los ciclos de trabajo diarios del mencionado sistema. En el marco de la gama de servicios que abarcan los SAEB, se proporciona la información de la tabla 2, pero en la presente contribución técnica se enfatiza en los casos de negocio asociados a las subestaciones de generación y T&D, cuya información se explica en la tabla 5, que contiene un resumen de criterios generales a tener en cuenta para seleccionar los parámetros de dimensionamiento de un sistema SAEB.

Subestaciones Generación	Subestaciones T&D
Máxima relación entre capacidad de generación y capacidad del SAEB = 3:1 Por ejemplo, en un parque solar FV de 30MW, el SAEB se dimensiona en máximo 10MW	Capacidad para atender la demanda que se conecta a la subestación, usualmente asociada a la cargabilidad y factor de potencia del transformador de potencia. Por ejemplo, se dimensiona el SAEB de máximo 4,5MW en una subestación con transformador de 6MVA con cargabilidad de 83,3% y FP de 0.9
Recomendación de hasta 4 horas de autonomía	Recomendación de 1, 2, 3 ó 4 horas de autonomía, según registro histórico de confiabilidad y demanda no atendida conectada a subestación radial.
Estrategia de compensación para el desempeño de baterías de tecnología LFP: <i>Escenario Avanzado</i> = Sobredimensionamiento de capacidad en MW en la inversión CAPEX durante el primer año. <i>Escenario Conservador / Moderado</i> = Compensación mediante incorporación de nuevas baterías a lo largo del ciclo de vida (Típicamente, cada 10 años) para compensar degradación del almacenamiento que puede caer a un 70% de su capacidad nominal original	

Tabla 5. Criterios generales para el dimensionamiento de aplicaciones SAEB. Recuperado de: World Bank (2020).

De la tabla 2 y de la tabla 5 también se pueden determinar otros casos de negocio documentados, que permiten dar rentabilidad a los servicios que

se ofrecen a través de los SAEB, entre los que se incluyen: regulación secundaria AGC, regulación primaria, arbitraje tarifario, etc.

2.2 Condiciones técnicas para la implementación de un caso de estudio SAEB

Para abordar un caso de estudio se tiene en cuenta el diligenciamiento de especificaciones técnicas para proyectos SAEB de la tabla 6, en cuyo caso están descritas en los términos de contratación para las unidades constructivas especiales del

sistema eléctrico colombiano. También se tienen en cuenta las especificaciones técnicas un SAEB genérico de 3MW/14MWh, correspondiente a catálogos comerciales disponibles por fabricantes reconocidos en la industria.

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Descripción General del SAEB			
Capacidad Almacenamiento Nominal	3	MW DC	Requerimiento de Proyecto SAEB (Nominal)
Tecnología Almacenamiento	LFP	Li-Fe-P	Requerimiento de Proyecto SAEB
Tiempo de carga	4	Horas -Día	Se deben validar las condiciones de diseño y fichas técnicas
Horas Autonomía	4,21	Horas -Día	Capacidad Energética / Capacidad Almacenamiento + Remanente Profundidad Descarga
Operación	1	Operación /día	Cantidad de operaciones de carga/descarga en un día del SAEB
Ciclos de Carga - Descarga	7500	Ciclos	Depende del tipo de tecnología
Capacidad Energética Nominal	12,63	MWh	Requerimiento de proyecto SAEB nominal en el punto de conexión
Vida Útil	20,6	años	Depende del tipo de tecnología y de los procedimientos de operación
Eficiencias del Sistema de Almacenamiento SAEB:			
Profundidad de Descarga	95,0%	%	Según el tipo de tecnología
Eficiencia de Uso del Sistema	94,0%	%	Incluye consumo energético para refrigeración, control e instrumentación
Tasa anual degradación baterías	98,5%	%	Según tipo de tecnología e información de los fabricantes de baterías
Tasa retención energética	100,0%	%	Según tipo de tecnología e información de los fabricantes de baterías
Eficiencia cableado Batería - Inversor PCS	99,8%	%	Según información fabricante de cables
Eficiencia cableado Inversor PCS Transformador	99,8%	%	Según información fabricante de cables
Eficiencia de descarga inversor PCS	98,0%	%	Según información fabricante de inversores

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Eficiencia conversión transformador	99,0%	%	Según información fabricante de transformador
Eficiencia cableado media tensión	99,8%	%	Según información fabricante de cables
Mínima capacidad de banco de baterías	14,9	MWhv	Sobredimensionamiento de 17,9% en la capacidad de almacenamiento del SAEB
<i>Características del Container y de los Racks del SAEB</i>			
Densidad Energética	190	Mh/Kg	Información del fabricante de vasos (Celdas) de baterías
Capacidad de Vasos Baterías	200	Ah	Información del fabricante de vasos (Celdas) de baterías
Voltaje Nominal	1152	VDC	Información del fabricante de racks y vasos (Celdas) de baterías
Capacidad de Rack en Container	230,4	kWh	Información del fabricante de racks y vasos (Celdas) de baterías
Capacidad de Racks requeridos	65		Cantidad de racks dentro de contenedores del SAEB
#Racks en Contenedor de 20 pies	16		Máxima cantidad de racks dentro de un contenedor de 20 pies según fabricante
#Contenedor de 20 pies	4		Máxima cantidad de contenedores de 20 pies para el SAEB
Relación Acumulador/Inversor	1 : 1		Un inversor por cada 1 contenedores de 20 pies
Cantidad Total Inversores	1		Un PCS por cada 3 MW de potencia
<i>Generalidades del sistema de corriente directa del conjunto SAEB</i>			
Rango Voltaje Nominal	794 ~ 1020	VDC	Rango de Voltaje a Potencia Nominal (U DC) a 50°C
Rango Operativo	795 ~ 1500	VDC	Rango de Voltaje Operativo (U DC)
Máximo Voltaje	1500	VDC	Máximo Voltaje (U máx - DC)
Máxima Corriente	2400	ADC	Máxima Corriente (I máx - DC) a 35°C
Potencia de Salida	1,7	MVA	Máxima Potencia Aparente por Contenedor a 50°C según información de fabricante
Potencia Nominal	1,86	MVA	Potencia Nominal por contenedor a 35°C según información de fabricante
<i>Condiciones del Sitio para el punto de conexión</i>			
Área Terreno	298	m ²	Superficie de predio con distancias de seguridad para 4 contenedores de 20 pies c/u + inversores
Voltaje Conexión	13,2	kV	13,2kV Hasta 7,5MW; 44kV hasta 20MW; 110kV otras potencias

Tabla 6. Definición de Especificaciones Técnicas para descripción de un sistema SAEB 3MW/14MWh.

Se sugieren adoptar escenarios de compensación para el desempeño de baterías de tecnología LFP, como se explica en la tabla 7, dado que al final de la vida útil del SAEB, según el fabricante Honeywell

(2023), éste degradará su almacenamiento a un 70% de su capacidad nominal original. Esta condición de degradación también se especifica en World Bank (2020) y en Larsson y Börjesson (2018).

2.3 Costos unitarios CAPEX para el caso de estudio

En Lazard (2021) se define el costo unitario de inversión CAPEX en términos de USD/MW y de USD/MWh como una métrica importante y útil para comparar la competitividad económica de diferentes fuentes de energía y proyectos de generación eléctrica, que se centra únicamente en el gasto de capital inicial por unidad de capacidad o energía y no tiene en cuenta los costos operativos continuos ni la vida útil del proyecto. No confundir con el Costo Nivelado de la Electricidad, o LCOE,

Levelized Cost of Electricity, por sus siglas en inglés, que es una métrica integral que considera tanto los costos iniciales como los costos operativos en curso a lo largo de la vida útil de un proyecto.

En la figura 4 se observa que para un proyecto de 1MW/4MWh se requieren costos unitarios de inversión CAPEX de 386 dólares por kWh y para un proyecto de 1MW/1MWh el costo es de 556 dólares por kWh en el año 2022; por tanto, el costo unitario por kWh disminuye en la medida que aumenta la autonomía del SAEB, para la misma capacidad de potencia instalada.

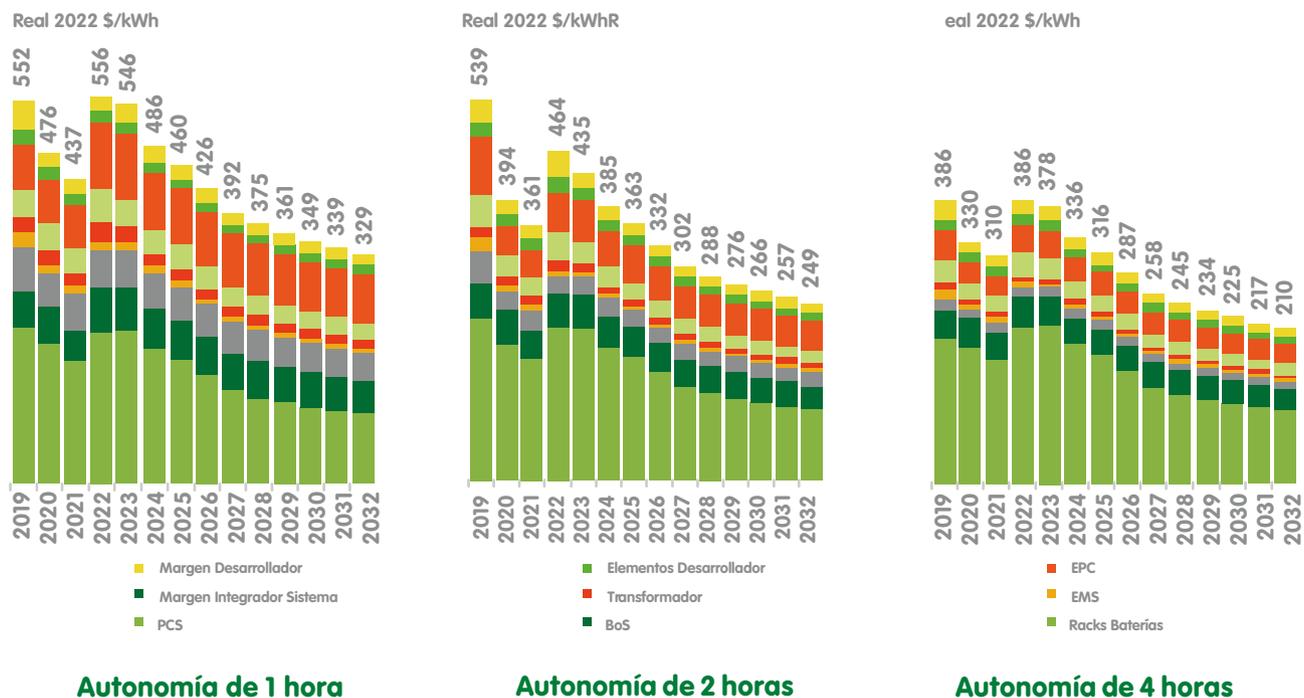


Figura 4. Desglose de componentes en el costo unitario USD/kWh para un proyecto SAEB. Autonomía de 4 horas vs Autonomía de 2 horas vs Autonomía de 1 hora. Recuperado de: Bloomberg (2022).

3. Viabilidad del caso de estudio

Desde Vigilancia Tecnológica de EPM se realizan estudios de mercado que tienen en cuenta los desarrollos tecnológicos de diferentes proveedores e instituciones gubernamentales como el NREL (2023), así como los reportes anuales de instituciones especializadas en el área, específicamente los estudios de mercado

y de costos (CAPEX y OPEX en sistemas SAEB) publicados por Bloomberg (2022) y McKenzie (2023). En la figura 5 se aprecia el modelo de estimación de costos de proyectos SAEB, en función de su capacidad energética (en MWh), tanto para las inversiones CAPEX como para los costos operación y mantenimiento OPEX.

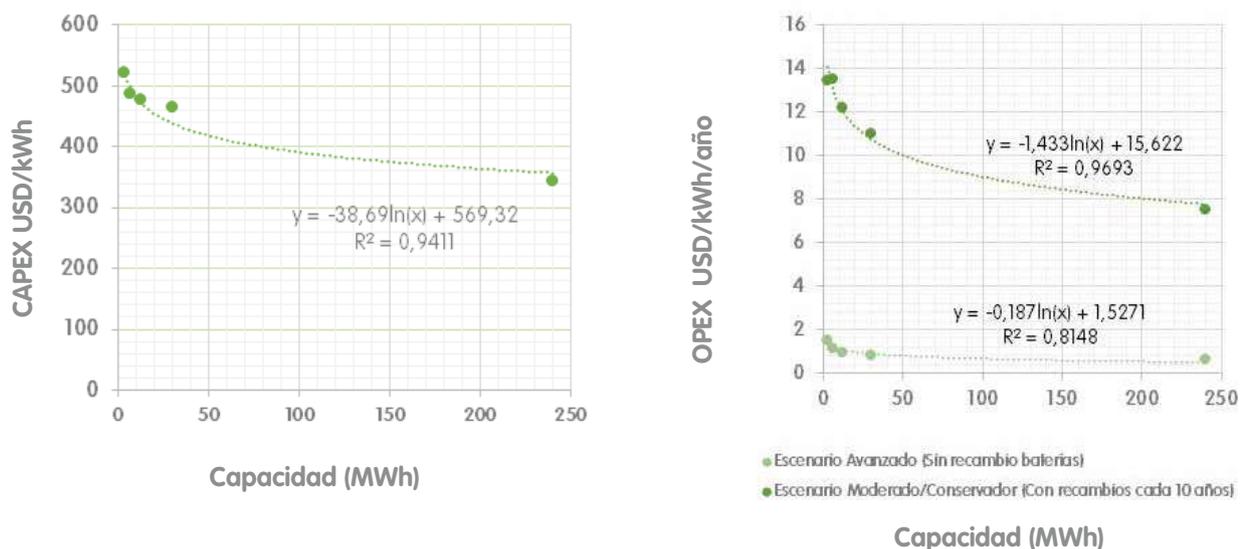


Figura 5. Modelo de costos unitarios CAPEX y OPEX para proyectos SAEB.

En la tabla 7 se considera la determinación de ingresos mínimos anuales que requiere un proyecto típico en los 3 diferentes escenarios,

con un dimensionamiento de 3MW / 14MWh, en tecnología LFP y capacidad de descarga del 90%.

Parámetro	Escenario Avanzado	Escenario Moderado	Escenario Conservador	Unidades
CAPEX Suministros	\$371.865	\$450.188	\$534.185	\$ / MWh
CAPEX EPC	\$92.966	\$112.547	\$133.546	\$ / MWh
CAPEX Total	\$6.575.315	\$7.960.212	\$9.445.439	
O&M Anual	\$1.022	\$12.772	\$12.772	\$ / MWh / año
OPEX Total	\$14.459	\$180.671	\$180.671	\$ / año
Ingresos anuales requeridos	\$847.937	\$1.198.284	\$1.386.377	\$/año/MWh
Tasa Interés	14,0%	14,0%	14,0%	
VPN	\$0	\$0	\$0	
TIR	14,0%	14,0%	14,0%	
Explicación	Innovaciones tecnológicas disponibles y maduras para el mercado. Se propone sobredimensionamiento en las condiciones iniciales de capacidad energética.	Innovaciones generalizadas, con cierto nivel de madurez. Aumento de capacidad de baterías cada 10 años, para compensar su degradación	Mercados tecnológicos consolidados. Aumento de capacidad de baterías cada 10 años para compensar su degradación. Se asume todo el CAPEX de acondicionamiento de la Subestación y Línea de Transmisión	

Tabla 7. Escenarios de rentabilidad para caso de estudio SAEB 3MW/14MWh con modelo de costos de Figura 5.

Para determinar los ingresos mínimos anuales requeridos por el proyecto típico, se recurre al cálculo de optimización con la función Solver de Excel. En cualquier caso, se efectúa una proyección de los ingresos mínimos anuales (en

dólares) para garantizar un valor presente neto (VPN) mayor a cero y una tasa interna de retorno (TIR) mayor a la tasa de interés definida en el entorno macroeconómico (vida útil de 20 años e IPP del 3% anual).



Figura 6. Escenarios de inversión para caso de estudio SAEB 3MW/14MWh en USD.

Obsérvese de la figura 6 la conveniencia de ajustar al “escenario avanzado”, es decir, se centra específicamente en las inversiones sobre la tecnología de almacenamiento y considera la

armonización con otros proyectos de generación o T&D para que estos asuman costos CAPEX y OPEX de los puntos de conexión en las subestaciones.

Conclusiones y recomendaciones

La implementación de las tecnologías de almacenamiento favorece la calidad en la prestación del servicio de energía, teniendo en cuenta la irrupción de generación con energías renovables, así como la confiabilidad del servicio desde las infraestructuras T&D. Adicionalmente, los SAEB también constituyen una oportunidad para contribuir al marco regulatorio, toda vez que se incorporan activos al sistema energético que aportan a su estabilidad, desempeño y calidad del servicio.

Para realizar sensibilización con entidades de planeación y regulación del mercado energético colombiano, con el fin de compatibilizar el funcionamiento de los SAEB con el marco regulatorio, se propone el acompañamiento con el ente regulador tan pronto se pongan en funcionamiento los primeros proyectos, sin necesidad de que esté todo el marco regulatorio establecido. Adicionalmente, se deberán aprovechar las lecciones aprendidas en lo referente a las condiciones técnicas en los puntos

de conexión y el cubrimiento de las pérdidas técnicas de energía a los circuitos que se atienden con los SAEB.

A pesar de ser una tecnología relativamente nueva, se destaca la amplia aceptación y crecimiento exponencial de los sistemas SAEB en todos los países. EPM deberá irse preparando técnicamente para la llegada de esta tecnología y continuar con la realización de monitoreo de la tecnología y la viabilidad de proyectos hasta que logren un VPN positivo.

Para futuros estudios, se recomienda investigar y normalizar los criterios de dimensionamiento de los sistemas SAEB, en términos de capacidad instalada, autonomía y vida útil. Asimismo, se sugiere la investigación de nuevos desarrollos, por ejemplo, los sistemas de almacenamiento móvil (MESS), los sistemas de respaldo para distribución, la integración de estos sistemas en comunidades energéticas, entre otros.

Notas al final

¹ Como se menciona en Polaris (2023) gracias a beneficios fiscales contenidos en la Ley de Reducción de la Inflación de agosto de 2022.

Referencias

- Aziz, A., Oo, A. y Stojcevski, A. (2018). Issues and mitigations of wind energy penetrated network: Australian network case study. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(6), 1141–1157. <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0430-4>
- Bañeres-Sorinas, M. (2019). *Estudio de alternativas en el reciclaje de baterías de plomo fuera de uso*. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://rb.gy/vzpj84>
- Bloomberg. (2022). *Bloomberg NEF Energy Storage System Cost Survey*. <https://rb.gy/9afh9h>
- Contemporary Amperex Technology. (2023). *Portafolio Comercial CATL*. <https://rb.gy/9hx4ev>
- Chamba, S., Vargas, W., Echeverría, D. y Riofrio, J. (2022). Regulación Primaria de Frecuencia Mediante Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano. *Revista Técnica "energía"*, 19(1), 13–21. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.506>
- Di-Chiara, L., López, D., Hallack, M., Weiss, M., Carvajal, F. y Chueca, E. (2022). *Potencial del uso de baterías para arbitraje intertemporal de precios en América Latina (BID)*. BID. <https://rb.gy/70b4tc>
- Energy Information Administration. (2023). *Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends*. <https://rb.gy/vecimq>
- Endemaño, L. (2016). *Análisis Global de los Sistemas de Almacenamiento de Energía Eléctrica*. [Tesis de maestría, Universidad de Sevilla]. <https://rb.gy/6r7sol>
- Feldman, D., Ramasamy, V. y Margolis, R. (2021). *U.S. Solar Photovoltaic BESS System Cost Benchmark Q1 2020 Report*. <https://doi.org/10.7799/1762492>
- Honeywell. (2023). *Honeywell's Battery Energy Storage System. Honeywell's experience cost-effective operations*. <https://rb.gy/kdza7r>
- International Renewable Energy Agency. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. <https://rb.gy/d0kbhc>
- Janek, J. y Zeier, W. (2023). Challenges in speeding up solid-state battery development. *Nature Energy*, 8(3), 230–240. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01208-9>
- Kadam, S., Hofbauer, W., Neuhauser, M., Lais, S., Wurm, E. y Drommi, J. (2022). XFLEX HYDRO—hydropower extending power system flexibility. *E+I Elektrotechnik und Informationstechnik*, 139, 723–724. <https://doi.org/10.1007/s00502-022-01077-2>
- Larsson, P. y Börjesson, P. (2018). *Cost models for battery energy storage systems*. KTH School of Industrial Engineering and Management. <https://rb.gy/uwdqdi>
- Lazard. (2021). *Lazard's latest annual Levelized Cost of Energy Analysis*, v7. <https://rb.gy/qm1axr>
- McKenzie. (2023). *Global energy storage market outlook update (Q2-2023)*. <https://rb.gy/43ixaz>

- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Annual Technology Baseline: Commercial Battery Storage*. <https://rb.gy/p5k1st>
- Ortega A, Ángel, S., Jaramillo V, Giraldo J., Medina, M., Duque, L., Valencia, V., Gutiérrez, A., Correa, C., Arias, J., Arango, S., Olaya, Y., León, R., Parra, J. y González, A. (2023). *Escenarios Energéticos: Seis Futuros para la Transformación en Colombia*. EIA. <https://rb.gy/50l8lb>
- Polaris. (2023). *Battery Energy Storage System Market Size Global Report, 2022 - 2030*. <https://rb.gy/0lxuis>
- Rolls-Royce. (2022). *Roll-Royce's EnergyPack Battery Energy Storage System (BESS)*. [Catálogo de Productos "Power Generation Solutions"]. <https://rb.gy/vtvetq>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2021). *Convocatoria Pública UPME STR 01-2021 Almacenamiento de Energía con Baterías - Atlántico*. <https://rb.gy/rk0ivi>
- World Bank. (2020). Economic Analysis of Battery Energy Storage Systems. En *Economic Analysis of Battery Energy Storage Systems (Energy Stu)*. <https://doi.org/10.1596/33971>

Cómo citar este artículo:

Correa, G. y Pachón, K. (2024). Implementación de un caso de estudio de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías (SAEB) para subestaciones de generación y de distribución. *Revista EPM*, (23), 50-67.



La importancia de las certificaciones y las acreditaciones como soporte de la competencia y la calidad

The importance of certifications and accreditations in support of competence and the quality

Heider Jader

Isaza Ochoa

Unidad CET normalización
y laboratorios, EPM

heider.isaza@epm.com.co

Resumen

Este artículo aborda conceptos para entender las certificaciones y las acreditaciones como una muestra de la competitividad y la calidad. Para ello se abordarán conceptos que darán más claridad sobre los sistemas de gestión,

las certificaciones y las acreditaciones. Además, se analizan datos que ayudarán a comprender desde la óptica cuantitativa la importancia de los sistemas de gestión.

Palabras clave:

Certificación, Acreditación, Estandarización, Sistemas de gestión, Sistemas de gestión de la calidad

Keywords:

Certification, Accreditation, Standardization management systems, Quality management systems

Introducción

Todas las organizaciones utilizan un sistema de gestión, algunas utilizan uno propio y otras posiblemente no tengan conciencia de que lo utilizan. Se puede encontrar algunas que tengan uno implementado y documentado, pero puesto sobre alguna estantería que suelen desempolvar cada cierto tiempo: para que en las auditorias no les encuentren hallazgos, para presentarse a un concurso, licitación o por exigencia del medio o algunos grandes clientes; pero también es posible encontrar empresas que disponen de un sistema estructurado que se rige por una serie de políticas, objetivos y estrategias establecidas, así también como una adecuada gestión por procesos, buscando que el sistema de gestión trabaje para la organización y a su vez los lleve a la consecución de metas y no por el contrario, sistemas de gestión que son una completa carga para la organización.

Encontrar compañías que sigan un proceso riguroso para establecer y ejecutar su sistema

de gestión no es tarea sencilla. Especialmente aquellas que hayan arraigado una cultura empresarial que integre plenamente dicho sistema, lo cual respalden con certificaciones o utilicen como piedra angular para obtener acreditaciones. Además, que este sistema forme parte inherente de su modo de trabajar diario agrega otro nivel de complejidad a la búsqueda (Ogalla, 2005) quizás porque existe esa costumbre de pensar que la certificación y la acreditación son papeles, una especie de diploma que se padece y que se muestra con orgullo, aunque sea más lo que se trabaja para sostenerlo que lo que se disfruta de las ventajas que ofrece poseerlo.

También, hay ejemplos de organizaciones que han decidido trabajar bajo un método normalizado con reconocimiento internacional y al que le atribuyen crecimientos en términos de calidad, aprendizaje y hasta económicos.

1. Definiciones

Para entender un poco más los temas relevantes de este artículo, es necesario conocer algunas definiciones, las cuales podrán estar acompañadas de una ampliación del concepto.

1.1 Sistema de gestión

Según la definición propuesta por la European Foundation for Quality Management (EFQM) como se citó en (Llarena et al., 2014), un Sistema de Gestión es un "esquema general de procesos y procedimientos que se emplea para certificar que la organización realiza todas las tareas necesarias para garantizar sus objetivos" (p. 6). Un Sistema de Gestión como tal es una forma de organizarse, dividiendo la empresa en áreas o procesos que permiten una gestión eficiente. Este sistema no solo abarca cómo se realizan las tareas o cómo se procede en diversas situaciones, sino que también respalda el cumplimiento de unas metas propuestas. Es importante destacar que en esta definición no se menciona por ahora la

normalización, ni se especifica que el sistema de gestión deba estar documentado o certificado o acreditado; es una definición amplia que subraya que todas las organizaciones poseen un sistema de gestión.

1.2 Sistema de gestión de la calidad (SGC)

Existe un modelo para implementar un Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) establecido por la norma internacional ISO 9001. Esta norma, enfocada en la administración, es fundamental para que una empresa pueda contar con un sistema efectivo que le permita administrar y mejorar la calidad de sus productos o servicios:

La comprensión y gestión de los procesos interrelacionados como un sistema contribuye a la eficacia y eficiencia de la organización en el logro de sus resultados previstos. Este enfoque permite a la organización controlar las interrelaciones e interdependencias entre los

procesos del sistema, de modo que se pueda mejorar el desempeño global de la organización. (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2015, párr. 27)

Además, suele ser la norma de referencia para otras normativas que incluyen componentes adicionales, pero que en términos de gestión se basan en la ISO 9001. Un ejemplo de ello es la norma ISO 17025, que establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, y establece que:

Este documento contiene requisitos que permiten a los laboratorios demostrar que operan de forma competente y que tienen la capacidad de generar resultados válidos. Los laboratorios que cumplen con este documento también operarán en general de acuerdo con los principios de la Norma ISO 9001. (ISO, 2017, párr.14)

La gestión en la calidad puede ser considerada como una herramienta capaz de proveer una conceptualización, un modo de hacer y un lenguaje común en las organizaciones que tienen su enfoque en los procesos, es decir los sistemas de calidad proveen las herramientas de estandarización adecuadas para que las empresas entreguen productos o servicios cada vez con mayores estándares internacionales. Así que dicho sistema de gestión de calidad se utiliza para implementar procesos dentro de una organización, que facilitan mejorarlos, reduce desperdicios, bajan costos, facilitan oportunidades de capacitación y genera compromiso entre el personal. Estos factores son fundamentales en una organización con visión de calidad y mejora continua. (Hernández y Ricardo, 2018).

Las normas ISO 9000 fueron inicialmente establecidas en 1987, con una revisión en 1994. En el año 2000, se llevó a cabo una nueva revisión con el objetivo de enfatizar la orientación hacia la gestión de la calidad total y la excelencia normativa (Hurtado et al., 2009, p. 20). Finalmente, en 2015, la norma adquirió una orientación hacia la gestión por procesos y es el esquema que se maneja hasta ahora.

1.3 Acreditación

La norma ISO/IEC:2017 Evaluación de la conformidad — Requisitos para los organismos de acreditación que realizan la acreditación de organismos de evaluación de la conformidad, define la acreditación como “atestación de tercera parte relativa a un organismo de evaluación de la conformidad que manifiesta la demostración formal de su competencia para llevar a cabo tareas específicas de evaluación de la conformidad” (ISO, 2017, párr. 25). La definición de organismo de evaluación de la conformidad, la misma norma, se define como organismo que realiza actividades de evaluación de la conformidad y que puede acreditarse.

Es decir, que la acreditación es una actividad voluntaria en la que un organismo que evalúa la conformidad o cumplimiento de requisitos manifiesta esa demostración formal de la competencia, y esta a su vez es evaluada por un organismo de tercera parte y que tiene autoridad para tal fin. Para un mejor entendimiento podríamos decir que se acreditan los laboratorios, porque ellos a través de procesos y procedimientos establecidos, evalúan la conformidad.

En Colombia, la Presidencia de la República, a través del Decreto 865 de 2013 establece que:

Se designa al Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), como único organismo nacional de acreditación que de manera exclusiva ejercerá y coordinará las funciones previstas en el Decreto número 2269 de 1993 y en el Decreto número 4738 de 2008.

Los organismos de evaluación de la conformidad que hubieren sido acreditados en el marco del Subsistema Nacional de la Calidad por entidades diferentes al ONAC y que deseen seguir prestando los servicios de evaluación de la conformidad, deberán adelantar la correspondiente acreditación con el ONAC y deberán ingresar al programa de seguimiento y vigilancia establecido por esa entidad. (Artículo. 1)

A pesar de estar reglamentado desde la misma Presidencia de la República, en Colombia existe otro organismo que también otorga acreditación, tal es el caso del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, s.f.), el cual establece que:

Si usted es un laboratorio o empresa de consultoría ambiental del país, que realiza muestreo, toma de muestra y/o análisis fisicoquímicos o microbiológicos de calidad ambiental sobre los diferentes recursos naturales de la nación (agua, aire, suelo, biota, residuos peligrosos) y desea obtener la acreditación, para hacerlo debe realizar la solicitud en el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM. (párr. 1)

En dicha publicación no menciona las acreditaciones del ONAC, esto es un tema en constante discusión, pero actualmente hay laboratorios con acreditación ONAC y acreditación IDEAM, como es el caso del laboratorio de EPM.

1.4 Certificación

La Real Academia Española (RAE, s.f.), define la certificación como “documento en que se asegura la verdad de un hecho” (definición 2). Otros autores definen la certificación como:

Una actividad que consiste en atestiguar que un producto o servicio se ajusta a determinadas especificaciones técnicas o requisitos establecidos en una norma u otro documento normativo, con la expedición de un acta en la que se pone de manifiesto dicha conformidad. (Equipo Vértice, 2010, p.14)

Es decir, que la certificación está acompañada de una testificación y una declaración por parte de un tercero, en este sentido la certificación se otorga bajo una norma a una empresa que cumple unos procesos y procedimientos y, que solicita esta certificación a un tercero.

A su vez ISO (2012) en la norma ISO 17065, complementa los términos y definiciones relativos a la certificación a través de otras normas o documentos:

Organismo de certificación: Organismo de evaluación de la conformidad de tercera parte que opera esquemas de certificación”. Es decir, aquel organismo que evalúa y otorga una certificación.

Esquema de certificación: Sistema de certificación aplicado a productos determinados, a los que se aplican los mismos requisitos especificados, reglas y procedimientos específicos.

Requisito de certificación: Requisito especificado, incluyendo los requisitos de producto, que cumple el cliente como condición para la obtención o mantenimiento de la certificación.

Alcance de la certificación: Identificación de: Los productos, procesos o servicios para los cuales se otorga la certificación

- El esquema de certificación aplicable
- Las normas y otros documentos normativos, incluida su fecha de publicación, con respecto a los cuales se considera que el producto, proceso o servicio es conforme

Sistema de certificación: Reglas, procedimientos y gestión para realizar la certificación aplicada a productos determinados. Se asignan los mismos requisitos especificados, reglas y procedimientos específicos. (ISO/IEC, 2013)

1.5 Normalización

Según la definición planteada por el Equipo Vértice (2010):

La normalización es una actividad que consiste en elaborar, difundir y aplicar normas. Por tanto, ofrece soluciones a situaciones repetitivas, sobre todo en el ámbito de las ciencias, la técnica y la economía, con el objeto de unificar criterios y utilizar un lenguaje común en cada ámbito concreto.

- El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Normalización (ICONTEC)
- La International Organization for Standardization (ISO)
- El Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A. C (IMNC)

- El Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM)
- El Instituto Nacional de Normalización de Chile (INN)
- El Instituto Nacional de Calidad del Gobierno de Perú (INACAL)
- La Asociación Española de Normalización (UNE)
- El Instituto Alemán de Normalización, o Deutsches Institut für Normung (DIN)
- La International Electrotechnical Commission (IEC)
- El American National Standards Institute (ANSI)
- El Comité Europeo de Normalisation (CEN)

Para la elaboración de normas, existen unas categorías que dependerán de su ámbito de aplicación:

Normas internacionales:

Estas tienen una aplicación mundial y con ellas se busca que quienes las adopten cumplan un estándar internacional. Se destacan en este sentido las siguientes:

- Las normas ISO, publicadas por la International Organization for Standardization
- Las normas IEC, elaboradas por la Comisión de Electrotecnia Internacional
- Las normas UIT desarrolladas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones

Normas regionales:

Son elaboradas por un organismo regional, pero pueden ser de un impacto tan grande que en otros países o regiones también sean adoptadas. En

esta se agrupan algunos organismos nacionales de normalización tales como:

- Las normas CEN, publicadas por el Comité Europeo de Normalización
- Las normas CENELEC, desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica
- Las normas ETSI, Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.

Normas Nacionales:

Son elaboradas, desarrolladas o adoptadas por organismos nacionales de normalización, en Colombia existen las NTC, las cuales las entrega el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación -ICONTEC, En este enlace se puede conocer los organismos de certificación nacionales miembros de ISO <https://www.iso.org/members.html>

Se puede encontrar por ejemplo normas con la siguiente descripción NTC-ISO/IEC, esto quiere decir que es una norma NTC, por lo cual fue publicada por ICONTEC y tiene carácter nacional; a su vez es una norma ISO, que quiere decir, que es de carácter internacional y que fue publicada, adoptada y/o traducida por la International Organization for Standardization, y por último es una norma IEC, que significa que esta norma es una creación de La International Electrotechnical Commission.

Las Normas Técnicas Colombianas gozan de buena reputación en la región y es común verlas en países vecinos que deciden esa adopción.

2. ISO y su función internacional

Dados los conceptos anteriores se puede indicar que cuando una empresa u organismo decide adoptar una norma y luego pasar por un proceso de certificación o si sus tareas son de evaluación de la conformidad (laboratorio) y optan por una acreditación, está mostrando estándares internacionales de competencia comparables con otras empresas u organismos que tengan esta misma certificación o acreditación.

La ISO es una organización internacional no gubernamental e independiente, compuesta por 167 organismos nacionales de normalización. A través de sus miembros, convoca a expertos para intercambiar conocimientos, establecer estándares y elaborar Normas Internacionales voluntarias. Estas normativas, basadas en el consenso y pertinentes para el mercado, fomentan la innovación y ofrecen soluciones a los desafíos globales (ISO, 2022).

3. Beneficios de la acreditación y la certificación

3.1 Sinónimo de calidad

Estudios referentes al tema señalan que las empresas que se certifican bajo un esquema ISO 9001, suelen señalar a sus clientes que trabajan con calidad. Estas empresas utilizan el certificado ISO 9001 de manera similar a como se exhibe un diploma universitario, demostrando que son profesionales en un área y por lo tanto son competentes para un fin. Por otro lado, los clientes que no tienen tiempo, conocimiento o recursos para evaluar la competencia de una empresa para un fin, prefieren exigir la certificación ISO 9001, dado que con esto se pueden evaluar atributos difíciles de observar. Pero, aun así, para las empresas que no sienten la presión de sus clientes por adoptar un sistema de gestión certificado, si tienen claro que las ventajas competitivas frente a quienes no se certifican, además que ayuda a conseguir mejores resultados frente a la satisfacción del cliente (Terlaak y King, 2006).

3.2 Conquista de nuevos mercados

Las compañías europeas han incentivado que aquellas que deseen ingresar a su mercado obtengan la certificación ISO 9001. Es por ello, que incluso grandes corporaciones multinacionales estadounidenses, al buscar oportunidades en Europa, reconocieron que la certificación ISO 9000 no solo mejoraba sus estándares de calidad, sino que también constituía un requisito competitivo para acceder al mercado europeo. Esto se debe principalmente a que el estándar ISO 9001 proporciona un lenguaje común que facilita la comunicación entre empresas a nivel internacional. (Dereli, et. al. 2011).

3.3 Mejora en los ingresos y la productividad

Un estudio llamado Beneficios e impactos de la implementación de normas técnicas en las organizaciones, donde se hizo una revisión sistemática de otros estudios, pudo concluir que:

Independientemente del sector económico donde se realizaron los estudios y de la metodología utilizada, los beneficios de implementar una norma técnica ISO para sistemas de gestión, en la gran

mayoría de las veces, mejoran los resultados sobre el mercado (ventas, ingresos, satisfacción de clientes) y sobre la productividad (operacionales: desperdicios, mejora de los tiempos). (Romero y Rojas, 2016).

Esto no debería ser algo novedoso, pues refleja el propósito de la norma, ya que en sus principios establece mejorar la gestión de la calidad para satisfacer las necesidades de los clientes y mejorar la eficacia. Que se logren estos beneficios es parte de lo que se espera de los objetivos explícitos de la norma.

3.4 Reducción de costos o bajo impacto económico en el tiempo

Hay quienes exponen que estos sistemas permitieron en algunos casos reducir costos administrativos e incluso operativos, generando así ahorros. Otros más estiman que los costos de implementación de estos sistemas ISO fueron transferidos al valor de los bienes en venta y por ende no afectaron las utilidades de la empresa. Se podría resumir entonces en que la implementación de un sistema de gestión tiene unos costos iniciales que pueden ser significativos, pero con el tiempo es cuestión de mantenimiento. (Ospina, 2021)

3.5 Permanencia en el mercado

Evaluar cómo los sistemas de gestión de calidad impactan en la liquidez y rentabilidad de una empresa es crucial para su continuidad en el mercado. Por ende, es esencial contar con herramientas que permitan anticipar esta situación. Estudios revelan que la implementación de un sistema de gestión de calidad conlleva un efecto positivo en los indicadores de liquidez y rentabilidad. Esto se alinea con la teoría financiera, pues mejorar los procesos de gestión administrativa de una empresa tiende a elevar dichos indicadores. Esta mejora, a su vez, reduce el riesgo de insolvencia en momentos financieramente desafiantes a corto plazo, al garantizar una mayor capacidad para cumplir con las obligaciones financieras, lo que fortalece la posición general de la empresa (Fontalvo et al., 2011). Aunque la normativa

ISO 9000 sea de naturaleza voluntaria, tener un sistema de calidad que cumpla con ella, y especialmente obtener su certificación, se ha convertido en una exigencia para las empresas que buscan proyectar una imagen de calidad y mantenerse competitivas en un mercado cada vez más desafiante (García, 2001).

3.6 La ISO (2009) en la norma 9004, establece algunos beneficios de la implementación de un sistema de gestión de la calidad de acuerdo con sus diferentes enfoques

Enfoque al cliente:

- Aumento de los ingresos y de la cuota de mercado obtenido mediante respuestas flexibles y rápidas a las oportunidades del mercado.
- Aumento de la eficacia en la utilización de los recursos de la organización para mejorar la satisfacción del cliente.
- Mejora de la fidelidad del cliente que conduce a la continuidad del negocio.

Liderazgo:

- Las personas comprenderán las metas y los objetivos de la organización y estará motivado hacia ellos.
- Las actividades se evalúan, se alinean y se implementan de un modo unificado.
- Se minimizará la mala comunicación entre niveles de una organización.

Participación de las personas:

- Personas motivadas, comprometidas e implicadas en la organización.
- Innovación y creatividad al promover los objetivos de la organización.
- Personas que son responsables de su propio desempeño.
- Personas que desean participar y contribuir en la mejora continua.

Enfoque basado en procesos:

- Costos más bajos y periodos más cortos a través del uso eficaz de los recursos.
- Resultados mejorados, coherentes y predecibles.
- Oportunidades de mejora centradas y priorizadas.

Enfoque de sistema para la gestión:

- Integración y alineación de los procesos que permitan obtener en las mejores condiciones los resultados deseados.
- Capacidad para centrar el esfuerzo en los procesos clave.
- Proporcionar confianza a las partes interesadas con respecto a la coherencia, la eficacia y la eficiencia de la organización.

Mejora continua:

- Ventaja en el desempeño gracias a la mejora de las capacidades de la organización.
- Alineación de las actividades de mejora en todos los niveles con los fines estratégicos de la organización.
- Flexibilidad para reaccionar rápidamente a las oportunidades.

Enfoque basado en hechos para la toma de decisiones:

- Decisiones informadas.
- Aumento de la capacidad para demostrar la eficacia de las decisiones anteriores mediante la referencia a los registros de los hechos.
- Aumento de la capacidad para revisar, cuestionar y cambiar las opiniones y las decisiones.

Relaciones mutuamente beneficiosas con el proveedor:

- Aumento de la capacidad de crear valor para ambas partes.
- Flexibilidad y rapidez de respuestas conjuntas al mercado cambiante o a las necesidades y expectativas del cliente.
- Optimización de los costos y de los recursos.

4. El enfoque de EPM

4.1 La acreditación en Empresas Públicas de Medellín (EPM)

EPM, no ha sido ajeno al aporte de la calidad y la competitividad que conllevan las acreditaciones. Las primeras acreditaciones de EPM se lograron a inicios de los años 2000, aunque logrando acreditaciones por separado en el que cada negocio manejaba sus propios laboratorios y por lo tanto sus propias acreditaciones; en el año 2017 todos los laboratorios pasaron a la Unidad Centro de Excelencia Técnica Normalización y Laboratorios, logrando unificar los esquemas de acreditación ante el ONAC, teniendo en este momento solo un esquema para todo lo relevante a calibración y uno para lo relevante a ensayos, además de contar con acreditación vigente ante el IDEAM.

El laboratorio de EPM se divide en áreas de trabajo, su esquema de acreditación es referente a nivel nacional. El código de acreditación para calibración de EPM, según el ONAC, es el 15-LAC-031 y cubre las siguientes áreas y magnitudes:

Área de medidores:

- Medidores de energía eléctrica
- Medidores de gas
- Medidores de agua
- Transformadores de corriente
- Energía

Área de Metrología:

- Tensión eléctrica
- Resistencia
- Corriente eléctrica
- Presión

El código de acreditación para ensayos de EPM, según el ONAC, es el 11-LAB-058 y cubre las siguientes áreas y ensayos:

Área de Química:

- Determinación de color aparente
- Determinación de aluminio
- Determinación de hierro total
- Determinación de nitratos
- Determinación de nitrilos

- Determinación de alcalinidad
- Determinación de turbiedad
- Determinación de pH
- Determinación de dureza total
- Determinación de sulfatos
- Determinación de cloruros
- Determinación de conductividad
- Determinación de aniones
- Determinación de Trihalometanos
- Determinación de carbono orgánico total oxidación persulfato
- Determinación de tensión de ruptura dieléctrica usando electrodos de disco
- Determinación de tensión de ruptura dieléctrica usando electrodos del tipo VDE
- Determinación del contenido de agua
- Determinación de gases disueltos
- Determinación de compuestos furánicos
- Determinación de Azufre corrosivo
- Determinación de Color ASTM
- Determinación de Metales de desgaste contaminantes y aditivos
- Determinación de Punto de Inflamación y fuego
- Determinación de tensión interfacial
- Determinación del Factor de disipación o factor de potencia
- Composición Química Acero Baja Aleación
- Composición Química Aleaciones Base Cobre

Área de microbiología:

- Determinación de coliformes totales
- Determinación de Giarda sp y Cryptosporidium sp.
- Determinación de heterótrofos
- Determinación de color aparente

Área Civil:

- Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa
- Método de ensayo para la determinación del límite líquido, del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos cohesivos.
- Método de ensayo para determinar el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos

- Método para determinar por lavado el material que para por el tamiz 75 um en agregados minerales

Área Eléctrica:

- Rigidez dieléctrica

Área Mecánica:

- Ensayo de dureza. Ensayo de Rockwell: escalas A, B, C
- Ensayo a tensión
- Ensayo a tensión

Área de Medición:

- Arranque de medidores de energía
- Funcionamiento sin carga para medidores de energía
- Verificación de la constante para medidores de energía

4.2 Las especificaciones técnicas en EPM y las normas en EPM

Las especificaciones y las normas técnicas son documentos a cargo del Centro de Excelencia Técnica Normalización y Laboratorios (CET N&L).

En las especificaciones se definen los requisitos mínimos que debe cumplir los productos o servicios ofertado a EPM, además en ellas se plasman las referencias normativas, y anexos relevantes tales como el uso contractual de la especificación, los ensayos propuestos y los planos o esquemas que se tengan para los productos tangibles.

Estas especificaciones se realizan sumando la experiencia del profesional, fichas técnicas de proveedores, normas de fabricación de producto y la realimentación que dan los usuarios finales sobre un producto o servicio. Es de resaltar además que desde el CET N&L se viene trabajando con las diferentes filiales del grupo EPM, para tener especificaciones técnicas homologadas en todo el grupo empresarial. Por su parte las normas técnicas son documentos que definen los criterios básicos en construcciones de la infraestructura de EPM.

Conclusiones

Comprender la certificación y acreditación

Este artículo ha explorado los conceptos fundamentales que permiten comprender de manera más completa los procesos de certificación y acreditación. Al abordar estos conceptos, se ha establecido una base sólida para interiorizar cómo estos sistemas de evaluación impactan en el éxito empresarial como indicadores de competitividad y calidad en el mercado actual.

Análisis cuantitativo para respaldar los sistemas de gestión

Utilizando el análisis de datos cuantitativos de otros estudios, se ha evidenciado la relevancia y el impacto positivo que los sistemas de gestión

tienen en distintos aspectos empresariales. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar y mantener sistemas de gestión efectivos para potenciar la competitividad y la calidad en el mercado.

El rango de aplicación de las normas

Es crucial reconocer la variedad de entidades dedicadas a la estandarización, cuyo ámbito de influencia puede ser local, regional o global. Estas organizaciones suelen colaborar entre sí, facilitando así la adopción de normativas nacionales, como las NTC colombianas, en otros países.

Referencias

- Decreto 865 de 2013 [Departamento Administrativo de la Función Pública]. Por el cual se designa al Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) como único organismo de acreditación y se dictan otras disposiciones. 29 de abril de 2013. <https://rb.gy/tjwwby>
- Dereli, T., Durmuşoğlu, A., Delibaş, D., y Avlanmaz, N. (2011). An analysis of the papers published in total quality management & business excellence from 1995 through 2008. *Total Quality Management*, 22(3), 373-386. <https://doi.org/10.1080/14783363.2010.532337>
- Equipo Vértice. (2010). *Gestión de la calidad ISO 9001 en el comercio*. Editorial Vértice.
- Fontalvo, T., Mendoza, A. y Morelos, J. (2011). Evaluación del impacto de los sistemas de gestión de la calidad en la liquidez y rentabilidad de las empresas de la Zona Industrial de Mamonal (Cartagena-Colombia). *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, (34), 314-341. <https://rb.gy/xsysl>
- Hernández, N. y Ricardo, J. (2018). *Gestión empresarial y posmodernidad*. Infinite Study.
- Hurtado, R., Rodríguez, W., Fuentes, H., y Galleguillos, C. (2009). Impacto en los beneficios de la implementación de las normas de calidad ISO 9000 en las empresas. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 23, 17-26. <https://rb.gy/smowpl>
- Organización Internacional de Normalización. (2015). *Sistemas de Gestión de la Calidad- Requisitos*. (ISO 9001). <https://rb.gy/zyxv63>
- Organización Internacional de Normalización. (2017). *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. (ISO 17025). <https://rb.gy/k7v0wd>
- Organización Internacional de Normalización. (2009). *Gestión para el éxito sostenido de una organización. Enfoque de gestión de la calidad*. (ISO 9004). <https://rb.gy/c0vjyh>
- Organización Internacional de Normalización. (2012). *Conformity assessment — Requirements for bodies certifying products, processes and services*. (ISO 17065). <https://rb.gy/thb85w>
- Organización Internacional de Normalización. (2013). *Evaluación de la conformidad — Fundamentos de la certificación de producto y directrices para los esquemas de certificación de producto*. (ISO 17067). <https://rb.gy/beg7z7>
- Organización Internacional de Normalización. (2022). *Acerca de ISO*. <https://rb.gy/n51jz8>
- Organización Internacional de Normalización. (2017). *Evaluación de la conformidad — Requisitos para los organismos de acreditación que realizan la acreditación de organismos de evaluación de la conformidad*. (ISO/IEC 17011). <https://rb.gy/07hhww>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). (s.f.). *Acreditación de laboratorios*. <https://rb.gy/3w71hm>
- Larena, M., Villodre, S., Pontoriero, F., y Cattapan, A. (2014). Modelo de sistema de gestión de calidad para la puesta en marcha de cursos no presenciales: instrumentos de seguimiento y evaluación. *Formación universitaria*, 7(6), 3-16. <https://rb.gy/iz427p>

- Real Academia Española [RAE] (s.f.). Certificación. En *Diccionario de la lengua española*. Recuperado el 16 de julio de 2024, de: <https://rb.gy/kr8vjd>
- Romero, C. y Rojas, Y. (2016). Beneficios e impactos de la implementación de normas técnicas en las organizaciones: una revisión sistemática. *Signos: Investigación en sistemas de gestión*, 8(2), 133-167. <https://doi.org/10.15332/s2145-1389.2016.0002.07>
- Ogalla, F. (2005). *Sistema de gestión: una guía práctica*. Ediciones Díaz de Santos.
- Ospina, S. (2021). *Análisis de la relación costo-beneficio en la certificación e implementación de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC)*
- Terlaak, A., y King, A. (2006). The effect of certification with the ISO 9000 Quality Management Standard: A signaling approach. *Journal of economic behavior & organization*, 60(4), 579-602. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2004.09.012>

Cómo citar este artículo:

Isaza, H. (2024). La importancia de las certificaciones y las acreditaciones como soporte de la competencia y la calidad. *Revista EPM*, (23), 68-79.



Transformación continua: aplicación del método Kaizen en un proceso de EPM

Continuous transformation: application of the kaizen method in an EPM process

**Pablo
Herrera Capdevilla**
Dirección Excelencia
Organizacional y Talento COE, EPM

pablo.herrera@epm.com.co

Resumen

En la actualidad, Kaizen es una de las filosofías más implementadas en el mundo por su efectividad para impulsar el cambio en las organizaciones, propiciando la eficiencia y mostrando que pequeños esfuerzos sumados pueden generar grandes transformaciones. En este sentido, este artículo expone la aplicación de la filosofía Kaizen en un proceso de EPM, con el propósito de mejorar su eficiencia y productividad. Para esto, inicialmente se presenta una introducción donde se habla sobre la importancia del Kaizen

para el crecimiento y sostenimiento empresarial; seguidamente, se realiza una aproximación a las principales definiciones y los autores más representativos en el tema; luego se expone la metodología y los principales resultados obtenidos en cada etapa de la aplicación de la filosofía Kaizen, para finalizar con una reflexión sobre el impacto de mantener una cultura de mejora continua y los beneficios que trae consigo esta filosofía.

Palabras clave:

Kaizen, Mejora continua, Desperdicios, Flujo de valor, Eficiencia

Keywords:

Kaizen, Continuous improvement, Waste, Value stream, Efficiency

Introducción

En un mundo globalizado, de constantes cambios, llenos de mucha información y complejo; las organizaciones y todos los seres humanos se encuentran en un desafío constante de crear soluciones asertivas a los problemas dinámicos del entorno. En este momento, el Kaizen juega un papel trascendental en la vida de cada uno, al tener como base el principio de "lo simple", nos recuerda que en muchas ocasiones las soluciones más efectivas son también las más prácticas y fáciles de utilizar. Es importante partir, de que la simplicidad no implica necesariamente superficialidad o falta de perfección en lo que se está desarrollando; más bien, se trata de enfocarse de manera clara en la solución del problema que se intenta resolver. Kaizen, que significa en japonés "cambio para mejorar", se basa en la idea de llevar a cabo pequeñas mejoras incrementales de forma constante y sistemática.

Esta filosofía se enfoca en simplificar los procesos, eliminar desperdicios y promover la participación de todos los miembros de una organización en la búsqueda de la excelencia. Al igual que el principio de lo simple, el enfoque de Kaizen reconoce que a menudo son los pequeños y simples cambios los que tienen el mayor impacto en la mejora del desempeño y la eficiencia. (Imai, 2014)

Este artículo busca presentar cómo la aplicación del Kaizen en una organización puede ayudar a lograr la simplicidad y, por ende, la eficiencia y la productividad empresarial. En este sentido, se presentará un caso aplicativo de cómo se logró mejorar un proceso en EPM, pasando de durar en promedio más de 90 días a un tiempo de aproximadamente 9,4 días; algo que, a simple vista sería difícil, pero con la dinámica de esta filosofía es posible lograrlo.

Con relación al contenido, inicialmente, se presentará una aproximación a la teoría que sentará las bases para el análisis posterior; el cual incluirá una revisión de los principales autores y postulados relacionados con el Kaizen, así como otras herramientas fundamentales que son esenciales para comprender el contexto y los conceptos abordados en el artículo. Se analizará cómo estas teorías y enfoques han evolucionado a lo largo del tiempo y cómo se aplican en diversos contextos empresariales.

Posteriormente, se describirá la metodología empleada, centrándose en la filosofía del Kaizen, detallando los pasos específicos que se siguen durante la implementación, así como las herramientas de apoyo utilizadas en el proceso. Luego, se realiza un análisis de los resultados obtenidos, se presentarán los impactos alcanzados en términos de eficiencia y productividad, identificando las mejoras cuantitativas y cualitativas que surgieron como resultado directo de la implementación del Kaizen.

Finalmente, se llevará a cabo una reflexión crítica sobre el impacto global de la metodología y los resultados obtenidos en el proceso específico. Se analizará cómo estos hallazgos se relacionan con los objetivos y desafíos más amplios del proceso mejorado, y evaluando el potencial de la aplicación y la escalabilidad de la filosofía en otros contextos empresariales. Se expondrán las lecciones aprendidas y las áreas de mejora identificadas durante el proceso, con el objetivo de proporcionar una visión integral de los beneficios y desafíos asociados con la implementación del Kaizen.

1. Aproximación a la teoría

1.1 Kaizen

Según Imai (2014) "la mejora se puede clasificar como Kaizen o como innovación; el Kaizen significa pequeñas mejoras como resultado de esfuerzos continuados y por su parte la innovación implica una mejora drástica como resultado de una cuantiosa inversión de recursos en nuevas tecnologías o nuevos equipos (siempre que el dinero sea un factor clave, la innovación resultará cara). Por la fascinación que suele generar la innovación, los directivos occidentales tienden a ser impacientes y a subestimar los beneficios a largo plazo del Kaizen para cualquier compañía, sin tener a veces en cuenta que esta filosofía se centra en los esfuerzos del personal, su estado de ánimo, la comunicación, la formación, el trabajo en equipo, la participación e implicación y la autodisciplina: un enfoque de sentido común y de bajo coste con el fin de mejorar".

Kaizen es una palabra compuesta de la derivación de dos kanjis japoneses¹, donde "KAI" significa cambio o reforma y "ZEN" es la sabiduría o bondad. Kaizen Blitz, a menudo denominado como Evento Kaizen o Kaizen Burst, es un esfuerzo intenso y coordinado (Normalmente desarrollado en un periodo de 2-5 días) enfocado en lograr una mejora radical de un solo proceso u operación al interior de una organización.

De acuerdo con Bessant (2003) indica que en la filosofía Kaizen, la movilización y la participación de los empleados, genera un canal o un medio para que los mismos, puedan contribuir al desarrollo de la compañía. En términos sencillos, "trabajando con las manos, pero utilizando el cerebro para pensar".

Comúnmente, Kaizen se refiere a un proceso de mejora gradual y continua, pero en ocasiones es necesario desarrollar mejoras radicales para un proceso u operación en particular en un corto periodo de tiempo. Es por ello por lo que el concepto de Eventos Kaizen se desarrolló pensando en cubrir esta necesidad. (Acosixsigma, 2023)

Este mismo autor plantea que la aplicación de este método brinda distintos beneficios:

- Eliminar sistemáticamente los desperdicios de todas las áreas; haciendo más eficiente los procesos y sistemas de la empresa y generar un incremento considerable en la calidad de los productos o servicios.
- Mejorar la habilidad de las personas para encontrar frecuentemente expectativas de: alta calidad, bajo costo y entregas a tiempo.
- Generar ahorros y tal vez lo mejor de todo es generar un hábito.
- Fomentar la cultura del trabajo en equipo dentro de las organizaciones.

1.2 Tipos de desperdicios

Los desperdicios se definen en el marco de la filosofía lean, la cual de acuerdo con Ohno (1988) "La persecución de una mejora del sistema de fabricación mediante la eliminación del desperdicio, entendiéndolo como desperdicio o despilfarro todas aquellas acciones que no aportan valor al producto y por las cuales el cliente no está dispuesto a pagar". De acuerdo con Acosixsigma (2023) en una organización existen 8 desperdicios que limitan la eficiencia en las organizaciones, los cuales son:

1.2.1 Sobreproducción

Abastecer al proceso con más de lo necesario para satisfacer las necesidades de orden, antes y más rápido de lo que se necesita, causa casi todos los otros tipos de desperdicios, pues el exceso de productos debe almacenarse hasta que pueda utilizarse, para lo que hace falta espacio de almacén, lo que reduce la vida útil del producto para el consumidor final y, cuando se trata de productos muy perecederos, aumenta la probabilidad de que se estropeen antes de venderlos. Esta es la peor pérdida de todas, ya que puede ser un factor que genere los demás tipos de desperdicios.

1.2.2 Transporte

El transporte, movimiento y manipulación excesivos de los artículos puede ser una de las principales causas de desperdicio en la fabricación, ya que estos movimientos innecesarios de materiales que entran y salen de las áreas de trabajo no agregan valor y se utilizan a menudo para dejar fuera del camino al inventario que se encuentra en exceso.

1.2.3 Inventario

Los procesos de fabricación ineficientes dan lugar a un exceso de inventario en forma de ingredientes de productos. Los fabricantes que producen más de lo necesario deben disponer de existencias suficientes para satisfacer la sobreproducción. Requiere personas, equipos y espacio para contar, transportar, almacenar y mantener; puesto que, al no recibir órdenes del material, este se convertirá en obsoleto, puede ser desechado y como se mencionó anteriormente el inventario se utiliza a menudo para ayudar a ocultar otros desperdicios.

1.2.4 Movimiento

Se refiere al desplazamiento innecesario de personas, como caminar sin trabajar (lejos del puesto de trabajo), búsqueda de herramientas, materiales o información, necesidad de alcanzar, realizar flexión o movimiento innecesario debido a la falta de limpieza o diseño del lugar de trabajo. Esto presupone que el proceso no está diseñado teniendo en cuenta a los colaboradores.

1.2.5 Sobre proceso

Sucede cuando se fabrica más cantidad de producto de lo que se necesita. Hacer más de lo necesario para entregar un servicio que funcione con eficacia, pasos de configuración adicionales, exceso de especificaciones del proceso y etapas de procesamiento adicionales. Al no ajustarse a los requerimientos de producción, se origina una redundancia que, lejos de mejorar el proceso o el producto, lo sobrecarga de características y lo encarece.

1.2.6 Defectos (Retrabajos)

Este desperdicio acontece cuando el trabajo no se ha completado satisfactoriamente al primer intento: cualquier defecto en el producto conlleva una carga adicional de trabajo para ser subsanado.

Es crucial optimizar los procesos de producción para prevenir los errores y, si se acaban cometiendo de todas maneras, que se puedan detectar lo antes posible; cuanto antes se identifiquen, más sencillo será resolverlos, ya que los errores en una empresa consumen tiempo, recursos y material para subsanarlos; si además llegan al cliente se provoca una insatisfacción y falta de confianza que podría dañar la relación laboral.

1.2.7 Esperas

Se manifiesta en los tiempos muertos entre etapas de la cadena que presentan niveles dispares de carga de trabajo. Se hace visible por ejemplo cuando se detecta que unos operarios están saturados, mientras que otros apenas tienen trabajo.

Esta espera puede deberse a la ruptura de alguna pieza, estar pendiente de un visto bueno por parte de un superior, falta de materiales o simplemente por no haber programado correctamente el trabajo.

1.2.8 Talento Humano

Se da cuando el personal está infrutilizado (talento no utilizado) y la empresa desaprovecha las habilidades, conocimiento y experiencia de su personal. Los colaboradores son vistos solo como una fuente de mano de obra, y no como verdaderos expertos del proceso; a la gente se le dice qué hacer, y se le pide "no pensar", los colaboradores no están involucrados en la búsqueda de soluciones y las oportunidades para mejorar el proceso se pierden.

2. Eventos Kaizen

Como se mencionó anteriormente, estos eventos inspirados en la filosofía Kaizen son espacios donde se enfoca la mejora y se generan soluciones eficaces a los cuellos de botella² identificados en los procesos de la organización. Los eventos Kaizen ofrecen una oportunidad para la innovación a través del trabajo colaborativo y promueven una cultura de excelencia en la organización. (Imai, 2014)

Los eventos Kaizen suelen realizarse de forma intensiva y continua en espacios de tiempo de cinco días, donde se conforman equipos multidisciplinarios para mejorar un proceso; sin embargo, como se puede observar en figura 1, por la dinámica de las actuales organizaciones como EPM, se propone realizar en momentos de trabajo, distribuidos en máximo tres meses.

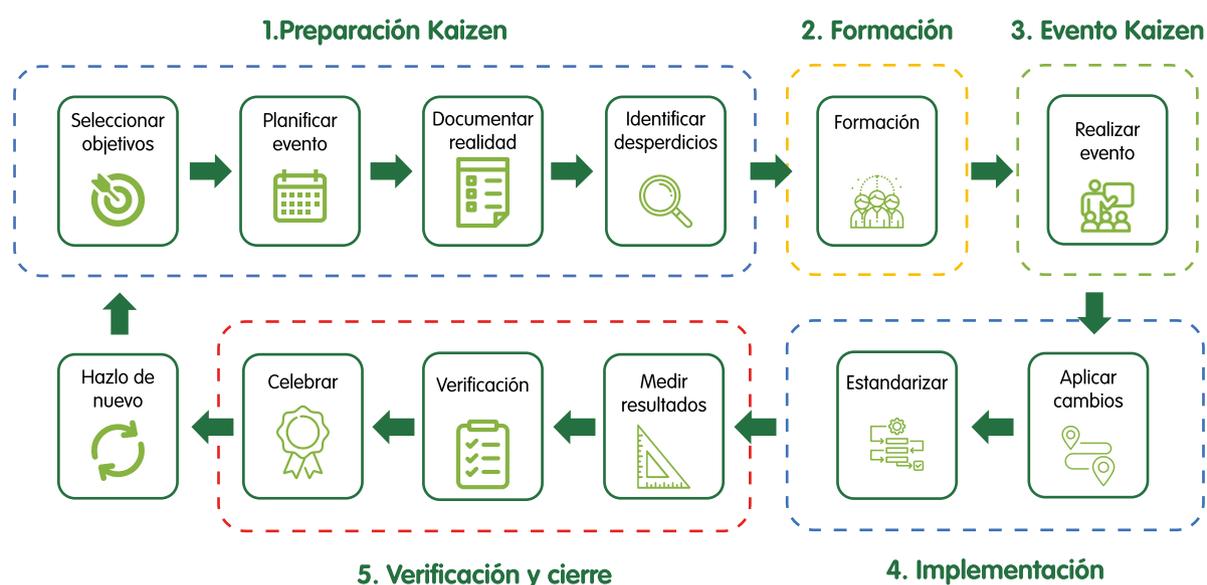


Figura 1. Etapas del evento Kaizen. Adaptado de Acosixsigma (2023).

2.1 Etapa 1. Preparación evento Kaizen

El objetivo del evento Kaizen es mejorar la eficiencia del proceso seleccionado mediante la identificación y eliminación de desperdicios, la optimización del flujo de trabajo y la implementación de soluciones innovadoras que impulsen la productividad y la calidad del producto final.

Objetivos específicos:

- Reducir el tiempo de ciclo del proceso en un 20%, con el fin de optimizar la atención prestada y poder cumplir con los lineamientos normativos.

- Entrenar a los asistentes en la implementación de herramientas Kaizen, con el fin de que se pueda comprender y replicar el alcance de la metodología.
- Implementar palancas de eficiencia que permitan optimizar el proceso.

En el marco de esta etapa, también se realizó un estado actual (AS IS) del proceso, logrando documentar el procedimiento actual, los tiempos de ciclo y los principales retos del proceso. Para esto, se implementó una herramienta denominada Mapa de flujo de valor (VSM), con la cual se logró tener la visualización completa del proceso y sus puntos de dolor. A continuación, se observa el resultado del VSM:

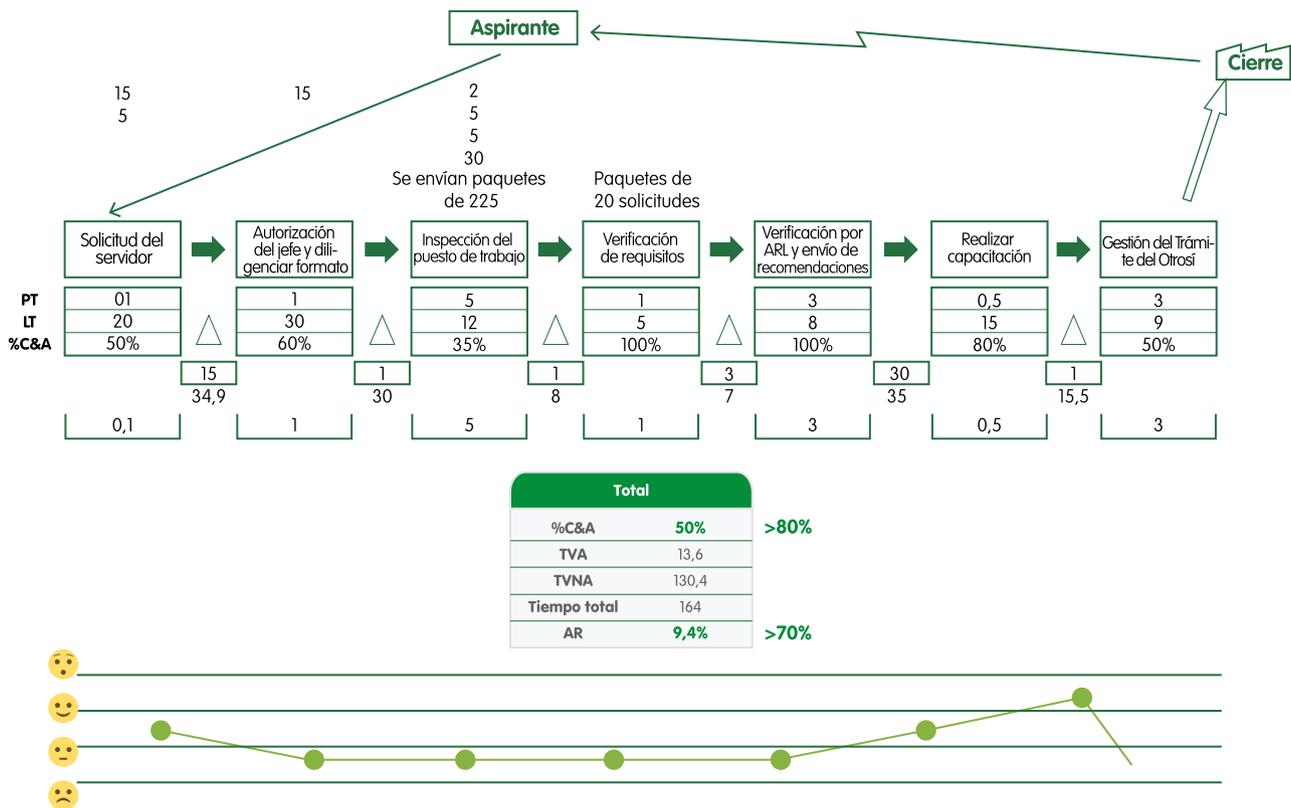


Figura 2. Mapa de flujo de valor VSM del proceso organizacional.

En este VSM se observa el flujo de valor del proceso seleccionado, los tiempos reales identificados con las letras PT, los tiempos totales identificados con las letras LT, la calidad de la información identificado con las siglas %C&A. En la parte inferior se logra observar el nivel de experiencia del cliente durante el proceso, lo cual muestra que en este caso el cliente, en la gran mayoría del flujo no se encuentra satisfecho con la calidad del proceso.

En la parte derecha, se observa un tablero de los principales indicadores del proceso, de los cuales se puede inferir:

- Con relación al %C&A se observa que solo el 50% de la información es de calidad y cumple con los estándares para satisfacer las necesidades del cliente.
- El tiempo total muestra que todo el proceso tiene una duración de 144 días, lo cual demuestra un alto tiempo de ciclo para entregarle valor al cliente.
- Lo anterior, de acuerdo con la metodología Kaizen, significa que solo el 9,4 del tiempo/ tareas agregan valor al cliente.

- Estos resultados indican que el proceso tiene desperdicios que son necesarios minimizar para aumentar el valor entregado al cliente.

2.2 Etapa 2 Formación

En esta etapa se generó un espacio con los responsables del proceso y grupos de interés para el entendimiento de la metodología y la comprensión de cada una de las etapas desarrolladas. Entre los principales conceptos revisados, estuvo inicialmente la definición de Kaizen y los siete desperdicios, la herramienta VSM, entre otros conceptos.

2.3 Etapa 3. Evento Kaizen

El evento Kaizen se desarrolló en varias etapas para identificar alternativas que pudiesen darle solución al problema. Para esto se realizó un análisis del Es – NO ES, la cual es una herramienta que permite delimitar el alcance de la solución que se espera obtener del evento Kaizen, esto también permitirá el entendimiento de todos

los integrantes del alcance del ejercicio, luego se realizó un ejercicio de causa raíz, donde se identificaron las principales causas que originan la problemática a través de una técnica denominada los 5 ¿por qué?, en la que se tiene que preguntar cinco veces cuál es el origen de esa causa.

Luego de encontrar las principales causas raíz y alineado a los momentos de dolor del proceso, se procedió a generar alternativas de solución para optimizar el flujo del proceso. Como resultado principal de esta etapa, se dio inicialmente la eliminación de muchos desperdicios como tiempos de espera a causa de la demora en la revisión de documentos, reprocesos por dobles aprobaciones, errores por fallas en el diligenciamiento de los formularios; de este ejercicio surgió el diseño de una automatización del flujo de trabajo en BPMS³ como palanca de eficiencia, con el cual se optimizará gran parte del proceso.

2.4 Etapa 4. Implementación

En la implementación se logró desarrollar los flujos de trabajo en la herramienta de automatización CONECTA, se realizaron alrededor de 6 sprint⁴ donde se contó con una casa de software que apoyó el desarrollo de la automatización. También se diseñaron los formularios necesarios para lograr desarrollarlos y los ANS⁵ necesarios. Para finalizar esta etapa de implementación se realizaron un conjunto de pruebas que permitieron validar conceptualmente las soluciones y también la funcionalidad de cada elemento de la aplicación.

2.5 Etapa 5. Verificación y cierre

Para esta última etapa, se revisó el VSM nuevamente con el fin de validar el impacto de la metodología y los resultados obtenidos. En esta revisión se midieron los tiempos alcanzados por cada momento del nuevo flujo de valor y se compararon con los resultados iniciales.

3. Principales resultados

Como parte de la revisión de los principales resultados de la aplicación de la filosofía Kaizen en el proceso seleccionado, se revisaron los impactos generados en el flujo de procesos. En el siguiente gráfico se puede observar el impacto en cuanto a los indicadores clave de un flujo de valor:

Total	Antes	Ahora
%C&A	50%	95%
TVA	13,6	6,6
TVNA	136,4	9,4
Tiempo total	150	16
AR	9,1%	41,3%

Tabla 1. Comparativo de indicadores de flujo de valor del proceso.

De la revisión de los indicadores anteriores se pueden concluir los siguientes resultados:

En conclusión, la implementación del enfoque Kaizen en el proceso organizacional ha generado resultados extraordinarios en términos de calidad, eficiencia y valor agregado para los usuarios. Los

datos revelan un notable aumento en la calidad de la información – %C&A, pasando del 50% al 95%, lo que refleja una mejora significativa en la eliminación de errores derivados de formatos no estandarizados, formularios mal diseñados y documentación mal diligenciada por los usuarios.

Además, se logró reducir considerablemente el Tiempo de No Valor Agregado (TVNA) de 136 días a solo 9,4 días, lo que representa una disminución sustancial en tiempos de espera, reprocesos y otros desperdicios en el proceso; esta reducción contribuye directamente a una optimización general de la eficiencia operativa.

Aunque en el Tiempo de Valor Agregado (TVA) se observa una disminución significativa, es importante destacar que el enfoque en mejorar el valor agregado para el cliente ha dado sus frutos. El porcentaje de tareas que agregan valor ha aumentado del 9,1% al 41,3%, lo que indica una mejora significativa en la entrega de valor al usuario. Aunque aún hay margen para mejorar, estos resultados reflejan un impacto positivo notable durante este primer ciclo de mejora continua.

Conclusiones

Como principal conclusión, la implementación de Kaizen ha demostrado ser una estrategia efectiva para impulsar la calidad, reducir el desperdicio y aumentar el valor para los usuarios; estos logros demuestran que el Kaizen es una filosofía práctica, que entrega resultados pequeños, pero que sumados se vuelven grandes logros y motiva a seguir avanzando en el viaje de la mejora continua, identificando nuevas oportunidades de optimización y garantizando que los procesos sean cada vez más eficientes y centrados en ofrecer un valor excepcional a quienes se sirve.

En cuanto a la metodología implementada, se observa que contiene los elementos necesarios

para ayudar a un proceso a enfocar y lograr resultados significativos para la mejora operativa de EPM. El desafío que queda es mantener la cultura hacia la mejora continua y lograr definir una gobernanza que apoye la sostenibilidad de la práctica en el tiempo.

Pensar en Kaizen significa mantener una disciplina de datos, identificación de desperdicios y proponer soluciones de valor que optimicen los procesos organizacionales, por tal motivo, herramientas aplicadas en este artículo deben ser compartidas a los equipos de la organización, porque todos son co – responsables de la mejora.

Notas al final

¹ Carácter chino.

² En el campo de la Ingeniería se refiere a restricciones del sistema.

³ Son herramientas que permiten definir, implementar y gestionar procesos de negocio de forma automatizada.

⁴ Se refiere a los ciclos de trabajo para desarrollar entregables del producto, proviene de las metodologías ágiles.

⁵ Acuerdos de Nivel de Servicio.

Referencias

- Acosixsigma. (2023). *Guía metodología de Kaizen*.
- Bessant, J. (2003). *High Involvement Innovation*. Chichester West Success.
- Felipa, J. (2014). *Metodología de implantación de modelo de mejora de procesos Lean Six Sigma en entidades bancarias*. Universidad de Piura. <https://rb.gy/4qanpl>
- Imai, M. (2014). *Gemba Kaizen; un enfoque de sentido común para una estrategia de mejora continua*. McGraw-Hill.
- Ohno, T. (1988). *Sistema de producción Toyota: más allá de la producción a gran escala*. Taylor & Francis.
- Gutierrez, H. y Vara, R. (2009). *Control estadístico de calidad y seis sigma*. Mc Graw Hill. <https://rb.gy/xgr4bwll>.

Cómo citar este artículo:

Herrera, P. (2024). Transformación continua: aplicación del método Kaizen en un proceso de EPM. *Revista EPM*, (23), 80-88.



Identificación de vegetación propensa a generar fallas de líneas de transmisión usando UVAS, Modelos digitales de elevación y analítica espacial

Identification of vegetation prone to generating transmission line failures using UVAS, digital elevation models and spatial analytics

**Mario Alberto
Caro Mejía**
Unidad Subestaciones
y Líneas, EPM

Mario.caro@epm.com.co

**Sandra Milena
Arroyave Patiño**
Unidad Centro de Excelencia Técnica
Normalización y Laboratorios, EPM

Sandra.arroyave@epm.com.co

Resumen

Para este trabajo se realizó un sobrevuelo con un vehículo aéreo no tripulado en un vano de la línea de transmisión doble circuito Guayabal – Envigado y Guayabal – Ancón Sur a 110 kV propiedad de Empresas Públicas de Medellín, con el fin de proponer una metodología para verificar la vegetación dentro de la zona de servidumbre, que sirva de complemento de inspección a la forma como lo hace actualmente la Unidad Subestaciones y Líneas. Esto incluyó, además del sobrevuelo, un procesamiento y

post procesamiento de las imágenes capturadas mediante diferentes softwares, y la verificación en campo con herramientas de precisión, además del uso de información de la plataforma Sistema del Árbol Urbano (SAU). Se concluyó que este tipo de tecnología determina con la precisión requerida las alturas, siendo más precisa que la forma tradicional, con lo que se lograría mejorar la planificación de los mantenimientos de las franjas de seguridad.

Palabras clave:

Vehículo aéreo no tripulado, Vegetación, Inspección, Servidumbre, Línea de transmisión, Modelo digital de elevación, Modelo digital del terreno

Keywords:

Manned aerial vehicle, Vegetation, Survey, Easement, Transmission line, Digital elevation model, Digital terrain model

Introducción

El Sistema Interconectado Nacional está conformado por la infraestructura del Sistema de transmisión Nacional (STN) y el Sistema de Transmisión Regional (STR); la finalidad del sistema es suministrar la energía necesaria para satisfacer las necesidades de los clientes. Cuando una línea queda por fuera del sistema se pueden ver afectados los indicadores de la calidad del servicio; un factor importante que puede ser causado por el acercamiento de la vegetación a los conductores de energía de alta tensión, ya que, al ingresar al campo electromagnético del conductor, se corre el riesgo de presentarse una descarga eléctrica.

Actualmente, la inspección a la vegetación en la zona de servidumbre de las líneas de transmisión de Empresas Públicas de Medellín (EPM) se realiza a nivel de superficie y a partir de observaciones del personal, visualizando si la vegetación vulnera las distancias mínimas de seguridad y se asigna un nivel de prioridad para la programación de la intervención. Sin embargo, determinar las distancias entre la rama y la vegetación a partir de la visualización, no deja de ser subjetivo por

los diferentes factores que pueden influir como la topografía, la posición del sol, el ángulo desde donde se esté mirando entre otros, lo que al final genera errores en el resultado.

Por lo expuesto, en este trabajo se quiere analizar si mediante la implementación de Modelos Digitales de Elevación (DSM) y Modelos Digitales de Terreno (DMT), generados por sobrevuelos con vehículos aéreos no tripulados, se obtienen las alturas y anchos de las copas de los árboles, identificando la vegetación que debe ser intervenida.

El área de estudio se delimito a un tramo de la línea de transmisión Guayabal – Envigado a 110 kV, la cual cuenta con suficiente vegetación dentro de la zona de servidumbre, que permitió comparar la precisión del método utilizado actualmente por EPM con los modelos digitales generados. Además de eso, se usó la plataforma del Sistema del Árbol Urbano (SAU), ya que allí se reportan todas las intervenciones silviculturales que se realizan a los árboles que están en la zona urbana pública del Área Metropolitana del Valle del Aburra.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Proponer una metodología para realizar la inspección de la franja de seguridad de la línea de transmisión Guayabal - Envigado a 110 kV, identificando la vegetación susceptible a generar fallas, por medio de sistemas aéreos no tripulados con sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar la inspección de la franja de seguridad de la línea de transmisión Guayabal - Envigado a 110 kV, identificando la

vegetación susceptible a generar fallas, por medio de sistemas aéreos no tripulados con sensor CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

- Verificar la precisión de la información resultante de la metodología implementada con los datos tomados en campo.
- Comparar la metodología resultante de la investigación con la metodología tradicional que se maneja actualmente en Empresas Públicas de Medellín para la inspección de la vegetación en las zonas de servidumbre de las líneas de transmisión.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en el municipio de Envigado en el departamento de Antioquia en el costado derecho del río Medellín, específicamente

en el barrio Las Vegas, entre los vanos 28 y 32 de la línea de transmisión doble circuito Guayabal – Envigado y Guayabal – Ancón Sur a 110 kV.

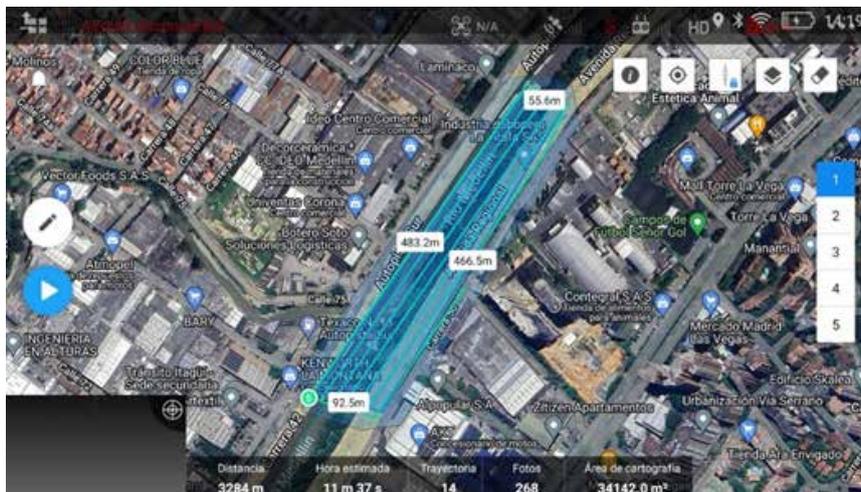


Figura 1. Área de estudio en la aplicación DJI Pilot.¹

2.2 Equipos y software

A continuación, se describen los equipos y programas usados para la obtención y procesamiento de las imágenes.

2.2.1 Vehículo aéreo no tripulado

Se utiliza para los sobrevuelos el UAV Mavic 2 Enterprise de la marca DJI, el cual cuenta con sistemas de visión omnidireccionales y sistemas de detección por infrarrojos y las características de la tecnología de DJI, tales como la detección de obstáculos y el sistema avanzado de asistencia al piloto, le permite capturar tomas complejas sin esfuerzo (DJI, 2021).



Figura 2. UAV Mavic 2

Peso de despegue (sin accesorios)	899 g
Dimensiones	Plegado: 214 x 91 x 84 mm (alto x ancho x alto)
	Desplegado: 322 x 242 x 84 mm (alto x ancho x alto)
Velocidad máxima de ascenso	5m/s (modo S), 4 m/s (modo P)
Velocidad máxima de descenso	3 m/s(modos S), 3 m/s (modo P)
Velocidad máxima	72 km/h (modo S, cerca del nivel del mar, sin viento)
Altura máxima de servicio sobre el nivel del mar	6000 m
Tiempo máximo de vuelo	31 minutos (sin viento, a una velocidad constante de 25 km/h)
Tiempo de vuelo estacionario	29 minutos (sin viento)
GNSS	GPS+GLONASS
Rango de precisión en vuelo estacionario	Vertical: +- 0.5m (con posicionamiento por GPS)
	Horizontal: +-1.5m (con posicionamiento por GPS)
Frecuencia de funcionamiento	2.400-2.4835 GHz; 5.725 -5.850 GHz
CAMARA	
Sensor	CMOS 1/2.3"
Velocidad de obturación	Píxeles efectivos: 12 millones Obturador electrónico: 8 -1/8000 s
Tamaño de imagen	4000 x 3000
Resolución de vídeo	4K - 2K - FHD
Almacenamiento interno	1 B

* En esta tabla se describen las características del UAV

Tabla 1. Configuración del UAV.²

2.2.2 Hipsómetro

Se usó el Hipsómetro marca LaserAce, el cual mide la distancia a un objetivo, la elevación, la altura y diámetro, así como laderas y pendientes. Cuenta con un modo de dos y de tres puntos para árboles

inclinados, así como un equipo multifunción que almacena los resultados (hasta 3.000 árboles) para su posterior visualización o descarga a su PC o PDA mediante el Bluetooth® (o RS232) de enlace de datos. A continuación, algunas de las principales características:

Rango	150 m sin tarjeta reflectante; 600m con reflector; ± 70° de horizontal
Precisión laser	10 cm
Resolución laser	1 cm
Precisión brújula digital	±0,2°
Dimensiones	110 x 100 x 50 mm
Peso	464 gr
Precisión inclinómetro	0,2°
Resolución inclinómetro	0,1°
Almacenamiento	3000 registros

Tabla 2. Características del hipsómetro.³



Figura 3. Hipsómetro marca LaserAce.

2.2.3 Software usado

Para la realización del proyecto se manejaron los siguientes programas:

- DJI Pilot: La Aplicación DJI Pilot se desarrolló exclusivamente para clientes empresariales y ella puede ofrecer dos tipos de vuelo. Misión de vuelo que permite planificar el vuelo, con lo cual se puede automatizar el vuelo, lo que posibilita que el trabajo sea mucho más eficiente y simple.
- Web Opendronmaps: La versión 1.9.1 de la plataforma WebODM fue la utilizada para el procesamiento de las imágenes que se tomaron en el sobrevuelo.
- Adicionalmente se usan los programas de ARGIS y QGIS para el procesamiento del DSM y DTM.
- Sistema de Árbol Urbano (SAU): Es un aplicativo web interactivo el cual permite el registro, la consulta y análisis de todas las intervenciones que se realizan sobre los árboles ubicados en las zonas urbanas públicas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, de tal forma que cada uno de ellos cuente con su "hoja de vida". En el aplicativo se registran actividades como siembra, mantenimiento, poda, trasplante o tala, y medición de variables de crecimiento, así como observaciones sobre el estado físico y fitosanitario del árbol, además para cada individuo se requiere su localización geográfica. (Cortés et al., 2017).

El registro de estas intervenciones forestales en el aplicativo es exigido por el Área Metropolitana de Valle de Aburra (AMVA).

2.3 Procedimiento para la obtención de imágenes

El vuelo contó con personal certificado por la Aerocivil para la operación y manejo del UAV. Para la autorización del vuelo, se presentaron la matriz de seguridad operacional aérea y el formulario solicitado por la Aerocivil. Al momento de ser realizado, se verificaron las variables climáticas mediante las aplicaciones UAV Forescat y Magnetology, las cuales indican las condiciones ambientales y el estado del campo electromagnético de la tierra (unidad KP) idóneas de la zona de interés.

Durante el vuelo se generaron 297 imágenes, en donde se cubrió un área aproximada de 5,74 hectáreas. Para evitar la deformación de las imágenes al momento de generar la ortofoto, se procuró que el área de estudio quedara en el medio del sobrevuelo. En la tabla 3 se muestran los parámetros con el que se configuró el UAV en la aplicación DJI Pilot y en la figura 4 el flujo del proceso llevado a cabo en la WebODM:

Altura de Vuelo	40 metros
GSD	0.71 cm/pixel
Superposición lateral	70%
Superposición frontal	80%

Tabla 3. Configuración del UAV.

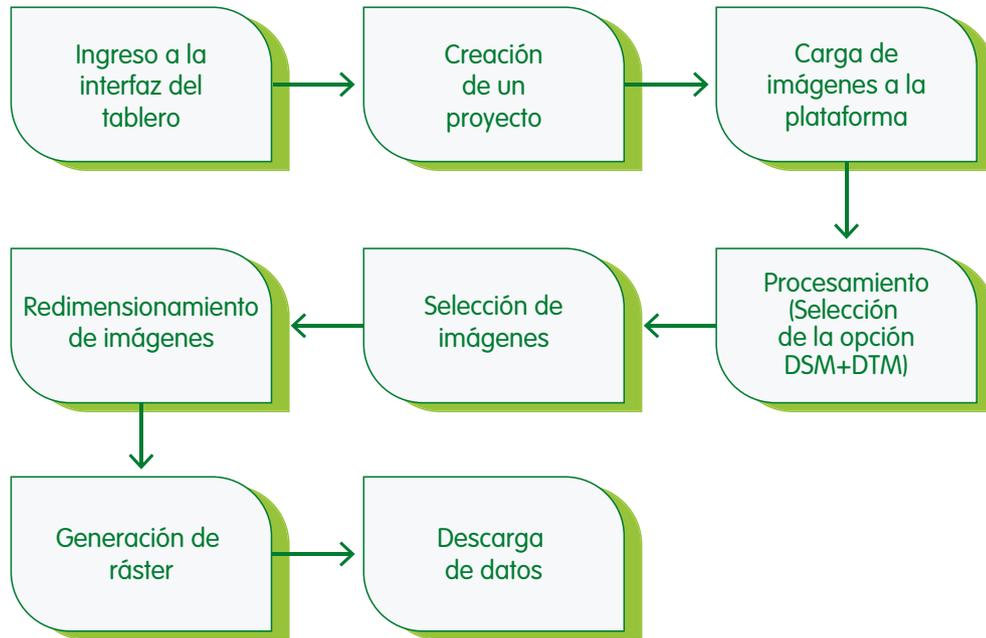


Tabla 4. Flujo del proceso realizado en WebODM.

El tiempo de procesamiento fue de 1 hora 36 minutos y trece segundos, en la figura 5 se muestra el resumen del proceso ejecutado:

Processing Summary	
Reconstructed Images	297 over 297 shots (110.0%)
Reconstructes Points (Sparse)	158886 over 165054 points (96.3%)
Reconstructes Points (Dense)	8,224,176 points
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2,3 cms
Reconstructed Components	1 component
Detected Features	8.713 features
Reconstructed Features	1,520 features
Geographic Reference	GPS
GPS errors	1.41 meters

Figura 5. Resumen de finalización del proceso⁴.

Luego del procesamiento de las imágenes, por defecto la plataforma genera una ortofoto que



Figura 6. Ortofotografía de la zona de estudio.



Figura 8. Modelo digital del terreno (DTM).

se muestra en la figura 6. Para posteriormente extraer el DSM figura 7 y DMT figura 8.

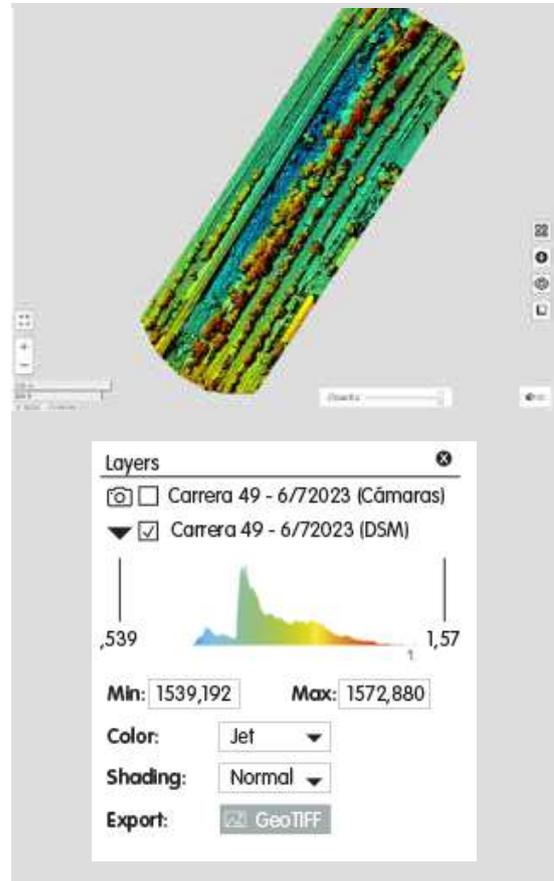


Figura 7. Modelo Digital de Superficie (DSM).

2.4 Cálculo de alturas de vegetación

Para lograr el cálculo de alturas de la vegetación se generó un modelo de elevación, utilizando la calculadora ráster. Para esto, se utilizaron las

capas DTM y DSM, en donde se realizó una resta, a partir del modelo de superficie. El cual dio como resultado el siguiente ráster, en el que se definieron las alturas entre $-15,8682$ y $18,764893$ metros.

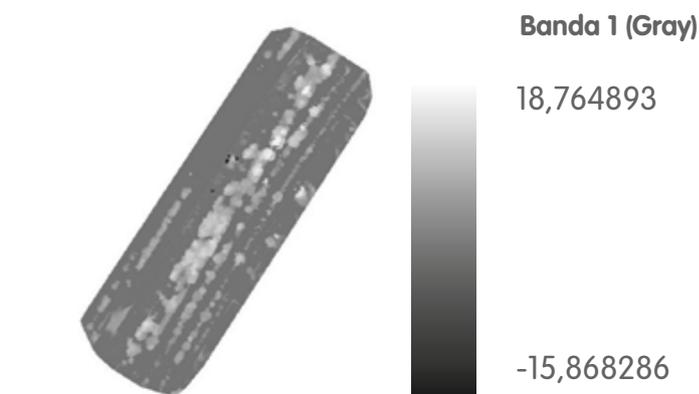


Figura 9. Ráster de altura de vegetación.

3. Resultados

Con el ráster resultante de la altura de la vegetación, se procedió a realizar una reclasificación. Para esto se tomó la altura indicada en el RETIE de 6,1 m para las líneas de transmisión de 110 kv ubicadas a una altitud menor o igual a los 1000 msnm, como distancia mínima de vegetación por debajo de la línea. Y ya que a partir de la altitud se debe aumentar en un factor del 3% por cada 300 metros de altitud adicional y considerando que el área de estudio se encuentra entre 1521 y 1525 msnm, la distancia vertical mínima aumenta aproximadamente 0,36 metros, es decir, se debe considerar 6,46 metros como distancia mínima vertical de seguridad.

Sin embargo, se decide iniciar controles de los individuos arbóreos a una altura inferior a esta para así contar con un margen de error y tiempo de programación de mantenimientos. Además, se considera la clasificación manejada en EPM para priorizar el mantenimiento de la vegetación la cual va de 1 a 3, siendo 1, la de atención inmediata, la 2 intervención a corto plazo y la 3, las intervenciones a mediano plazo.

Con esta información se procede a definir las categorías para la reclasificación de las alturas según la prioridad de los mantenimientos a la vegetación:

ID	Rango de Altura (m)	Observación
4	-15.8682 a 0	Para posteriormente descartar estas alturas que no son de interés.
3	0 a 3	Para definir posibles individuos arbustivos que sea idóneos para mantenerse dentro de la zona de servidumbre.
2	3 a 5	Vegetación que ya requiere mantenimiento por poda.
1	> a 5	Vegetación de porte arbóreo la cual supera las alturas de seguridad y deben ser intervenidas con prioridad alta.

Tabla 4. Rangos de reclasificación.

Del modelo generado en la reclasificación, se resaltan los ID 1 y 2, para identificar la vegetación priorizada que requiere ser intervenida. En la figura 10 se aprecia el área de estudio con la reclasificación siendo 1 en color rojo los individuos por encima de la altura de seguridad y 2 color amarillo individuos que requieren mantenimiento.

Además, se realiza el montaje de la capa vectorial con las torres y el trazado de los conductores, suministrada por EPM, generando un buffer de la zona de servidumbre (líneas en color azul), en donde aprecian mejor los individuos arbóreos presentes en la franja de seguridad.

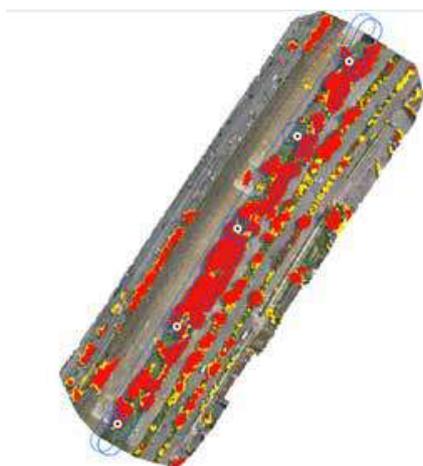


Figura 10. Individuos arbóreos, torres y zona de servidumbre.

Se puede evidenciar que casi toda la vegetación, que se encuentra dentro de la franja de seguridad está en la categoría de priorización 1 (zona roja). Esto quiere decir que su altura, no está cumpliendo con las distancias verticales máximas de seguridad contempladas en la categorización, por lo que el riesgo de presentar fallas asociadas a la vegetación aumenta.

Se procedió a realizar visitas a campo en donde se realizó la medición de alturas a algunos individuos arbóreos, a través de hipsómetro, con el fin que sirvieran de testigo, para corroborar la exactitud del modelo en la determinación de las alturas por lo que se tomaron tres individuos arbóreos representativos y de fácil identificación y medición, como controles de altura.

ID individuo arbóreo	Altura Calculada (m)	Altura Hipsómetro (m)
Cámbulo	10.80	10.68
Ceiba	4.85	4.84
Araucaria	9.8	9.7

Tabla 5. Altura arbórea.

Como se puede apreciar la diferencia entre las alturas es mínima, y es tolerable para la finalidad de lo que se pretende en este estudio.

Otra herramienta usada para ayudar a determinar la efectividad de la metodología realizada fue el aplicativo SAU. Desde la base de datos de este, se descargaron los datos de los individuos arbóreos de la zona de estudio, con el fin de corroborar las intervenciones realizadas en el mantenimiento de la zona de servidumbre, con respecto a la capa de

alturas generadas a partir del procesamiento de las imágenes obtenidas con el UAV.

Para el área de estudio se encontró que hay reportados en el SAU 317 individuos arbóreos desde el año 2015, como se puede apreciar en la figura 11 (puntos color verde). De esa cantidad, solo 22 individuos tienen reportes de intervención realizadas por el mantenimiento de servidumbres, las cuales fueron ejecutadas en el año 2021. La ubicación de los individuos se puede observar en la figura 12 (puntos amarillos).

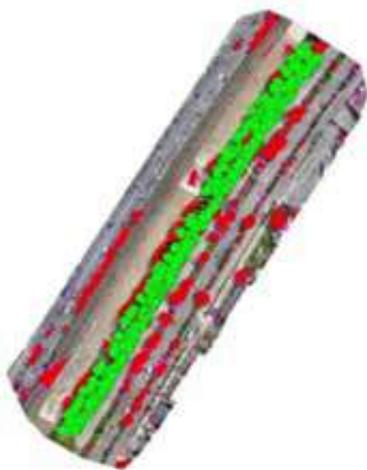


Figura 11. Individuos de la zona de estudio reportados en el SAU para el 2015.

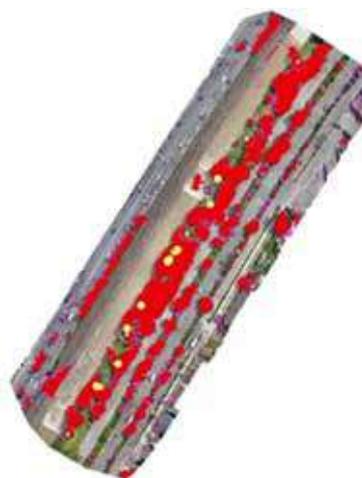


Figura 12. Individuos intervenidos en el 2021.

Esto indica una muy baja intervención con respecto a la categorización de priorización 1 que se usó en el modelo, con lo cual se puede inferir, que la inspección visual desde el suelo presenta muchas falencias al momento de definir que vegetación se debe intervenir oportunamente.

Además de la verificación en campo de las alturas, se realizó una verificación del desplazamiento de una de las torres (torre 28) comparándola con la capa de las torres suministrada por EPM, encontrando un desplazamiento de 2.955 metros. Esta diferencia no se considera tan relevante ya que, el objetivo del proyecto es más robusto debido al alto volumen de las copas de los árboles y la amplitud de las zonas de intervención.

3.1 Comparación con la metodología de EPM

Actualmente en EPM no se cuenta con un procedimiento preciso para el manejo de la vegetación en las franjas de seguridad de las líneas de transmisión. El procedimiento que se realiza es el siguiente:

- Anualmente se programan recorridos por parte de los guarda-líneas de la empresa, si estos observan zonas frondosas que consideran tengan alturas considerables, informan la prioridad del mantenimiento según los tres niveles de priorización ya mencionados (1, la de atención inmediata, 2 intervención a corto plazo y 3, las intervenciones a mediano plazo) al coordinador.

- El coordinador programa, según la prioridad, con el contratista para verificar y hacer mantenimiento de la vegetación.
- El equipo contratista reporta los mantenimientos que realiza al coordinador y es responsable de hacer el reporte en el aplicativo SAU.

Como se puede apreciar este procedimiento es muy subjetivo y no se encuentra estandarizado, por lo que el error humano llega a presentar mucha relevancia. Además de encontrar que en el aplicativo SAU no cuenta con la información al día de los mantenimientos realizados.

La metodología planteada en el trabajo presenta un mejor seguimiento y control de la vegetación en las franjas de servidumbre, ya que, a través del modelo digital, se puede definir con una buena exactitud la altura de la vegetación y estimar con una mayor certeza los individuos arbóreos que están en prioridad 1, que están incumpliendo las distancias verticales de seguridad.

Los vuelos sobre las líneas se podrían realizar cada 6 meses para mejorar la planificación de los mantenimientos y tener información más actualizada para suministrar a los responsables del mantenimiento. Es de resaltar que esta metodología podría ser más eficiente en las zonas donde hay más abundancia de vegetación, ya que es allí donde se pueden presentar los mayores errores humanos a la hora de estimar subjetivamente la altura para priorizar los mantenimientos.

Se debe considerar también los equipos para realizar los vuelos y los equipos de cómputo que sean robustos para soportar el procesamiento de imágenes de alta resolución. El software adecuado para los equipos y procesamiento de imágenes, además, de considerar si son de libre acceso o licenciados; Asimismo, se debe contar con personal capacitado y con disponibilidad.

Conclusiones

- La metodología llevada a cabo en este trabajo presenta buenos resultados para ser aplicados al control de la vegetación en las zonas de servidumbre de las líneas de transmisión, ya que el modelo digital de alturas que se genera maneja precisiones mucho más confiables que los levantamientos realizados en campo dada la subjetividad asociada.
- Al realizar la comparación con la metodología realizada actualmente en EPM se pudo evidenciar que este tipo de tecnologías, brindan una información más precisa y confiable, y aportaría en la gestión del riesgo, minimizando la probabilidad de fallas en la prestación del servicio y la probabilidad de que se presente un accidente por una descarga eléctrica, debido a un acercamiento de la vegetación por superar las distancias mínimas de seguridad.
- Esta metodología podría aplicarse a la par con la forma como se realiza actualmente el trabajo del manteniendo de la servidumbre en EPM, fortaleciendo así el proceso actual y mejorando la eficiencia en la gestión de los activos.
- El aplicativo SAU resulta ser una plataforma muy útil para hacer seguimiento y control, la cual se puede ir fortaleciendo con la información de más individuos arbóreos y la información oportuna de las intervenciones realizadas.
- Finalmente se deben considerar los recursos adicionales para llevar cabo este tipo de metodologías, que como se pudo constatar resultan ser un buen complemento de los procesos actuales realizados en EPM.

Notas al final

¹ Se muestra el área de estudio en la aplicación DJI Pilot.

² Los datos técnicos del equipo se toman del manual de usuario [22].

³ Especificaciones del hipsómetro tomadas del manual de usuario.

(<https://www.appareil.cl/wp-content/uploads/2019/04/Trimble-LaserAce-1000.pdf>)

⁴ Nota: Imagen tomada del aplicativo Web ODM, al final del procesamiento de la información.

Referencias

- Cortés, M., Pérez, J., Rincón, H., y Solano, L. (2017). *Aplicativo Web Sistema Arbol Urbano - Guia para la medicion e ingresode la información*. Secretaria de Medio Ambiente de Medellín. <https://rb.gy/vfyez1>
- DJI. (2021). *Mavic 2 enterprise advance: manual de usuario*. <https://rb.gy/o5i8vs>

Cómo citar este artículo:

Caro, M. y Arroyave, S. (2024). Identificación de vegetación propensa a generar fallas de líneas de transmisión usando UVAS, Modelos digitales de elevación y analítica espacial. *Revista EPM*, (23), 89-101.

Convocatoria para publicar en la Revista EPM

El Comité Editorial de la Revista EPM invita a la postulación de artículos, para las próximas ediciones, en temas relacionados con las líneas temáticas del Grupo EPM y otros contenidos enmarcados en la filosofía de la Revista, orientada a la divulgación y apropiación social del conocimiento. La estructura de los artículos debe tener en cuenta los lineamientos que se presentan en la Guía para Autores Revista EPM.pdf.

Fechas para el envío de los artículos

Edición No. 25 (Ene.-Jun. 2025):

Fecha de inicio de la convocatoria 16 de diciembre de 2024

Fecha límite de recepción 14 de febrero de 2025

Edición No. 26 (Jul.-Dic. 2025):

Fecha de inicio de la convocatoria 06 de mayo de 2025

Fecha límite de recepción 25 de julio de 2025

Recepción de artículos y contacto

Revista EPM

dep01980568@epm.com.co

gestiondeinformacion@fundacionepm.org.co



Estamos ahí.

www.epm.com.co