Revista epm®

Publicación especializada en la gestión de servicios públicos

No. 21 | Enero - Junio 2023

La Planeación
Estratégica en EPM

Análisis de riesgo
en torres de transmisión

Análisis de desempeño
y costo de ciclo de vida
de bombas sumergibles
de turbina vertical

Riego por goteo

energía | gas natural | aguas

Revista
Publicación especializada en la gestión de servicios públicos
epm®
estamos ahí

Revista EPM No.21
Enero - Junio 2023
ISSN: 2145-1524

Grupo Directivo EPM:
Jorge Andrés Carrillo Cardoso
Gerente General
María Cristina Toro Restrepo
Secretaria General
Daniel Arango Ángel
Vicepresidente Ejecutivo Gestión de Negocios
Darío Amar Flórez
Vicepresidente Ejecutivo Nuevos Negocios, Innovación y Tecnología
Wilder Wiler Echavarría Arango
Vicepresidente Ejecutivo Proyectos e Ingeniería
Martha Lucía Durán Ortiz
Vicepresidente Ejecutivo Finanzas Corporativas e Inversiones
Carlos Israel Orduz Aguilar
Vicepresidente Generación Energía
Andrés Moreno Múnera
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
Silvio Triana Castillo
Vicepresidente Comercial (E)
Alejandro Jaramillo Arango
Vicepresidente Crecimiento Negocios
Ana Milena Joya Camacho
Vicepresidente Sostenibilidad y Estrategia
Juliana Carolina Zapata Molina
Vicepresidente Experiencia del Empleado y Soluciones Organizacionales
Carlos Enrique Londoño Amariles
Vicepresidente Suministros y Servicios Compartidos
Jhonatan Villada Palacio
Vicepresidente Asuntos Legales
Mabel R. López Segura
Vicepresidente Comunicación y Relaciones Corporativas
Andrés Felipe Uribe Mesa
Vicepresidente Riesgos
Gustavo Alejandro Gallego Hernández
Vicepresidente Auditoría Corporativa

Edición y coordinación de la Revista EPM:
Luz Beatriz Rodas Guerrero
Dirección Desarrollo del Talento Humano
Evelyn Correa Zabala
Unidad Talento Humano
José Ignacio Murillo Arango
Gerencia Comunicación Corporativa
Paola Andrea Valencia Valencia
Gerencia Identidad Corporativa

Equipo editorial Biblioteca EPM
Amparo Elisa Peña Peña
Dahianna Elisey Moreno Vanegas
Elizabeth Cristina Zuluaga Ramírez
Alejandro Ruiz Bonilla
Stevens Aguirre Pérez
Catalina Cardona Otálvaro
Diana Marcela Ramírez Betancur
Ana Lorena González García
Alejandra Acevedo Sánchez

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

© Copyright: Empresas Públicas de Medellín E.S.P. No está permitida su reproducción por ningún medio impreso, fotostático, electrónico o similar, sin la previa autorización escrita del titular de los derechos reservados. Las opiniones expresadas por los autores en este número corresponden a su posición personal.

Presentación

Hoy los cambios tecnológicos, sociales, económicos y ambientales impactan el sector de los servicios públicos y ello demanda una reflexión profunda sobre la transformación organizacional y cultural orientada al desarrollo de procesos estratégicos dinámicos que respondan de manera adecuada a los desafíos y cambios que plantea el mercado, es así como se inicia esta nueva edición #21 de la Revista EPM, con el artículo *La Planeación Estratégica en EPM* en donde su autor hace una breve reseña histórica sobre la función de la planeación, su evolución de acuerdo con el entorno y cómo ha influido en el desarrollo histórico y en el proceso de crecimiento de EPM.

Los desafíos por la implementación de otras fuentes de energía y la ejecución de prácticas orientadas a la gestión de los riesgos marcan el camino hacia el artículo *Desmantelando mitos de la energía nuclear*, en donde el autor hace un barrido por los principales hechos relacionados con la energía nuclear para derribar los mitos alrededor del tema. en contraste con el tema anterior, el artículo *Análisis de riesgo en torres de transmisión 100 kV y derivadas de su operación* describe la metodología de análisis que incluye y relaciona variables como fenómenos amenazantes, elementos expuestos, vulnerabilidad, área de afectación probable y niveles de riesgo en este tipo de infraestructura lineal.

Hoy el Grupo EPM ha dado un paso importante con la certificación el sistema de gestión de activos de todas las filiales nacionales y casa matriz bajo el estándar ISO 55001 para los negocios de T&D y, en este sentido, en el artículo *Propuesta para la medición del nivel de madurez de la gestión de activos en los negocios certificados bajo la norma ISO 55001 del Grupo EPM* el autor describe la metodología para continuar la senda de la mejora continua y un crecimiento de la gestión de activos, que permita la generación de valor en el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización.

En el artículo *Ingeniería de confiabilidad en etapas tempranas del ciclo de vida de los proyectos* la autora presenta la metodología de Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) la cual ha sido aplicada comúnmente para optimizar las técnicas de mantenimiento correctivo y preventivo; sin embargo, en EPM, el Centro de Excelencia Técnica, consciente de la importancia de la aplicación de estas herramientas de ingeniería en todo el ciclo de vida de los activos, decidió incursionar en su aplicabilidad en las etapas tempranas de los proyectos. En la misma línea, el artículo *Metodología para la desincorporación de activos en redes de distribución: Interacción técnica y financiera* da a conocer una metodología que refleja la interacción entre la parte técnica y financiera, estableciendo la forma de calcular el valor de la proporción del activo razonable para dar de baja en la contabilidad.

Las autoras del artículo *Análisis de desempeño y costo de ciclo de vida de bombas sumergibles de turbina vertical* presentan el impacto de las fallas, reparaciones y planes de mantenimiento en el desempeño de los sistemas mencionados y cómo afectan estos eventos al costo total del ciclo de vida del proyecto.

De otro lado y llevando al lector hacia los desarrollos de la tecnología, el artículo *Oportunidades y desafíos de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos* identifica mediante una revisión de literatura y un

análisis bibliométrico las oportunidades y desafíos para las empresas de servicios públicos, además de proponer soluciones que apunten a la mejora de eficiencia o nuevos modelos de negocio en sector.

Finalmente, no se podía dejar pasar una edición de la presente publicación sin hablar del agua. En el artículo *Riego por goteo, estrategia en el cuidado del agua* el autor aborda el concepto como una de las soluciones para el cuidado del agua ante la posibilidad de desabastecimiento. Con este artículo se pretende dar a conocer la tecnología de riego con una visión global, pero siempre orientado a su aplicación en Colombia.

Comité Editorial Revista EPM

Contenido

La Planeación Estratégica en EPM: breve reseña histórica y lecciones para el futuro
Strategic Planning at EPM: a brief history and lessons for the future
PAG 7

Desmantelando mitos de la energía nuclear
Debunking nuclear power myths
PAG 27

Análisis de riesgo en torres de transmisión ≥ 110 kV y derivadas de su operación bajo el precepto de la gestión del riesgo de desastres
Risk analysis in transmission lines ≥ 110 kV and derivatives of its operation under the precept of disaster risk management
PAG 44

Medición del nivel de madurez de la gestión de activos: una revisión y propuesta para los negocios certificados bajo la norma ISO 55001 del Grupo EPM
Measuring the maturity level of asset management: a review and proposal for EPM Group's ISO 55001 certified businesses
PAG 60

Oportunidades y desafíos de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos: revisión de literatura
Opportunities and challenges of Web 3.0 in the public services sector: literature review
PAG 80

Ingeniería de confiabilidad en etapas tempranas del ciclo de vida de los proyectos
Reliability engineering early in the project life cycle
PAG 100

Metodología para la desincorporación de activos en redes de distribución – Interacción técnica y financiera
Methodology for assets disposal in distribution networks – Technical and financial interaction
PAG 118

Análisis de desempeño y costo de ciclo de vida de bombas sumergibles de turbina vertical
Performance and life cycle cost analysis of vertical turbine submersible pumps
PAG 126

Riego por goteo, estrategia en el cuidado del agua
Drip irrigation, water care strategy
PAG 144

Values
Sum of Jan
Sum of Feb
Sum of Mar
Sum of Apr
Sum of May
Sum of Jun
Sum of Jul
Sum of Aug
Sum of Sep

La Planeación Estratégica en EPM: breve reseña histórica y lecciones para el futuro

Strategic Planning at EPM: a brief history and lessons for the future

Luis Fernando Aristizábal Gil
Gerencia Centros de Excelencia Técnica

luis.aristizabal.gil@epm.com.co

Resumen

La función de planeación ha sido clave en el desarrollo histórico y el crecimiento de EPM. Esta evolucionó de una planeación técnica en un entorno monopólico a diferentes intentos de crear una cultura de *planeación estratégica,* desde mediados de los años noventa, en medio de una cultura racionalista e *ingenieril* predominantes. Dichos intentos se dieron en respuesta a grandes choques normativos y cambios en el mercado de los servicios públicos y propiciaron grandes procesos de transformación organizacional, generalmente acompañados de prestigiosas firmas consultoras. Los resultados obtenidos develan un éxito relativo, entre logros por destacar y asuntos pendientes por concretar, en particular desde el proceso y desde el cambio cultural requerido. Los cambios tecnológicos que impactan hoy al sector de los servicios públicos, en particular el de energía, demandan una reflexión sobre los cambios organizacionales y culturales orientados a desarrollar un proceso estratégico dinámico y que responda de manera adecuada a los desafíos y cambios que plantea el mercado. Una mirada en perspectiva del proceso estratégico y las respuestas dadas desde la estructura en las tres últimas décadas, dejan lecciones que deben servir de reflexión para encaminar los nuevos procesos estratégicos que requiere la organización.

Palabras clave:
EPM, Planeación estratégica, Historia empresarial, Planeación y finanzas.

Keywords:
EPM, Strategic planning, History of organizations, Planning and finance.

Introducción

Esta reseña pretende recorrer las diferentes estructuras y enfoques organizacionales dados a la planeación estratégica en EPM entre 1994 y 2022. Es preciso abordar dos explicaciones para entender esta escogencia. La primera da cuenta de la estrecha relación entre estructura y estrategia, si nos acogemos a los planteamientos de Chandler[1], en su trabajo pionero sobre *Estrategia y Estructura*. Si bien hoy se acepta que en las escuelas de estrategia más racionales como la de la *Planificación*, la estrategia es determinada por la estructura y no a la inversa como suele pensarse, en las escuelas de enfoque sistémico y de aprendizaje se reconoce que ambas interactúan entre sí, en un proceso de realimentación.

También es necesario advertir aquí que la revisión de los ajustes a la estructura no se centrará solamente en la función de *planeación*, sino en la de *finanzas*, en vista de la trascendencia de su actuación coordinada y dados los intentos de integración entre las mismas que se han dado a lo largo del período analizado.

La segunda es sobre la elección del período de análisis, el cual tiene que ver con el momento en que se produjo la profunda reestructuración del sector de los servicios públicos - y del sector eléctrico en particular – con las leyes 142 y 143 de 1994, introduciendo elementos de libre competencia y eliminando barreras de entrada en algunas de las actividades de la cadena de valor. No obstante, se hará un breve recuento histórico de los esquemas de planeación y de finanzas de la era monopólica, para tener un mejor contexto.

Es claro, que antes de dicha reforma estructural las reglas del juego eran de carácter totalmente monopólico y la planeación era por lo tanto un problema, si bien no trivial, eminentemente técnico. Hasta dicha reforma, poco o nada se hablaba en el sector público de planeación estratégica y mucho menos en el sector de los servicios públicos.

El proceso de transformación fue disruptivo al final de la década de los 90 para el sector de las telecomunicaciones y hoy se replica de manera similar – guardadas las proporciones -en el sector energético debido al acelerado cambio tecnológico, demandando de los actores agilidad y claridad en la definición del norte de la organización. Por ello, resulta pertinente revisar la evolución de los esquemas que ha intentado la organización para desarrollar la estrategia empresarial, hasta llegar al estado actual, con un ánimo crítico, con la única pretensión de contribuir a su mejoramiento y de reflexionar sobre cómo debería orientarse el proceso de direccionamiento estratégico en un entorno de cambio tecnológico y social acelerados.

Los orígenes de la Planeación en EPM

Como se mencionó anteriormente, la planeación en la etapa monopólica de los servicios públicos era de carácter técnico. No por eso se puede dar por descontado que se dispusiera de dicha capacidad, en particular, en el sector público. La historia de EPM se remonta a los inicios de la etapa de municipalización de los servicios en la década del 20 del siglo pasado, cuando se emprendieron lo que para la época eran verdaderos *megaproyecto*s, como los casos de Guadalupe (décadas 1920-1930) y posteriormente con Riogrande (décadas de 1940-1950)[2]. El desarrollo de la cadena Nare – Guatapé – Peñol, que sin duda constituyó el megaproyecto más importante de EPM en el siglo XX, se daría ya bajo la estructura del ente autónomo en las décadas de 1960-1970.

Es importante mencionar que dicha capacidad de construcción de grandes proyectos implicó el desarrollo de una capacidad de planeación. De hecho, como lo afirmaría Oscar Baquero Pinillo, primer Gerente General de la empresa, esta debería *planear el futuro con una anticipación no menor a 15 años*[3].

Es interesante examinar la forma como la empresa organizó la función de la planeación técnica en las primeras décadas desde la creación hasta la reforma de los servicios públicos a mediados de la década de los 90. La estructura organizacional inicial se considera como de tipo *ingenieril*[4], con una dupla conformada por la *Gerencia Técnica* y la *Gerencia de Operación*. Sobra decir que la

Gerencia Técnica se encargaba de funciones como diseños, montajes e interventoría de los nuevos proyectos; entre tanto, la Gerencia de Operación se encargaba de la gestión y mantenimiento de los activos construidos para prestar los servicios.

Bajo la Gerencia Técnica se ubicaba la dependencia encargada de la de Planeación, creada desde antes de 1960 y que empezaría a conformar junto con las dependencias de Finanzas y de Jurídica, la denominada *tecnoestructura* planteada por Mintzberg y otros: un grupo de personas pensantes altamente calificadas y dedicadas a apoyar a quienes debían ocuparse de las operaciones del día a día. Como lo dijera el propio Gerente Baquero (López et al, 1998):

> La implantación de este criterio (15 años) dio origen al departamento de planeación, núcleo de profesionales que desde entonces han tenido gran importancia en EEPPM no solamente por la seguridad que han dado a las decisiones de la Gerencia, sino, y no de menor trascendencia, por la continuidad que EEPPM ha podido dar a sus programas de crecimiento. (p. 144)

Es de destacar el hecho de que desde 1969, se configura una especialización de la función de planeación por servicios, con la creación de las unidades de planeación de acueducto, planeación energía, planeación teléfonos y planeación saneamiento hídrico.

Bajo la administración del recordado Gerente Diego Calle Restrepo, en 1976, la Planeación se adscribe a la Gerencia General, dándole un rol de *mirar corporativamente el horizonte de la entidad* y adquiriendo gran preponderancia; en 1977 se crean tres nuevas unidades de planeación: Desarrollo, Asuntos Ambientales y Recursos Naturales.

Durante varias décadas la planeación técnica se encargó de definir el *norte* de la entidad. En un entorno de monopolio y unas exigencias de atención del crecimiento permanente de la demanda, la herramienta que cohesionaba a la organización eran los *Planes Maestros* de cada servicio. Allí se plasmaban los planes de inversión quinquenales, con una proyección extendida a 10 o 15 años, según el caso, y se establecían las denominadas *metas físicas* para el seguimiento de los planes. Correspondía a la División de Finanzas conseguir los fondos necesarios para soportar los planes de inversión.

La planeación centralizada se mantuvo hasta finales de los 90, proporcionando una visión unificada de la empresa y manteniendo un grado de especialidad por servicio; de dicha planeación surgieron los *grandes* proyectos hidroeléctricos como Playas, Guadalupe IV y la cadena del río Porce; se definió la construcción de la planta termoeléctrica de La Sierra, que representó un reto e innovación tecnológica para el momento; se decidió la incursión en el negocio de gas natural por red, la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Fernando y se confeccionaron los planes de desarrollo de la transmisión y distribución y los planes de inversión para los demás servicios.

La función financiera

Ya se había mencionado la importancia que ha tenido la función financiera en el desarrollo de EPM y, en particular, su interacción con la planeación desde la creación del ente autónomo. En relación con su aparición en la estructura organizacional, baste decir que desde 1957 se crean la División de Finanzas (antes División Contabilidad) y el Departamento de Servicios que manejaba las relaciones con los *suscriptores*. La función Financiera jugaría un papel clave en el establecimiento desde sus inicios del denominado *rigor financiero*, basado en los principios de unidad de caja y separación contable, y el control de costos y presupuestal. Inicialmente la dependencia encargada de presupuesto y luego la División de Programación Financiera desde 1976, se encargaban de elaborar las proyecciones

financieras de la entidad y se calculaba el EBITDA por servicio para reportar el estado de las finanzas a los bancos internacionales de fomento.

Un concepto importante para entender el crecimiento que tuvo la empresa el siglo pasado es el del trabajo integrado de las funciones de planeación y de finanzas. La interacción entre estas dos funciones, la centralización de los derechos de decisión de crecimiento e inversión por fuera del ámbito *operativo* o de los servicios, proporcionando un diálogo entre éstos y el *eje de Planeación-Finanzas*, permitió, bajo las condiciones de entorno de la época, desarrollar los grandes proyectos y apalancar el gran crecimiento orgánico de los servicios.

En palabras de un exdirector de Planeación de principios de los 90 (López et al, 1998) la empresa se desarrolló y creció de la mano de la *yunta de Planeación y Finanzas*. Si esta funcionaba y trabajaba armónicamente, se lograría proyectar la empresa en el largo plazo y asegurar su crecimiento exitoso, manteniendo la rigurosidad requerida en la definición de las inversiones.

La reforma de los servicios públicos de 1994 y el surgimiento de la estrategia

En 1994, como se anotó anteriormente, se produjo la gran reforma de los servicios públicos en Colombia, al hilo con las tendencias de *desregulación* de la industria que se dio en el mundo bajo la influencia de los denominados esquemas *neoliberales* impulsados por las reformas de M. Thatcher en Inglaterra y de R. Reagan en los EEUUA; en América Latina el pionero y el modelo a seguir fue Chile. La reforma buscaba introducir eficiencia en la gestión de los servicios públicos, abriendo los diversos sectores a la participación de la iniciativa e inversión privada, introduciendo la competencia donde fuera factible y limitando el rol del Estado a regular los servicios y proteger los derechos de los usuarios.

Las empresas empezaron a responder frente estos cambios de diversas formas. En el caso de EPM, en 1994 se lleva a cabo la separación de actividades en el servicio de energía, al dividir la antigua Gerencia de Energía en las Gerencias de Generación y de Distribución de Energía, y paralelamente se crean las divisiones de Mercadeo Generación y Comercial Distribución para enfrentar la apertura del mercado de grandes clientes y las nuevas reglas del mercado mayorista.

En 1997 se da otro paso audaz *al partir* la Dirección de Planeación y asignarla a cada uno de los negocios. Con ello se buscaba incursionar y motivar la creación de *pensamiento estratégico* en la empresa y preparase para afrontar los abruptos cambios del entorno. Se mantuvo, no obstante, una Planeación Corporativa con el fin de asegurar la integración del proceso. Desde este momento empieza a darse un movimiento hacia la creación del concepto de *centro corporativo*, con efectos en la práctica más de control que de direccionamiento. El centro corporativo busca mantener cierta integración y coherencia de las funciones descentralizadas y en EPM se dan de manera conjunta desde Planeación y Finanzas corporativas, con diferentes grados de integración y trabajo conjunto a lo largo del tiempo.

Cabe anotar que desde 1993 el Gobierno empezó a abrir el mercado de distribución de energía a la competencia y expidió las primeras resoluciones que creaban el *mercado no regulado* de energía para clientes con demanda instalada superior a los 2 MW. El primer paso de EPM en ese año fue el de crear un equipo de trabajo y luego una dependencia adscrita a la Gerencia Financiera, encargada de comercializar la energía a los *grandes clientes*. Se podría afirmar que en lo que se refiere al sector de energía, lo primeras adaptaciones para enfrentar la competencia se dieron con esta dependencia encargada de comercializar la energía a los grandes clientes.

La Gerencia Financiera mantuvo su estructura y sus procesos de planeación financiera, con la División de Programación Financiera creada en 1976 y las respectivas unidades financieras para cada servicio; en 1996 se parte la dependencia de Programación Financiera de Energía, en las respectivas programaciones de Generación y Distribución. Se mantuvo la rigurosidad y por qué no, la rigidez del proceso presupuestal. El vínculo entre la planeación de inversiones y la planeación financiera y presupuestal se daba a través de las proyecciones financieras de cada servicio.

El primer gran cambio estratégico: la reestructuración de Price Waterhouse y Mc-Kinsey en 1997-99

La puesta en marcha de una planeación descentralizada por *negocio* no produjo los efectos esperados de migrar hacia una planeación estratégica. No se generó una cultura de *pensamiento estratégico* y de orientación al cliente, que en medio de una compleja normatividad se seguía viendo como un *suscriptor*. En 1997 se había producido la reforma a la naturaleza jurídica de la empresa, que adoptó la forma de Empresa Industrial y Comercial del Estado, después de un agitado debate político que involucró a diversos estamentos de la ciudad. La administración de la empresa decide entonces contratar una consultoría de *primer nivel*, con el fin de reestructurar la empresa de manera que pudiera responder de manera efectiva a los retos del entorno y proyectarla hacia el futuro.

El resultado más importante de esta transformación fue tal vez la creación del concepto de UEN – Unidad Estratégica de Negocio – reflejadas en la estructura como Gerencias, todas provistas con Unidades de Planeación, que tenían la misión de estudiar el entorno de cada de su negocio y elaborar un *plan estratégico*.

Desde el punto de vista de la estructura financiera, se dio un paso también muy audaz pues por primera vez se dio la descentralización de la función financiera en las UEN, aunque se mantenían centralizadas las finanzas corporativas con funciones de coordinación o de integración de las funciones descentralizadas como eran elaborar el presupuesto y hacer la planeación financiera; funciones como tesorería y contabilidad se mantenían centralizadas y se conservaba el principio de unidad de caja que rigió desde la creación del ente autónomo.

La planeación de los negocios tuvo un gran énfasis en lo estratégico, cayendo la planeación técnica un poco en el olvido. Esto último puede atribuirse en buena parte a la fuerte crisis económica de finales de los 90, que se extendió hasta los primeros años de este siglo. La demanda de energía tuvo un importante decrecimiento y tardaría una década en alcanzar valores de crecimiento similares a los que se tuvieron antes de la crisis económica de 1998.

La transformación que siguió a la consultoría de Price Waterhouse y McKinsey constituyó la primera gran transformación de las tres relevantes que se han producido desde el inicio de la apertura a la *competencia* del sector de los servicios públicos en 1994. Desde el punto de vista de la planeación estratégica el legado fue ambivalente: de un lado, se introdujo una metodología de planificación estratégica rígida, basada en la elaboración de planes rigurosos que se monitoreaban durante todo el año, sin que se diera una verdadera evaluación sobre el posicionamiento o ventajas competitivas efectivas logradas a partir de la ejecución –rezagada o no– de dichos planes.

La referencia principal del consultor fue el trabajo de Morrisey[5], con énfasis en engorrosos procedimientos y pasos encadenados desde la planeación a largo plazo hasta la táctica. Primó pues

la escuela analítica y *deliberada* de la planeación estratégica, es decir la escuela de la Planificación[6]. Al final se impuso la planeación presupuestal, con su carga normativa y desligada de los *planes estratégicos*. Se mantuvo, pues, el consabido rigor financiero a través de la planeación presupuestal y de las proyecciones financieras. Como en la mayoría de las transformaciones, la cultura organizacional se convirtió en una fuerte barrera para el cambio, y como en toda organización burocrática, se asimilaron los cambios sin que se diera un real cambio de fondo: los nuevos procesos se incorporaron en la normatividad y se adoptó el ritual de hacer planes estratégicos sin mucha preocupación por su contenido y, sobre todo, por su resultado.

De otro lado, la consultoría de McKinsey tuvo una gran influencia en el crecimiento y en la estrategia de la empresa en el período 1998-2005. Esta firma propuso metodologías y esquemas de *planeación estratégica* un poco menos formales que los planes basados en la citada metodología de Morrisey[7]. Introdujo herramientas importantes como la denominada Estructura – Costo – Desempeño, utilizada durante varios años para analizar el entorno y la competencia. De otra parte, instituyó la metodología de *Creación de Valor o de Valor Económico Agregado* – EVA, desarrollando las herramientas y la capacidad de elaborar los árboles de rentabilidad históricos de los negocios y su proyección futura, como insumo clave para idear y evaluar estrategias. Desafortunadamente, esta disciplina se mantuvo solo por unos años y representó una valiosa oportunidad de integrar la estrategia con las finanzas, proporcionando además un buen entendimiento de la situación financiera de cada negocio.

El segundo importante aporte de McKinsey fue la recomendación de diseñar una estrategia de crecimiento inorgánica, a partir de fusiones y/o adquisiciones, tanto en el ámbito nacional como internacional. Esta estrategia fue ejecutada con éxito, por lo menos desde la perspectiva de la *compra*, iniciándose en el año 2000 y consolidando las principales adquisiciones de empresas de energía –y en menor escala de Aguas– a nivel nacional entre los años 2000 y 2009 e iniciando una estrategia de expansión internacional entre 2010 y 2015. Dicho mandato estuvo acompañado de la creación en cada gerencia de UEN de Subgerencias de Nuevos Negocios (luego denominadas de *Crecimiento*), función que se ha mantenido visible en la estructura organizacional a través de los cambios posteriores.

Como resultado de esta estrategia, en el año 2000 se adquiere el control de la EADE (distribuidora regional de Antioquia); en 2002 se crea Aguas de Bogotá que luego se convertiría en Aguas Nacionales; en 2003 se adquieren las acciones mayoritarias de las distribuidoras eléctricas CHEC y EDEQ del eje cafetero; entre 2006 y 2007 se llega como socio a las empresas regionales de Aguas de Urabá y Aguas de Occidente y en 2009 se compran las empresas de distribución eléctrica CENS y ESSA que prestan el servicio en los departamentos de Norte de Santander y Santander, respectivamente. Entre 2010 y 2011 la empresa consolida su entrada en el mercado centroamericano de energía, primero con la adquisición del *holding* DECA II y sus filiales en Guatemala en 2010 y adquiriendo luego en 2011 las empresas DELSUR en El Salvador y ENSA en Panamá. En 2013 se adquiere el proyecto de generación eólica Parque Los Cururos en Chile y la empresa TICSA en México, experta en plantas de tratamiento de aguas residuales y se crea EPM México. En 2015 se materializa la adquisición de la empresa Aguas de Antofagasta en Chile. La inversión internacional superó los US$2.500 MM.

Es bueno recordar que desde 2003 se inició la expansión internacional de EPM a través del negocio de Generación, al definir la construcción de la central hidroeléctrica de Bonyic en Panamá, con una capacidad de 31,8 MW. Esto significó una apuesta arriesgada como se evidenció en los retrasos y sobre costos que enfrentó este proyecto.

Las adquisiciones más recientes se dieron en 2017 con la compra de EPRio, empresa que presta el servicio de acueducto y saneamiento en el municipio de Rionegro, en el oriente cercano, a unos

28.000 clientes. En 2020 se adjudica la compra de las acciones de la empresa CaribeMar a EPM, hoy AFINIA, permitiendo la llegada del Grupo a 1,5 millones de clientes de la costa caribe, distribuidos en cuatro Departamentos.

Esta estrategia permitió a EPM convertirse en un Grupo Empresarial, casi de manera inadvertida, consolidándose como la empresa de servicios públicos más grande del país y alcanzando, en el sector de distribución de energía, más de 9 millones de usuarios en todos los servicios y una población atendida del orden de 30 millones de personas. Cabe destacar que las dos últimas grandes transformaciones emanadas de las grandes consultorías que las promovieron estuvieron enfocadas a proponer esquemas de organización, gestión y gobierno del grupo empresarial, asunto que aún presenta altibajos y se puede afirmar que aún está pendiente de resolver.

Finalmente, desde el punto de vista competitivo, además de corregir importantes rezagos tarifarios, sugirió adoptar la denominada estrategia de *empaquetamiento* de servicios, aprovechando la sinergia natural de todos contar con la posibilidad de llegar al cliente con todos los servicios. No obstante, en parte por ser una estrategia definida *desde adentro* y por quedarse en un planteamiento general, no logró una materialización efectiva diferente de sinergias con las que se contaba desde hacía muchos años, como era el disponer para todos los usuarios de una *factura unificada servicios.*

Otro concepto importante desde la estructura y los roles que dejó la consultoría fue la creación del centro corporativo que estaba a cargo de las Gerencias de Planeación Corporativa y de Finanzas Corporativas, tenían la función de agregar valor a los negocios, promoviendo la captura de sinergias y el impulso a las estrategias competitivas; sin embargo, dada la cultura imperante, su rol se orientó más al control financiero de los negocios que al direccionamiento estratégico propiamente dicho.

La integración de Planeación y de Finanzas

En un esfuerzo por *integrar desde la raíz* la planeación estratégica y la financiera, en 1999 se fusionan las dos Gerencias de Planeación y de Finanzas corporativas en una Gerencia de Planeación y Finanzas; esta estructura operó hasta finales de 2001. El resultado más positivo de que se le atribuye fue el de una mayor integración de las inversiones estratégicas y de crecimiento a largo plazo en las proyecciones financieras de los negocios y la creación de una cultura, aunque más bien fugaz como se anotó anteriormente de evaluación de la *creación de valor económico* en la organización, a partir de las estrategias propuestas; no obstante, podría afirmarse que siguió primando una visión *planificadora* y presupuestal de la estrategia competitiva.

De Planeación y Finanzas a Finanzas y Planeación

En 2001 se decide fortalecer la planeación financiera de la empresa y se elimina la anterior Gerencia de Planeación y Finanzas creada en 1999, para dar paso a la Gerencia de Finanzas Institucionales y Planeación Corporativa, tras un breve paso por una estructura dotada de una Dirección Financiera y una Gerencia de Planeación Corporativa. En la nueva Gerencia se mantuvo una Subgerencia de Planeación Corporativa. Con este cambio se buscaba fortalecer el análisis del portafolio de inversiones en filiales que ya mostraban un crecimiento importante, en particular en el negocio de telecomunicaciones. Desde el punto de vista de la planeación estratégica y financiera no se

produjeron mayores cambios. Los negocios seguían a cargo de establecer la estrategia competitiva. Como principal decisión de esta época se destaca la escisión del negocio de telecomunicaciones (2006), lo que de alguna manera muestra las limitaciones del modelo para preparar la empresa para los retos del entorno y la competencia *agresiva* y la construcción del parque eólico de Jepírachi en la Guajira, de 19,5 MW de capacidad y que constituyó una verdadera innovación para esa época en el país.

En 2008 se separan de nuevo la planeación financiera y estratégica en la estructura organizacional, creando las Gerencias de Planeación Institucional y la Gerencia de Finanzas Institucionales. La primera enfocó sus esfuerzos en crear un banco de proyectos con un esquema de reporte unificado, en un esfuerzo por compensar la variedad de prácticas de proyectos y la dispersión de información asociada a los grados de libertad y *moméntum* que venían adquiriendo los negocios en la definición de sus decisiones de inversión y de crecimiento. Se implantó un cuadro de mando de indicadores para monitorear el avance de la estrategia corporativa en las cuatro dimensiones típicas, a saber: Aprendizaje (o Gente), Procesos, Mercado y Clientes y Financiera. Se inicia la planeación de la nueva transformación que se denominó EPM Sin Fronteras. Se definió la MEGA (Meta Grande y Ambiciosa) a 10 años consistente en alcanzar ingresos para el Grupo por $5.000 MM en 2015.

Los negocios seguían formulando su estrategia competitiva expresada básicamente en una sentencia general, aplicando metodologías derivadas de las consultorías más recientes y declarando alcanzar importantes posiciones o reconocimientos de su negocio en la región. Desafortunadamente, estas declaraciones no estuvieron acompañadas de un esquema de evaluación (es decir, sobre cómo se mediría el logro o avance hacia la visión declarada), que permitieran su verificación o ajuste de las acciones. Es de

anotar que los indicadores definidos en el Cuadro de Mando Integral, no tenían una alineación clara con dichas declaraciones, excepto por algunas relaciones indirectas.

Por su parte la Finanzas Institucionales retoman sus funciones de planeación financiera y presupuestal y de orientación de la gestión financiera del grupo empresarial, con el análisis de la situación financiera de largo plazo de los negocios *internos* de EPM y de las inversiones externas o filiales. El ciclo presupuestal, que más que una proyección de nuevas estrategias es una extrapolación de los flujos de los años anteriores, termina dominando a las estrategias de los negocios.

Por último, es necesario agregar que desde 1999 se creó una Gerencia de Gestión de Inversiones compuesta por un equipo de altas calidades profesionales y que tuvo mucho mayor éxito en la gestión del portafolio, mediante una estrecha coordinación y priorización de las intervenciones internas, definió lineamientos para la actuación coordinada en las Juntas Directivas, seguimiento estricto de los planes de negocio y resultados financieros, en conjunto con la Gerencia de Finanzas Institucionales y Planeación Corporativa. Este fue quizás el mejor momento en la gestión del portafolio de inversiones desde que se conformó el Grupo Empresarial.

La transformación de Teletraining/Breakthrough

En 2004 se contrata una nueva consultoría estratégica, esta vez con la firma Breakthrough, entonces Teletraining Ltda. El objetivo era el de revisar no solo la estrategia corporativa sino los esquemas de gobierno del grupo empresarial, que como se dijo, venía experimentando un crecimiento importante en el país. En general, se tuvo mucho éxito en la evaluación y en la compra de empresas, pero mucho menos cuando de materializar los planes de negocio se trataba; entre las dificultades de integración se encontraban las barreras culturales y la falta de coordinación y cierto atropellamiento con el que las innumerables dependencias de la matriz interactuaban desde sus procesos con las nuevas filiales.

Entre los aspectos a destacar de esta asesoría se encuentran los siguientes. En primer lugar, se sacuden los paradigmas predominantes respecto de que estrategia competitiva se podía plasmar en planes estratégicos rígidos. La visión propuesta fue la de una estrategia construida a partir de unos recursos diferenciados y únicos que permitían construir un mapa de actividades o *ADN* de los negocios, también único. Como aporte valioso de este concepto fue la identificación de una capacidad *existente y diferenciada*, relacionada con la elaboración de modelos altamente sofisticados del mercado de energía y de producir análisis avanzados; dicha capacidad fue agrupada en una dependencia y puesta al servicio de toda GEN de Energía y de la organización, no sin vencer gran resistencia interna. De alguna manera, se crea entonces desde esa época un Centro de Excelencia de Conocimiento especializado y que logró mantenerse por largo tiempo.

Sobre el concepto de estrategia se promulgaba la necesidad de hacer *elecciones y renuncias*. No obstante, la metodología *estelar* propuesta fue la de las fuerzas competitivas de M. Porter[8], de moda en ese momento, lo cual no dejaba de ser paradójico pues se trataba de llegar a la estrategia a partir de meticulosos análisis de información del entorno y definiciones de *posicionamientos* que prometían el éxito. Es justo matizar el anterior comentario: el consultor utilizó el concepto de mapa de actividades que había sido propuesto también por M. Porter, en su clásico artículo sobre *¿Qué es la Estrategia?*[9] que no era muy conocido y divulgado en nuestro medio. Su propuesta representaba un movimiento del pensamiento estratégico de la escuela del *posicionamiento*, hacia la escuela de aprendizaje, basada en los recursos internos o capacidades distintivas, que estuvo muy en boga a fines de los años 90. Si bien el consultor propuso

algunos esquemas de mapas de actividades por negocio, denominados los ADN organizacionales, éstos tuvieron poco impacto en cuanto a su materialización y se careció de un plan para ponerlos en funcionamiento de manera deliberada.

Uno de los conceptos importantes de esta asesoría fue sin duda el concepto de Grupo Estratégico de Negocios (GEN): se trataba de extender la visión de la anterior UEN y desarrollar una mirada integral del negocio más allá de la propia matriz, incluyendo las filiales; se delegaba entonces el control y la gestión del portafolio de las filiales al respectivo líder del Grupo Estratégico de Negocios. Se conceptualizaron, en consecuencia, tres GEN: Telecomunicaciones[10], Energía y Aguas. Lo anterior se refleja en la estructura organizacional en las nuevas Direcciones de Energía y de Aguas (e inicialmente en la Dirección de Telecomunicaciones). Estas liderarían los negocios de la propia EPM, la gestión de portafolio de inversiones y la estrategia de crecimiento del grupo estratégico respectivo.

A partir de esta nueva estructura y estrategia, se inicia y consolida el crecimiento del Grupo EPM a nivel internacional, se incursiona en el sector de la transmisión nacional y se define la construcción del proyecto de generación eléctrica Ituango de 2.400 MW de capacidad y de la Planta de Tratamiento de aguas residuales Aguas Claras en Bello, con una capacidad promedio de hasta 5 m^3/s.

La función de planeación después de esta consultoría quedó a cargo de las Direcciones de los GEN y se mantuvieron las metodologías tradicionales, actualizadas algunas y con nombres nuevos otras, partiendo de una revisión formal del entorno, los clásicos análisis DOFA y si bien se abandonó el riguroso formato de planes detallados de principios de los 2000, se dio paso a los denominados Planes de Negocio o de Empresa. No se dio continuidad a la construcción de mapas de actividades o ADN de los negocios ni se desarrolló la capacidad para hacerlo.

La función financiera mantuvo el esquema centralizado-descentralizado, con una Dirección de Finanzas Corporativas que tenía el rol de integrar unas funciones financieras asignadas a los GEN, es decir, a las Direcciones de Negocios. La interacción entre los roles de planeación y finanzas no cambió mucho, con la primera concentrada en desarrollar el pensamiento estratégico *convencional*, desarrollar e implantar cuadros de indicadores y definir el banco de proyectos de la empresa. La interacción con las planeaciones de los GEN fue más bien débil y los negocios aprovecharon sus *derechos de decisión* para definir su estrategia competitiva, también basada en las premisas de la escuela de diseño, y las finanzas tanto de las GEN como corporativa más orientadas al control financiero. Se destaca el avance en esta época, de una mayor formalización del seguimiento al desempeño financiero de las diferentes filiales del Grupo.

Cabe mencionar que tanto la consultoría de Price Waterhouse y McKinsey en 1999 y la de *Breakthrough* en 2004 señalaron la importancia de mantener - o alcanzar - la eficiencia operativa como base para expandir los negocios. En palabras de McKinsey (1999), la eficiencia de los *negocios base* era el argumento para ganarse el derecho a crecer. En el lenguaje de Breakthrough (2004), para todos los negocios de Energía y Aguas, plantea la excelencia operacional como la *disciplina de mercado* recomendada. Al fin y al cabo, para Porter (1996) la excelencia operativa era una condición *necesaria pero no suficiente* de los negocios. Esto es lo que en el lenguaje de la estrategia de crecimiento se conoce también, en términos menos amigables, como *el derecho a crecer.*

En la segunda mitad de la década 2000-2010, la estrategia de la empresa empieza a dar un vuelco importante hacia esquemas que comportan una visión más *integral*. En 2007 se define la política de responsabilidad social empresarial (RSE), se define un propósito empresarial que incluía elementos de sostenibilidad y permanencia en el tiempo, de

creación de valor para todos los grupos de interés y acotando la RSE como los "compromisos de origen obligatorio o voluntario que EPM asume en relación con sus grupos de interés, conservando como objetivo central la sostenibilidad" (EPM, 2007, p.27)

Se declara también el objetivo de desarrollar territorios *sostenibles y competitivos*. Este viraje estratégico se enmarca en las escuelas o perspectivas más de corte sistémico, que se caracteriza entre otras por definir una estrategia *multiobjetivos* y en aceptar que la estrategia es más un patrón que emerge o se construye en el día a partir del aprendizaje, la cultura, los ejercicios de poder y teniendo en cuenta el contexto social y económico local. Esta tendencia está en línea con las últimas tendencias *estratégicas* de la época.

El programa EPM Sin Fronteras

En 2012 y 2013 se desarrolla la última gran transformación empresarial, conocida como el programa EPM Sin Fronteras (EPMSF), surge como una necesidad de optimizar la gestión de las empresas de energía del Grupo, pues la Comisión de Regulación de Energía y Gas venía de expedir una normatividad que unificaba las tarifas de energía en las áreas de servicio de las filiales de

EPM; posteriormente, el programa adquiere un alcance mayor abarcando al resto de sectores de servicios. El nombre del programa no era casual, pues buscaba un grado de integración de las empresas del grupo que *borrara* las fronteras entre matriz y filiales.

Para llevar a cabo la transformación se contrata al consultor Booz-Allen, firma que posteriormente cambió su nombre al de Strategy&. Esta es sin duda una de las transformaciones más impactantes y retadoras que ha tenido EPM en su historia. La estructura y estrategia recomendadas por Strategy& se implantó desde finales de 2013, con resultados variables frente a lo esperado.

En cuanto a la estructura organizacional, se pasó de una configuración por negocios (o por Grupo Estratégico de Negocio) a una estructura *netamente funcional*, con el propósito de desarrollar y concentrar capacidades, acordes a las necesidades de cada función. En relación con la función financiera se volvió entonces a un esquema totalmente centralizado sin conservar siquiera la especialidad por negocios que se implantó incluso en la década de los 90. Esto incrementó no solo el poder de finanzas corporativas, sino que enfatizó la orientación de la función financiera hacia el control y fiscalización, incrementando la normatividad interna y rompiendo un poco el diálogo con los negocios.

A diferencia de la función financiera, la planeación se mantuvo en los diferentes negocios con un rol preponderante en su desarrollo: la planeación es el integrador e interlocutor al interior de cada negocio y hacia el resto de la organización, en los temas de estrategia, presupuestación y proyecciones financieras, necesidades y planes de inversiones, necesidades y planes de operación y mantenimiento, etc. Su rol es central y se requiere del desarrollo de las capacidades apropiadas y suficientes para ejercer tan importante misión. La planeación de los negocios tiene una responsabilidad técnica al definir las necesidades de inversión del sistema y estratégica, pues es el responsable de definir y actualizar la estrategia competitiva y elaborar el plan de negocios respectivo.

Por su parte la Planeación Corporativa (inicialmente la Vicepresidencia de Estrategia y Crecimiento), tiene a su cargo desarrollar el direccionamiento estratégico de la empresa, compuesto por: el propósito, la identidad o los principios y valores, los resultados esperados y la forma como se lograrán (estrategia corporativa, estrategias competitivas y de soporte). Las estrategias competitivas y de soporte consisten en breves enunciados que engloban el foco estratégico que servirá de guía a cada una de los negocios y áreas de soporte.

Es importante mencionar que, desde finales de la década anterior, los objetivos empresariales han migrado de un único objetivo de tipo financiero (expresado en ingresos, EBITDA, valor económico agregado u otro) a varios objetivos que den cuenta de los diferentes grupos de interés y que muestren una inserción en un contexto social más amplio. Esto obedece a su vez a la redefinición del propósito empresarial más allá del propio mercado o del producto de la empresa, con alcances altruistas que proporcionen sentido de pertenencia a empleados y afiliación de todos los grupos de interés en general. Este giro en la concepción de la estrategia respondería a lo que Richard Whittington llama la *escuela sistémica*: se plantean múltiples objetivos y la estrategia se sigue construyendo a partir de un proceso deliberado. Para Whittington (2002), la visión estratégica *sistémica* se concibe más como un esquema de cooperación que de competencia; presume un rol paternalista del Estado y una concepción comunitaria de las relaciones entre directivos y trabajadores; la estrategia y los resultados deben *ponerse en contexto*. En consecuencia, empiezan a aparecer MEGAS de tipo social y ambiental, al lado de la MEGA netamente *financiera*; alineación y contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, contribución a mitigar los efectos del cambio climático[11], etc. Una explicación puede ser que al menos los directivos han sentido la influencia de las teorías de Otto Scharmer que se han venido divulgando en los últimos años en los *círculos de conversación*, de actuar con visión de construir y actuar en ecosistemas mayores que nuestra propia organización.

Un concepto importante de la estructura adoptada desde el programa EPMSF lo constituye la triada de Vicepresidencias Ejecutivas de Negocio, Proyectos e Ingeniería y Estrategia y Crecimiento. En una estructura funcional, estas vicepresidencias reunían los aspectos relevantes de los anteriores GEN o UEN: la estrategia corporativa como insumo para la estrategia de negocios, las operaciones de los negocios para prestar los servicios, el crecimiento inorgánico, ahora ligado con la estrategia corporativa para asegurar mayor coherencia y asignar adecuadamente los derechos de decisión y el crecimiento orgánico asignado en su ejecución a la Vicepresidencia de Proyectos e Ingeniería.

Como complemento a este núcleo ejecutivo, aparecen las diferentes funciones de soporte asignadas a diferentes vicepresidencias *no ejecutivas*: Suministro y Servicios Compartidos, Finanzas Corporativas, Desarrollo Humano y Capacidades Organizacionales, Comunicación y Relaciones Corporativas, Secretaría General y Auditoría Corporativa.

En relación con el legado estratégico de EPMSF, se comentarán sin entrar en detalle dos grandes aportes de la consultoría: las formas de jugar y las principales iniciativas o proyectos de desarrollo empresarial recomendadas. Estas últimas estaban dirigidas a cerrar una serie de brechas de eficiencia en algunos procesos operativos clave de la organización, sugiriendo que estábamos muy lejos de haber logrado la anhelada *excelencia operacional.*

En cuanto a las formas de jugar o *directrices estratégicas*, se recomendaron las siguientes: *rentabilizador* de negocios, desarrollador de proyectos, comprador inteligente y desarrollador de soluciones. Como puede observarse, se sigue apuntando a objetivos de eficiencia operacional y de crecimiento, enfocado este en el crecimiento internacional.

En relación con las 13 iniciativas empresariales inicialmente propuestas, se destacan la implantación de los siguientes procesos, sistemas o proyectos, según el caso: Proyecto Cadena de Suministro, el de mayor palanca económica, proceso de Gestión de Activos, proceso de Productividad en Campo, proceso y modelo operativo, optimización procesos financieros, presupuesto base cero, proceso planeación integrada, modelo de desarrollo de proyectos y proceso del Centro de Excelencia Técnica, entre otros. Algunas de estas iniciativas se desvanecieron en el tiempo, en la maraña de la normatividad interna o en las barreras culturales y de resistencia al cambio; otras cumplieron total o parcialmente los objetivos. Es importante hacer una evaluación objetiva de los logros alcanzados y de las lecciones aprendidas de la implantación y manejo del cambio de este ambicioso proyecto de transformación que representó el programa de EPMSF.

Se resalta que independiente de lo acertadas que fueran las iniciativas propuestas por EPMSF, una evaluación global –no detallada– de los resultados arroja un balance agridulce. Para citar un solo ejemplo, en el proyecto de más expectativas de valor, el de Cadena de Suministro, no se ha logrado implantar un proceso de contratación ágil, no ha contado con los recursos suficientes, no se ha dado un desarrollo claro de las categorías de bienes y servicios y ha caído en la selva de una reglamentación interna cada vez más compleja y engorrosa, que lo alejan del proceso de clase mundial que se pretendía implantar. Con muchas de las iniciativas ocurrió algo similar o hubo mucho retraso en obtener los resultados previstos.

Por otra parte, el manejo del cambio fue quizás el más débil de todas las transformaciones organizacionales anteriores, dejó vacíos y duplicidades en algunos roles y responsabilidades que aún persisten, dando lugar a falta de claridad y deterioro del clima organizacional.

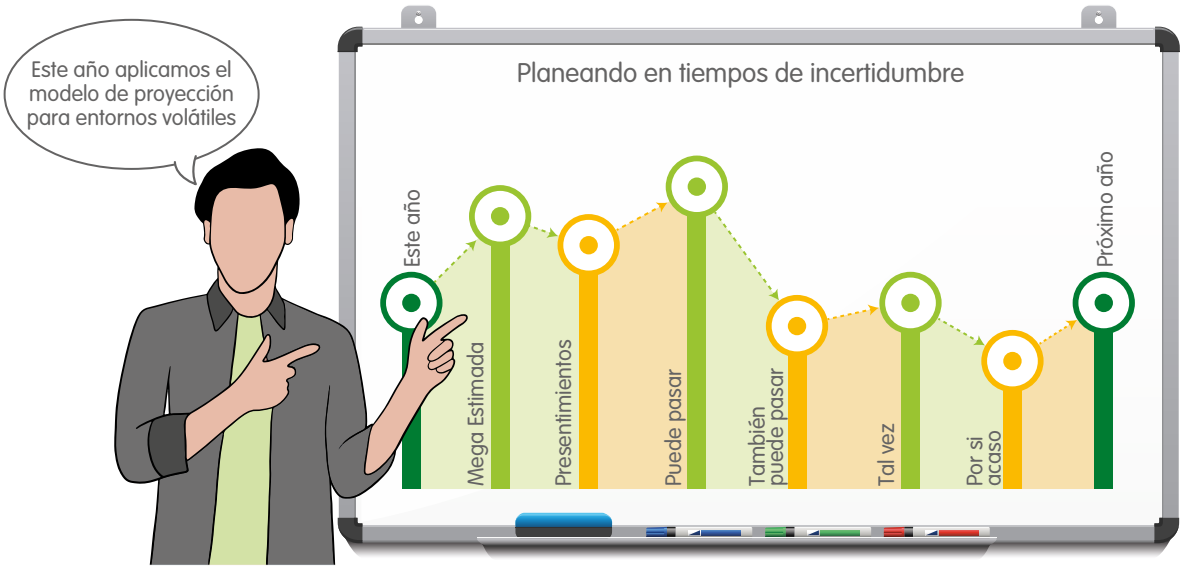


Figura 1. Planeación estratégica.

McKinsey y la Visión 2025

Con el fin de actualizar la visión estratégica planteada por EPMSF, de cara a los grandes cambios en el entorno que se venía dando en todos los negocios, en particular en los de energía, en 2017 se contrata nuevamente a la firma McKinsey.

Como aspectos a resaltar, se destacan los siguientes: se propuso como MEGA triplicar el EBITDA de 2016 a 2025; cerca del 60% proveniente del crecimiento, tanto orgánico (36%) como inorgánico (24%), este último basado en adquisiciones internacionales del negocio de Distribución Energía; finalmente, se propusieron acciones de mejoramiento de eficiencia internas (¡otra vez!) para los negocios y para la gestión de proyectos de infraestructura. Esta última se plasmó en la iniciativa de Mejoramiento de Capacidades en Gestión de Proyectos. Salvo el caso de Generación, las opciones de mejora de eficiencia de los negocios han tenido poco o ningún avance y los propios negocios que habían participado en su identificación con el consultor, las desestimaron al momento de comprometerse con su ejecución.

En 2018 se produjo la emergencia del proyecto hidroeléctrico Ituango y toda la organización se volcó a su solución, se desplazaron iniciativas e inversiones y la estrategia de la Visión 2025 quedó en buena medida varada a mitad de camino.

Reflexiones finales

Lo primero que hay que advertir es que los diferentes abordajes que se dieron en la organización en relación con el concepto y las técnicas para elaborar una estrategia tuvieron gran influencia de las grandes consultorías – y de las firmas consultoras – contratadas a lo largo de los años.

Resulta claro que desde que se dio la reforma de los servicios públicos en 1994, EPM se ha preocupado por contar con una estrategia que le permita adaptarse a las nuevas condiciones del entorno y que le aseguren el éxito de la era del monopolio y la supervivencia en largo plazo.

El enfoque preponderante y en particular en los primeros intentos de desarrollar una estrategia, fue definitivamente el racionalista, o mejor, el perteneciente a las escuelas prescriptivas de Mintzberg o las perspectivas deliberadas de Whittington. Lo anterior no es de sorprender, si se toma en cuenta la cultura normativa e ingenieril que ha caracterizado a la organización desde sus orígenes.

Las escuelas prescriptivas se manifestaron en el desarrollo de la estrategia de EPM en los intricados procesos cíclicos, repetitivos y analíticos, que consignaban la estrategia en rígidos planes de acción y en presupuestos anuales, mediante los cuales se pretendía controlar la realidad del mercado.

No obstante, la organización *informal* se las arregla para crear grupos y proyectos *ad-hoc*, para responder a oportunidades o amenazas del entorno, para hacer aprobar acciones no previstas y rebuscarse los recursos técnicos y financieros. Ningún modelo organizacional se materializa de manera *pura*, sino que termina siendo una mezcla de conceptos, de teoría y de práctica. La planeación estratégica en EPM no ha sido la excepción a esa regla y es producto de una combinación de técnicas y prácticas que provienen y combinan conceptos de diferentes escuelas: la de diseño y planificación, la emergente, de aprendizaje y basada en los recursos y en los últimos años, en la escuela sistémica. Ninguna de ellas llega para desplazar totalmente a las otras, sino que se va conformando una amalgama, quizás única, de técnicas y procesos estratégicos.

La estrategia se materializa, pues, en la práctica mediante lo que realmente hacemos, en una mezcla de lo previamente formulado y en muy buena parte improvisado. Como en la metáfora del alfarero, popularizada por Mintzberg[12], la estrategia simplemente emerge en la acción. Una mirada global frente al éxito en la elaboración y ejecución de una *estrategia ganadora* en EPM desde 1994, deja sinsabores y nos muestra un *vaso medio lleno*. Si bien algunas recomendaciones, en particular, las asociadas a lograr la *excelencia operacional* han mostrado altibajos, podemos afirmar, a juzgar por los resultados financieros y de mercado en el tiempo, que los diferentes negocios han sido relativamente exitosos en materializar sus estrategias competitivas y sus planes de crecimiento basado en adquisiciones. Obviamente, cualquiera puede retar la afirmación de que la confección de la estrategia precedió a dicho éxito.

Hay que reconocer el aporte de la función financiera a los logros estratégicos y a los resultados de la empresa. Las finanzas jugaron un papel importante en conseguir los recursos financieros requeridos para la estrategia de crecimiento, para los planes de inversión y reposición y la operación de la empresa. Lo anterior se logró mediante la diversificación de las fuentes de financiación, estableciendo un diálogo permanente con el sector financiero y generando la confianza necesaria para acceder a los recursos y honrar las obligaciones. Este trabajo es conjunto con la planeación, pues lo primero que pregunta un banquero, antes de mirar los números y las proyecciones financieras, es: ¿y cuál es la estrategia… a largo plazo de tu negocio?

La disciplina presupuestal y la planeación financiera son sin duda necesarios en una organización como EPM, que administra recursos públicos. Tal como se actuó en la era época monopólica, se requiere de un interlocutor crítico que cuestione las estrategias que proponen los negocios. Este rol de *centro corporativo* debe seguir siendo ejercido por la denominada *yunta* de planeación y finanzas corporativas. Pero el rol del centro corporativo no debe quedarse en el necesario *control y fiscalización*, sino que debe trascender a proponer nuevas estrategias aún no vistas por los negocios, identificar sinergias, evaluar si se están logrando los objetivos estratégicos, promover el análisis de las desviaciones y las acciones correctivas; proponer formas de asociación y estrategias para optimizar la estructura y el costo de capital y liderar y fomentar la priorización de la inversiones y propuestas estratégicas de los negocios, entablando un diálogo de igual a igual en el que todos se sientan remando en el mismo barco.

Algunas reflexiones en cuanto a la forma de elaborar la estrategia y a su contenido. En primer lugar, es importante elaborar un marco o direccionamiento estratégico general que permita cohesionar a los empleados y enfocar y priorizar las acciones, tal como se viene haciendo desde hace varios años. En una organización como EPM hay múltiples elecciones e intereses promovidos por empleados, dependencias, proveedores, por la alta dirección y por la administración de turno. Este marco estratégico, además de las típicas definiciones de la *identidad* de la empresa, sus valores y principios y el cambio cultural requerido, debe definir claramente las prioridades (o focos o ejes de gestión como se han denominado recientemente) y los principales resultados esperados en el mediano y largo plazo.

Importante entender y hacer explícitas tanto las elecciones como las renuncias y promover la disciplina organizacional para su cumplimiento. A partir de estas definiciones generales, más o menos estables –cambiantes con la flexibilidad requerida y las realidades de mercado–, se deben insertar los negocios con sus estrategias competitivas, las principales acciones y recursos requeridos y resultados específicos a alcanzar. Lo propio con las áreas de soporte. Estos cursos de acción no consisten en planes de acción detallados a los cuales se les hace un seguimiento estrecho, sino más bien de un acuerdo explícito sobre lo que debe hacerse y lo que no; el centro corporativo–planeación y finanzas, debe asegurar que se dispongan los recursos necesarios para lograr la estrategia. La planeación corporativa tiene además un rol clave en asegurar la alineación de los planes de soporte con el direccionamiento estratégico y las estrategias y resultados esperados de los negocios: los *sueños* de las áreas de soporte deben ser concertados y justificados y deben darse los recursos requeridos y hacerse un seguimiento estrecho a los resultados esperados.

Las estrategias y los supuestos básicos con el margen propio de incertidumbre y las sensibilidades del caso, deben llevarse a las proyecciones financieras para determinar el valor o rango de valor de las estrategias de los negocios a largo plazo y generar el ciclo de realimentación necesario.

Una mención especial merece la denominada *excelencia operacional* (o eficiencia operacional). Esta ha estado presente en las diferentes consultorías como parte importante de las estrategias a implantar, pero, al parecer, sigue siendo una asignatura por aprobar, como lo demuestran algunos eventos importantes en activos e infraestructura crítica y los análisis de falla que deben realizarse. Es de advertir que las acciones de mejora operacional no consisten exclusivamente en *invertir más* en la actualización de las redes y en tecnología; también se requiere continuar y profundizar las herramientas y sistemas de gestión de activos, optimizar los procesos de operación y mantenimiento y asegurar el desarrollo de las competencias requeridas en el personal operativo. Una revisión exhaustiva debe hacerse al rígido modelo de talento humano, propendiendo por una revisión y eliminación de actividades de poca agregación de valor, propiciando la movilidad, y flexibilidad para asignar las personas y a las dependencias que las requieran para ejecutar la estrategia. También debería definirse un plan estructurado de desarrollo y fortalecimiento de capacidades.

Todo lo anterior demanda un gran liderazgo no solo del Gerente General sino de la alta dirección de la empresa. El rol de ésta, más que hacer revisiones detalladas de los *planes de negocio o planes estratégicos*, es el de promover las conversaciones apropiadas sobre el curso de la empresa, sobre su estrategia, los riesgos, amenazas y también de las oportunidades; definir prioridades y evaluar si en el global la empresa está materializando su estrategia y está logrando los grandes objetivos que se propuso. Estas conversaciones deben extenderse a los demás directivos de la organización para generar el entendimiento de lo que se quiere, aclarar las prioridades y renuncias y recibir realimentación de lo que ocurre en el mercado, en el día a día. La pregunta final sería, como diría Alejandro Salazar[13]: ¿estamos teniendo las debidas conversaciones estratégicas?

Notas al final

[1] Chandler, A.D., (1962/1998), Strategy and Structure: Chapters in the History of the American Industrial Enterprise, MIT Press. Chandler plantea que la definición de la estrategia precede a la definición de la estructura organizacional, la cual es "posterior y dependiente" de la primera. Desde entonces acuñó la breve sentencia de que "la estructura sigue a la estrategia", relación que sería revisada más adelante por otros autores como Tom Peters y el propio Henry Mintzberg.

[2] López Díez, J.C., Atanores y Almenaras, 2018. El autor describe en el Cap. 2, los retos que para la época significó la construcción de los proyectos hidroeléctricos de Guadalupe, Riogrande y Guatapé.

[3] Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, EPM 45 Años: Una Mirada Al Pasado, Una Visión de Futuro; 2000, p.41 En el Ap 4., sobre la creación del ente autónomo entre 1954 y 1955, se evidencian los criterios racionalistas (de eficiencia y eficacia de la administración), la autonomía y la importancia de planear con base en bases técnicas sólidas (que luego se conocería como rigor técnico).

[4] López, J.C., Aristizábal, L.F, Arias A., Tobón C., El Modelo Racionalizador de los Servicios Públicos: El Caso de las Empresas Públicas de Medellín, EAFIT, 1998. Para ver más detalle de las diferentes estructuras organizacionales que adoptó la empresa desde su creación en 1955, referirse al Cap. 8 de esta investigación.

[5] Morrisey, G.L., Planeando con Morrisey, Vol. I, II y III, Prentice Hall, 1996. El autor hace énfasis en el proceso de planeación estratégica, como una secuencia basada en el análisis de información interna y del entorno. Si bien el primer tomo es dedicado al pensamiento estratégico, el enfoque dado al interior de la empresa fue el de producir un plan estratégico detallado y hacer el respectivo seguimiento.

[6] El autor propone una muy buena clasificación de las diferentes escuelas de abordaje del proceso estratégico. La Tabla 12.1 presenta un buen resumen al respecto, Mintzberg, H. et al. Safari a la Estrategia, 1999, p. 446-451.

[7] Mckinsey & Co. (1997), Desarrollando Una Estrategia de Negocio Ganadora. Documento interno que plantea la visión de McKinsey, de la época, del concepto de estrategia y de unidad de negocio. Presenta un arsenal variopinto de herramientas y conceptos, incluyendo los conceptos de visión, valor económico, grupos de interés, análisis de Estructura-Conducta y Desempeño y cadena de valor o sistema de negocio.

[8] Porter, M., How Competitive Forces Shape Strategy, Harvard Business Review, https://asiakas.kotisivukone.com/files/laatuoptimi2013.kotisivukone.com/tiedostot/porter_5competitive_forces.pdf, 1979. Porter propone aquí su famoso modelo de las cinco fuerzas que definen las fuentes de la competencia y atractividad de un sector: rivalidad competitiva, poder de los proveedores, poder de los compradores, amenaza de substitutos y amenaza de nuevos entrantes.

[9] Porter, M. What is Strategy? HBR, https://hbr.org/1996/11/what-is-strategy, 1996. Agudo e innovador artículo donde Porter se aparta de la escuela de la planificación y plantea la conexión de la estrategia con la disponibilidad y diseño de capacidades organizacionales distintivas que son la base de la ventaja competitiva.

[10] En 2006 el negocio de Telecomunicaciones fue escindido de EPM, dando origen a una nueva filial.

[11] EPM definió en 2019 ser carbono neutral en 2025, mientras que Colombia definió esa meta para 2050.

[12] Mintzberg, H (1987). Crafting Strategy, HBR, https://hbr.org/1987/07/crafting-strategy, 1987. En este provocador artículo, el autor, plantea que la estrategia como resultado de un proceso racional y analítico es una distorsión que desorienta a las

empresas en el proceso estratégico, y que en contraste, utilizando la metáfora del alfarero, aduce que la estrategia emerge más como el resultado de la habilidad, el involucramiento, la dedicación y el perfeccionamiento a través del dominio de los detalles, etc.

[13] Salazar Yusti, A (2021), La Estrategia Emergente y la Muerte del Plan Estratégico, Camlibro, 2021. El autor es muy crítico del plan estratégico como se desarrolla en muchas empresas, como resultado de un proceso analítico, y se ubica más en la escuela del aprendizaje de Mintzberg o en el modelo evolucionista de Whittington, en el que el proceso estratégico es en esencia emergente y el objetivo es maximizar los beneficios (en los términos del autor, crear valor).

Referencias

- EPM. (2007). *Informe de Responsabilidad Social Empresarial, Informe anual de Gestión de EPM.* https://rb.gy/nic33
- López, J., Aristizábal, L., Arias A. y Tobón C. (1998), *El Modelo Racionalizador de los Servicios Públicos: El Caso de las Empresas Públicas de Medellín*, EAFIT.
- Porter, M. (1996). What Is Strategy?. *Harvard Business Review.* https://rb.gy/d8sr2
- Whittington, R. (2002), *¿Qué es la Estrategia? ¿Realmente Importa?.* Thomson.

Cómo citar este artículo:

Aristizábal, L. (2023). La Planeación Estratégica en EPM: breve reseña histórica y lecciones para el futuro. *Revista EPM*, (21), 7-26.

Desmantelando mitos de la energía nuclear

Debunking nuclear power myths

David Andrés Galeano González
Dirección Regulación Energía, EPM

david.galeano@epm.com.co

Resumen

En el imaginario colectivo la energía nuclear se relaciona con bombas y accidentes nucleares. Sin embargo, hoy existen 440 reactores en 32 países y se están construyendo más de 60. Los reactores nucleares de fisión para la generación eléctrica siguen siendo un campo activo de investigación y desarrollo en todo el mundo. En este artículo se hace un barrido por los principales hechos relacionados con la energía nuclear para desmantelar los mitos alrededor del tema. Al final, se da un contexto para Colombia y se plantea una posible ruta a seguir en el marco de las disposiciones de la Agencia Internacional de Energía Atómica.

Palabras clave:
Generación eléctrica, Energía nuclear, Reactor, Uranio, Residuos.

Keywords:
Electricity generation, Nuclear energy, Reactor, Uranium, Waste.

Introducción

En este artículo no se pretende hacer una introducción teórica sobre las bases y fundamentos de la energía nuclear. Tampoco se dará la idea de que la nucleoelectricidad[1] es la panacea, pues esta energía también tiene sus falencias y hay que darlos a conocer. En las siguientes líneas, se hará un breve repaso por las principales características de esta energía y al final, se evaluarán los fundamentos sobre los cuales se ciernen los mitos y verdades de la energía nuclear.

Si bien existen plantas en decenas de países, la energía nuclear no goza de mucha aceptación social (Montoya, como se citó en Fernández, 2018), y no es un misterio que este tipo de energía tenga mala reputación a nivel mundial. La encuesta realizada por Morning Consult (Jenkins, 2020) revela que 1 de cada 3 adultos piensa que Estados Unidos debería mantener las plantas nucleares actuales, pero no construir nuevas instalaciones, el 16% piensa que Estados Unidos debería mantener operativas las plantas nucleares existentes y construir nuevos reactores y solo el 29% mira la energía nuclear de manera favorable, mientras que el 49% la ve de manera desfavorable. Sin embargo, ¿qué tan bien fundamentado está este resultado?, es algo que se profundizará en el desarrollo del presente texto.

1. ¿En qué consiste la energía nuclear?

La palabra *átomo* es de origen griego que significa *indivisible*. Este concepto proviene del filósofo Demócrito con su discípulo Leucipo y se fundamentaba en la convicción de que la materia podía dividirse hasta un límite, y ese límite era el átomo.

En 1803 Dalton propuso el primer modelo científico del átomo, el cual postulaba que estos no se podían destruir ni dividir, además, que los átomos de un mismo elemento compartían las mismas propiedades entre sí. Por lo tanto, este concepto no tenía en cuenta la posibilidad de partículas subatómicas las cuales fueron propuestas por Thomson en 1904, quien entendió que el átomo podía estar compuesto por cargas positivas y negativas entremezcladas. Sin embargo, fue Rutherford en 1911 quien dio un salto gigante en la teoría nuclear al plantear la idea de que efectivamente los átomos estaban compuestos por partículas positivas (protones) y negativas (electrones), pero que, además, esas partículas negativas circundaban a las positivas que estaban concentradas en el centro, el cual consideró como el *núcleo* del átomo.

Prontamente, en 1911 Bohr replanteó el modelo de Rutherford al considerar que los electrones predichos siguen órbitas estables y cuantizadas. Había nacido así la visión cuántica del átomo, sin embargo, aún no estaba terminado el modelo. Hacía falta una pieza fundamental para terminar de armar el rompecabezas: los neutrones. Es así como regresa a la escena Rutherford en 1920 y propone esta partícula atómica que tiene la particularidad de no tener carga eléctrica pero que le aporta estabilidad al núcleo atómico.

A Schrödinger le debemos el modelo actual del átomo, en el cual, los electrones tienen un comportamiento que emula una onda estacionaria (este modelo concibe los electrones como ondas de materia) y funciona a través de términos probabilísticos para el movimiento de electrones en el espacio (Atkins y Jones, 2012) Sin embargo, el concepto del núcleo atómico, que es en gran medida lo que nos interesa en adelante, se sigue conservando de acuerdo con el modelo de Bohr.

Para nuestros fines particulares, estamos interesados en el átomo de uranio, el cual está compuesto por 92 protones en el núcleo y 92 electrones alrededor de él. Con relación al número de neutrones, esta cantidad puede variar dependiendo del isótopo al que nos refiramos.

A continuación, se introduce el concepto de fisión y de fusión nuclear. La palabra fisión hace referencia a dividir en dos o más partes, mientras que fusión se refiere a unir múltiples partes. Por lo tanto, en adelante, cuando se habla de fisión nuclear, se hace referencia al proceso de romper el núcleo del átomo para generar elementos más livianos, y cuando se hace referencia a fusión nuclear, se habla de la unión de dos o más núcleos atómicos para conformar uno más pesado. Específicamente, en la energía nuclear se habla comúnmente del proceso de fisión nuclear cuando el núcleo atómico del isótopo uranio-235 (que seguiremos nombrando bajo la notación ^{235}U) se divida en múltiples elementos producto del bombardeo con neutrones como se explicará en detalle en la sección 2.

2. Fisión nuclear

Como se detalló en la sección 1, la fisión nuclear consiste en romper el núcleo del átomo para que se conformen elementos más livianos. Sin embargo, de ese rompimiento se expulsan neutrones que golpean otros núcleos y así comienza lo que se conoce como una *reacción en cadena*.

Por razones relacionadas con la estabilidad del núcleo y la posibilidad de fisionarlo fácilmente, se utiliza el isótopo ^{235}U, esto quiere decir, que en el núcleo existen 92 protones y 143 neutrones. Tal núcleo es impactado con un neutrón que genera su división, conformando así, por un breve periodo de tiempo el uranio 236, el cual es altamente inestable y comienza a oscilar hasta que se rompe en dos elementos que en la mayoría de los casos son criptón-89 (^{89}Kr) y bario-144 (^{144}Ba). Producto de esta división se genera calor, rayos gama y otros neutrones que se dirigen hacia otros núcleos.

La idea de dividir el átomo provino de Rutherford, quien es considerado el padre de la física nuclear, no solo por su modelo atómico, sino por las ideas que de él se desprendieron y que alumnos como John Cockcroft y Ernest Walton trataron de materializar. En 1932, estos últimos trataron de hacer la primera división del núcleo atómico bombardeando núcleos de litio con protones y obteniendo dos núcleos de helio. Sin embargo, fue Enrico Fermi quien en 1934 propuso la primera fisión nuclear de átomos pesados como el uranio, idea que se mantiene hasta hoy en los reactores comerciales que se encuentran en operación.

El primer reactor nuclear que se construyó en el mundo se inauguró el 2 de diciembre de 1942, durante la Segunda Guerra Mundial, se conoció como el Chicago Pile 1. Este reactor estaba dedicado a la producción de plutonio para bombas nucleares, y, por lo tanto, todo lo que se hacía en este reactor era secreto militar. No tardó mucho en llegar el primer reactor nuclear para la generación eléctrica, el cual fue inicialmente de carácter experimental. Este reactor fue construido en Tennessee (Estados Unidos), y operó desde 1943 hasta 1963 con una potencia inicial de 4 MW. Por otro lado, los rusos estaban haciendo lo propio con un reactor en Obninsk, el cual fue puesto en operación en el año 1954 con una potencia inicial de 5 MW. Es importante anotar que el reactor ruso fue el primero de su tipo conectado a la red eléctrica. Este reactor fue desmantelado en 2002 después de haber sido repotenciado en 1964 a 100 MW.

3. ¿Cómo funciona una planta nuclear?

El principio de funcionamiento es exactamente igual al de una planta térmica a carbón, gas o petróleo, solo que el combustible son barras de uranio. Todo generador eléctrico necesita de un movimiento relativo de una bobina ante un campo magnético, para que, a partir de la ley de inducción de Faraday, se genere la energía eléctrica. Por lo tanto, la transferencia de energía calórica a energía cinética es un requisito esencial para que un rotor (campo magnético) tenga el movimiento relativo respecto a un estator (bobinas).

Existe una enorme diversidad de reactores nucleares, sin embargo, los dos tipos más comunes son el PWR (Pressurized Water Reactor) y el BWR (Boiling Water Reactor), los cuales representan el 63.2% y el 18.3% de los reactores instalados en el mundo, respectivamente (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2019). El porcentaje restante de reactores se distribuye entre tecnologías que se conocen como GCR (Gas-Cooled Reactor), PHWR (Pressurized Heavy-Water Reactor), LWGR (Light Water Graphite Reactor), FBR (Fast Breeder Reactor), entre otras que se han venido desarrollando e instalando alrededor del mundo.

De forma simplificada, el reactor BWR consiste en un contenedor donde las barras están en contacto con el agua que es calentada por la reacción en cadena y el vapor de esa agua mueve el rotor del generador para producir electricidad. Este tipo de reactores se caracteriza porque el agua está en contacto con el material radiactivo y, por lo tanto, los niveles de radiación en el agua que está en contacto con las piezas móviles del generador son altos. No obstante, al ser un ciclo cerrado, el agua contaminada no sale del reactor nuclear y los seres vivos se mantienen aislados de tal radiación.

Por su parte, el reactor PWR también genera vapor de agua para que esta mueva la turbina, pero a diferencia del BWR el circuito del agua que mueve la turbina y el circuito del agua que tiene contacto con el material combustible son independientes. Así, se produce una transferencia de calor de un circuito a otro y debido a que tiene independientes los circuitos de agua, representan una mayor complejidad, pero a su vez una mayor seguridad frente a fugas de radiación, pues el agua que tiene contacto con las partes móviles (el rotor del generador) no contiene material radiactivo. Es por esto que los reactores PWR son más comunes en el mundo. El tema de la seguridad en las plantas nucleares juega un papel esencial, como mostraremos en la sección 8.

4. Acerca del uranio

Hasta aquí se ha tratado con algún detalle el asunto de la fisión nuclear y de la operación de las plantas, sin embargo, es necesario comprender un poco más acerca del material fisionable que se utiliza, que en la enorme mayoría de plantas nucleares del mundo es ^{235}U. El uranio es el elemento 92 de la tabla periódica, se considera un actínido y pertenece al grupo de las *tierras raras*; además, este es el último elemento abundante de forma natural en la tierra. A partir de este elemento, (los que tienen un número atómico mayor a 92) son de elaboración artificial y son conocidos como transuránicos.

El uranio tiene 6 isótopos conocidos, que van desde el uranio 232 (^{232}U) hasta el uranio 238 (^{238}U). De forma natural, el uranio se encuentra en minerales como la uranitita, la cual es rica en 238U con una proporción del 99.2742%, mientras que el ^{235}U tiene una concentración del 0.7204% y el ^{234}U del 0.0054%. Como hemos dicho antes, el ^{235}U es el que nos interesa para la reacción nuclear en la generación eléctrica. En la sección 5 se verá cómo es el proceso de separación de estos isótopos para obtener el uranio con las cualidades necesarias para ser utilizado en un reactor nuclear.

A diferencia del petróleo, que se encuentra fuertemente localizado en el medio oriente, las minas de uranio están distribuidas en todo el globo terráqueo. Australia es el mayor productor de uranio con un 30% del mercado, seguido por Kazajstán (14%), Canadá (8%), Rusia (8%) y el 40% restante se encuentra en varias decenas de países. Lo anterior evita de cierta manera la concentración de mercado y el riesgo político que se manifiesta con los combustibles fósiles.

Si bien, la enorme mayoría de reactores nucleares en el mundo utilizan ^{235}U, la investigación en el uso de nuevos combustibles nucleares es bastante activa. Por ejemplo, algunos reactores están tratando de utilizar el torio. Este elemento se estima que es tres veces más abundante que el uranio y se encuentra aún mejor distribuido en el planeta. Los principales países productores de torio son India (13%), Brasil (10%), Australia (9%) y Estados Unidos (9%), el 59% restante está distribuido en múltiples países. Si bien hay varios reactores de torio operando, todavía son materia de investigación y desarrollo.

A continuación, se hará un corto análisis del comportamiento del mercado, que, dicho de paso, presenta una notoria menor volatilidad en comparación con los precios de los combustibles fósiles. Recientemente, el precio del uranio se ha visto afectado por eventos puntuales, tales como, la escasez del suministro debido a la inundación de la mina Cigar Lake en Canadá en octubre de 2006 y que generó lo que se llamó la burbuja del uranio debido a que el precio pasó de 15 USD/lb a 138 USD/lb pues en ese entonces se estaban construyendo decenas de plantas nucleares en todo Asia y hubo nerviosismo por un riesgo de desabastecimiento de combustible nuclear. Sin embargo, el abastecimiento se mantuvo por la rápida adecuación de minas en otras regiones de Canadá y Kazajstán bajando el precio rápidamente.

Por su parte, el accidente de Fukushima en 2011 marcó otro hito importante en el precio del uranio pues si bien estaba en descenso después de la burbuja del uranio, este accidente aumentó el precio en casi un 40%, lo cual es inusual en este mercado. No obstante, entre 2011 y 2014 los precios tuvieron un descenso del 70% y hoy se ubican a niveles similares a los previos a la burbuja del uranio con niveles de volatilidad bastante bajos, auspiciado esto por el desarrollo de nuevas tecnologías nucleares que utilizan menor cantidad de uranio además de mejoras sustanciales en los sistemas de seguridad sobre los que profundizaremos en la sección 8.

5. Enriquecimiento del uranio

El porcentaje de ^{235}U en el mineral no alcanza a ser el 1%, por lo tanto, el enriquecimiento del uranio hace referencia al proceso en el cual aumenta de forma artificial la proporción del isótopo ^{235}U en el material fisionable.

Para que una barra de uranio pueda ser utilizada en una central nuclear se requiere una serie de pasos desde la explotación en la mina, pasando por la fabricación del concentrado de uranio, luego el enriquecimiento y la fabricación de las barras a ser utilizadas en el reactor. El costo de la explotación minera representa aproximadamente el 46% y el del enriquecimiento el 38% (Calderón, 2012).

Previo al enriquecimiento, se debe separar el uranio del resto del mineral. A continuación, se describe de forma general el procedimiento (Fernández et al., 2009):

- Inicialmente, se tritura el mineral y se filtra con agua. Luego se tamiza con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para separar el U_3O_8 del resto de mineral.
- Se filtra la mezcla anterior y se extrae el U_3O_8 a partir de un proceso electroquímico.
- Finalmente, se centrifuga y seca el uranio en un horno a 700 °C, con presiones controladas.

Como resultado, se obtiene un concentrado de uranio al 99% que está listo para ser enriquecido. El método más común de enriquecimiento es el centrifugado, aunque existen otros métodos en desarrollo como el de difusión[2].

Para la centrifugación se requiere convertir el uranio obtenido en el paso anterior en hexafluoruro de uranio (UF_6), el cual ingresa de manera gaseosa a una cámara que gira a altas velocidades consiguiendo separar el isótopo 238 del 235 por diferencia de pesos. El ^{238}U es 1.26% más pesado que el ^{235}U y por lo tanto la fuerza centrífuga es la que se encarga de separar ambos isótopos. Este proceso se realiza en cientos de cámaras dispuestas en cascadas.

Una vez se obtiene la separación entre el ^{235}U y el ^{238}U, bajo condiciones controladas de presión y temperatura se transforma el UF_6 en UO_2. En este paso es fundamental conocer el tipo de reactor donde se utilizará el combustible pues de eso dependen las características del UO_2 fabricado.

Por medio de un secado en un horno, se obtienen pastillas que, en términos generales, tienen un diámetro aproximado de 1.5 cm y una altura de 2 cm, pero que equivalen a la misma energía de 810 Kg de carbón, 565 L de petróleo o 480 m^3 de gas (American Nuclear Society [ANS], s.f.). Tales pastillas de uranio son apiladas y encapsuladas en varillas de metal que pueden tener distintos tamaños. Así, hay una diversidad enorme de barras que se diseñan para cada central en específico.

6. Desechos nucleares

Es importante mencionar que, una sola pastilla de uranio tiene tanta energía como cientos de litros de petróleo o casi una tonelada de carbón. En otras palabras, la densidad energética del uranio es tal que, volumétricamente hablando, los residuos no ocupan mayor tamaño.

Para ilustrar lo anterior, en 60 años de desarrollo de la industria nuclear en Estados Unidos se han producido 70.000 toneladas de residuos nucleares (Conca, 2019). Esta cantidad cabría en una cancha de fútbol.

La disposición de los residuos es algo que ya está controlado y existen depósitos especialmente destinados en el mundo para ello (Ewing, 2015). Aunque a la fecha, no ha habido un solo accidente grave con los sitios de almacenamiento de residuos nucleares, la cantidad de residuos almacenados en estos sitios decaerá sustancialmente con el desarrollo de la tecnología y la seguridad asociada, además, las plantas cada vez son más eficientes en el uso de material radiactivo (Horvath y Rachelew, 2016).

Es importante saber que una vez utilizado el combustible no se desecha inmediatamente. Cuando las barras de uranio han agotado su capacidad de generar calor suficiente para mover la turbina, estas son retiradas y repotenciadas por métodos químicos para ser utilizadas nuevamente en otras plantas nucleares o procesos relacionados con materiales radiactivos, como por ejemplo la medicina nuclear, la agricultura, entre otros. Alrededor de esto existe una enorme industria que se encarga de repotenciar y reutilizar el combustible nuclear.

Adicionalmente, existen otros procesos que hoy se están desarrollando como el PUREX (Plutonium Uranium Redox Extraction) (Herbst et al., 2011) en el cual se reutilizan los residuos nucleares por métodos químico-físicos de una planta para ser reprocesados y ser utilizados en la industria médica, de alimentos o en dataciones geológicas. Otro proceso en constante desarrollo es el de transmutación nuclear (Takai y Hagino, 2015), en el cual se acelera el decaimiento de los residuos radioactivos para que el tiempo de almacenamiento se reduzca drásticamente. Así como estos dos procesos para reducir el tiempo de disposición de los residuos nucleares y optimizar su uso, hay otra decena que están siendo desarrollados y que a futuro serán comerciales.

7. Operación de plantas nucleares

Mientras que las plantas térmicas no nucleares tienen costos de operación y mantenimiento inferiores frente a las plantas nucleares, es importante decir en su defensa que el costo del combustible en estas últimas es un 90% menor. La razón es clara: mayor densidad energética en el combustible, alta disponibilidad mundial del recurso y menor especulación e intermediarios.

Si bien el costo nivelado[3] de las plantas nucleares ha venido creciendo en los últimos años por asuntos relacionados a la modernización de su seguridad, es pertinente hacer en este punto un análisis de los pro y contras de las demás fuentes de generación eléctrica que, en principio, podrían tener un costo nivelado menor al nuclear.

Las energías renovables como la eólica y la solar han venido ganando terreno en la generación a gran escala en los últimos años. En el caso de la generación eólica, la intermitencia del recurso y su alto nivel de incertidumbre, hacen que sea una tecnología de respaldo, más no una tecnología que aporte energía firme. Por su parte, la energía solar, tiene aún bajos niveles de eficiencia y para grandes potencias instaladas requieren de enormes terrenos en zonas con poca sombra, es decir, se requiere de sitios muy específicos, generalmente lejos de los grandes centros de consumo. Además, mientras no haya un desarrollo importante a bajo costo del almacenamiento, la energía solar seguirá siendo una fuente para las horas del día, dejando la carga desabastecida en las noches (en grandes parques solares). Así, la energía eólica y la solar son excelentes complementos, pero no bastan para ofrecer energía de base.

Las plantas a gas presentan menores costos nivelados que las plantas nucleares, sin embargo, la disponibilidad local de gas es un problema y la alta volatilidad de los costos del gas natural licuado nos someten a escenarios indeseados de alta incertidumbre. Por otro lado, las plantas de carbón tienen problemas ambientales, además del manejo del combustible también generan rechazos en las regiones donde se instalan. Adicionalmente, el sector eléctrico mundial va en retirada del uso de carbón como combustible para los próximos años, lo cual hará más difícil la consecución de repuestos y los respectivos mantenimientos. Todo lo anterior, y la mayor conciencia ambiental, harán que el costo nivelado de las plantas térmicas a carbón y gas aumente sustancialmente en los próximos años.

Con relación a la energía geotérmica, si bien es una opción bastante buena, la alta incertidumbre para encontrar el recurso, además de la disponibilidad espaciotemporal del mismo y las bajas potencias que generalmente se manejan en estas plantas (unas cuantas decenas de MW, en la mayoría de casos) hacen que estas plantas complementen la matriz energética, pero no se usen para planear la expansión de un país.

En los párrafos precedentes mostramos que si bien el costo nivelado de la energía nuclear es mayor que el de varias tecnologías alternativas; la energía firme y la baja huella de carbono de las plantas nucleares, hacen que estas plantas sean atractivas para ser consideradas en la expansión del sistema interconectado del país.

Con relación al enriquecimiento del uranio, Estados Unidos tiene un oligopolio en este asunto contando con el 62% de las plantas de enriquecimiento. Francia, Reino Unido, Rusia, China, Holanda y Alemania tienen el resto de las centrifugadoras para el enriquecimiento del uranio, y cuatro empresas se reparten el 80% del mercado: Usec, Urenco, Tenex y Eurodif (World Nuclear Association, 2022).

Es importante diferenciar el uranio para la generación eléctrica del usado para actividades bélicas. Para una planta nuclear de generación eléctrica se requiere de combustible enriquecido entre el 4% y el 5%. Por su parte, los reactores

experimentales y destinados a asuntos militares pueden requerir combustible nuclear enriquecido al 20% y para una bomba nuclear el combustible debe tener un enriquecimiento superior al 90%. Así pues, el combustible nuclear que se necesita para una planta es diferente al usado para una bomba. La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) es la garante de que el mercado de uranio enriquecido en el mundo sea utilizado para fines pacíficos.

Para comprar el combustible nuclear, las plantas deben recurrir a los agentes autorizados, entre los cuales hay cinco agentes importantes que acaparan el 82% del mercado. Estos son: AECL, TVEL, GNF, Westinghouse y AREVA.

Por su parte, para la negociación del precio, lo común es recurrir a firmas consultoras especializadas, como TradeTech, UxC, Mega Uranium, Uranium Resources, entre otras. Estas empresas se encargan de la negociación con los vendedores para obtener el mejor precio y disponibilidad, de acuerdo con las características particulares de la planta, y las proyecciones de precio, estabilidad política y tecnológica. Cada planta nuclear es diferente y, por lo tanto, las características del combustible y operación también lo son.

8. Desastres nucleares y seguridad

La IAEA cuenta con una escala internacional de eventos nucleares, la cual va desde 0 hasta 7, siendo 7 un accidente mayor y 0 una simple desviación en la programación de generación. De acuerdo con los registros históricos, solo 2 eventos han sido catalogados como escala 7: Chernóbil (1986) y Fukushima (2011).

El accidente de Chernóbil en la antigua Unión Soviética, de acuerdo con lo que está registrado se debió a una indebida operación del reactor nuclear en unas pruebas de reducción de potencia, lo cual, generó una serie de desequilibrios en el reactor 4 de la central. Así, se produjo un sobrecalentamiento en el núcleo generando explosiones sucesivas. Por su parte, el accidente de Fukushima sucedió después de que un terremoto de magnitud 9.0 en la escala de Richter provocara un tsunami sobre la costa nororiental japonesa. Este tsunami generó inundaciones en la central que sacaron de servicio los sistemas eléctricos de las bombas de agua y la consecuente fundición del material nuclear, atascando las barras controladoras de la reacción y generando así la inminente explosión del reactor.

Es de resaltar que el generador de Chernóbil fue construido en 1972 y el de Fukushima en 1976. También, es importante indicar que el 99.997% del tiempo de operación de las plantas nucleares en toda su historia no han sufrido accidentes ni eventos (Voss, 2020). En la categoría 6 de la escala internacional de eventos nucleares aparece el accidente de la planta Kyshtym en 1957 cuyo año de construcción fue 1945 y sea dicho de paso, fue una planta nuclear para asuntos militares y no para generación eléctrica.

Luego del accidente de Fukushima, hubo una pausa en el desarrollo nuclear a nivel global y se dio la orden de revisar y modernizar toda la seguridad de las plantas nucleares existentes. En la sección 9 hablaremos sobre la modernización y cambios tecnológicos que ha tenido el sector nuclear en los años recientes. Para reafirmar el punto anterior, se hará un breve recuento tecnológico de las generaciones de la tecnología nuclear.

- **Generación I:** Construidos entre 1945 y 1965. Fueron los primeros prototipos de reactores

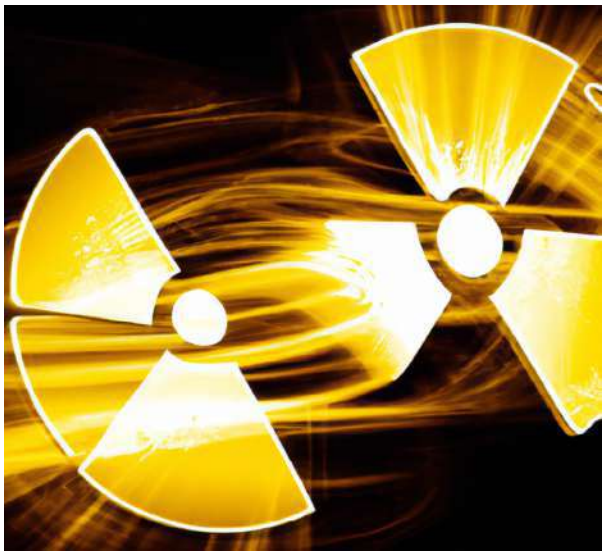
nucleares. Su tecnología de seguridad era rudimentaria y la operación del reactor era prácticamente manual, sin automatismos. Hoy prácticamente todos están desmantelados.

- **Generación II:** Construidos entre 1965 y 1995. Debido a modernizaciones que se hicieron a lo largo de la historia para el año 2013 el 75% de los reactores estadounidenses construidos en este periodo todavía estaban activos. Tanto el reactor de Chernóbil como los de Fukushima pertenecían a esta categoría. Sin embargo, luego del accidente de Fukushima fue obligatoria la modernización de todos los reactores de generación II que existieran en el mundo, so pena de no tener acceso a la compra del combustible nuclear. Todas las plantas fueron modernizadas a tecnología relacionada con la seguridad pasiva[4].

- **Generación III:** Construidos entre 1995 y 2010. Esta clase de reactores involucran mejoras en el uso del combustible, una eficiencia térmica superior y el uso de seguridad pasiva, lo cual los hace muy seguros al no requerir alimentación eléctrica para la operación de sus sistemas de seguridad.

- **Generación III+:** Construidos desde 2010 hasta la actualidad. Se consideran una evolución de la generación III ya que ofrecen mejoras sustanciales en el diseño de los sistemas de seguridad. Con este diseño, se resuelven tres problemas fundamentales al tiempo: seguridad, costo y facilidad de construcción. Al ser plantas modulares, su ensamblaje es sencillo y rápido (una planta de gran tamaño se puede construir en un periodo de 3 a 4 años). El diseño de esta tecnología involucra nuevas consideraciones de seguridad que toma en cuenta lo ocurrido con el accidente de Fukushima. El enfriamiento pasivo es uno de ellos, en el cual no se requiere de bombas alimentadas por electricidad para enfriar la planta luego de que hubiera una falla generalizada de los sistemas y la central quede aislada de la alimentación eléctrica. Así, el material nuclear haya sido fundido y se obstruya su movimiento, en esta clase de plantas existe la posibilidad de enfriar el material radiactivo y evitar un accidente. Empresas como Areva, Toshiba, Mitsubishi, Kepco, Candu, entre otras, están instalando este tipo de plantas.

- **Generación IV:** Actualmente se encuentran en desarrollo y se espera que prontamente estén disponibles comercialmente. Tienen mejoras sustanciales en asuntos de seguridad, sostenibilidad, eficiencia y costos. El reactor de cuarta generación más desarrollado hasta el momento es el Reactor Rápido de Sodio o más conocido como SFR (por sus siglas en inglés), el cual tiene por característica principal el enfriamiento por medio de sodio brindando ventajas a la hora de moderar neutrones débiles en las reacciones en cadena, lo que hace que la reacción se detenga de una manera casi que instantánea, además de absorber rápidamente el calor de la reacción. Otra gran ventaja de los reactores de cuarta generación es que se genera un ciclo cerrado del combustible, lo que implica que los residuos nucleares radian durante siglos y no durante milenios como con las tecnologías precedentes (Khan, 2019). Adicionalmente, con esta tecnología se obtiene entre 100 y 400 veces más rendimiento energético para un mismo combustible; por lo tanto, los residuos nucleares son mínimos y se espera que sean comercialmente viables a partir del año 2025.



9. Energía nuclear después del desastre de Fukushima

En una central nuclear, las barras moderadoras ayudan a controlar la velocidad de los neutrones y el agua ayuda al intercambio de calor para mantener en ciertos niveles la temperatura del reactor. En caso de haber una fuga de agua o no haber una renovación de estas por acción de las bombas, el reactor comenzará a subir la temperatura hasta niveles que podría fundir el material que encapsula las barras al material moderador o incluso el reactor. Específicamente, en Fukushima fallaron los motores que bombean agua dentro del reactor por la inundación en el cuarto de control a causa del tsunami.

Al no haber agua para evacuar el calor, el calentamiento del reactor fue muy rápido y se derritieron las barras de combustible, lo cual hizo imposible insertar las barras de control. Luego, el núcleo y la aleación de zirconio (que envuelve las barras moderadoras) se fundieron y el hidrógeno que se produjo causó las sucesivas explosiones. La planta de Fukushima era de generación II, un accidente de estos habría sido fácilmente controlado en una central de generación III+ o IV, pues así las bombas de agua hubieran fallado y se hubría hecho efectiva la refrigeración del núcleo por medios de seguridad pasiva.

Una vez se conocieron las causas del accidente de Fukushima, países como Reino Unido, República Checa, Polonia, Francia, Finlandia y Países Bajos, entre otros con una base nuclear instalada, han tenido una reacción racional al declarar que la energía nuclear es necesaria y lo seguirá siendo para sus territorios. Adicionalmente, hicieron un llamado a mantener la calma y aprender las lecciones que dejó este accidente. Es así como 14 países de la Unión Europea decidieron revisar los sistemas y normas de seguridad en sus plantas nucleares. Por su parte, en Sudáfrica, el Gabinete de Estado aprobó el 17 de marzo de 2014 incluir a la energía nuclear dentro de su parque generador de energía.

Algunos países como Italia y Suiza decidieron hacer una pausa temporal en sus programas nucleares. Sólo Alemania anunció medidas más estrictas en cuanto a su base instalada (el cierre de siete plantas antiguas). No obstante, a 2023 Alemania dispone de tres plantas nucleares activas: Isar 2, Neckarwestheim y Emsland. Por su parte, China e India decidieron revisar sus sistemas y políticas de seguridad en cuanto a la energía nuclear, pero declararon rotundamente no parar el crecimiento en el uso de este energético

En el continente americano la realidad no fue muy distinta. En Canadá, la mayoría de las provincias apoyaron la continuación de las plantas nucleares siempre y cuando se revisen sus sistemas de seguridad. En Estados Unidos, entidades como la Casa Blanca y la Comisión Reguladora Nuclear, expresaron su confianza en la energía nuclear. Sin embargo, se revisó toda la seguridad de las plantas nucleares y se entró en un plan de modernización rápida de las mismas.

En resumen, la energía nuclear no ha desaparecido ni desaparecerá del escenario energético del mundo en los próximos años. Hoy, Estados Unidos tiene una capacidad instalada nuclear para generar 805 TWh de energía, Francia 379 TWh, seguidos muy de cerca por China, Rusia, Corea del Sur, Canadá, por solo nombrar algunos ejemplos.

En la actualidad, se están construyendo 62 reactores, principalmente en Asia: 8 en Rusia, 20 en China, 3 en Corea del Sur, 2 en Japón. En América del norte, países como Estados Unidos están construyendo 4 reactores, y por su lado Brasil y Argentina, de a un reactor nuclear, respectivamente. Así, el mundo nuclear hizo una pausa con el accidente de Fukushima, se repensó, aceleró los desarrollos en temas de seguridad pasiva y siguió creciendo.

10. Nuevas tecnologías de fisión nuclear

Aunque previamente afirmamos que los reactores más comunes en el mundo son los PWR y BWR, lo cierto es que en el mundo se siguen construyendo y desarrollando nuevas clases de reactores, que intentan hacerlos más modulares, compactos, seguros, económicos y eficientes.

Ejemplo de esto es el Evolutionary Power Reactor (EPR) que se construirá en Francia, India, China y Reino Unido, el cual tendrá la capacidad de bajar su potencia al 25% sin poner en riesgo la planta. Adicionalmente, tendrá una rampa de subida de potencia que permitirá llevar la planta desde el 25% de su capacidad al 100% en tan solo 30 minutos.

Por otra parte, la tecnología AP1000 ya está operando en China y Estados Unidos, pero se espera que empiece a operar en Francia. Este sistema es básicamente una evolución de las plantas PWR que mejora los sistemas de seguridad a la vez que disminuye los costos operativos al hacer más eficiente el uso del combustible. Tiene un sistema de enfriamiento del núcleo que incluye eliminación pasiva de calor residual por convección, además tiene un aislamiento de contención mejorado.

No obstante, para países como Colombia o aquellos que no tengan una demanda eléctrica intensiva (bajos niveles de industrialización), quizás la mejor opción sea un sistema de baja potencia. Es así como el CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares), que está siendo desarrollado en Argentina, ofrece una excelente opción. El CAREM es un reactor autopresurizado que desarrolla actualmente la CNEA (Comisión Nacional de Energía Atómica) en la provincia de Buenos Aires.

Otros proyectos similares al CAREM se están emprendiendo desde países como Sudáfrica (Proyecto PBMR), Suecia (proyecto Secure -H), Japón (Proyecto Fuji), Corea del Sur (proyecto Smart), Canadá (Proyecto Candu X), Israél (proyecto RTFR), Estados Unidos (proyecto USR), por solo mencionar algunos. Y es que la demanda de reactores nucleares de baja potencia tiene una proyección muy alta en la medida que países poco industrializados o en zonas remotas de países industrializados comenzarán a demandarlos. Adicionalmente, estos reactores de baja capacidad tienen la ventaja de ser instalados fácilmente en periodos cortos de tiempo al ser modulares.

11. Energía nuclear en Colombia

A pesar de que muchos no lo saben, Colombia ya ha tenido interacción con la tecnología nuclear. Desde 1965, Colombia cuenta con el reactor nuclear IAN-R1, ubicado en el corazón de Bogotá, que ha servido para la producción de radioisótopos utilizados en diversas áreas, desde medicina hasta geología. Este antecedente marca una premisa: Colombia no es ajena al mundo nuclear.

No obstante, la integración de la energía nuclear en la matriz energética colombiana es un proceso que se contempla con precaución y meticulosidad. Los documentos estratégicos, como el CONPES 4075 y el Plan Energético Nacional (PEN) 2022-2052, actúan como guías en esta travesía. Mientras el primero propone estudios técnicos y de viabilidad, el segundo visualiza la incorporación de la energía nuclear hacia 2038. Estos planes refuerzan la ambición de Colombia de diversificar su matriz energética y enfrentar los desafíos del cambio climático.

Colombia no solo tiene la capacidad de aprovechar la energía nuclear para diversos fines, sino que también tiene el potencial de ser un proveedor de uranio. En 2012, se identificaron reservas estratégicas, con varios municipios destacándose como principales yacimientos de uranio.

Más allá del uranio y de las infraestructuras existentes, es esencial contar con un marco regulatorio robusto. Colombia ya tiene regulaciones en materia nuclear, pero se prevé fortalecer estas con la creación de una entidad regulatoria especializada y la adhesión a acuerdos internacionales sobre seguridad nuclear.

Además de la regulación, es esencial la participación de diferentes partes interesadas. La planificación normativa incorpora una consulta amplia con expertos, la sociedad civil y organismos internacionales, garantizando que las decisiones sean consensuadas y reflejen las necesidades y aspiraciones de la nación.

Desde una perspectiva económica, la energía nuclear puede ser un motor de desarrollo. Generaría empleo, impulsaría la investigación y colocaría a Colombia como referente en la región. Pero, es fundamental realizar análisis de coste-beneficio para determinar su viabilidad.

La educación y formación en el ámbito nuclear son esenciales. Dado el nivel avanzado de la tecnología, las universidades y centros de investigación desempeñarán un papel crucial en la formación de profesionales capacitados. Si Colombia decide avanzar en su viaje nuclear, aún queda un largo camino por recorrer. La experiencia internacional sugiere un proceso de al menos una década para la implementación. Pero, como se dice sabiamente, "Un viaje de mil millas comienza con un primer paso."

De esta forma, la energía nuclear representa una oportunidad y un desafío para Colombia. A través de la planificación estratégica, el compromiso con la seguridad y el bienestar, y el diálogo constante, Colombia se encamina hacia un futuro energético más sostenible y resiliente.

Adicionalmente, Colombia cuenta con la Reglamentación en Materia Nuclear emitida por el Ministerio de Minas y Energía en la cual se dan todos los lineamientos de protección y seguridad radiológica, además de la caracterización de las fuentes radiactivas. Colombia utiliza material radiactivo para actividades relacionadas con la medicina, como el uso de radiotrazadores o radiofármacos que se utilizan para hacer gammagrafías o tomografías de emisión de positrones, por solo mencionar unos pocos usos.

Por lo anterior, Colombia genera residuos nucleares que deben ser manipulados de acuerdo con la reglamentación del país. En otras palabras, a la pregunta: ¿qué haremos con los residuos que se generen de una planta nuclear en Colombia? la respuesta sería: lo mismo que hoy hacemos con los residuos que ya tenemos. Como se ha argumentado antes, la eficiencia en el uso del combustible nuclear en las plantas de nueva generación, adicional a que Colombia tiene una baja demanda eléctrica (en comparación con las grandes potencias económicas), seguramente implicará que el país piense en una planta pequeña, cuyos residuos serían incluso, comparables a los que hoy tiene el país.

Por otra parte, Colombia es un país que cuenta con reservas de uranio. En 2012, el gobierno clasificó aproximadamente 20 millones de hectáreas como *reserva estratégica* de las cuales, alrededor de un millón podrían tener potencial para la explotación de uranio. Específicamente, en los municipios de Berlín (Caldas), Irra (Risaralda), Caño Negro (Cundinamarca), además de Zapatoca y California (Santander) tendrían las mayores reservas de Uranio en Colombia.

Finalmente, si Colombia tomara la decisión de inscribir un programa nuclear ante la IAEA, aún se debe recorrer un largo camino para llegar a tener una planta en nuestro territorio. De acuerdo con el documento Milestones Approach de la IAEA (2015), para que un país incursione en la energía nuclear, se deben surtir tres fases:

- **Fase 1:** se hace un anteproyecto con actividades bien definidas en el cual quede claro el plan para que se alcance una masa crítica de conocimiento nuclear que pueda operar, mantener y construir una planta nuclear en el territorio.
- **Fase 2:** esta es la fase preparatoria para contratar y construir la planta nuclear luego de tener una legislación clara que promueva el desarrollo de esta tecnología. Se espera que, como resultado de esta fase el país esté listo para licitar o negociar un contrato para la construcción y operación de la primera planta nuclear.
- **Fase 3:** Se desarrollan las actividades para implementar la primera planta nuclear. En esta fase se toman las decisiones finales sobre la forma de financiación, contratos y construcción de la planta.

De acuerdo con la experiencia de la IAEA, entre la primera y tercera fase pueden pasar entre 10 y 15 años. Por lo tanto, frente a una decisión de incursionar en tal energético aun faltaría un largo camino por recorrer. Sin embargo, como dijo Lao-Tse: "Un viaje de mil millas comienza con un primer paso".

Notas al final

[1] Término ampliamente utilizado para referirse a la generación eléctrica a partir de combustibles nucleares.

[2] Separación de los isótopos por medio de una membrana porosa.

[3] Medida del costo actual neto promedio de la generación de electricidad para una planta de generación durante su vida útil.

[4] La seguridad pasiva hace referencia a la no intervención humana o retroalimentación eléctrica (electrónica) que lleva al reactor a una parada segura. Generalmente, son tecnologías que operan a partir del campo gravitacional, flotabilidad, diferencias de presión, sin necesidad de alimentación eléctrica.

Referencias

- American Nuclear Society. (s.f.). *Know Nuclear.* https://rb.gy/evdqn
- Atkins, P. y Jones, L. (2012). *Principios de Química* (5ta ed.). Panamericana.
- Calderón, G. (2012). *El combustible nuclear. Proceso del uranio desde la mina a la central nuclear.* Enusa. https://rb.gy/2evg
- Conca, J. (2019). *Used nuclear fuel. The science council for global initiatives.* https://rb.gy/jq0h
- Ewing, R. (2015). *Long-term storage of spent nuclear fuel.* Nature Materials, 14(3), 252–257. https://rb.gy/gk6fpi
- Fernández, J. (2018). *Científico Modesto Montoya: "La mala reputación de la energía nuclear no se explica".* Energiminas. https://rb.gy/vmgt0t
- Fernández, A., Bodiou, L. y Glatz, J. (2009). *Electrochemical processing of spent nuclear fuel: a review.* Journal of Applied Electrochemistry, 39(11), 2151-2161.
- Herbst, R., Baron, P. y Nilsson, M. (2011). Standard and advanced separation: PUREX processes for nuclear fuel reprocessing. En Nash, K y Lumetta, G (Ed.). *Advanced separation techniques for nuclear fuel reprocessing and radioactive waste treatment, (pp. 141-175).* Woodhead Publishing. https://rb.gy/tv6dch
- Horvath, A. y Rachlew, E. (2016). *Nuclear power in the 21st century: Challenges and possibilities.* Ambio, 45(Supl. 1), 38-49. https://rb.gy/25lbn3
- International Atomic Energy Agency. (2015). *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power.* IAEA. https://rb.gy/7t0lqa

- International Atomic Energy Agency. (2019). Nuclear Power Reactors in the World. IAEA. https://rb.gy/4as0fz

- Jenkins, M. (2020). *Nuclear Energy Among the Least Popular Sources of Power in the U.S.*, Polling Shows. Morning Consult. https://rb.gy/7jxqju

- Khan, S. (2019). *Using next generation nuclear power reactors for development of a techno-economic model for hydrogen production.* International Journal of Energy Research, 43(13), 6827-6839. https://rb.gy/chqktk

- Takai, S. y Hagino, K. (2015). Nuclear transmutation of long-lived nuclides with laser compton scattering: quantitative analysis by theoretical approach. En Nakajima, K, (Ed.). *Nuclear back-end and transmutation technology for waste disposal: beyond the Fukushima accident*, 3-11. https://rb.gy/zyebgx

- World Nuclear Association. (2022). *Uranium Enrichment*. https://rb.gy/l4yf

- Voss, S. (2020). Nuclear security considerations for space nuclear power: a review of past programs with recommendations for future criteria. *Nuclear Technology*, 206(8), 1097-1108. https://rb.gy/u8rrlf

Cómo citar este artículo:

Galeano, D. (2023). Desmantelando mitos de la energía nuclear. *Revista EPM*, (21), 27-43.

Análisis de riesgo en torres de transmisión ≥ 110 kV y derivadas de su operación bajo el precepto de la gestión del riesgo de desastres

Risk analysis in transmission lines ≥ 110 kV and derivatives of its operation under the precept of disaster risk management

Rubén Darío Valdés Torres
Unidad Subestaciones y Líneas de Transmisión, EPM

ruben.valdes@epm.com.co

Resumen

Las líneas de transmisión ≥ 110 kV producto de su operación, exposición y/o susceptibilidad pueden enfrentar o detonar condiciones de riesgo de desastres, las cuales deben ser gestionadas según un marco regulatorio de obligatorio cumplimiento. De ahí que, entidades como la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en el ámbito de sus competencias de seguimiento y control, ha requerido a Empresas Públicas de Medellín (EPM) la estimación del riesgo de la infraestructura lineal ≥ 110 kV con licencia ambiental. En respuesta desde la Unidad Subestaciones y Líneas de Transmisión (USUL) se desarrolló una metodología de análisis que incluye y relaciona variables como fenómenos amenazantes, elementos expuestos, vulnerabilidad, área de afectación probable y niveles de riesgo.

Palabras clave:
Línea de transmisión, Gestión, Riesgo de desastre, Daños potenciales, Análisis, Amenaza, Vulnerabilidad.

Keywords:
Transmission line, Management, Disaster risk, Potential damage, Analysis, Hazard, Vulnerabilty.

Introducción

Las líneas de transmisión como uno de los activos necesarios para la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica requieren de procesos de gestión que garanticen durante su vida útil su disponibilidad y rentabilidad, en la medida en que estos se exponen a condiciones naturales, socionaturales y antrópicas que pueden afectar su funcionamiento. Asimismo, producto de su operación y de su interacción con el entorno cambiante, podrían desencadenar efectos con consecuencias para las personas, los bienes, los medios de subsistencia y los ecosistemas. Esta doble condición, actualmente busca ser regulada bajo la gestión del riesgo de desastres, precepto de obligatorio cumplimiento que exige a entidades como EPM su incorporación bajo el enfoque: "conocer, reducir (mitigación, prevención) y manejar (preparación y ejecución de la respuesta)" (Decreto 2157, 2017).

En el marco de esta obligación, el país formula en el año 2017 lineamientos generales para que las entidades públicas en función de sus actividades implementen acciones para gestionar los posibles efectos de eventos de origen natural, socionatural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, sobre la infraestructura y derivadas de su operación. Lineamientos que son adoptados y traducidos en requerimientos por entidades como la ANLA. Producto de esto desde USUL se desarrolló una metodología de valoración del riesgo de desastres según la localización de las torres de energía, que incorpora variables como amenaza, elementos expuestos, vulnerabilidad, área de afectación probable y niveles estimados de riesgo, la cual es presentada a través del presente artículo a los distintos grupos de interés del Grupo EPM, como ejemplo de una buena práctica.

1. Antecedentes

1.1 Ámbito de la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD)

El espacio que comprende la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), está determinado por unos límites definidos a partir de la promulgación en el año 2012 de la Ley 1523, entre los cuales se destacan el ser considerado como producto de una construcción social, de tener carácter territorial con una gestión basada en la corresponsabilidad, una estructura organizacional definida y unos instrumentos de planificación orientados a acciones.

Desde allí, el riesgo de desastre debe ser entendido como "los daños o pérdidas potenciales debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socionatural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional… que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos" (Ley 1523, 2012, Artículo 4) y su gestión como el proceso de planear, ejecutar, seguir y evaluar las acciones para su conocimiento, reducción y manejo (Ley 1523, 2012).

Desde este entender, todas las entidades prestadoras de servicios públicos se ven en la obligación de incorporar en su quehacer la GRD, particularmente siguiendo los lineamientos generales definidos por el Decreto 2157 de 2017 "por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012".

Entidades como el Ministerio de Minas y Energía, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios y la ANLA, en su rol de control y seguimiento, han adoptado como marco orientador para el sector energético, lo definido por el Decreto 2157 de 2017.

1.2 GRD en líneas de transmisión ≥ 110 kV propiedad de EPM

La gestión del riesgo no ha sido ajena en el manejo de los activos asociados a la transmisión de energía, siendo incorporada desde la planeación y entrada en operación de los proyectos a partir de concepciones como el riesgo operacional, riesgo eléctrico, continuidad de negocio, análisis de criticidad, seguridad y salud en el trabajo.

Las primeras aproximaciones a la GRD por parte del negocio de Transmisión y Distribución de Energía T&D con la colaboración de la Dirección de Ingeniería de Riesgos, fueron planteadas desde dichas nociones, lo que conllevó en algunos casos, a que los análisis de riesgo de desastre no respondieran a los criterios definidos por el Decreto 2157 de 2017.

Es así como proyectos de transmisión con licencia ambiental han sido requeridos por la ANLA en términos de la metodología de valoración de escenarios, determinación de áreas de afectación probable y elementos expuestos que puedan verse afectados en relación con la localización de las torres de energía (ANLA, 2021). Al no contar con una metodología de análisis específica para el riesgo de desastre orientada a las líneas de transmisión, se construyó una propia desde USUL, inicialmente implementada en el proyecto Bello-Guayabal-Ancón BGA a 230 kV y posteriormente en los proyectos Bacatá-Nueva Esperanza a 500 kV, Magdalena Medio a 230 kV y Porce II a 220 kV.

2. Buena práctica análisis de riesgo de desastres

Los daños y pérdidas potenciales como producto del impacto de eventos de diverso origen en relación con la susceptibilidad de lo que puede verse afectado, deben ser recogidos en un modelo que relacione dos conceptos fundamentales: la amenaza y la vulnerabilidad. Uno entendido como los eventos naturales o inducidos por el hombre con capacidad de causar pérdidas y daños y el otro como la fragilidad o predisposición de las estructuras físicas, sociales y económicas de verse afectados por éstos (Ley 1523, 2012).

De ahí que, los análisis de riesgo de desastres se construyan en función de la relación amenaza-vulnerabilidad, pero teniendo en cuenta para el caso de las líneas de transmisión, los eventos con potencial de afectación "sobre la infraestructura expuesta y aquellos que se deriven de los daños de la misma en su área de influencia de posible afectación, así como de su operación" (Decreto 2157, 2017, párr. 4). Lo que conlleva: la identificación, ubicación y estimación de aspectos como áreas de probable afectación, elementos expuestos, niveles de amenaza-vulnerabilidad-riesgo, origen de los eventos, frecuencias o probabilidades de ocurrencia.

2.1 Eventos con potencial de afectación sobre la infraestructura expuesta

2.1.1 Identificación de fenómenos amenazantes

Los eventos con potencial de daño se manifiestan en diferentes escalas territoriales, motivo por el cual se requiere como punto de partida precisar la ubicación por medio del Sistema de Referencia Oficial de Coordenadas (CTM12 origen nacional) de las líneas de transmisión, con el fin de identificar posteriormente si existe relación espacial o no con estos.

El origen y extensión geográfica de los eventos pueden ser identificados a partir de fuentes primarias o secundarias, que para el caso de la metodología de análisis se limitan al personal encargado de la operación de la infraestructura y a

las entidades consideradas pertinentes (entidades territoriales, corporaciones autónomas regionales, entidades científicas adscritas al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, departamentos administrativos y ministerios).

La intersección de la infraestructura con alguno de los eventos aparte de confirmar su existencia permite conjeturar que su materialización puede causar impactos (ver figura 1), de allí que, estos entren a ser parte del listado de fenómenos amenazantes con potencial de daño sobre las líneas de transmisión. En cuanto a la clasificación según su origen (natural, socionatural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional) y su caracterización (causas, fuentes, frecuencia de ocurrencia), se hace conforme los datos disponibles según las fuentes primarias y/o secundarias.

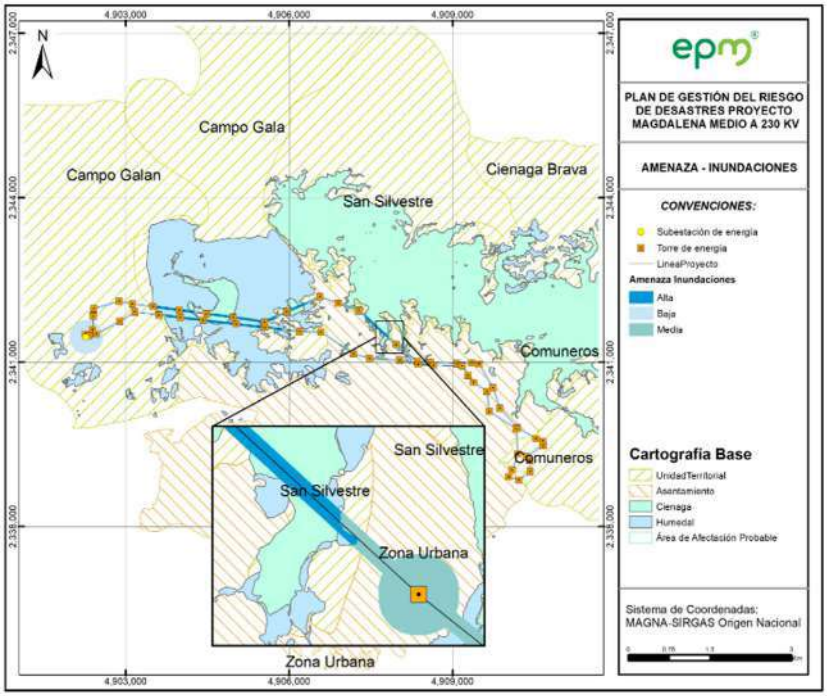


Figura 1. Mapa inundación línea de transmisión Magdalena Medio 230 kV. Recuperado de: (EPM, 2022c).

2.1.2 Caracterización de elementos expuestos

El entendimiento de la susceptibilidad que puede o no tener una línea de transmisión frente a la materialización de uno o varios fenómenos amenazantes, parte del conocimiento de su ubicación (exposición) y sus características estructurales. Por consiguiente, se recopilan datos que dan cuenta de estos rasgos (ver figura 2), sean usados o no posteriormente en la estimación del riesgo de desastres.

2.1.3 Vulnerabilidad

Definida la exposición de la infraestructura se requiere precisar la fragilidad de ésta en relación con la manifestación de los eventos, para lo cual se determinan variables asociadas a condiciones estructurales de las torres de transmisión, tales como antigüedad, materiales de construcción y estado de conservación, cumplimiento de normatividad, inspecciones y mantenimiento. Al igual que su valoración según la escala bajo, medio y alto (ver tabla 1).

HOJA DE VIDA DE TORRES	
INFORMACIÓN TÉCNICA	
Número de torre	44
Tipo de torre	B1
Abcisa	16417,59
Cota (msnm)	1971,36
Coord Este	838035,3
Coord Norte	1179845
Altura total torre	33,842
Altura a fase inferior	21,53
Fundación	Zapata
Long de la base (m)	7,24
Área de la base (m^2)	52,4176

Figura 2. Información técnica línea de transmisión BGA a 230 kV. Recuperado de: (EPM, s.f.).

Variables a evaluar	Baja	Media	Alta
	1	2	3
Antigüedad de la estructura	La antigüedad es menor de 5 años.	Entre 6 y 20 años.	Mayor de 20 años o se desconoce su antigüedad
Materiales de construcción y estado de conservación de la estructura	La estructura tiene materiales de muy buena calidad, adecuada técnica constructiva y buen estado de conservación.	Estructura de madera, concreto, adobe, bloque o acero, sin adecuada técnica constructiva y con un estado de deterioro moderado.	Estructuras de adobe, madera u otros materiales, en estado precario de conservación.
Cumplimiento de la normatividad vigente en la construcción de la estructura	Se cumple con las normas vigentes.	Se cumple parcialmente algunas normas vigentes.	No se cumple con las normas vigentes o se desconoce si cumple con la normatividad
Cercanía de la estructura con respecto al fenómeno amenazante	La infraestructura está más allá del área de influencia indirecta del área de afectación probable del fenómeno amenazante	La infraestructura está en la zona de influencia indirecta del área de afectación probable del fenómeno amenazante	La infraestructura está en la zona de influencia directa del área de afectación probable del fenómeno amenazante
Inspecciones y mantenimiento de la infraestructura	Se hacen inspecciones semanales o mensuales del estado de la infraestructura y se le hace mantenimiento a la infraestructura	Se hacen inspecciones anuales del estado de la infraestructura y se le hace mantenimiento a la infraestructura	No se hacen inspecciones periódicas del estado de la infraestructura, no se le hace mantenimiento a la infraestructura o se desconoce si se le hace mantenimiento a la infraestructura

Tabla 1. Variables para la evaluación de vulnerabilidad física (líneas de transmisión).

2.1.3 Riesgo

Si bien las consecuencias esperadas en la infraestructura producto de la relación fenómenos amenazantes, exposición y vulnerabilidad, pueden variar. Para el caso del riesgo de desastres solo son de interés aquellas que conllevan una "alteración o interrupción intensa grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento u operación de la sociedad o una comunidad" (Ley 1523, 2012, Artículo 4). De ahí que se haya determinado que el colapso de las torres de transmisión sea en principio el evento que cumpla esta condición.

- **Área de probable afectación**

Determinar las consecuencias o el nivel de riesgo requiere delimitar la cobertura o extensión geográfica del fenómeno, la cual en el presente caso está definida por la superficie cubierta por una torre una vez colapse. Asumiendo que ésta se comporta como un cuerpo rígido que puede caer en cualquier dirección, el área de probable afectación se limita a una circunferencia, donde su perímetro se define en función de la altura de la torre y del eje de ésta (ver figura 3).

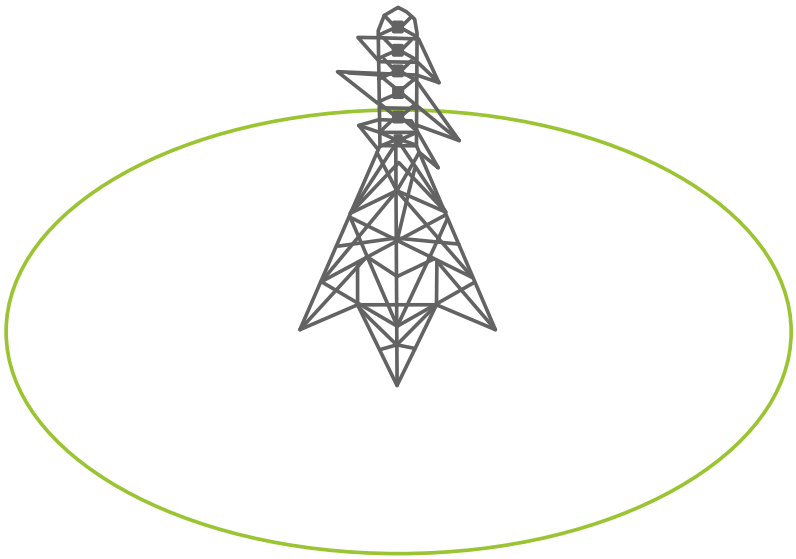


Figura 3. Representación área de probable afectación por colapso de torre.

Conocida el área de afectación, la severidad del colapso se estima en términos de la fuerza de choque o energía potencial gravitatoria esperada en la que se relacionan masa (m), gravedad (g) y altura (h) (ver figura 4), bajo los criterios perímetro, características estructurales de la torre, energía potencial y energía cinética (ver tabla 2). Lo que en resumen se entiende como que un cuerpo a mayor altura puede transferir mayor energía en el impacto.

Energía potencial gravitatoria m x g x h
m: masa (kg)
g: gravedad (mt/s^2)
h: altura (mt)

Fuerza de choque kg x g x d = kg x g x h
kg: kilogramos
g: gravedad
h: altura (mt)

Figura 4. Relación aritmética fuerza de choque esperada.

Criterios	Definición
Criterio 1	Perímetro de peligro con relación a la altura de la torre como alcance máximo del evento
Criterio 2	> h > energía potencial
Criterio 3	Al caer un cuerpo la energía potencial se transforma en energía cinética
Criterio 4	> energía cinética > cantidad de energía que se transfiere en el impacto
Criterio 5	La diferenciación del nivel de amenaza con base en el perímetro se hará según: cercanía con la base (pata o altura promedio de una persona), cuerpo de la torre hasta el cuello y parte superior (cabeza de la torre)

Tabla 2. Criterios para estimación de la severidad por colapso de torre.

En este sentido, la estimación de la severidad deberá ser equiparable con el nivel de amenaza, por medio de la representación espacial de las áreas donde se esperan diferencias de grado en la energía del impacto. De ahí que, se zonifique el área de probable afectación en baja, media o alta, tomando como referencia las partes en que se divide una torre de transmisión (ver figura 5) y el comportamiento físico esperado, donde la pata equivale a un menor impacto o nivel bajo, el cuerpo a mediano impacto o nivel medio y la cabeza de torre a un mayor impacto o nivel alto (ver figura 6, figura 7).

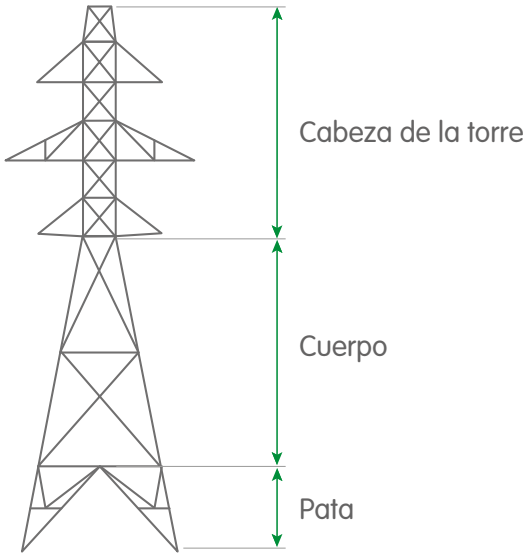


Figura 5. Partes en las que se divide una torre de transmisión.

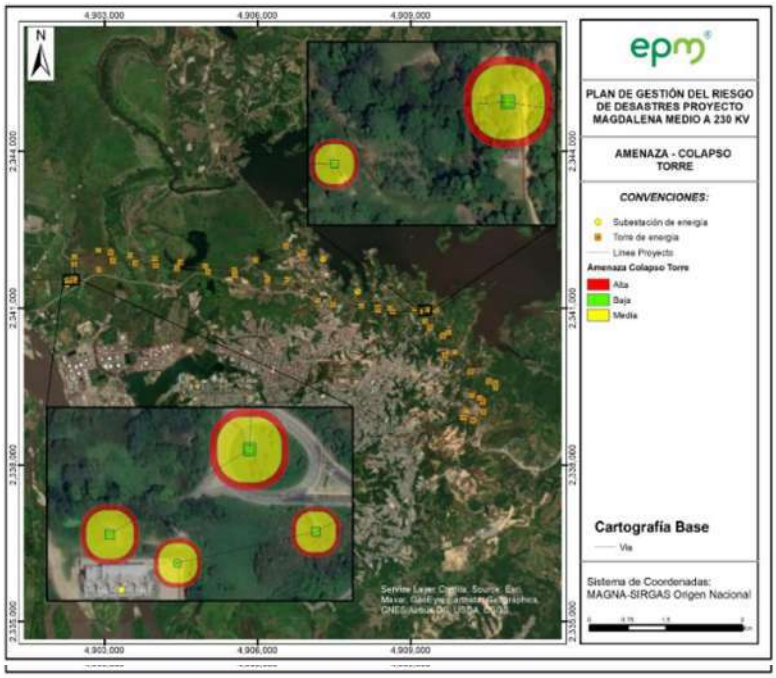


Figura 6. Área de afectación probable en función de los niveles de amenaza por colapso de torre de transmisión, proyecto BGA a 230 kV. Recuperado de: (EPM, 2022c).

Figura 7. Área de afectación probable en función de los niveles de amenaza por colapso de torre de transmisión proyecto Nueva Esperanza 500 kV. Recuperado de: (EPM, 2022b).

La zonificación puede ser expresada en diferentes unidades de área, con el fin de establecer cuál es el total de superficie a verse afectada en caso de la materialización del evento según los niveles de amenaza (ver tabla 3).

Numeración torre	Municipio	Longitud	Latitud	Área según el nivel de amenaza colapso estructural		
				Baja (m^2)	Media (m^2)	Alta (m^2)
T1-L	Tenjo	4,800324	-74,178685	2623,24	2080,68	11713,41
T2-L	Tenjo	4,800464	-74,180186	2340,78	1079,26	9829,63
T3-L	Tenjo	4,800493	-74,182654	1267,12	472,14	2404,82
T4-L	Tenjo	4,800527	-74,18561	1945,14	831,37	6449,19
T5-L	Tenjo	4,803008	-74,18815	1775,62	831,37	5138,66

Tabla 3. Área de probable afectación según niveles de amenaza. Plan de gestión del riesgo de desastres Nueva Esperanza 500 kV. Recuperado de: (EPM, 2022b).

- **Exposición y vulnerabilidad**

Considerada el área de afectación probable y sus niveles de amenaza, se requiere determinar en ésta la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura (Decreto 2157, 2017). Para lo cual, es indispensable consultar información territorial disponible y superponerla con la zonificación por colapso de torre.

La superposición permite confirmar la existencia de elementos expuestos, su tipo, área total y grado de exposición. En este sentido, se resume, agrupa y representa por cada torre de transmisión lo que podría ser susceptible al daño a razón de su ubicación (ver figura 8) y según los niveles de amenaza (ver tabla 4).

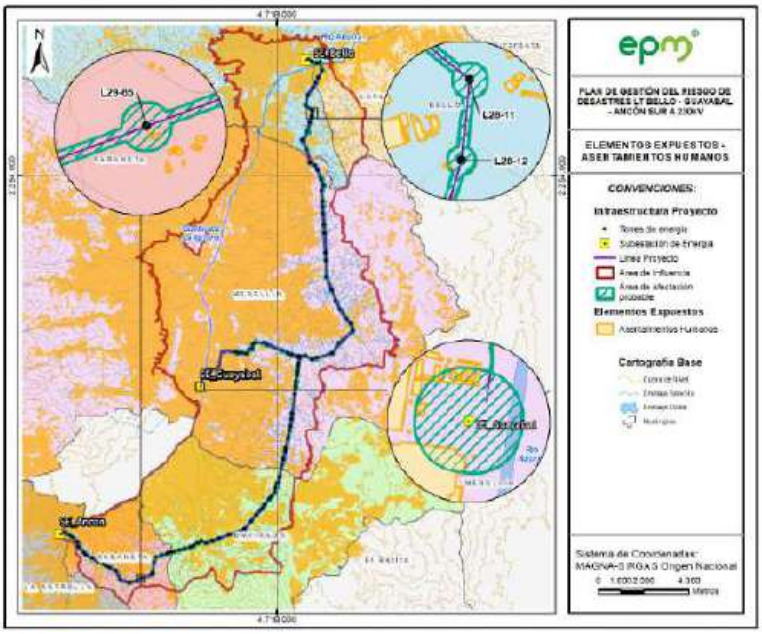


Figura 8. Representación asentamientos humanos en área de afectación probable por colapso de torre, proyecto BGA 230 Kv. Recuperado de: (EPM, 2022).

Tramo	No. torre	Municipio	Este	Norte	Asentamientos humanos		
					Área expuesta a amenaza baja Área (ha)	Área expuesta a amenaza media Área (ha)	Área expuesta a amenaza alta Área (ha)
Norte	1	Bello	838432,09	1192992,16	Construcciones urbanas 0,001895	Construcciones urbanas 0,035789	Construcciones urbanas 0,015607

Tabla 4. Área de construcciones urbanas en condición de exposición según nivel de amenaza por colapso de torre. Plan de gestión del riesgo de desastres BGA 230 kV.

La estimación de la susceptibilidad al daño de los elementos expuestos que en principio está definida por su ubicación se complementa con la consideración de características que determinan su fragilidad ante los efectos adversos producto del colapso de torre. Así pues, condiciones estructurales, económicas, sociales y ambientales particulares dan cuenta de la intensidad de los daños esperados.

En este sentido, dichas condiciones se representan a través de variables según el elemento expuesto con magnitudes de bajo, medio o alto dadas sus características intrínsecas (tabla 1 y tabla 5). Acorde con la información disponible, se valoran y relacionan por medio de una operación aritmética, resultado de la cual se obtiene el nivel de vulnerabilidad del elemento expuesto frente al evento colapso estructural (ver figura 9).

Aspectos a evaluar	Baja	Media	Alta
	1	2	3
(v1) Cercanía de las áreas ambientalmente sensible y/o servicios ambientales con respecto al fenómeno amenazante	La mayor parte del área ambientalmente sensible se encuentra en el nivel de amenaza bajo	La mayor parte del área ambientalmente sensible se encuentra en el nivel de amenaza medio	La mayor parte del área ambientalmente sensible se encuentra en el nivel de amenaza alto
(v2) Presencia de especies amenazadas según las categorías propuestas por la UICN*	En el área de probable afectación se encuentra alguna especie en categoría no evaluado, datos insuficientes, o preocupación menor	En el área de probable afectación se encuentra alguna especie en categoría vulnerable o casi amenazado	En el área de probable afectación se encuentra alguna especie en categoría en peligro o en peligro crítico
(v3) Presencia de especies endémicas	En el área de probable afectación no se encuentran especies endémicas	En el área de probable afectación se encuentra al menos una especie endémica	En el área de probable afectación se encuentra más de 1 especie endémica o no se tiene información
(v4) Presencia de servicios ambientales	En el área de probable afectación no se identifica algún servicio ambiental o no se tiene información	En el área de probable afectación se identifica al menos un servicio ambiental	En el área de probable afectación se identifica más de un servicio ambiental

Tabla 5. Variables para la evaluación de vulnerabilidad ambiental.

$$f\ (\text{Vamb}): \sum v1, v2, v3, v4$$

Figura 9. Ecuación estimación de vulnerabilidad ambiental.

A su vez, producto de los resultados mínimos y máximos según la sumatoria de las variables evaluadas de cada elemento expuesto, se definen rangos que retoman los niveles bajo, medio y alto, de manera que la vulnerabilidad pueda ser representada según éstos (ver figura 10).

Intervalo	Calificación (Vamb)
$(X_1\text{-}X_2]$	(1) BAJA
$(X_3\text{-}X_4]$	(2) MEDIA
$(X_5\text{-}X_6]$	(3) ALTA
Intervalo: (Valor máx. - valor min.) /# intervalos	

Figura 10. Representación de niveles de vulnerabilidad ambiental.

Cada elemento expuesto evaluado al confluir espacial y temporalmente requiere una interpretación integral, de ahí que, el concepto de vulnerabilidad global se tome como referente, ya que según éste la vulnerabilidad "surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características que convergen" (Wilches, 1993, p.22). Por consiguiente, una vez hecha la estimación individual de la susceptibilidad de aquello que puede ser afectado por el colapso de torre, se estime su relación como un todo, por medio de un índice sumatorio simple (ver figura 11) y la comparación de sus resultados en función de rangos previamente establecidos (ver figura 12).

$$f(\text{Vglobal}): \sum \text{V elementos expuestos}$$

Figura 11. Ecuación estimación de vulnerabilidad global.

Intervalo	Calificación (global) VU
$(X_1\text{-}X_2]$	(1) BAJA
$(X_3\text{-}X_4]$	(2) MEDIA
$(X_5\text{-}X_6]$	(3) ALTA
Intervalo: (Valor máx. - valor min.) /# intervalos	

Figura 12. Estimación de vulnerabilidad global.

- **Correlación amenaza/vulnerabilidad**

Los daños potenciales son producto de la interacción fenómeno amenazante (colapso de torre) y susceptibilidad de los elementos expuestos, en consecuencia, la determinación de la magnitud del riesgo será el producto de la relación de los factores amenaza y vulnerabilidad (ver figura 13). Dado que en Colombia según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) entidad que dirige y coordina la gestión del riesgo, el nivel de riesgo se "expresa comúnmente en tres categorías: alto, medio, bajo y mediante tres colores: rojo, amarillo y verde respectivamente" (UNGRD, 2017), de ahí que su representación se hará conforme a esto (ver figura 14).

$$f(\text{R}): \text{A, Vglobal}$$

Figura 13. Representación del producto de la relación amenaza y vulnerabilidad.

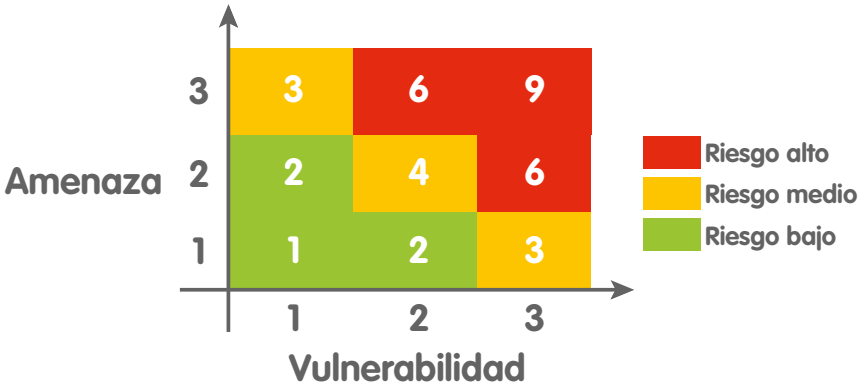


Figura 14. Representación del producto de la relación amenaza y vulnerabilidad.

Al estar el riesgo de desastres en función del fenómeno amenazante y la vulnerabilidad (ver figura 14), la zonificación de éste se representará en el área de probable afectación de la misma manera que se hizo con los niveles de amenaza, así pues, por cada torre de transmisión habrá una delimitación de la magnitud del riesgo (ver tabla 6), según el área que se espera sea afectada por su colapso.

Línea	No. torre	Municipio	Riesgo					
			Nivel de Riesgo según área de afectación probable (amenaza baja)		Área expuesta a amenaza media Área (ha)		Área expuesta a amenaza alta Área (ha)	
Tasajera Bello	T43-L16	Bello	1	Bajo	1	Bajo	2	Medio
	T40-L16	Bello	1	Bajo	1	Bajo	2	Medio
	T41-L16	Bello	1	Bajo	1	Bajo	2	Medio

Tabla 6. Representación del producto de la relación amenaza y vulnerabilidad. Plan de gestión del riesgo de desastres Porce II 220 kV. Recuperado de: (EPM, 2023).

Conclusiones

La metodología de análisis desarrollada desde USUL, permite la estimación de la magnitud del riesgo de desastres asociado a las líneas de transmisión ≥ 110 kV, teniendo en cuenta variables como: amenaza, elementos expuestos, vulnerabilidad, área de afectación probable y niveles de riesgo acorde con lo requerido por las regulaciones de índole nacional y los requerimientos de las autoridades competentes. No obstante, con el fin de tener una mayor aproximación a la estimación de daños o pérdidas potenciales, ésta deberá ser complementada con enfoques probabilísticos, escalas más detalladas y valoraciones económicas de lo que puede verse afectado.

Recomendaciones

Dada la condición cambiante del riesgo de desastres y la incertidumbre creciente del entorno, la metodología de análisis debería ser constantemente revisada y ajustada en función de los cambios de los fenómenos amenazantes, los elementos expuestos y el aumento o disminución de su susceptibilidad al daño, los cambios técnicos en las líneas de transmisión y/o la presunción de la materialización de los daños o pérdidas según la información disponible. Adicionalmente, se sugiere se evalúe la pertinencia de ésta en la determinación de la magnitud del riesgo de desastres en líneas de transmisión ≤ a 110 kV.

Finalmente, en el desarrollo del análisis del riesgo de desastres se deben tener en cuenta la delimitación y zonificación de los fenómenos amenazantes que pueden impactar las torres de transmisión de energía, producto de los estudios de detalle elaborados por las entidades territoriales.

Referencias

- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. (2021). Acta No. 228. [Acta reunión de control y seguimiento ambiental]. PROYECTO "Repotenciación de las Líneas de Transmisión de Energía El Salto-Barbosa, Barbosa-Bello y Tasajera-Bello y Línea de Transmisión Porce II a 220 kV y construcción de la ampliación del patio de 220 kV de la subestación El Salto". Expediente LAM0260. 10 de junio de 2021.

- Decreto 2157 de 2017. Por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012. https://rb.gy/po9nss

- EPM. (s.f.). *BGA. Hojas de vida de Torres, Tramo Norte*. [Documento interno]

- EPM (2022a). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas PGRDEPP, Subestación Guayabal-GIS Línea de Transmisión 230 Kv, versión 3.* Documento disponible en la intranet corporativa.

- EPM (2022b). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas PGRDEPP, Nueva Esperanza-Línea de Transmisión 500 kV, versión 3.* Documento disponible en la intranet corporativa.

- EPM (2022c). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas PGRDEPP, Magdalena Medio a 230 kV.* Documento disponible en la intranet corporativa.

- EPM (2023). *Plan de Gestión del Riesgo de Desastres de las Entidades Públicas y Privadas PGRDEPP, Líneas de transmisión de energía El Salto-Barbosa, Barbosa-Bello y Tasajera-Bello y línea de transmisión Porce II a 220 kV y construcción de la ampliación del patio de 220 kV de la subestación El Salto, versión 4.* Documento disponible en la intranet corporativa.

- Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. https://rb.gy/3iclag

- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes.* https://rb.gy/6ts6g

- Wilches, G. (1993). La vulnerabilidad global. En: Maskrey, A. (comp). *Los Desastres no son Naturales* (pp. 11-44). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. LA RED. https://rb.gy/lcok7m

Cómo citar este artículo:

Valdés, R. (2023). Análisis de riesgo en torres de transmisión ≥ 100 kV y derivadas de su operación bajo el precepto de la gestión del riesgo de desastres. *Revista EPM*, (21), 44-59.

+TRE-U3/+ER: Tablero Regulador de Tensión U3
Control Terminal

Medición del nivel de madurez de la gestión de activos: una revisión y propuesta para los negocios certificados bajo la norma ISO 55001 del Grupo EPM

Measuring the maturity level of asset management: a review and proposal for EPM Group's ISO 55001 certified businesses

Jorge Esteban Rivera Muñoz
Dirección de Gestión de Activos, EPM

jorge.esteban.rivera@epm.com.co

Resumen

Hoy el Grupo EPM ha dado un paso importante dentro de la gestión de activos y es haber certificado el sistema de gestión de activos de todas las filiales nacionales y casa matriz bajo el estándar ISO 55001 para los negocios de T&D, por lo que se hace necesario establecer una metodología con la ayuda de los diferentes referentes normativos internacionales y modelos de madurez acreditados, para continuar la senda de la mejora continua y un crecimiento en el nivel de madurez de la gestión de activos que permita la generación de valor en el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización.

Palabras clave:
Gestión de activos, Sistema de gestión de activos, Nivel de madurez en gestión de activos, Fundamento de la gestión de activos, Escala de calificación, Optimización, Excelencia.

Keywords:
Asset management, Asset management system, Asset management maturity level, Asset management fundamentals, Rating scale, Optimization, Excellence.

Introducción

El objetivo de la gestión de activos es permitir a la organización disponer de los activos adecuados a sus necesidades empresariales y prestar servicios de apoyo para que éstos puedan funcionar eficazmente, así en términos concretos, la gestión de activos permite que una organización obtenga valor de sus activos a medida que persigue sus objetivos estratégicos ISO (2019). Lograr la obtención de valor al tiempo que se equilibran los costes financieros, medioambientales y sociales, el riesgo, el nivel y la calidad del servicio y el rendimiento de los activos, conlleva un proceso de múltiples etapas, la concepción de mejora continua y como dijo el físico y matemático británico William Thomson Kelvin "Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre", así las cosas, queda la tarea de buscar cómo medir el avance en la gestión de activos y es ahí donde resulta el término de grado o nivel de "Madurez en Gestión de Activos".

La figura 1 representa mediante circunferencias de tangentes interiores la relación entre los conceptos de la gestión de la organización, la gestión de activos, el sistema de gestión de activos y el portafolio de gestión de activos o cartera de activos, a la vez que ilustra la base para el entendimiento de los modelos de madurez de la gestión de activos y los diferentes referentes normativos aplicables a cada uno.

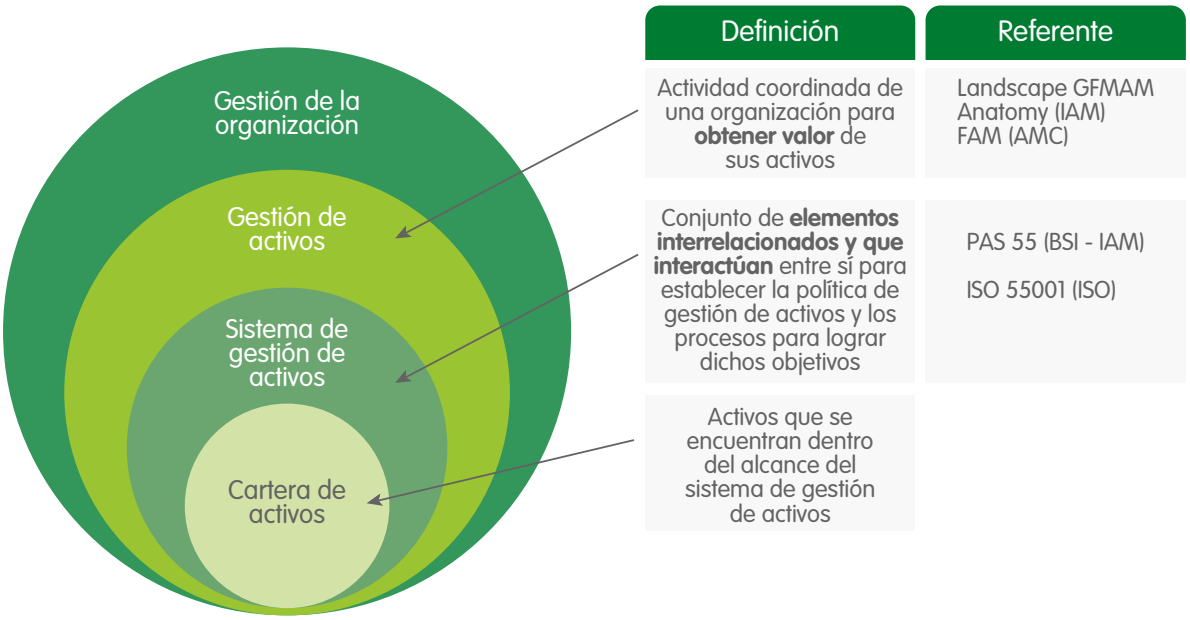


Figura 1. Relaciones entre los términos clave de la gestión de activos y su referente normativo (ISO, 2014a).

1. Referentes normativos de gestión de activos y sistemas de gestión de activos

1.1 Referentes normativos de gestión de activos

1.1.1 Lansdcape GFMAM del Foro Global de Mantenimiento y Gestión de Activos

El Foro Global de Mantenimiento y Gestión de Activos (GFMAM) por sus siglas en inglés, consiste en una agremiación de diferentes entidades cuyo objetivo es el de compartir los avances, conocimientos y normas en materia de mantenimiento y gestión de activos. Dicho foro lo integran entidades de diferentes países como el IAM (Reino Unido), PEMAC (Canadá), AMC (Australia), ABRAMAN (Brasil), entre otros.

Para GFMAM (2014), una de las publicaciones más relevantes es el Asset Management Landscape de marzo del 2014, siendo su segunda versión y actualizada acorde los requerimientos de la ISO 55001, dicho documento tiene como propósito dar una visión general de la disciplina de la gestión de activos y proporcionar la estructura para la creación de un cuerpo de conocimiento o Body of Knowledge para los sistemas de certificación, cualificaciones en gestión de activos, así como brindar criterios para evaluar la madurez.

El desarrollo de este cuerpo de conocimiento conserva los fundamentos comunes de la gestión de activos de valor, alineación, liderazgo y aseguramiento y se desarrolla mediante la estructura de 39 fundamentos divididos en 6 temas: estrategia y planificación, toma de decisiones en la gestión de activos, ejecución del ciclo de vida, información de activo, organización y personas, y riesgo y revisión:

Estrategia y planeación de la gestión de activos	
1	Política de gestión de activos
2	Estrategia y objetivos de la gestión de activos
3	Análisis de la demanda
4	Planeación Estratégica
5	Planeación de la gestión de activos
Toma de decisiones en la gestión de activos	
6	Toma de decisiones en la inversión de capitales
7	Toma de decisiones en operaciones y mantenimiento
8	Comprensión del valor en el ciclo de vida
9	Estrategia de recursos
10	Estrategia de desconexiones e interrupciones
Actividades de cumplimiento del ciclo de vida	
11	Normas técnicas y legislación
12	Creación y adquisición de activos
13	Ingeniería de sistemas
14	Gestión de la configuración
15	Cumplimiento del mantenimiento
16	Ingeniería de confiabilidad
17	Operaciones de activos
18	Gestión de recursos
19	Gestión de desconexiones e interrupciones
20	Respuesta antes fallas e incidentes
21	Desmantelamiento y eliminación de activos

Habilitadores para el conocimiento de activos	
22	Estrategia de información de activos
23	Gestión de la información de activos
24	Sistemas de información de activos
25	Datos e información
Habilitadores de organización y personas	
26	Gestión de la adquisición y de la cadena de suministros
27	Liderazgo para la gestión de activos
28	Estructura organizacional
29	Cultura organizacional
30	Gestión de competencia
Riesgo, revisión y mejora continua	
31	Evaluación y gestión del riesgo
32	Planeación de contingencia y análisis de resiliencia
33	Desarrollo sostenible
34	Gestión del cambio
35	Monitoreo del desempeño y salud de los activos
36	Monitoreo del sistema de gestión de activos
37	Revisión, auditoría y aseguramiento de la gestión
38	Cálculo del costo y valorización del activo
39	Participación de los grupos de interés

Figura 2. Tabla de los fundamentos de la Gestión de Activos (GFMAM, 2014).

Cada fundamento contiene una definición, un contexto, artefactos o elementos a considerar para su desarrollo, fundamentos GFMAM relacionados y referentes normativos aplicables, es decir, se tiene como propósito establecer un ¿Qué? mas no un ¿Cómo?, por lo que no se establecen pautas o una guía de aplicación, quedando a la organización que adopte este referente la tarea de investigar o establecer relaciones de asesoría y consultoría especializada.

1.2 Framework for Asset Management (FAM)

En AMC (2014), el Framework de la Gestión de Activos o FAM por sus siglas en inglés, es una colección de modelos, definiciones y contenidos producido por el Asset Management Council (AMC) de Australia y contenido en su Ambok (Cuerpo del conocimiento de la gestión de activos), que describen la profesión y las prácticas de la gestión de activos, y constituye una base para promover y comunicar una comprensión de dichas prácticas.

El modelo conceptual presenta las expectativas y necesidades de las partes interesadas encerrando los diferentes fundamentos de la gestión de activos, el valor asociado al enfoque en los resultados, el alineamiento asociado a las capacidades, el aseguramiento al nivel de este, y el liderazgo y cultura asociado a la organización de aprendizaje.

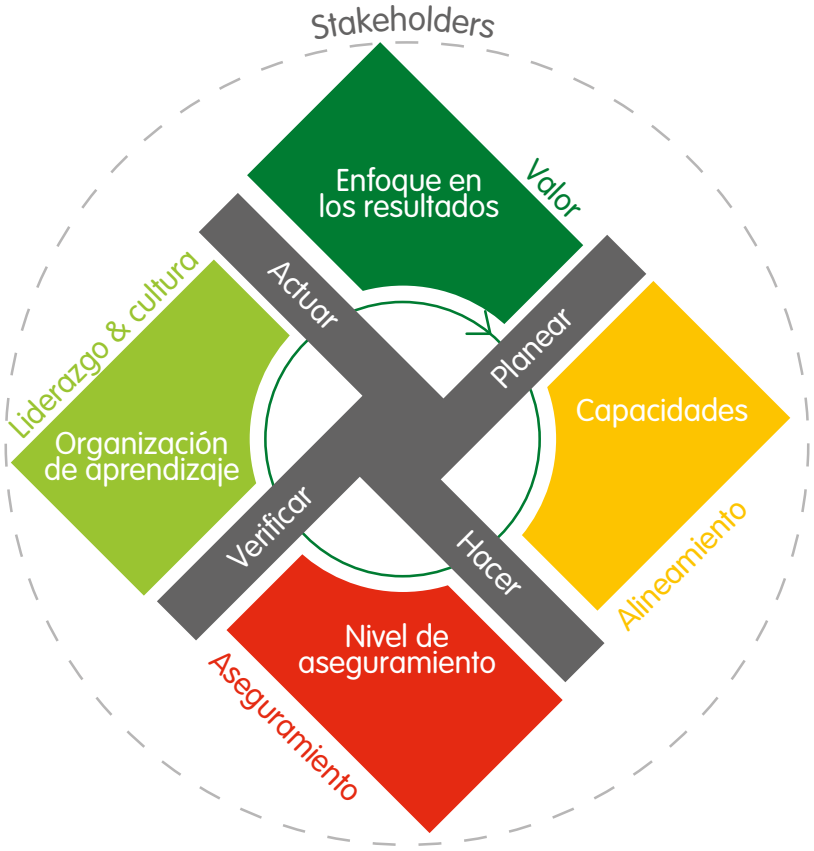


Figura 3. Adaptación de la figura del modelo Conceptual de FAM (AMC, 2014).

Para AMC (2014), el modelo del sistema de gestión de activos del FAM ilustra cuales son los componentes claves de un sistema de gestión de activos y la interrelación de estos, por ejemplo, los objetivos de gestión de activos deben estar en consonancia con todos los demás objetivos de los sistemas/funciones de gestión. Cuando se combinan con todos los demás objetivos de gestión (por ejemplo, financieros, de seguridad, de producción/operaciones, etc.), permiten alcanzar colectivamente los objetivos empresariales requeridos.

Figura 4. Adaptación de la figura del modelo de Sistema de Gestión de Activos del FAM.

En la figura 4 ilustra cómo debe ser la alineación entre los diferentes elementos de un sistema de gestión de activos y la estructura que debe seguir el sistema de gestión, denota como a partir de las expectativas y necesidades de las partes interesadas (regulación, comunidad, empleados, etc.) se establece un liderazgo de la organización con elementos a un nivel estratégico, seguidamente se encuentran los objetivos organizacionales alineados con los objetivos de gestión de activos y finalmente toda una interrelación de los demás elementos como la toma de decisiones y la gestión del riesgo que afectan tanto las competencias, roles como los procesos de la organización.

Se establece también en el FAM que el modelo del Sistema de Gestión de activos (SGA) tiene unos artefactos de los cuales se destacan, el o los

documentos de las tomas de decisiones de las partes interesadas, política de gestión de activos, Plan Estratégico de Gestión de Activos (PEGA) y los planes de gestión de activos, haciendo referencia a la ISO 55000.

La figura 5 muestra el modelo organizacional, el cual es complementario al modelo del sistema de gestión, replicando a todos objetivos estratégicos, es decir, se establece que los objetivos ambientales, de seguridad operacional, de gestión de activos y financieros deben existir los mismos elementos de gestión de la figura 4.

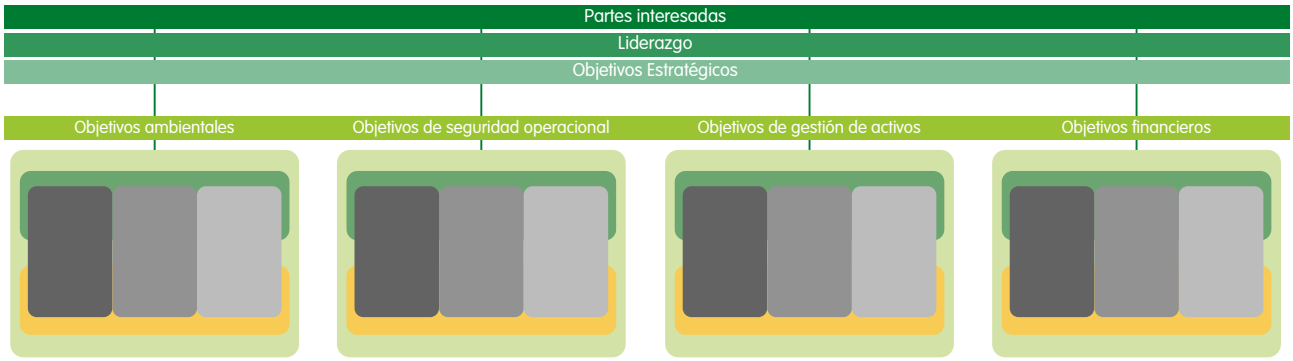


Figura 5. Adaptación de la figura del modelo organizacional de Gestión de Activos del FAM. (AMC, 2014).

En AMC (2014), finalmente, el FAM presenta su modelo de entrega o prestación de capacidades o Capability Delivery Model que ilustra esquemáticamente los procesos que pueden utilizarse en parte o en su totalidad por la organización, estos procesos se indican en 6 disciplinas: gestión de la demanda, Ingeniería de sistemas, gestión de la configuración, adquisiciones, operaciones y mantenimiento, y mejora continua, estas disciplinas están asociadas a una serie de normas nacionales e internacionales, como la ISO/IEC 15288 según cita el FAM.

Gestión de activos: una anatomía del IAM

Según IAM (2015), al igual que el FAM, el *Anatomy* o como su nombre completo lo ilustra Gestión de activos: una anatomía, es un referente relevante dentro de la gestión de activos, su nombre anatomía se define como el estudio de la estructura o funcionamiento interno de algo con el propósito de examinar y analizar sus partes, y es precisamente lo que este documento logra aterrizar con la ayuda de su modelo conceptual de 6 cajas *6 boxes*.

Para el año 2012 el modelo conceptual del IAM se alinea con las disposiciones del *Landscape* del GFMAM, definiendo las diferentes interacciones entre los 6 temas y su integración con el ciclo de vida de los activos.

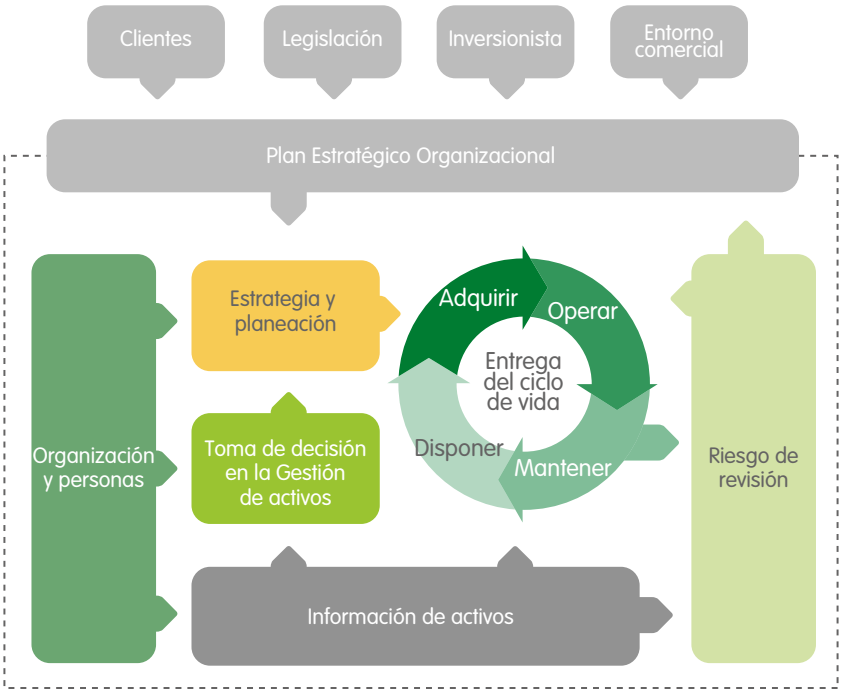


Figura 6. Modelo conceptual de la gestión de activos del IAM (IAM, 2015).

Para IAM (2015) este referente normativo detalla no solamente el ¿Qué? de los 39 fundamentos del GFMAM al alinearlo con su modelo conceptual, sino que también establece un ¿Cómo? con una serie de recomendaciones, adicionalmente plantea una serie de recursos de los que dispone el IAM para complementar el entendimiento de temas específicos, aquí se encuentra la herramienta del Big Picture, los documentos de la directrices sobre temas específicos o SSG por sus siglas en inglés, marco de competencias y dos herramientas que se trataran posteriormente como son las directrices y escalas de madurez en la gestión de activos y la Metodología de autoevaluación Plus o SAM+ por sus siglas en inglés.

1.3 Referentes de Sistemas de Gestión de Activos

1.3.1 PAS 55

En IAM (2008), las Especificaciones Disponibles al Público 55 o PAS 55 por sus siglas en inglés, fueron el primer documento que dio línea a un sistema de gestión dentro de la gestión de activos, lo anterior bajo la premisa de una respuesta a la demanda por parte de la industria de un estándar con la connotación de sistema de gestión de alto nivel, es decir, con la estructura de la ISO 14000 o ISO 18000, la primera edición se dio en el año 2004 y para el 2008 se realizó la respectiva revisión.

Este referente normativo fue dirigido por el IAM en colaboración del Instituto de Estándares Británico (BSI), constaba de dos partes, la de especificaciones para la gestión optimizada de los activos físicos (PAS55-1) y la de directrices para la aplicación (PAS55-2). Para Durán (s.f.), si bien tuvo gran aceptación por la industria y ayudó a establecer madurez en diferentes organizaciones a nivel mundial en sistemas de gestión de activos, nunca se consideró un estándar británico, no obstante, demostró ser una excelente ayuda para establecer, revisar y mejorar sistemas de gestión de mantenimiento, auditables y certificables con una amplia credibilidad internacional.

1.3.2 Familia de Normas ISO 5500X

Según las ISO (2018), la Familia de Nomas ISO 5500X consisten en un conjunto de normas internacionales (ISO 55000; 55001; 55002) que proveen una descripción general sobre la Gestión de Activos, sus principios y terminología y beneficios esperados de adoptar la gestión de activos e implementar un Sistema de Gestión de Activos (ISO, 2019), allí se explica los principales conceptos, elementos y lenguaje para una buena Gestión de Activos (ISO 55000- ¿Por Qué?) (ISO, 2014a), provee los requisitos de un Sistema de Gestión de Activos (ISO 55001 - ¿Qué?) (ISO, 2014b) y unas directrices para la aplicación de estos requisitos (ISO 55002- ¿Cómo?)

Construido como un sistema de gestión ISO con estructura de alto nivel (HLS), consta de los elementos de contexto operacional, liderazgo, planificación, recursos, procesos, evaluación del desempeño y mejora continua.

2. Modelos de madurez en la gestión de activos

Existen múltiples modelos de madurez para la gestión de activos en las organizaciones, unos desarrollados de manera local por cada organización, también por tipos de industrias similares agremiadas bajo un mismo concepto como localidades, distritos, como es el caso de la Federación de Municipalidades Canadienses –FMC, por sus siglas en inglés- y también por entidades más reconocidas como el IAM, AMC o ABRAMAN de Brasil, todos integrantes del GFMAM que si bien no tiene un modelo específico, ha dado directrices de lo que se espera de un modelo de madurez en la gestión de activos.

2.1 Directrices del GFMAM

El Foro Global de Mantenimiento y Gestión de Activos ha emitido una serie de directrices bajo las cuales se espera que se encuentre enmarcado un modelo de madurez de gestión de activos.

2.1.1 Declaración de Posición

Para GFMAM (2021a), en su segunda versión, esta declaración de posición contiene una serie de antecedentes y un camino a la madurez donde plantea una escala para la medición, de la siguiente manera:

- **Instintivo:** Gestión por instinto, sin valores ni normas colectivas.
- **Dependencia:** Dependiente de la existencia de normas mantenidas por la alta dirección que transmite a las personas los valores y creencias de esa sociedad.
- **Independencia:** El liderazgo independiente empieza a ser un proceso. Ofrecerá buenos resultados alineados con los objetivos de la organización, pero aún no está plenamente arraigado en todos los niveles de la organización.
- **Interdependencia:** El liderazgo interdependiente se convierte en un proceso en el que las normas de conducta para todos están guiadas por el propósito de la organización y sus valores y creencias, que es coherente con su cultura y contexto. Aportará el máximo valor respecto a los objetivos de la organización de forma sostenible a largo plazo. Puede mantenerse incluso con cambios importantes en el personal clave.

La figura 7 muestra los diferentes niveles de madurez en la gestión de activos ubicándola entre la capacidad organizacional en gestión de activos y el desempeño de la organización, donde también se pueden ilustrar 4 cuadrantes obteniendo una madurez óptima en el superior derecho, una prometedora en inferior derecho, en el superior izquierdo una madurez eficaz pero insostenible e inferior izquierdo una madurez ineficaz.

Figura 7. Adaptación de los Niveles de madurez en la gestión de activos (GFMAM, 2021a).

Por último, la declaración de posición presenta las características que debe mostrar una organización madura y los beneficios dentro de 5 aspectos: partes interesadas y contexto, liderazgo y cultura, toma de decisiones, mejora continua y por último resultados y valor.

2.1.2 Directrices para evaluar la madurez de la gestión de activos

Para GFMAM (2021b), en esta guía de directrices hace énfasis sobre la necesidad de contar con un *framework* o referente base para establecer la madurez de gestión de activos, se establecen los beneficios de contar con una medición de la madurez de gestión de activos, los componentes de la evaluación de madurez como: alcance, presentación de la documentación, análisis de la documentación, entrevistas y visitas y por último la evaluación de la madurez de la gestión de activos, la cual se resalta debe contener tanto los elementos de la ISO 55001 como los 39 fundamentos del *Landscape* de GFMAM para asegurar que tiene cobertura sobre la gestión de activos y no solo sobre el sistema.

2.1.3 Especificación para un evaluador de la madurez de la gestión de activos

En GFMAM (2021c), esta especificación detalla la competencia de un evaluador de la madurez de gestión de activos determinando la experiencia, conocimiento, educación, habilidades y finalmente el establecimiento de un pensamiento jerárquico a partir de la taxonomía de Bloom, comenzando por recordar, entender, aplicar, analizar, evaluar y crear.

2.2 Modelos de madurez del AMC

Según el AMC (s. f), se estableció un modelo de madurez propio para la gestión de activos denominado AMMM por su siglas en inglés, en el cual a partir de un aplicativo web de aproximadamente 150 preguntas determina el estado de la organización frente al sistema de gestión de activos, dicha evaluación se puede realizar con 3 opciones diferentes, una básica que muestra el nivel de madurez de la gestión de activos de la organización dentro de 10 elementos de la gestión de activos, una intermedia que muestra lo de la básica más una comparación o benchmarking del nivel de madurez de la organización con otras del mismo sector y de otros sectores y finalmente una avanzada que muestra lo de la intermedia más informe que destaca los puntos fuertes y las oportunidades de la organización, y una sesión informativa para ejecutivos el último día de la evaluación.

La evaluación avanzada también cuenta con visitas en sitio y dos asesores certificados CFMA (Certified Fellow in Asset Management) que acompañan todo el proceso y validan las evidencias presentadas.

Según AMC (s. f) dicho modelo se presenta con una estructura en 3 dimensiones, como se aprecia en la figura 12, donde en un eje están los temas evaluados que corresponden a las definiciones de la norma ISO 55000, los requisitos de la ISO 55001 y los modelos del FAM, es decir, los 10 elementos de la gestión de activos acorde al modelo, un segundo eje con los fundamentos de un sistema de gestión de activos más un componente de agilismo y un tercer eje con la escala de madurez de este modelo, la cual se define en:

- **Patológico:** ¿para qué gastar nuestro tiempo en gestión de activos?
- **Reactivo:** hacemos algo cuando tenemos un incidente.
- **Burocrático:** disponemos de un sistema para la gestión de activos.
- **Proactivo:** estamos en alerta para las oportunidades de gestión de activos y los riesgos que pudieran emerger.
- **Generativo:** la gestión de activos es parte integral de todo lo que hacemos.

Figura 8. Representación de las dimensiones del modelo de madurez del AMC.

En AMC (s. f), este modelo no proporciona una guía específica para determinar la forma en que se establecen las calificaciones, el aplicativo web del modelo de madurez según las evidencias proporcionadas y las respuestas otorgadas por la organización, entrega un radar con el ajuste a los requisitos de la norma ISO 55001, un radar con el ajuste a los 10 temas de gestión de activos, un gráfico de barras donde indica porcentualmente el cumplimiento con los fundamentos de gestión de activos y una gráfica de la ubicación de la madurez de la organización, donde se relaciona el uso del sistema de gestión de activos vs el logro de resultados, similar al de la figura 11.

2.3 Escala y directriz de madurez en la gestión de activos del IAM

Para IAM (2016), esta directriz de madurez parte del marco de referencia de los 6 temas y 39 fundamentos del *Landscape* del GFMAM (Tabla 1) y que fue adoptado como se vio previamente por el modelo conceptual de 6 cajas del IAM. Esta directriz va en su versión 1.1 publicada en el año 2016 y detalla en su escala de 0 a 5 la calificación que se debería otorgar a cada uno de los 39 fundamentos; además, incluye un fundamento N°0, el cual es contar con un sistema de gestión de activos. La escala se determina de la siguiente manera:

- **0. inocente:** la organización no ha reconocido la necesidad de este requerimiento o no existe evidencia de compromiso asumido.
- **1. consciente:** la organización ha identificado la necesidad de este requerimiento y existe evidencia de la intención de desarrollarlo.
- **2. desarrollo:** la organización ha identificado los medios para alcanzar sistemática y continuamente los requerimientos, y puede demostrar que estos están siendo desarrollados con planes creíbles y con los recursos necesarios.
- **3. competente:** la organización puede demostrar que alcanza sistemática y continuamente los requerimientos relevantes establecidos en ISO 55001.
- **4. optimizado:** la organización puede demostrar que está sistemática y coherentemente optimizando su práctica de gestión de activos, de acuerdo con los objetivos y contexto operacional de la organización.
- **5. excelente:** la organización puede demostrar que aplica las prácticas de liderazgo y alcanza el valor máximo de la gestión de sus activos, acorde con los objetivos y contexto operacional de la organización.

Para IAM (2016), de manera complementaria a esta escala se tiene el análisis del corbatín o *Bow Tie* el cual de manera gráfica ilustra cómo las organizaciones comienzan implementando la gestión de activos a través de un proceso de alineación e integración alcanzando la competencia, independientemente de los activos o del contexto organizacional, así el estado central para ser competente corresponde al nivel de madurez coordinado, integrado, alineado y gestionado del ciclo de vida. Niveles superiores entonces serán dependientes del portafolio de activos y su contexto.

La figura 8 ilustra el diagrama del análisis *Bow Tie* y con el cual se debe tener precaución, ya que este modelo de madurez del IAM está diseñado para la gestión de activos y no para la madurez del sistema de gestión de activos, recordando que se busca evidencias para calificar las 6 cajas y sus 39 fundamentos y no los requisitos de la ISO 55001, no obstante, la calificación de competente establece el alcanzar sistemática y continuamente los requisitos de esta norma ISO.

Según ISO (2014ª) La directriz de madurez del IAM establece que el ser competente en los 39 fundamentos es equivalente a tener un sistema de gestión de activos implementado y conforme a la norma ISO 55001, incluso en el análisis *Bow Tie* ilustra como la calificación de competente tiene la descripción de apto para certificación y tiene embebida la gráfica de la relación entre los elementos claves del sistema de gestión de activos de la ISO 55000. Lo anterior conlleva un análisis detallado en las organizaciones y sobre todo aquellas quienes implementaron el sistema de gestión de activos mediante una hoja de ruta siguiendo la ISO 55001 y no los 39 fundamentos.

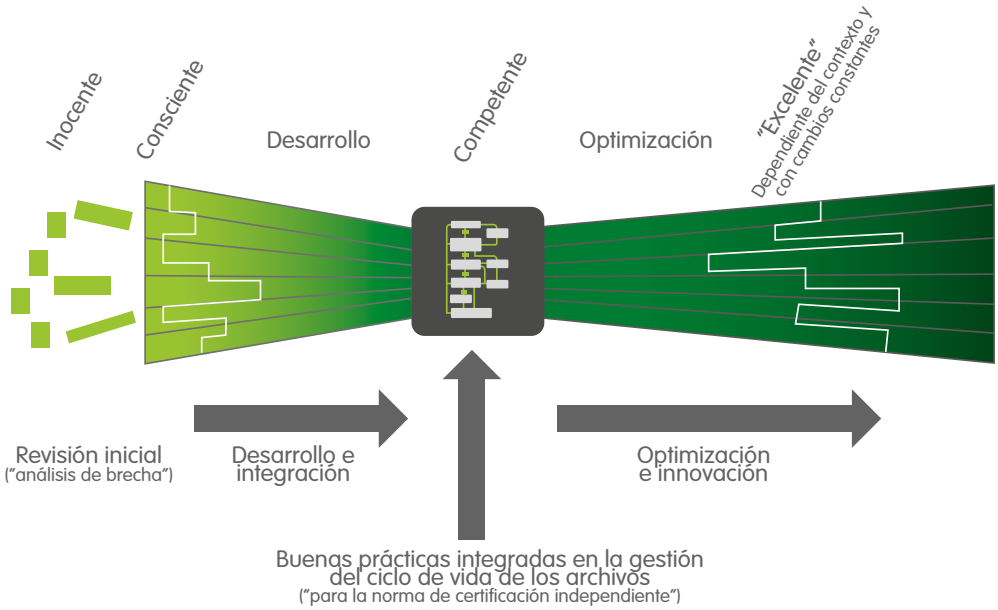


Figura 9. Diagrama del análisis *Bow Tie* de la directriz madurez en la gestión de activos.

2.3.1 Metodología de autoevaluación (SAM+)

Según IAM (2016), la Metodología de Autoevaluación o SAM por sus siglas en inglés es un insumo complementario de la directriz para la madurez y tiene como objetivo establecer perfiles de madurez y brechas en etapas tempranas de implementación, con el fin de alcanzar el nivel de competencia en algún referente normativo, por ejemplo, la SAM puede parametrizarse con la PAS55, la ISO 55001 o los 39 fundamentos, dejando claro que la máxima calificación posible es de 3, ya que si bien esta directriz para la madurez proporciona los elementos para calificar niveles superiores en la gestión de activos, establece que la SAM no es la herramienta diagnóstica pertinente.

2.4 El camino a la excelencia en la gestión de activos – Escala de madurez y guía (IAM)

Esta guía de IAM (2021), en su segunda versión del año 2022, llega a determinar en gran medida las características de optimización y excelencia en la gestión de activos, trascendiendo del modelo conceptual de 6 cajas del IAM y del Landscape del GFMAM con sus 39 fundamentos, dejando un precedente importante al plantear un nuevo modelo conceptual de 10 cajas para estas calificaciones superiores.

Acorde a la figura 10, se tienen unas entradas nuevas y cambios en la descripción con relación al modelo de 6 cajas, entra el propósito y contexto, liderazgo y gobernanza, valor y resultado, se separa la gestión de riesgos de la revisión y esta a su vez se complementa con la mejora continua, finalmente la información de los activos pasa a tener un carácter de gestión de la información.

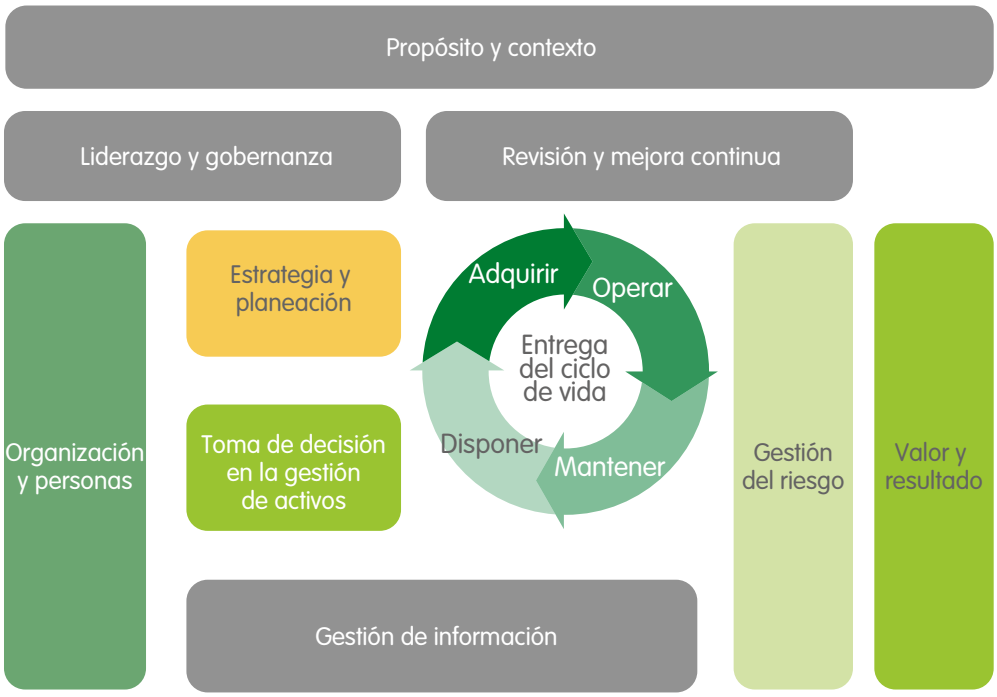


Figura 10. Adaptación del modelo conceptual de la gestión de activos del IAM para Niveles de Optimización y Excelencia (IAM,2021).

Se plantea también una modificación al modelo *Bow Tie* como se ilustra en la figura 15, donde combina los dos modelos conceptuales del IAM estableciendo que para encontrar la competencia se deben explorar el modelo de 6 cajas y que para alcanzar la optimización y la excelencia se debe orientar hacia el modelo de 10 cajas.

De acuerdo a IAM (2021) el modelo conceptual de 10 cajas propuesto al no tener como referente al *Landscape* del GFMAM y no existir un referente normativo o *framework* como la Gestión de activos: una anatomía, adolece de una explicación detallada, artefactos y recomendaciones. Esta guía para la excelencia se centra en la presentación de una serie de preguntas que debería tener en cuenta el evaluador experto, pero sin presentarle una vinculación cuantitativa como sus directrices predecesoras, reiterando que debe tenerse presente el contexto de la organización con elementos como la criticidad, volatilidad y la complejidad. Muchas preguntas son abiertas y más que criterios de sí/no, el reconocimiento de la optimización o la excelencia es necesariamente un juicio cualitativo sobre la adecuación a la situación particular de la organización.

Para IAM (2021) el evaluador que está en busca de diagnosticar la gestión de activos dentro de los niveles de optimización y la excelencia debe reconocer que la organización ha alcanzado, o se está acercando a los límites del desarrollo, la capacidad y el rendimiento pertinentes, debe ser capaz de calibrar la idoneidad de las actividades, las pruebas de optimización sistemática y proporcionada, el valor que se está generando y las pruebas de innovación real, con lo que también se concluye que estas evaluaciones son dinámicas, por ejemplo, si se otorga un nivel de optimización en alguna *caja* por alguna innovación o ser referente en el sector, no necesariamente en evaluaciones futuras lo siga siendo, por lo que la calificación pudiese disminuir o sostenerse aun cuando se presenten nuevas evidencias.

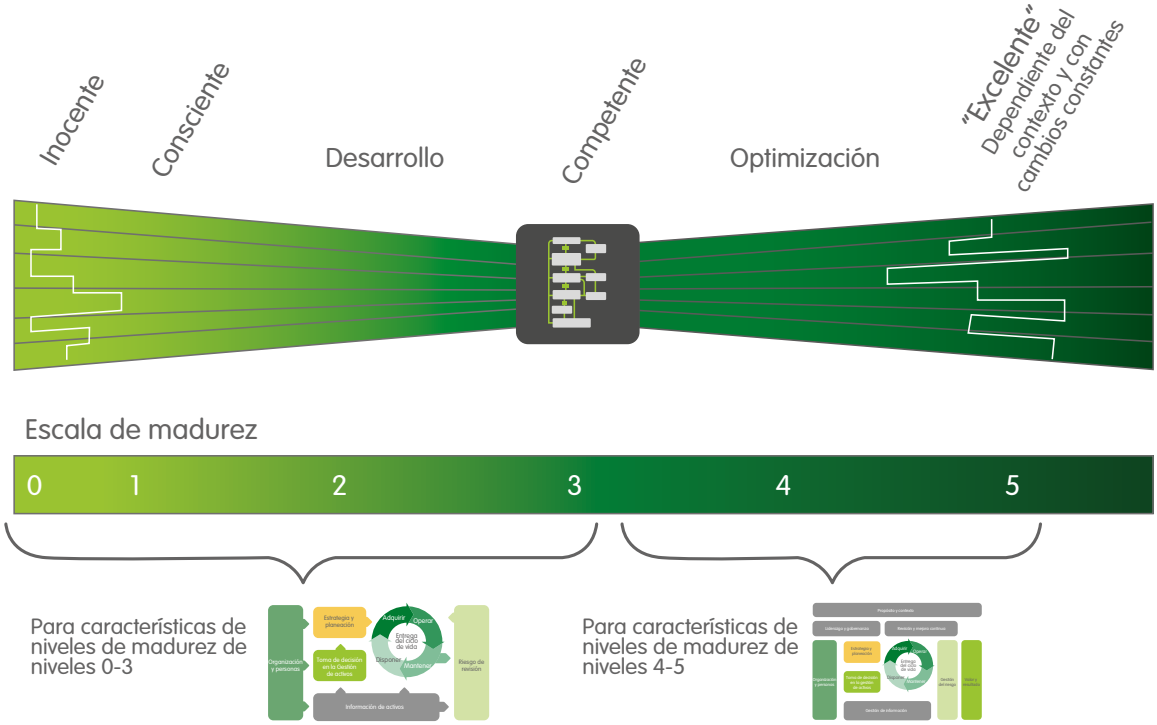


Figura 11. Adaptación del diagrama del análisis *Bow Tie* (IAM, 2021)

3. Propuesta para la medición de la madurez en gestión de activos para negocios competentes y/o certificados

Para los negocios certificados bajo la ISO 55001 del Grupo EPM, así como para aquellos que están en la senda de alcanzar la competencia de su sistema de gestión de activos, independiente de que busquen o no certificarse, ha existido un común denominador y es que su hoja de ruta ha estado basada en los requisitos de la ISO 55001, lo que conlleva necesariamente a, antes de pensar en buscar los niveles de optimización y excelencia, dar un primer paso y validar si la hipótesis de tener un sistema de gestión de activos competente es equivalente a tener todos los fundamentos del modelo de 6 cajas en igual calificación, ya que para una organización o negocio sería sumamente complejo ir a validar la excelencia en temas como confiabilidad, cuando la ISO 55001 no lo establecía como un requisito pero el modelo de 6 cajas sí.

Según la ISO (2018), organizaciones que hayan tenido como guía de implementación la ISO 55002 pudieron haber considerado elementos de confiabilidad en la creación de objetivos de gestión de activos y/o en los elementos de evaluación del desempeño, o como en el caso de varios negocios del Grupo EPM donde estas prácticas ya hacían parte de los artefactos para la toma de decisiones dentro de los procesos y se adaptaron al sistema de gestión de activos.

Con el fin de validar lo anterior, la propuesta radica en que para aquellos negocios y/o filiales del grupo EPM que hayan alcanzado la certificación o competencia de su sistema de gestión de activos, el próximo nivel de madurez que se realice, debe radicar en evaluar los 39 fundamentos del modelo de 6 cajas del IAM y dejar así sentadas las bases o brechas para empezar a buscar los niveles de optimización y excelencia. Para lo anterior se requiere parametrizar la SAM y contar con un evaluador que tenga pleno conocimiento de los referentes normativos que implica esta evaluación.

3.1 El Indicador estratégico de Nivel de Madurez en Gestión de Activos (NMGA)

Hoy EPM y la mayoría de las filiales tienen dentro de su cuadro de mando integral el objetivo de *Gestionar Efectivamente las Operaciones* (o una redacción similar en este objetivo) perteneciente a la perspectiva de Operaciones. Allí, entre varios indicadores que nutren la gestión, se encuentra el indicador que nos permite gestionar la mejora continua de la gestión de activos, el indicador de Nivel de Madurez en Gestión de Activos (NMGA), el cual, si bien tiene la finalidad o alcance de medir toda la gestión de activos, hoy tiene un foco muy importante y es dar testimonio cuantitativo de la implementación del sistema de gestión de activos, dato que es proporcionado por los resultados de las evaluaciones anuales elaboradas con la metodología SAM.

Hoy, el indicador NMGA está definido con unas variables asociadas a los diferentes requisitos de la norma ISO 55001 y una meta de 3 para el 2023. La propuesta es ampliar la cantidad de variables que intervienen y poder así conservar la trazabilidad del mismo, de este modo se agruparían todas la variables actuales en un solo resultado denominado fundamento N°0, el cual, en caso de sostener la certificación y/o contar con un auditoría que demuestre que el sistema de gestión de activos es competente, se le otorgaría la calificación de 3 por parte del evaluador y así continuar con los demás 39 fundamentos, dando lugar a la primera medición de la gestión de activos.

Lo anterior permitiría que cuando el indicador requiera expandirse al modelo de 10 cajas buscando la parametrización de la optimización y la excelencia, se sostenga toda la trazabilidad desde que se consideraba solamente el sistema de gestión de activos.

3.2 Coherencia en los resultados

La ISO 55000 (2014) define la *gestión de activos* como

> una actividad coordinada de una organización para obtener valor a partir de los activos. Establece adicionalmente en la definición de *valor* que los activos existen para proporcionar valor a la organización y a sus partes interesadas, que la gestión de activos no se enfoca en sí misma, sino en el valor que el activo puede proporcionar a la organización y finalmente que el valor será determinado por la organización y sus partes interesadas, de acuerdo con los objetivos organizacionales. (p. 3)

Dentro de las generalidades de esta misma norma se encuentra que el *sistema de gestión de activos* "es un conjunto de elementos de una organización interrelacionados y que interactúan cuya función es establecer la política y los objetivos de la gestión de activos y los procesos necesarios para alcanzar dichos objetivos." (ISO, 2014a)

Dado lo anterior, no resultaría coherente un incremento en el nivel de madurez de la gestión de activos, o del sistema de gestión de activos, si no estamos obteniendo valor a partir de los activos, o los objetivos de gestión de activos que apalancan los estratégicos no se están cumpliendo, es decir, el nivel de madurez y los resultados organizacionales deber ir sincronizados en su tendencia, por ejemplo, si los indicadores de disponibilidad no se están cumpliendo de manera repetitiva es evidente que las acciones para mitigar el riesgo de

incumplimiento no están siendo efectivas, por lo tanto se esperaría que la calificación del nivel de madurez fuera coherente con este hallazgo.

El requisito 9.1 de la norma ISO 55001 establece que la organización debe asegurar que sus seguimientos y mediciones le permitan cumplir con las expectativas y necesidades de las partes interesadas (ISO, 2014b), dando una clara disposición de que el objetivo del seguimiento, medición, análisis y evaluación es proporcionar los insumos para la toma de decisiones que permita alcanzar la meta de los objetivos de gestión de activos, trascendiendo de un asunto meramente documental.

3.3 Evaluaciones de Optimización y Excelencia

Para cuando la organización y/o negocios del grupo EPM determinen que ya se tiene competencia con el modelo conceptual de las 6 cajas del IAM y se haya realizado un manejo del cambio por la Dirección de Gestión de Activos o encargados en cada filial, se podrá emprender el camino en la búsqueda de la optimización y la excelencia. Acá, se tienen dos retos importantes que resolver y son las prácticas innovadoras en gestión de activos en búsqueda de valor que establecerán los negocios y sus procesos, y determinar las competencias de los evaluadores, así como los planes de capacitación asociados.

Conclusiones

El Grupo EPM ha establecido actividades de gestión de activos, así como los procesos necesarios para establecer los sistemas de gestión de activos en sus diferentes filiales y negocios, dando lugar a la generación de valor y el cumplimiento de los objetivos de gestión de activos como apalancadores de los objetivos estratégicos, esto se ha visto reflejado al alcanzar niveles de madurez satisfactorios acorde a las metas establecidas y que en casos como el de los negocios de T&D nacionales hicieron meritoria la certificación de su sistema de gestión de activos bajo el estándar ISO 55001.

Con el fin de continuar con la generación de valor y el apalancamiento de los objetivos estratégicos, se hace necesario la adaptación de referentes complementarios tanto en la gestión de activos como en sus modelos y directrices de madurez asociados, entre estos encontramos las publicaciones de Foro Mundial de Mantenimiento y Gestión de Activos (GFMAM) como la agremiación más grande del mundo en cuanto a entidades dedicadas al estudio de la gestión de activos se refiere, los desarrollos del Council de Gestión de Activos de Australia (AMC) que poco a poco han ido entrando al contexto latinoamericano con certificaciones como la CAMA (Certified Asset Management Assessors) y las del Instituto de Gestión de Activos (IAM) que son las que en mayor proporción se han adaptado a la gestión de activos del Grupo EPM.

Luego de establecer el contexto de la medición de los niveles de madurez actuales del Grupo EPM, se encuentra que dispone de un indicador con un protagonismo claro dentro de los objetivos estratégicos y que dicho indicador actualmente verifica los niveles alcanzados en la madurez del sistema de gestión de activos, que para algunos negocios como los de T&D ya ha alcanzado su máximo por diseño, es decir, competente.

La propuesta para los negocios competentes se basa entonces en:

1. Ajustar la metodología SAM para evaluar los 39 fundamentos del modelo conceptual de 6 cajas.

2. Ajustar el indicador NMGA conservando las variables actuales y complementando con las necesarias para evaluar los 39 fundamentos del modelo de 6 cajas.

3. Evaluar el fundamento N°0 que sería el sistema de gestión de activos, acá se tomaría un valor de 3 asegurado por un sistema certificado y con seguimientos anuales.

4. Evaluar los 39 fundamentos y validar la hipótesis sobre la competencia del sistema de gestión de activos en relación a la competencia del modelo conceptual de 6 cajas.

5. En caso de encontrar brechas, establecer los respectivos planes de acción con un foco de generar valor.

6. Realizar las evaluaciones de madurez anuales necesarias hasta encontrar la competencia en gestión de activos.

7. Realizar un manejo del cambio por parte de la Dirección de Gestión de Activos para la determinar todos los riesgos y acciones de mitigación que se requieren para ajustar los negocios a las prácticas de optimización y excelencia.

8. Si bien este último paso haría parte del anterior, es necesario dejar explicito que se debe continuar con el modelo de medición propuesto anteriormente hasta tanto no se valide que las prácticas a adoptar agregan valor y contar con los evaluadores con el nivel de experticia y conocimiento apropiados.

Finalmente, es importante concluir que después de conocer la interrelación de elementos, temas o cajas del modelo conceptual de 6 y 10 cajas del IAM, resulta imprudente pensar en adolecer de alguna

de ellas para establecer la gestión de activos en la organización, si bien existirán prioridades para ir trabajándolas acorde al recurso disponible, es importante saber que al igual que con los requisitos de la ISO 55001 no hay uno más importante que otro y que para llegar al entendimiento holístico de la gestión de activos es necesario abordar todos los temas o cajas, reiterando la búsqueda de generar valor y el cumplimiento de los objetivos estratégicos.

Referencias

- Asset Management Council. (s. f.). *Asset Management Maturity - An introduction to the AM Council's maturity assessment tool.* Recuperado febrero 16, 2023, de https://rebrand.ly/wrjubxr
- Asset Management Council. (2014). *Framework for the Asset Management.*
- Durán, J. B. M. (s. f.). *Gestión de Mantenimiento bajo estándares Internacionales como PAS 55 Asset Management.* www.twpl.com
- Hardwick, J. C. G., Kerr, M. C. C., Killeen, M., & Kohler, P. B. E. (Mech), C. (2021). *Living Asset Management Maturity.* Tablo Pty Ltd.
- Organización Internacional de Normalización. (2014a). Gestión de activos, aspectos generales, principios y terminología (ISO 55000). www.iso.org
- Organización Internacional de Normalización. (2014b). Gestión de activos, Sistemas de gestión, Requisitos (ISO 55001). www.iso.org
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *Directrices para la aplicación de la ISO 55001* (ISO 55002). www.une.org
- Organización Internacional de Normalización. (2019). Comprendiendo los beneficios de un Sistema de Gestión de Activos de la Norma ISO 55001 Gestión de Activos (ISO 5500X).
- The Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2021). *Asset Management Readiness Scale - Municipal Asset Management Program Contents.*
- The Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2014). *The Asset Management Landscape* (Segunda edición). www.gfmam.org
- The Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2021a). *Asset Management Maturity A Position Statement.* www.gfmam.org
- The Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2021b). *Guidelines for Assessing Asset Management Maturity.* www.gfmam.org
- The Global Forum on Maintenance & Asset Management. (2021c). *Specification for an Asset Management Maturity Assessor.* www.gfmam.org
- The Institute of Asset Management. (2008). *PAS 55-1:2008 Parte 1: Especificaciones para la gestión optimizada de activos físicos.* www.theIAM.org

- The Institute of Asset Management. (2015). Gestión de activos: una anatomía. In *Versión 3.* www.theIAM.org
- The Institute of Asset Management. (2016). *IAM Escala y directriz de madurez en la gestión de activos (Maturity Scale).*
- The Institute of Asset Management. (2021). *The Pathway to Excellence In Asset Management IAM Maturity Scale & Guidance.* www.theIAM.org

Cómo citar este artículo:

Rivera, J. (2023). Propuesta para la medición del nivel de madurez de la gestión de activos en los negocios certificados bajo la norma ISO 55001 del Grupo EPM. *Revista EPM,* (21), 60-79.

Oportunidades y desafíos de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos: revisión de literatura

Opportunities and challenges of Web 3.0 in the public services sector: literature review

Beatriz Eugenia Giraldo Castaño
Gerencia Nuevas Soluciones, EPM
beatriz.eugenia.giraldo@epm.com.co

Enrique Villa Pérez
Gerencia Nuevas Soluciones, EPM
enrique.villa@epm.com.co

Resumen

Este artículo tiene como objetivo identificar las oportunidades y desafíos que presenta la Web 3.0 en el sector de servicios públicos, mediante una revisión de literatura y un análisis bibliométrico, además de proponer soluciones que apunten a la mejora de eficiencia o nuevos modelos de negocio en las empresas de servicios públicos.

La Web 3.0 es la evolución del internet y se caracteriza por ser una web descentralizada, donde los usuarios tienen un control total sobre sus datos y su privacidad. A partir del análisis realizado, se presentan una serie de casos de uso aplicados en el sector de las Utilities que han conducido a mejoras en eficiencia a través de procesos innovadores, así como a la monetización de servicios. Sin embargo, la implementación de la Web 3.0 también conlleva retos en su implementación, especialmente en empresas tradicionales como las empresas de servicios públicos, entre los cuales de encuentran la falta de regulación, la resistencia al cambio y los costos asociados con la implementación.

Palabras clave:
Web 3.0, Empresas de servicios públicos, Utilities, Bibliométrico, Nuevas soluciones, Eficiencia, Innovación, Monetización.

Keywords:
Web 3.0, Public service companies, Utilities, Bibliometric, New solutions, Efficiency, Innovation, Monetization

Clasificación JEL:

O32 - Innovación y adopción de nuevas tecnologías
L96 - Servicios públicos y regulación
O33 - Análisis bibliométrico y revisión de literatura.

Introducción

Hace 20 años, Rheingold (1993) describió las comunidades virtuales como grupos de personas que se conectan a través de intereses y emociones. La evolución del internet ha estado diferenciada por diferentes denominaciones en función de su avance; en sus inicios cercanos a los años 1980, la Web 1.0 era una red estática en la que los desarrolladores se centraban en proporcionar contenido a los usuarios (Goodwin, 2004). En su segunda etapa, la Web 2.0 revolucionó la forma de interactuar de las personas en línea, con plataformas como Facebook y YouTube que en su momento modificaron el panorama de la web (Ifenthaler, 2012). Aunque la Web 2.0 es social y fácil de usar, su uso y centralización de datos de usuarios planteó preocupaciones sobre la privacidad y el control del usuario (Gupta y Singh, 2022).

En la actualidad, la Web 3.0 se centra en la creación de un entorno de aprendizaje personalizado y significativo a través del uso de tecnologías inteligentes (Çelik y Elci, 2020). Esto incluye la web semántica, que permite que las máquinas comprendan y procesen el significado de los datos y la información en línea para una mejor personalización de los servicios (Berners-Lee et al., 2001; Çelik y Elci, 2020). Por su parte, la pandemia del COVID-19 ha actuado como un catalizador para la adopción acelerada de la web 3.0, llevando a la transformación digital en muchos sectores y acelerando la creación de nuevas oportunidades de negocio en línea (Khan et al., 2022).

Esta investigación se centra en el impacto de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos y tiene como objetivo identificar los desafíos y oportunidades que plantean en éste las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, blockchain, realidad aumentada, tecnología semántica y el metaverso. Con una revisión sistemática de la literatura se seleccionan los artículos relevantes, a través de la base de datos académica Web of Science, para analizar los datos, presentar los resultados y discutirlos en la sección de conclusiones, donde se abordan las implicaciones prácticas para el sector de servicios públicos.

La pregunta central es cómo las empresas de servicios públicos pueden aprovechar las oportunidades y superar los desafíos de la Web 3.0 para mejorar su eficiencia y ofrecer soluciones innovadoras a sus usuarios.

Metodología

El artículo emplea una combinación de métodos sistemáticos, empíricos y críticos para examinar literatura relacionada con el tema, obtener y analizar tanto datos cuantitativos como cualitativos para establecer conclusiones sobre las oportunidades y desafíos de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos y su impacto en la productividad, la innovación y la generación de ingresos.

Para recopilar información relevante, se realizó una revisión de la literatura empleando técnicas bibliométricas, con el fin de clasificar la investigación académica y los estudios científicos, así como identificar nuevas tendencias en la investigación y evaluar el rendimiento de la literatura. Diferentes estudios han destacado la efectividad del análisis bibliométrico en la investigación, como Donthu et al., (2021) y Lewis y Alpi (2017). Además, se hace hincapié en la utilidad de esta metodología para recopilar información pertinente y actualizada sobre el tema en cuestión, tal como menciona Chen et al., (2021) en su estudio bibliométrico.

La investigación se basó en una búsqueda de artículos en la bases de datos Web of Science, que es ampliamente utilizada en la academia (Falagas et al, 2008), a través de la siguiente ecuación de búsqueda: *"((ALL=(Web 3.0) OR ALL=(Inteligencia artificial) OR ALL=(cadenas de bloques) OR ALL=(Metaverso) OR ALL=(gemelos digitales) OR ALL=(tokenización) OR ALL=(realidad aumentada) OR ALL=(Tecnología Semántica) OR ALL=(Redes descentralizadas) OR ALL=(territorios inteligentes) OR ALL=(ciudades inteligentes) OR ALL=(Artificial Intelligence) OR ALL=(Blockchain) OR ALL=(Metaverse) OR ALL=(Digital Twins) OR ALL=(Tokenization) OR ALL=(Augmented Reality) OR ALL=(Semantic Technology) OR ALL=(Decentralized Networks) OR ALL=(Smart Territories) OR ALL=(Smart Cities)) AND (ALL=(Servicios públicos) OR ALL=(Public Services) OR ALL=(Utilities)) AND (ALL=(Oportunidades) OR ALL=(Desafíos) OR ALL=(retos) OR ALL=(Opportunities) OR ALL=(Challenges)) AND (ALL=(Análisis) OR ALL=(Revisión de literatura) OR ALL=(Revisión bibliográfica) OR ALL=(Bibliometría) OR ALL=(Estudio de casos) OR ALL=(Analysis) OR ALL=(Literature Review) OR ALL=(Bibliometrics) OR ALL=(Bibliographic Review) OR ALL=(Case Study)))".*

Se eligió un período desde 2019 hasta 2023 para capturar una amplia y reciente gama de estudios revisados por pares en revistas científicas, por tratarse de una temática en continuo cambio.

1. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos del análisis bibliométrico se dividen en varios análisis cuantitativos de los documentos, fuentes y palabras. Posteriormente, se presenta un análisis cualitativo basado en los principales artículos en este campo de investigación.

1.1 Análisis Bibliométrico

La búsqueda de información mediante la ecuación descrita arrojó un resultado de 914 documentos en Web of Science, cuyo análisis preliminar de categorías muestra que las 5 más importantes tienen que ver con ciencias de la computación y sistemas de información, ingeniería eléctrica, ciencias de inteligencia artificial, telecomunicaciones y métodos de ciencia de la computación, como se visualiza en la figura 1.

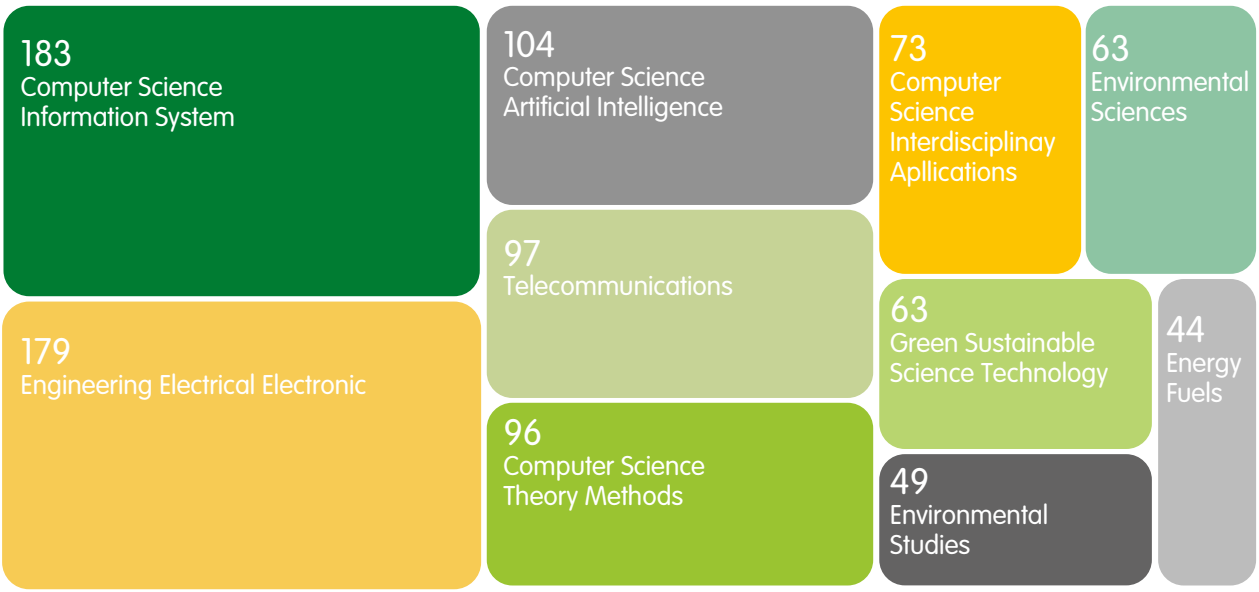


Figura 1. Mapa de categorías.

Para obtener la información detallada sobre los documentos recopilados y analizados, que se muestra en la tabla 1, se utilizó RStudio, el cual es un entorno integrado de desarrollo (IDE) para el lenguaje de programación R, en combinación con el paquete Biblioshiny que permite realizar análisis bibliométricos y visualizar los resultados de manera interactiva (Aria y Cuccurullo, 2017). Los resultados evidencian que en el periodo comprendido entre 2019 y 2023 los documentos recopilados se producen a partir de 602 fuentes diferentes de publicaciones con un promedio de citas por documento de 12.63. Esto indica que los documentos publicados muestran un gran impacto en la investigación.

Los contenidos de los documentos se analizan con base en Keywords Plus y Author's Keywords (palabras claves del autor). Por definición, Keywords Plus se refiere a las palabras clave y frases extendidas generadas a partir del sistema de motores de búsqueda (Tripathi et al., 2018). En este análisis se utilizarán las palabras clave del autor.

Descripción	Resultados
Información principal sobre los datos	
Espacio de tiempo	2019:2023
Fuentes (revistas, libros, etc.)	602
Documentos	914
Tasa anual de crecimiento %	-37.7
Edad promedio del documento	2.23
Citas promedio por documento	12.63
Referencias	53933
Contenido del documento	
Keywords Plus (ID)	1733
Palabras clave del autor (DE)	3181
Autores	
Autores	6434
Autores de documentos de un solo autor	132
Colaboración de autores	
Documentos de un solo autor	53
Coautores por documento	3
Coautorías internacionales %	9.7
Tipos de documentos	
Article	581
Article; book chapter	3
Article; early access	27
Article; proceedings paper	5
Editorial material	7
Proceedings paper	154
Review	129
Review; early access	8

Tabla 1. Combinación y normalización de resultados.

Con relación a la Web 3.0 se han asignado un total de 3181 palabras clave a los artículos que abordan este tema, lo que indica el interés y la relevancia que ha adquirido en la investigación académica. Además, se ha observado que 6563 autores han escrito sobre este tema, siendo la mayoría de ellos (6434) autores individuales. No obstante, también se ha encontrado que existe una colaboración significativa entre los autores, con un índice de colaboración de 3 para 139 artículos escritos por un solo autor y varios autores.

La Producción Científica Anual se ha utilizado como herramienta para identificar el estado y avance de la investigación en torno a la medición de la innovación en la Web 3.0. De acuerdo a la figura 2, se puede observar que el pico más alto se registró en el año 2022, con un potencial de crecimiento adicional en 2023, donde se cuenta con 25 producciones. Esto sugiere que la investigación sobre la Web 3.0 sigue siendo un tema de interés y que hay un constante flujo de nuevos aportes en esta área.

Year	Articles
2019	166
2020	187
2021	237
2022	264
2023	25

Figura 2. Producción científica anual.

En cuanto a la productividad por país, en la investigación sobre la Web 3.0, la figura 3 muestra que Estados Unidos lidera con casi el doble de producción científica en comparación con China y varios países de la Unión Europea. Sin embargo, es importante destacar que no se ha encontrado ninguna producción científica en esta área por parte de países de Iberoamérica. Cerrando la lista se encuentran países como Alemania, Japón, Italia, Corea e Irán, los cuales presentan una producción científica similar en relación con la Web 3.0.

Estos hallazgos sugieren que existe un gran interés y producción científica en torno a la Web 3.0 a nivel internacional, con una importante presencia de Estados Unidos en la investigación. No obstante, también se puede observar la falta de participación de países de Iberoamérica en esta área, lo cual podría representar una oportunidad para futuras investigaciones y aportes en este campo.

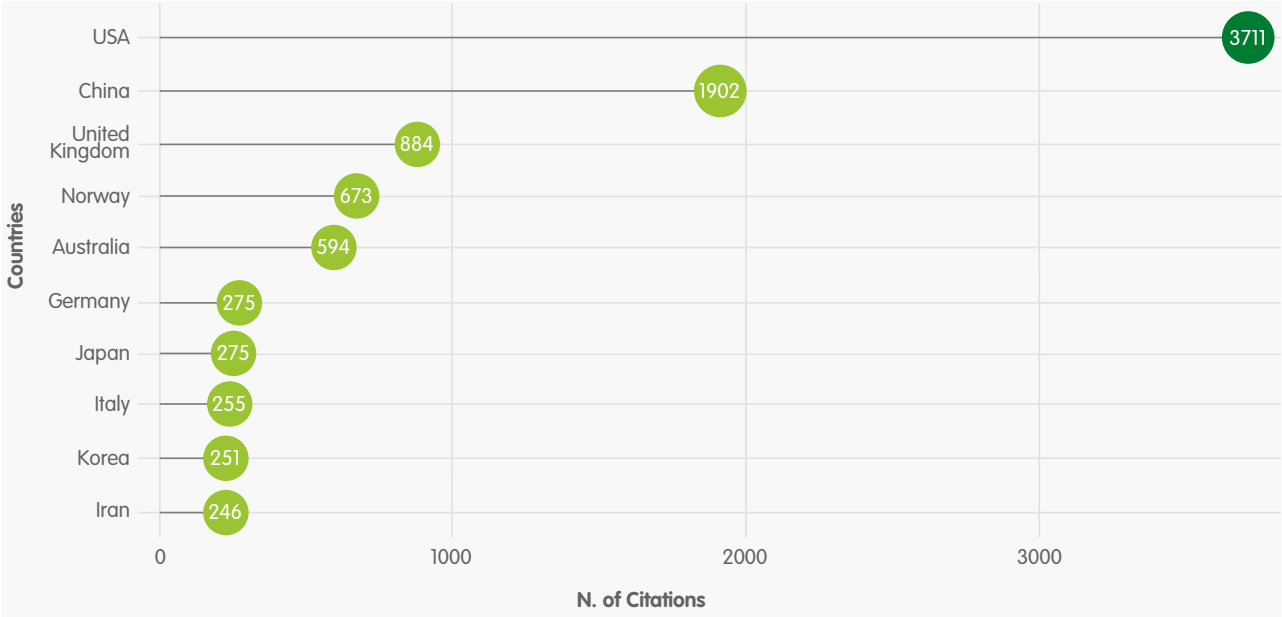


Figura 3. Productividad por país.

La identificación de palabras clave es una herramienta útil para los investigadores en la búsqueda de centros de investigación y revistas relevantes (Herrera-Viedma et al., 2016). En este sentido, la figura 4 muestra que la palabra Challenges es la más frecuente con un total de 118 referencias, seguida de otras expresiones de búsqueda.

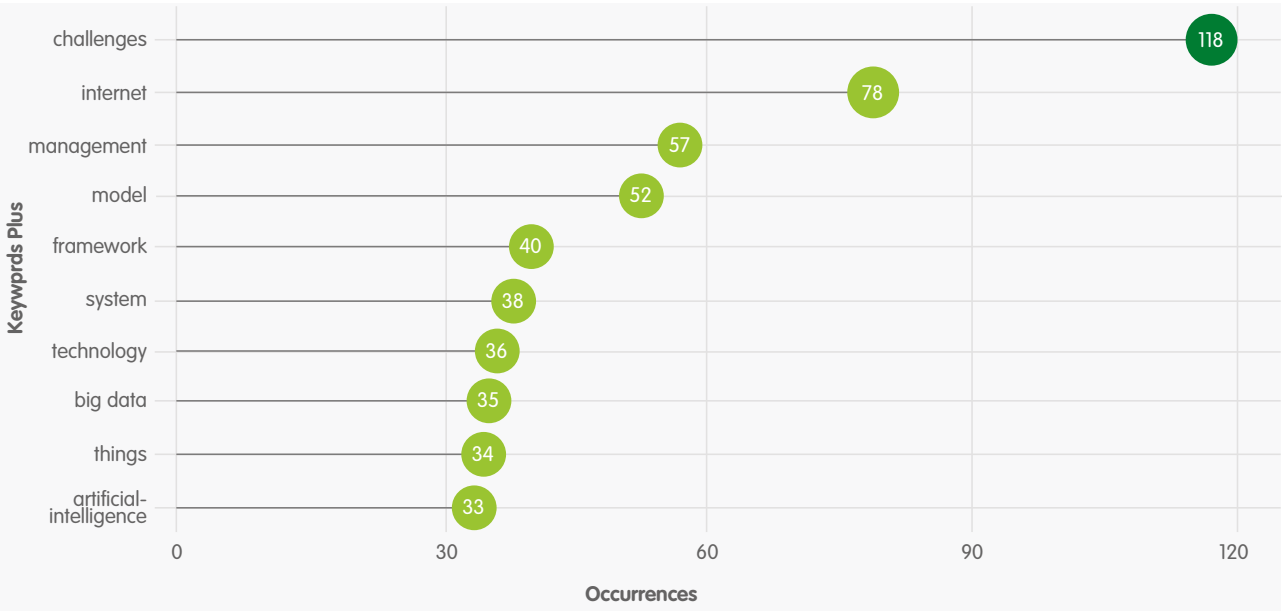


Figura 4. Palabras más frecuentes.

Por otra parte, al analizar el mapa temático en la figura 5, se puede observar que el concepto de retos es el que surge inicialmente, pero se comienza a incluir otros conceptos relacionados con la inteligencia artificial, analítica, ciudades inteligentes, ciudades e internet.

La revisión de la literatura señala que una combinación de tecnologías, como blockchain, inteligencia artificial y realidad virtual, están activamente involucradas en la definición de la Web 3.0. De esta manera, se puede afirmar que la Web 3.0 no solo es una evolución tecnológica de la Web 2.0, sino que involucra una integración de tecnologías emergentes para brindar nuevas capacidades y beneficios a los usuarios.

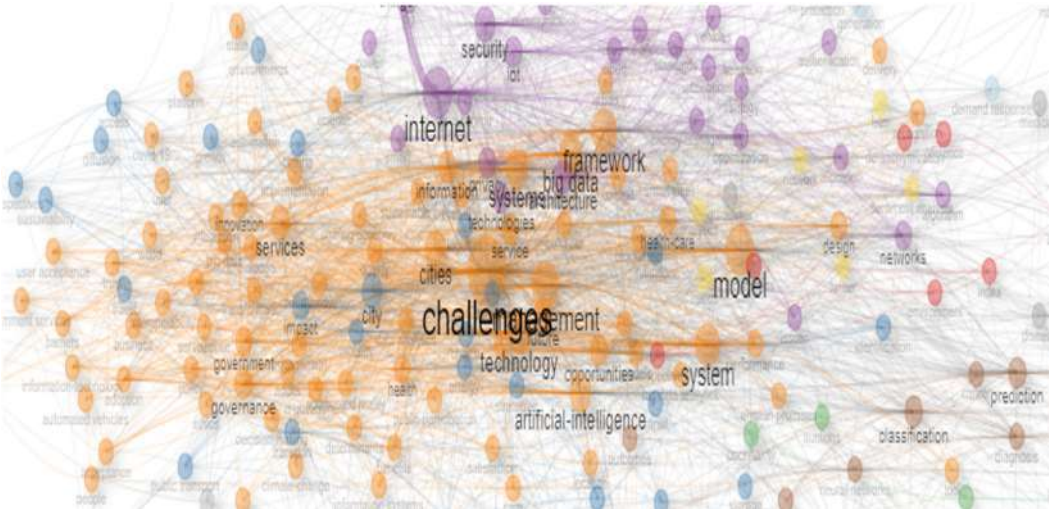


Figura 5. Mapa Temático.

1.2 Temáticas relevantes a la Web 3.0

Como resultado del análisis, a continuación se detallan algunos apartes que dan cuenta de aspectos relevantes a la Web 3.0 abordados por los autores y que se relacionan con retos y oportunidades para las empresas de servicios públicos:

Ali et al. (2019) exploran los impactos de la Web 3.0 en los ecosistemas empresariales, identificando las oportunidades y desafíos que enfrentan las empresas a medida que se integran en la nueva web.

Según Wei et al., (2021), la tecnología blockchain es esencial para garantizar la seguridad y la transparencia en la Web 3.0. La inteligencia artificial, por su parte, permite una mejor comprensión de la información y su contexto, lo que facilita la toma de decisiones. La realidad virtual, por último, ofrece una experiencia más inmersiva para los usuarios en la Web 3.0.

La publicación de Billones et al., (2021) proporciona una descripción general de los principales desarrollos y tendencias en la Web 3.0 por parte de las ciudades inteligentes, así como una discusión sobre los desafíos y oportunidades que se presentan en esta nueva era de la web.

Varias investigaciones anteriores han reconocido la Gestión de nuevas tecnologías, el Proceso de innovación; las Innovaciones; las Actividades innovadoras; los Factores de mercado; las Capacidades tecnológicas; la Competitividad; la Brecha tecnológica (Morozov y Taskaeva, 2016; Mihci, 2020; Gartner, 2022). Sin embargo, no hay referencias importantes a la implementación de estas tecnnologías en el sector de los servicios públicos.

1.3 Casos de uso de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos

La implementación de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos presenta una serie de oportunidades y desafíos que deben ser considerados. El artículo de Buterin (2014) es uno de los primeros en presentar la idea de la Web 3.0 y describir cómo podría funcionar en la práctica. Se centra en la idea de contratos inteligentes y cómo estos podrían ser utilizados para crear aplicaciones descentralizadas en una nueva internet.

En términos de oportunidades, la Web 3.0 ofrece la posibilidad de mejorar la transparencia, eficiencia y seguridad en el sector de servicios públicos. Por ejemplo, Jameel et al., (2020) describen cómo la tecnología blockchain podría utilizarse para crear una economía completamente nueva. Discute cómo la descentralización y la confianza en la tecnología podrían eliminar la necesidad de intermediarios en muchas industrias, lo que podría tener un impacto significativo en la economía global. De igual forma, puede ser utilizada para garantizar la transparencia y seguridad de los procesos de votación en la toma de decisiones públicas (Lin et al., 2022).

Según Wei et al., (2021), la Taipei Water Department ha logrado mejorar la transparencia y seguridad en la gestión de información sobre el suministro de agua al adoptar la tecnología blockchain. Esta tecnología ha permitido que la información sea compartida y almacenada de forma descentralizada, evitando la manipulación o alteración de los datos. En este proceso, se ha utilizado una red privada de blockchain para asegurar la confidencialidad de la información y evitar posibles ciberataques. Así mismo, Taipei utiliza blockchain para crear un sistema de votación en línea seguro y confiable para sus elecciones locales, lo que permitió mejorar la participación ciudadana y aumentar la confianza en el proceso electoral. Además, también están implementando blockchain en su sistema de salud para mejorar la seguridad y privacidad de la información de los pacientes, lo que ha mejorado la calidad de atención médica.

La iniciativa de Singapur para desarrollar un ecosistema de innovación en torno a la Web 3.0 y el metaverso la convierte en pionera en la adopción de tecnologías avanzadas, incluyendo blockchain, para mejorar sus servicios públicos. Singapur utiliza blockchain para mejorar la seguridad y privacidad en su sistema de identificación digital, lo que ha mejorado la experiencia del ciudadano y ha aumentado la confianza en el gobierno. En el caso de la empresa SP Group en Singapur, la implementación de la tecnología blockchain permitió crear una plataforma de facturación electrónica descentralizada y reducir la necesidad de intermediarios. La plataforma permite a los consumidores realizar un seguimiento en tiempo real de su consumo de energía y generar informes personalizados (Wu y Tran, 2018).

En el caso de LO3 Energy y ConsenSys, su colaboración se enfoca en la creación de una red descentralizada de energía renovable que permite a los consumidores generar y comercializar su propia energía de manera segura y transparente. La tecnología blockchain permite a los consumidores vender su excedente de energía a otros usuarios de la red de manera directa, reduciendo los costos y mejorando la eficiencia en el proceso de comercialización. Además, la tecnología blockchain garantiza que cada transacción sea registrada de forma segura y transparente, lo que reduce los riesgos de fraude y errores en el proceso de intercambio de energía (Wu y Tran, 2018).

Acorde a los mismos autores, la implementación de tecnologías basadas en la Web 3.0 ha permitido a la ciudad de Seoul resolver muchos problemas relacionados con el transporte y la gestión de residuos. En términos de transporte, la ciudad mejoró la eficiencia mediante la implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real de la congestión del tráfico, que ayuda a los conductores a tomar rutas alternativas y reducir el tiempo de viaje. Según datos de la ciudad, este sistema redujo el tiempo de viaje en un 14,5% y disminuyó el tiempo de espera en los semáforos en un 21,6%. Además, la ciudad logró una reducción del 7,1% en el número

de vehículos en las carreteras durante las horas pico, mejorando con ello la calidad del aire en la ciudad. En cuanto a la gestión de residuos, la ciudad implementó un sistema basado en la tecnología blockchain que permite a los ciudadanos obtener cupones por reciclar, lo que llevó a un aumento del 48% en la tasa de reciclaje en la ciudad.

La implementación del sistema de gestión de residuos basado en la Web 3.0 en Seoul mejoró significativamente la eficiencia y la calidad de vida de sus habitantes. Según un estudio realizado por Wei et al. (2021), se han recopilado datos de más de 380.000 hogares y se han recogido más de 15 millones de toneladas de residuos mediante este sistema. Además, se estima que el sistema redujo los costos operativos de los servicios de limpieza en un 30% y disminuyó los tiempos de espera para la recolección de residuos en un 40%. El uso de tecnologías basadas en la Web 3.0 permite una gestión de residuos más eficiente y personalizada para los ciudadanos, lo que a su vez mejora la calidad de vida en la ciudad.

Otro ejemplo de la implementación exitosa de la Web 3.0 es la ciudad de Amsterdam, Países Bajos. Según Wu y Tran (2018), la implementación del sistema de gestión de energía sostenible en Amsterdam llevó a una reducción del 10% en el consumo de energía en hogares y edificios públicos, lo que equivale a una reducción de emisiones de dióxido de carbono de alrededor de 900 toneladas por año. Además, la ciudad logró reducir la congestión del tráfico en un 13% y la emisión de gases de efecto invernadero en un 10%, gracias a la implementación de sistemas inteligentes de transporte que ayudan a los conductores a evitar zonas de congestión y optimizar sus rutas de conducción.

Otro ejemplo es Estonia, que ha utilizado blockchain para crear un sistema de registro de propiedad altamente seguro y confiable. También ha utilizado blockchain para mejorar la seguridad y privacidad en su sistema de salud, logrando con esto aumentar la calidad en la atención médica y la confianza en el sistema de salud (Wei et al., 2021).

El de caso de Accenture (Wohlgenannt et al., 2020) muestra cómo una compañía de energía utilizó la realidad aumentada para mejorar la eficiencia y la seguridad en la construcción de una planta de energía. De igual forma, el estudio de caso de Siemens de *Realidad Extendida en el Mantenimiento de las Infraestructuras de Energía* (Vidal et al., 2020), muestra cómo una compañía de energía utiliza la realidad extendida para mejorar la planificación y ejecución del mantenimiento de sus infraestructuras.

Anshari y Hamdan (2022) estudiaron cómo las tecnologías urbanas sostenibles integradas y en red han configurado ecosistemas inteligentes, esto lo realizaron mediante un sistema de *Internet de las Cosas Urbanas y Algoritmos de Monitoreo de Datos en Ciudades Inteligentes y Ambientalmente Sostenibles.* Los mismos autores revisaron el impacto y la aplicación de gemelos digitales en el sector de la energía y presentaron algunos casos de estudio exitosos, incluyendo la implementación de gemelos digitales en sistemas de generación, transmisión y distribución de energía.

Smart Grid de PG&E (California, Estados Unidos): PG&E es una de las principales compañías de servicios públicos de California que ha adoptado la tecnología IoT para mejorar su infraestructura y ofrecer un mejor servicio a sus clientes. La compañía utiliza sensores y dispositivos conectados para monitorear y controlar su red eléctrica, lo que le permite detectar y solucionar problemas de forma más eficiente (Bestepe y Yildirim, 2022).

El gobierno del Reino Unido ha lanzado un proyecto para mejorar la eficiencia energética en el país utilizando IoT y AI. El proyecto incluye la instalación de sensores en hogares y edificios para monitorear y controlar el consumo de energía, lo que permite ahorrar costos y reducir la huella de carbono (Farrukh et al., 2020) .

TenneT, una compañía de energía holandesa, implementó un gemelo digital en su red eléctrica inteligente para mejorar la eficiencia y la resiliencia de la red. Con la ayuda de un gemelo digitalla compañía pudo simular y analizar diferentes escenarios de fallas y planificar mejor su respuesta (Yu et al., 2022).

Khan et al., (2022) revisan el uso de gemelos digitales en el sistema eléctrico y presenta casos de estudio de diferentes países, incluido China, donde se ha implementado con éxito para mejorar la planificación, la optimización y la gestión de la red eléctrica.

Estos resultados demuestran que la implementación exitosa de tecnologías basadas en la Web 3.0 puede tener un impacto significativo en la eficiencia y la sostenibilidad de las ciudades, así como en la calidad de vida de sus habitantes. Sin embargo, es importante señalar que la implementación de estas tecnologías debe ser cuidadosamente planificada y ejecutada para maximizar sus beneficios y minimizar cualquier impacto negativo.

También existen desafíos importantes que deben ser abordados para aprovechar al máximo las oportunidades de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos. Un desafío importante es la falta de regulaciones claras y estandarizadas para la implementación de la Web 3.0 en este sector (Rogelj y Bogataj, 2020). Además, la falta de conciencia y comprensión por parte de los stakeholders sobre la tecnología y sus aplicaciones en el sector de servicios públicos también puede ser un obstáculo importante (Horejsi et al., 2020).

1.4 Oportunidades de monetización de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos

Según Gyimesi y Somlyódyné (2021), en la Web 3.0, se manejan los datos de manera más eficiente y segura, mejorando la calidad y la validez de los datos recopilados. Como resultado, se presentan nuevas oportunidades a las empresas para mejorar sus productos y servicios, aumentar la eficiencia y generar ingresos adicionales a través de la monetización de datos de varias maneras. Una opción es vender los datos a terceros, como empresas de investigación de mercado, publicidad y análisis de datos, entre otros, para mejorar sus productos y servicios o tomar decisiones empresariales basadas en la información recopilada (Hoofnagle et al., 2019). También se pueden crear anuncios personalizados y relevantes para los consumidores utilizando los datos recopilados, lo que puede mejorar la eficacia de la publicidad y aumentar el retorno de la inversión (van der Sloot, 2017).

Las empresas pueden utilizar los datos para identificar patrones y tendencias, y para desarrollar nuevos productos y servicios que satisfagan las necesidades de los consumidores. Por ejemplo, una empresa de servicios públicos podría utilizar los datos para crear una nueva aplicación móvil que permita a los consumidores controlar mejor su consumo de energía (Johnson et al., 2017). Además, pueden usar los datos para optimizar su eficiencia y reducir los costos, identificando áreas en las que se produzca un uso ineficiente de la energía y tomar medidas para corregir la situación (Tan y Zhan, 2017).

La implementación de tecnología blockchain y la tokenización en las empresas de servicios públicos ha abierto nuevas oportunidades de negocio. Según Bekrar et al. (2021), es posible ofrecer tokens a los clientes a cambio de acceso a los servicios o infraestructura de la empresa, lo que aumenta los ingresos de la misma. Además, se han identificado otras oportunidades basadas en la tokenización. En primer lugar, el crowdfunding que permite a las empresas de servicios públicos recaudar fondos de inversores individuales en pequeñas cantidades de manera eficiente en lugar de depender de grandes inversores institucionales, tal como se menciona en el estudio de Caneva et al. (2017). En segundo lugar, la tokenización facilita y acelera las transacciones comerciales con otras empresas, como la venta de energía renovable entre empresas de servicios públicos, tal como se describe en la investigación de Burger y Weinmann (2022). En tercer lugar, la tokenización permite la creación de mercados secundarios para los tokens, lo que aumenta su liquidez y valor. Esto permite a inversores y clientes comprar y vender tokens en estos mercados secundarios, tal como se menciona en el estudio de Halden et al. (2021). Por último, las empresas de servicios públicos pueden crear programas de recompensas para los clientes que reduzcan su consumo de energía a través de la tokenización, lo que incentiva a los clientes a tomar medidas para reducir su huella de carbono y ayuda a la empresa a cumplir con los objetivos de sostenibilidad (Bhattacharya et al., 2022).

El metaverso es definido por Dwivedi et al. (2022) como una red de múltiples mundos virtuales interconectados que representa una tendencia emergente en la Web 3.0. La utilización de esta plataforma virtual puede ofrecer a las empresas oportunidades de monetización, como la venta de bienes virtuales y servicios de pago, publicidad y patrocinio, e incluso la participación en proyectos de energía renovable. Para aprovechar estas oportunidades, es necesario comprender las necesidades y preferencias de los usuarios del metaverso, ofreciendo productos y servicios relevantes y atractivos.

En cuanto a la publicidad y patrocinio, la plataforma del metaverso puede ser utilizada por las empresas para promocionar sus productos y servicios, así como patrocinar eventos y actividades que aumenten su visibilidad y reconocimiento de marca (Dwivedi et al.,2021).

Por otro lado, el metaverso permite la venta de bienes virtuales, lo que implica una oportunidad de ofrecer productos relacionados con la infraestructura y energía, como edificios virtuales. Estos bienes pueden ser adquiridos por los usuarios del metaverso para mejorar su experiencia en el entorno virtual (Park y Kim, 2022).

Asimismo, las empresas pueden ofrecer servicios de pago, como la posibilidad de pagar facturas de servicios públicos o adquirir tokens que representen energía y servicios dentro del metaverso (Huynh et al., 2023). Además, el metaverso permite la recopilación de datos de los usuarios, lo que ofrece información valiosa sobre sus hábitos de consumo y preferencias que pueden ser analizadas para mejorar la eficiencia y calidad de los servicios ofrecidos (Njoku et al., 2023).

Por último, las empresas de servicios públicos pueden participar en proyectos de energía renovable dentro del metaverso y ofrecer energía limpia a los usuarios, contribuyendo así a la lucha contra el cambio climático y a mejorar la reputación de la empresa (Feroz et al., 2021).

1.5 Desafíos de la implementación de la Web 3.0

Una de las mayores barreras para la implementación de la Web 3.0 en las empresas de servicios públicos es la falta de regulación. La tecnología de la Web 3.0 es relativamente nueva y aún no está claro cómo se regulamentarán sus aplicaciones y usos, lo que puede dificultar la adopción de esta tecnología en las empresas de servicios públicos que buscan cumplir con las regulaciones y requisitos legales (Mendybayev, 2022).

En algunos países, como los Estados Unidos, se están tomando medidas para regulaciones en torno a las criptomonedas y la tecnología blockchain. Por ejemplo, la Comisión de Valores y Bolsa de EE. UU. (SEC, por sus siglas en inglés) ha tomado medidas para regular los ofrecimientos iniciales de monedas (ICO) y los fondos cotizados en bolsa basados en criptomonedas (ETF) (Tern, 2021).

En la Unión Europea, la Dirección General de Mercado Interno y Servicios de la Comisión Europea ha publicado una estrategia sobre blockchain que incluye la necesidad de regular las criptomonedas y garantizar la protección de los consumidores y los inversores (Wei et al., 2021).

Según López et al. (2023), en Colombia aún no se cuenta con una regulación específica para la Web 3.0 y sus tecnologías. Sin embargo, el país ha adoptado una actitud progresista en cuanto a la tecnología blockchain y las criptomonedas. Se espera que en el futuro se adopten medidas regulatorias para proteger a los consumidores y regular el uso de estas tecnologías. Aunque actualmente existen normativas que podrían resultar relevantes para las tecnologías de la Web 3.0.

Entre ellas, se encuentra la Ley 1581 de 2012 y sus decretos reglamentarios, que establecen las normas para la protección de datos personales. Esta normativa es aplicable a cualquier empresa o entidad que recolecte, almacene, use o comparta datos personales, incluyendo aquellas que utilicen tecnologías de la Web 3.0 (Gómez et al., 2020).

En cuanto a las criptomonedas, en Colombia no se cuenta con una regulación específica. No obstante, en noviembre de 2022 se aprobó un proyecto de ley con el objetivo de regular las plataformas en línea de intercambio de criptoactivos que operan en el país, conocidas como exchanges. El proyecto de ley permitiría reconocer estas plataformas, establecer vigilancia y control sobre las mismas y proteger a los usuarios que realizan transacciones con criptoactivos en el país (Autorregulador del Mercado de Valores [AMV], 2022).

En Colombia, existe el CONPES CTI (Consejo Nacional de Política Económica y Social), un documento que establece las políticas y estrategias para el

desarrollo de la tecnología de la información en el país. Este documento puede ser relevante para la Web 3.0, ya que establece las directrices para el uso de tecnologías emergentes y la innovación en el sector de las TIC (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2021).

La regulación del metaverso es un tema en proceso de desarrollo; actualmente, en la mayoría de los países, incluido Colombia, no existen regulaciones específicas que aborden este asunto. No obstante, se están realizando algunos esfuerzos para regular el entorno virtual. Por ejemplo, la Unión Europea está considerando adoptar regulaciones en relación a la privacidad y el control de datos en el entorno virtual y ha propuesto una regulación al respecto (Ng, 2022). En Estados Unidos, la Comisión Federal de Comercio (FTC) ha abordado la protección de la privacidad y los derechos de los consumidores en el entorno virtual y ha tomado medidas contra las empresas que no cumplen con sus responsabilidades de privacidad y seguridad de datos (Hardy et al., 2022).

La resistencia al cambio es otro desafío para la implementación de la Web 3.0. Muchas empresas de servicios públicos han invertido en tecnologías y sistemas existentes y pueden ser reacias a reemplazarlos con nuevas tecnologías. Además, los empleados de estas empresas pueden sentir resistencia a aprender y adoptar nuevas tecnologías (Vilone y Longo, 2021).

La implementación de la Web 3.0 puede requerir una inversión significativa en tecnología y capacitación, lo que puede ser un obstáculo para las empresas de servicios públicos con presupuestos ajustados. Además, la falta de experiencia y conocimiento sobre la Web 3.0 puede llevar a que sea más costoso implementar y mantener la tecnología (Balfaqih y Alharbi, 2022).

Conclusiones

La principal contribución del artículo es proporcionar una imagen actualizada y completa de las oportunidades y desafíos que plantea la Web 3.0 en el sector de los servicios públicos. Se evidencia cómo estas tecnologías pueden mejorar la eficiencia y la innovación en el campo, y cómo puede impulsar nuevas soluciones y nuevas formas de monetización.

Sin embargo, es importante resaltar que la limitación temporal de los datos recopilados a partir del análisis bibliográfico puede significar que algunos de los resultados presentados no estén completamente actualizados. Además, el estudio puede haber omitido algunos documentos importantes que no estaban incluidos en la base de datos de artículos científicos publicados en inglés y español, lo que puede tener una inclusión limitada de artículos en otros idiomas.

Independientemente de las limitaciones mencionadas anteriormente, el resultado de esta investigación brinda una idea de las tendencias emergentes y los conocimientos relacionados con la literatura existente en la Web 3.0 en su objetivo de proporcionar una experiencia en línea más personalizada y conectada para el usuario, con la ayuda de la inteligencia artificial, la conexión de datos y la inclusión de la realidad digital tipo metaverso donde los usuarios pueden interactuar en un mundo virtual 3D.

Sin embargo, el desarrollo de la Web 3.0 también presenta desafíos, incluyendo la falta de regulación, los costos de implementación y la resistencia al cambio. Actualmente, la regulación de la Web 3.0 y sus tecnologías relacionadas aún no está completamente establecida en muchos países, incluido Colombia. En general, se espera que se adopten regulaciones más específicas sobre el

metaverso en el futuro cercano, especialmente a medida que esta tecnología continúe ganando popularidad y se utilice más ampliamente. Es un tema en desarrollo y se espera que evolucione con el tiempo a medida que la tecnología siga avanzando.

Los costos asociados con la implementación de la Web 3.0 también son un factor importante a considerar, porque se requiere una inmensa capacidad de procesamiento y almacenamiento para generar los modelos analíticos, de transacciones y procesamiento gráfico, y ofrecer una excelente experiencia y seguridad al usuario. Asimismo, sería importante investigar las implicaciones éticas y legales y cómo estas pueden ser abordadas.

Hay muchos ejemplos a nivel mundial que muestran la implementación exitosa de la tecnología de la Web 3.0 en las empresas de servicios públicos. Estos casos demuestran que la adopción de esta tecnología en servicios públicos puede mejorar la eficiencia, transparencia, seguridad y privacidad, y aumentar la confianza en el gobierno y en los servicios públicos. Es importante que se consideren estas oportunidades y tomen medidas para integrar la tecnología en sus operaciones.

El metaverso, por su parte, es una tecnología relativamente nueva y aún en desarrollo. Aunque hay mucho entusiasmo y expectativa sobre su potencial, también hay una cierta cantidad de resistencia al cambio debido a la incertidumbre sobre cómo funcionará y qué impacto tendrá en la sociedad. Al igual que con el internet, es probable que la resistencia disminuya a medida que más personas experimenten y comprendan las aplicaciones únicas de la tecnología.

Pese a estos desafíos, la implementación de la Web 3.0 y el metaverso pueden ofrecer a las empresas de servicios públicos la oportunidad de monetizar sus servicios y proporcionar soluciones innovadoras a los problemas reales de sus usuarios. En este sentido, es importante que las empresas establezcan estrategias de negocio claras y trabajen en conjunto con el sector académico y gubernamental para definir objetivos comunes y establecer indicadores claros para medir el éxito.

Referencias

- Ali, M., Jabeen, H., Hoyt, C. y Lehmann, J. (2019). *The KEEN Universe: An Ecosystem for Knowledge Graph Embeddings with a Focus on Reproducibility and Transferability.* Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30796-7_1
- Anshari, M., y Hamdan, M. (2022). Enhancing e-government with a digital twin for innovation management. *Journal of Science and Technology Policy Management.* https://doi.org/10.1108/JSTPM-11-2021-0176
- Aria, M. y Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, 11(4), 959–975. https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007
- Autorregulador del Mercado de Valores. (2022). Nueva regulación de activos virtuales (criptoactivos). *Análisis AMV,* (2). https://rebrand.ly/q9fpz6n
- Balfaqih, M. y Alharbi, S. (2022). Associated Information and Communication Technologies Challenges of Smart City Development. *Sustainability,* 14(23), 16240. https://doi.org/10.3390/su142316240
- Bekrar, A., Ait El Cadi, A., Todosijevic, R. y Sarkis, J. (2021). Digitalizing the Closing-of-the-Loop for Supply Chains: A Transportation and Blockchain Perspective. *Sustainability,* 13(5), 2895. https://doi.org/10.3390/su13052895

- Berners-Lee, T., Hendler, J. y Lassila, O. (2001). The Semantic Web. A New Form of Web Content That Is Meaningful to Computers Will Unleash a Revolution of New Possibilities. *Scientific American,* 284(5), 1–5.

- Bestepe, F., y Yildirim, S. (2022). Acceptance of IoT-based and sustainability-oriented smart city services: A mixed methods study. *Sustainable Cities and Society, 80,* 103794. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103794

- Bhattacharya, S., Chengoden, R., Srivastava, G., Alazab, M., Javed, A., Victor, N., Maddikunta, P. y Gadekallu, T. (2022). Incentive Mechanisms for Smart Grid: State of the Art, Challenges, Open Issues, Future Directions. *Big Data and Cognitive Computing, 6*(2). https://doi.org/10.3390/bdcc6020047

- Billones, R., Guillermo, M., Lucas, K., Era, M., Dadios, E. y Fillone, A. (2021). Smart Region Mobility Framework. *Sustainability, 13*(11), 6366. https://doi.org/10.3390/su13116366

- Burger, C., y Weinmann, J. (2022). Blockchain Platforms in Energy Markets;A Critical Assessment. *Journal of Risk and Financial Management, 15*(11). https://doi.org/10.3390/jrfm15110516

- Buterin, V. (2014). *A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform.* Ethereum. https://rebrand.ly/330797

- Caneva, S., Weiss, I., Papapetrou, M., Alonso, P., Gajda, O., Kohl, K., Bergmann, A., Burton, B., Aschenbeck-Florange, T., Dlouhy, A., Drefke, T., Ferrari, A., Martinoli, M., Wahlmüller, J., Egger, S., Harwood, T., Maaren, R., Harder, K., Müller-Windisch, S., Petit, F. (25-29 de septiembre de 2017). *Crowdfundres: a new opportunity for financing renewable energy projects.* 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Países bajos.

- Çelik, D. y Elçi, A. (2020). A survey on semanticized and personalized health recommender systems. *Expert Systems, 37*(4). https://doi.org/10.1111/exsy.12519

- Chen, W., Ahmed, M., Sofiah, W., Isa, N., Ebrahim, N. y Hai, T. (2021). A Bibliometric Statistical Analysis of the Fuzzy Inference System - Based Classifiers. *IEEE Access, 9,* 77811–77829. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3082908

- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2021). Documento CONPES - Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022 - 2031. (4069). https://rebrand.ly/75c1b4

- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., y Lim, W. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 133,* 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

- Dwivedi, Y., Hughes, L., Wang, Y., Alalwan, A., Ahn, S., Balakrishnan, J., Barta, S., Belk, R., Buhalis, D., Dutot, V., Felix, R., Filieri, R., Flavián, C., Gustafsson, A., Hinsch, C., Hollensen, S., Jain, V., Kim, J., Krishen, A.,… Wirtz, J. (2022). Metaverse marketing: How the metaverse will shape the future of consumer research and practice. *Psychology and Marketing, 40*(4), 750-776. https://doi.org/10.1002/mar.21767

- Dwivedi, Y., Ismagilova, E., Hughes, D., Carlson, J., Filieri, R., Jacobson, J., Jain, V., Karjaluoto, H., Kefi, H., Krishen, A., Kumar, V., Rahman, M., Raman, R., Rauschnabel, P. A., Rowley, J., Salo, J., Tran, G. y Wang, Y. (2021). Setting the future of digital and social media marketing research: Perspectives and research propositions. *International Journal of Information Management, 59,* 102168. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102168

- Falagas, M., Pitsouni, E., Malietzis, G. y Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web

of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB Journal, 22*(2), 338–342. https://doi.org/10.1096/fj.07-9492lsf

- Farrukh, M., Meng, F., Raza, A. y Tahir, M. S. (2020). Twenty-seven years of Sustainable Development Journal: A bibliometric analysis. *Sustainable Development, 28*(6), 1725–1737. https://doi.org/10.1002/sd.2120

- Feroz, A., Zo, H. y Chiravuri, A. (2021). Digital Transformation and Environmental Sustainability: A Review and Research Agenda. *Sustainability, 13*(3), 1530. https://doi.org/10.3390/su13031530

- Gartner. (8 de abril de 2022). *Metaverse Evolution Will Be Phased; Here's What It Means for Tech Product Strategy.* https://rebrand.ly/f254f9

- Gómez, A., Arévalo, S., Bernal, D. y Rosero, D. (2020). El derecho a la protección de datos personales, tecnologías digitales y pandemia por COVID-19 en Colombia. *Revista de Bioética y Derecho, (50)*, 271-294. https://rebrand.ly/uv2xqke

- Goodwin, I. (2004). Book Review: H. Rheingold. 1993. The Virtual Community: Homesteading on the Electronic Frontier. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley. ISBN 0-201-60870-7 H. Rheingold. 2000. The Virtual Community: Homesteading on the Electronic Frontier (2nd Edition). Cambridge, Massachusetts: MIT Press. ISBN 0-262-68121-8. *Westminster Papers in Communication and Culture, 1*(1), 103-109. https://doi.org/10.16997/wpcc.206

- Gupta, D. y Singh, S. (2022). *Evolución de la Web 3.0: Historia y futuro.* Insights2Techinfo. https://rebrand.ly/1m521n9

- Gyimesi, Á. y Somlyódyné, E. (2021). Az adat és a kormányzás jelentősége az okos város stratégiai alapú értékteremtési folyamatában – Magyar nagyvárosok összehasonlítása egy szintetizáló ökoszisztéma modell keretében. *Tér és Társadalom, 35*(3), 59–86. https://doi.org/10.17649/TET.35.3.3339

- Halden, U., Cali, U., Dynge, M., Stekli, J. y Bai, L. (2021). DLT-based equity crowdfunding on the techno-economic feasibility of solar energy investments. *Solar Energy,* 227, 137–150. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.067

- Hardy, W., Palinski, M. y Rozynek, S. (2022). Roblox And The Digital Market For Virtual Experiences. *DELab Working Paper,* (3). https://rebrand.ly/htoakqu

- Herrera-Viedma, E., Martinez, M. y Herrera, M. (2016). Bibliometric tools for discovering information in database. En Fujita H, Ali M, Selamat A, Sasaki J, Kurematsu M (eds) *Trends in applied knowledge-based systems and data science: 29th international conference on industrial engineering and other applications of applied intelligent systems, IEA/AIE 2016, Morioka, Japan, August 2–4, 2016, Proceedings.* (pp 193–203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42007-3_17

- Hoofnagle, C., van der Sloot, B. y Borgesius, F. (2019). The European Union general data protection regulation: what it is and what it means. *Information & Communications Technology Law, 28*(1), 65–98. https://doi.org/10.1080/13600834.2019.1573501

- Horejsi, P., Novikov, K., y Simon, M. (2020). A Smart Factory in a Smart City: Virtual and Augmented Reality in a Smart Assembly Line. *IEEE Access,* 8, 94330–94340. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994650

- Huynh, T., Pham, Q., Pham, X., Nguyen, T., Han, Z. y Kim, D. (2023). Artificial intelligence for the metaverse: A survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 117,* 105581. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105581

- Ifenthaler, D. (2012). Introduction ¿Is Web 3.0 Changing Learning and Instruction? En P. Isaias, D., Ifenthaler, D., Kinshuk, Sampson, D. y Spector, J. (Eds.). *Towards learning and instruction in Web 3.0: advances in cognitive and educational psychology.* (pp. XI–XVI). Springer.

- Jameel, F., Javaid, U., Khan, W., Aman, M., Pervaiz, H. y Jäntti, R. (2020). Reinforcement Learning in Blockchain-Enabled IIoT Networks: A Survey of Recent Advances and Open Challenges. *Sustainability, 12*(12), 5161. https://doi.org/10.3390/su12125161

- Johnson, J., Friend, S. y Lee, H. (2017). Big Data Facilitation, Utilization, and Monetization: Exploring the 3Vs in a New Product Development Process. *Journal of Product Innovation Management, 34*(5), 640–658. https://doi.org/10.1111/jpim.12397

- Khan, A., Milne-Ives, M., Meinert, E., Iyawa, G., Jones, R. y Josephraj, A. (2022). A Scoping Review of Digital Twins in the Context of the Covid-19 Pandemic. *Biomedical Engineering and Computational Biology, 13.* https://doi.org/10.1177/11795972221102115

- Lewis, D. y Alpi, K. (2017). Bibliometric Network Analysis and Visualization for Serials Librarians: An Introduction to Sci2. *Serials Review, 43*(3–4), 239–245. https://doi.org/10.1080/00987913.2017.1368057

- Lin, Y., Gao, Z., Tu, Y., Du, H., Niyato, D., Kang, J., y Yang, H. (2022). *A Blockchain-based Semantic Exchange Framework for Web 3.0 toward Participatory Economy.* arXiv. https://doi.org/10.48550/ARXIV.2211.16662

- López, F., Núñez, E., García, V. y Bursac, Z. (2020). A Case Study for a Big Data and Machine Learning Platform to Improve Medical Decision Support in Population Health Management. *Algorithms, 13*(4), 102. https://doi.org/10.3390/a13040102

- Mendybayev, B. (2022). Imbalances in Kazakhstan's Smart Cities Development. *Environment and Urbanization ASIA, 13*(1), 144–152. https://doi.org/10.1177/09754253221083198

- Mihci, H. (2020). Is measuring social innovation a mission impossible?. *Innovation: The European Journal of Social Science Research, 33*(3), 337–367. https://doi.org/10.1080/13511610.2019.1705149

- Morozov, V. y Taskaeva, N. (2016). Basic Market Factors Affecting Innovative Activities. *Journal of Internet Banking and Commerce, 21*(S4), 1-20. https://rebrand.ly/a97311

- Ng, D. (2022). What is the metaverse? Definitions, technologies and the community of inquiry. *Australasian Journal of Educational Technology, 38*(4), 190–205. https://doi.org/10.14742/ajet.7945

- Njoku, J. , Nwakanma, C. , Amaizu, G. y Kim, D. (2023). Prospects and challenges of Metaverse application in data-driven intelligent transportation systems. *IET Intelligent Transport Systems, 17*(1), 1–21. https://doi.org/10.1049/itr2.12252

- Park, S. y Kim, Y. (2022). A Metaverse: Taxonomy, Components, Applications, and Open Challenges. *IEEE Access, 10,* 4209-4251. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3140175

- Rheingold, H. (1993). *The virtual community: homesteading on the electronic frontier.* Addison-Wesley. https://rebrand.ly/gsyko47

- Rogelj, V. y Bogataj, D. (2020). Smart Lifetime Neighbourhoods: Literature Review and Research Agenda. *IFAC-PapersOnLine, 53*(2), 16902–16907. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1230

- Tan, K., y Zhan, Y. (2017). Improving new product development using big data: a case study of an electronics company. *R&D Management, 47*(4), 570–582. https://doi.org/10.1111/radm.12242

- Tern, S. (2021). Survey of Smart Contract Technology and Application Based on Blockchain. *Open Journal of Applied Sciences, 11*(10), 1135–1148. https://doi.org/10.4236/ojapps.2021.1110085

- Tripathi, M., Kumar, S., Sonker, S. y Babbar, P. (2018). Occurrence of author keywords and keywords plus in social sciences and humanities research : A preliminary study. *COLLNET Journal of Scientometrics and Information Management, 12*(2), 215–232. https://doi.org/10.1080/09737766.2018.1436951

- Van der Sloot, B. (2017). Legal fundamentalism: Is data protection really a fundamental right. En Leenes, R. Brakel, R. Gutwirth, S. y Hert, P. (Eds.), *Data protection and privacy: (In)visibilities and infrastructure* (pp. 3-30). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50796-5_1

- Vidal-Balea, A., Blanco-Novoa, O., Fraga-Lamas, P., Vilar-Montesinos, M. y Fernández-Caramés, T. (2020). Creating collaborative augmented reality experiences for industry 4.0 training and assistance applications: Performance evaluation in the shipyard of the future. *Applied Sciences, 10*(24), 9073. https://doi.org/10.3390/app10249073

- Vilone, G. y Longo, L. (2021). Classification of Explainable Artificial Intelligence Methods through Their Output Formats. *Machine Learning and Knowledge Extraction, 3*(3), 615–661. https://doi.org/10.3390/make3030032

- Wei, L., Wu, J., y Long, C. (2021). Blockchain-Enabled Trust Management in Service-Oriented Internet of Things: Opportunities and Challenges. En *2021 The 3rd International Conference on Blockchain Technology.* (pp. 90–95). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3460537.3460544

- Wohlgenannt, I., Simons, A. y Stieglitz, S. (2020). Virtual reality. *Business & Information Systems Engineering, 62,* 455–461. https://doi.org/10.1007/s12599-020-00658-9

- Wu, J., y Tran, N. (2018). Application of Blockchain Technology in Sustainable Energy Systems: An Overview. *Sustainability, 10*(9), 3067. https://doi.org/10.3390/su10093067

- Yu, J., Petersen, N., Liu, P., Li, Z. y Wirsum, M. (2022). Hybrid modelling and simulation of thermal systems of in-service power plants for digital twin development. *Energy, 260,* 125088. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125088

Cómo citar este artículo:

Villa, E. & Giraldo, B. (2023). Oportunidades y desafíos de la Web 3.0 en el sector de servicios públicos: revisión de literatura. *Revista EPM*, (21), 80-99.

Ingeniería de confiabilidad en etapas tempranas del ciclo de vida de los proyectos

Reliability engineering early in the project life cycle

Cindy Lloraine Sánchez Rincón
Gerencia Centros de Excelencia Técnica, EPM

cindy.sanchez@epm.com.co

Resumen

La aplicación de las herramientas de Ingeniería de Confiabilidad busca obtener valor para la organización mediante el uso de técnicas de ingeniería que permiten tomar decisiones de inversión de acuerdo con el desempeño, la criticidad y el costo de los activos. La metodología de Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM) ha sido aplicada comúnmente para optimizar las técnicas de mantenimiento correctivo y preventivo; sin embargo, en Empresas Públicas de Medellín (EPM), el Centro de Excelencia Técnica, consciente de la importancia de la aplicación de estas herramientas de ingeniería en todo el ciclo de vida de los activos, decidió incursionar en su aplicabilidad en las etapas tempranas de los proyectos.

Palabras clave:
Activo, Ciclo de vida, Confiabilidad, Desempeño, Disponibilidad, Mantenibilidad, Modos de falla, Probabilidad de falla, Riesgo, Taxonomía.

Keywords:
Asset, Life cycle, Reliability, Performance, Availability, Maintainability, Failure modes, Probability of failure, Risk, Taxonomy.

Introducción

Ingeniería de confiabilidad es el término aplicado a las diferentes técnicas, herramientas y métodos que en conjunto permiten determinar que un activo o sistema opera con la calidad adecuada, bajo las condiciones operativas requeridas y de forma continua en un tiempo determinado. No es suficiente que un activo o sistema cumpla con los parámetros de funcionalidad y calidad requeridos, sino que además es importante que este desempeñe satisfactoriamente la función para la que fue creado bajo las condiciones de operación y durante el tiempo establecido, es decir que sea confiable.

La confiabilidad como metodología de análisis, debe soportarse en una serie de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de una forma sistemática, a fin de poder determinar la continuidad operacional y el costo de esta. Existe una gran variedad de métodos y herramientas que nos permiten cuantificar estas variables y evaluarlas en el tiempo, bajo el enfoque de tres aspectos críticos del activo: desempeño, riesgo y costo.

En este artículo se expone la aplicación de la metodología de Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad en etapas tempranas de los proyectos de infraestructura (formulación y diseño conceptual), realizada al interior de la Gerencia CET de EPM, y los resultados obtenidos luego de realizar la implementación en dos proyectos de este tipo.

1. Antecedentes

Las metodologías de ingeniería de confiabilidad han sido comúnmente aplicadas en la etapa productiva del activo, para optimizar planes de mantenimiento y garantizar la continuidad operacional; sin embargo, si lo que se busca es rentabilizar las inversiones, la aplicación de las metodologías, técnicas y herramientas de confiabilidad no debería limitarse a la etapa de operación, sino que estas deberían ser aplicadas a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, en especial en las etapas tempranas de los proyectos, donde se conceptualizan y diseñan los activos, ya que es en estas etapas donde se toman las decisiones que rigen el rumbo del desarrollo del proyecto y por lo tanto se compromete el costo del mismo, pero a su vez, es donde este tiene la flexibilidad suficiente para soportar cambios sin mayores afectaciones en el costo y el tiempo de ejecución (Schuman y Brent, 2005).

Aunque los beneficios de la aplicación de las metodologías de ingeniería de confiabilidad en etapas tempranas pueden ser variados, todos están orientados a rentabilizar las inversiones a través de la maximización de la utilización de los activos. Entre estos beneficios se pueden destacar:

- Selección de alternativas soportada en la cuantificación del desempeño proyectado en el tiempo.
- Identificación de activos o componentes críticos.
- Implementación de acciones de mitigación de riesgos.
- Estimación del costo del ciclo de vida.
- Optimización de alcances en los proyectos.
- Valoración del costo-beneficio de las inversiones proyectadas.

2. Metodología

Dentro de la ingeniería de confiabilidad se enmarcan diferentes metodologías, entre las cuales se pueden listar, entre otras tantas:

- AMEF – Análisis de Modos y Efectos de Falla
- FRACAS – Reporte de fallas, análisis y sistema de acción correctiva
- FBD – Diagrama de bloques funcionales
- RAM – Análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad

El Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad o análisis RAM por sus siglas en inglés (Reliability, Availability and Maintainability), se enfoca en valorar y proyectar tres aspectos que definen el comportamiento de un activo: desempeño, riesgo y costo (Galván y Primera, 2017).

El desempeño del activo evalúa el comportamiento histórico del mismo o comportamiento proyectado a lo largo de su ciclo de vida. Esta evaluación considera tres parámetros: confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad. La confiabilidad es la probabilidad de que el activo ejecute la función para la que fue creado, en el tiempo determinado y bajo las condiciones operativas establecidas; la disponibilidad es la probabilidad de que el activo esté disponible, es decir sin falla, en un tiempo definido y la mantenibilidad corresponde a la probabilidad de reparar la falla, es decir devolver el activo a su condición operativa (Galván y Primera, 2017).

La valoración de la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad basa su desarrollo en el análisis probabilístico de fallas, la cual se enfoca en identificar las formas en que un activo puede fallar (modos de falla), el tiempo medio para fallar (MTTF), el tiempo medio entre fallas (MTBF), el tiempo medio para reparar las fallas (MTTR) y las consecuencias posibles de estas fallas.

El Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad es estándar para todos los proyectos de infraestructura y puede ser aplicada a los diferentes negocios de EPM: Agua y Saneamiento, Generación, Transmisión y Distribución de energía y Gas, donde se involucren activos físicos operativos. La aplicación de la metodología se desarrolla en cuatro (4) pasos o componentes, como se indica en la figura 1:

1. Definición de la necesidad y la frontera de estudio
2. Evaluación de parámetros de desempeño
3. Valoración del riesgo
4. Estimación del costo del ciclo de vida

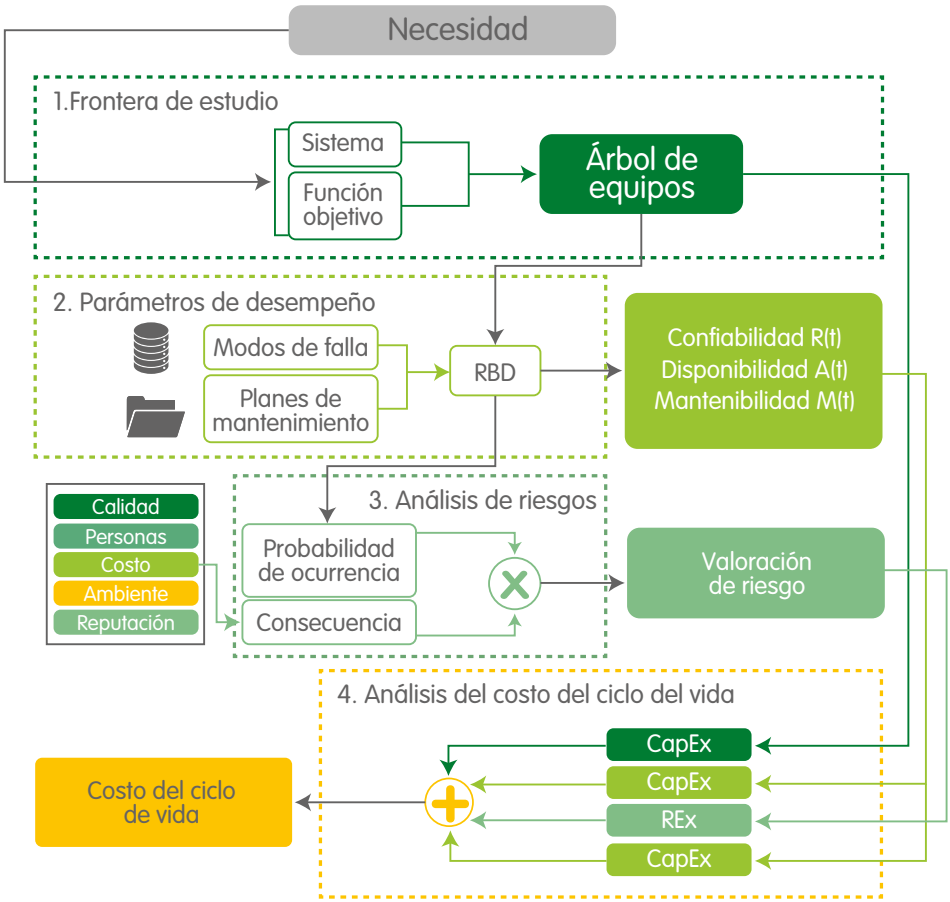


Figura 1. Componentes de la metodología RAM.

2.1. Definición de la necesidad y la frontera de estudio

La definición de la necesidad es el paso inicial para la aplicación de la metodología y el desarrollo del análisis, en este se especifica el problema a resolver, la necesidad o el requerimiento del sistema. La necesidad varía de acuerdo con el tipo de proyecto, dependiendo de si la infraestructura a desarrollar es nueva (creación de activos), es existente (modernización de activos) o involucra la implementación de nuevas tecnologías.

Las necesidades están orientadas a identificar activos críticos, a proyectar la capacidad productiva del sistema o a estimar los costos totales del ciclo de vida de un activo o sistema. Las necesidades se expresan como cuestiones al sistema de activos, por ejemplo:

- ¿Cómo se comportan los parámetros de desempeño (confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad) del activo/sistema a lo largo del tiempo operativo del mismo?
- ¿Cuáles son los activos críticos para la operación del sistema?
- ¿Cuál es la capacidad productiva y su comportamiento a lo largo del tiempo operativo?
- ¿Cuál es el costo del ciclo de vida proyectado?
- ¿Cuál activo presenta el mayor impacto a la continuidad operativa del sistema si falla?

- ¿Cuál activo es más propenso a poner en riesgo la seguridad operacional?
- ¿Cuáles son los modos de falla que puede presentar el activo?
- ¿Cuál es el impacto en el sistema si falla un componente o activo?

Las respuestas a estos interrogantes permiten definir el alcance del análisis y el nivel de detalle con el que se abordará el mismo. Definir la *frontera de estudio* corresponde a establecer los límites físicos y funcionales que enmarcan el sistema objeto de análisis y sobre el cual se tomarán las decisiones, esta frontera incluye además la *función objetivo,* la cual establece los parámetros y el comportamiento operativo que satisfacen la necesidad.

2.2. Evaluación de parámetros de desempeño

Los parámetros de desempeño: Confiabilidad ($R_{(t)}$), Disponibilidad ($A_{(t)}$) y Mantenibilidad ($M_{(t)}$), se establecen a partir del comportamiento histórico del activo, esta historia se construye a partir de la información capturada por el personal responsable de la operación y el mantenimiento, la cual es registrada en los sistemas de información como EAM Máximo, JD Edwards, entre otros. En estas bases de datos se registra cada evento de mantenimiento, ya sea de tipo correctivo, programado o de inspección, acompañado de información relacionada con el activo afectado, las fechas de ocurrencia de la falla y reinicio de operación, los recursos de personal y materiales utilizados en la ejecución del mantenimiento y el costo asociado a cada uno de ellos. A partir de esta información se realiza una depuración de eventos en busca de identificar los modos de falla de los activos, los cuales estarán asociados a los ítems mantenibles[1] de cada activo. El nivel de detalle al que se llegue en el componente del activo para asignar el modo de falla dependerá del detalle al que se haya llegado en la descripción del evento registrado.

Cuando se trata de activos de los cuales no se tienen registros históricos en los sistemas de información de la empresa, se recurre al uso de datos de fuentes externas, como los datos de activos similares en otra instalación, las bases de datos de equipos genéricos como OREDA o IEEE, los datos del fabricante, entre otros.

- **Identificación de modos de falla y asignación de distribuciones de probabilidad**

Los modos de falla hacen referencia a todas las formas en las que un activo puede fallar, es decir, son las formas en las que puede degradarse o incumplirse la función de un activo. Estas están compuestas por tres aspectos: la causa, el efecto y el modo de detección. La primera, establece básicamente aquello que produce la falla funcional; la segunda, expone en qué medida se ve afectada la funcionalidad, si parcial o totalmente y la tercera, es la forma en la que se puede evidenciar que la falla ha ocurrido. Para una falla puede existir varias causas y a su vez, para cada causa uno o varios modos de detección. Posterior a la identificación de los modos de falla, se agrupan los eventos, considerando el tiempo entre eventos y la duración de cada reparación; con esta agrupación de datos se establecen las distribuciones de *probabilidad de falla* ($F_{(t)}$) y *probabilidad de reparación* ($r_{(t)}$). La primera corresponde a la tendencia que tienen los activos o componentes para presentar un modo de falla y la segunda a la tendencia del tiempo requerido para reparar la falla.

Los modos de falla y la distribución de probabilidad de falla se asignan en los niveles taxonómicos *Ítem mantenible o Activo,* definidos en el modelo taxonómico de EPM, el cual se presenta en la figura 2.

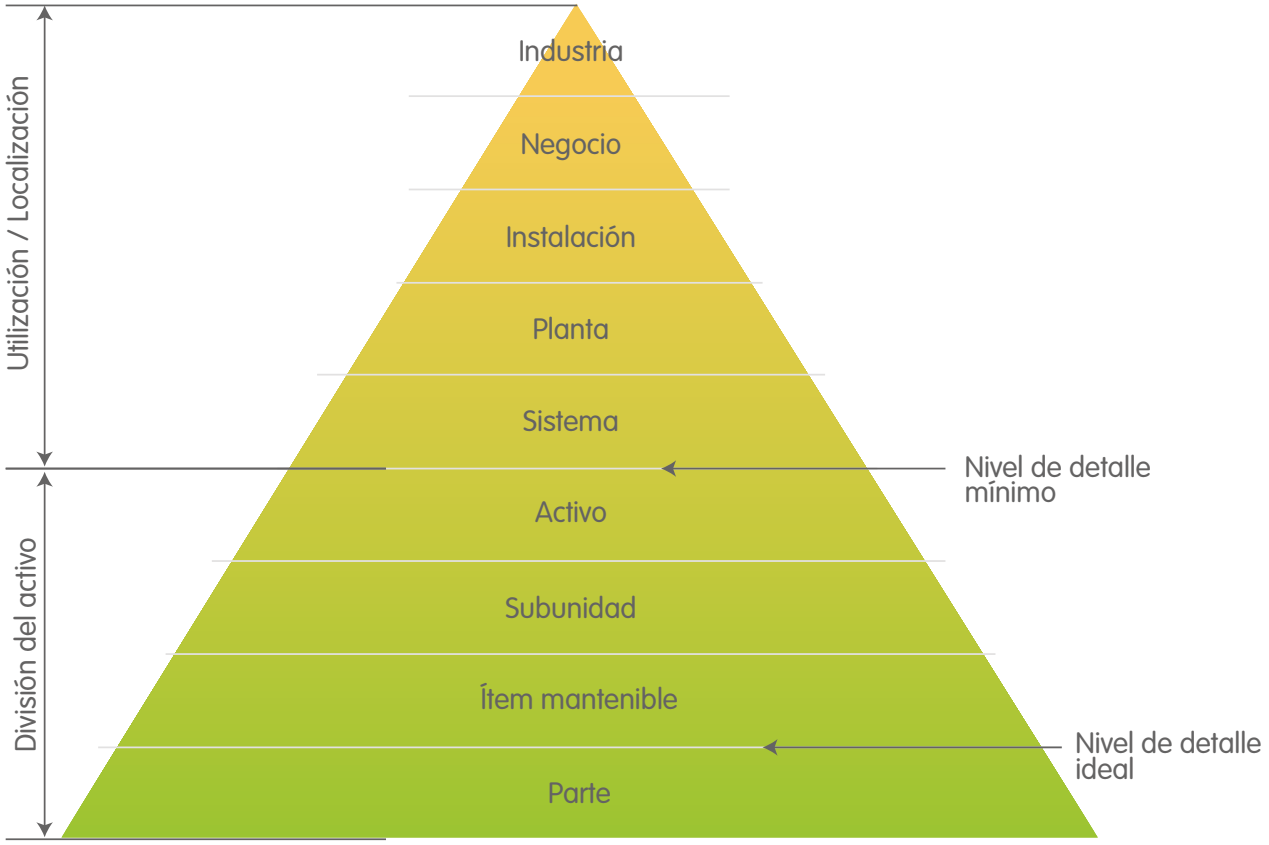


Figura 2. Taxonomía de activos de EPM.
Adaptado del Manual de taxonomía de EPM.

De igual manera, cada modo de falla se desagrega en sus causas posibles y a cada una se le asignan las tareas de mantenimiento que mitigan la materialización de la falla, tales como las intervenciones programadas de acuerdo con el plan de mantenimiento establecido para cada activo, incluyendo los equipos, herramientas y el personal involucrado y la distribución de probabilidad de reparación.

- **Generación de Diagramas de Bloques de Confiabilidad (RBD[2])**

Una vez se establece el nivel de detalle del activo o grupo de activos a analizar, se construye el modelo digital, este corresponde a un diagrama de bloques de confiabilidad, que define en una representación gráfica, la interacción que deben tener los activos o componentes de activos para dar cumplimiento a la función objetivo. En la figura 3 se muestra como ejemplo el diagrama de bloques de confiabilidad (RBD) de la PCH La Herradura, desagregado hasta el nivel taxonómico Subunidad. El nivel de detalle de diagrama RDB es aquel que se puede lograr con los eventos de falla y mantenimiento, dicho nivel de detalle se rige por lo dispuesto en el modelo taxonómico de EPM.

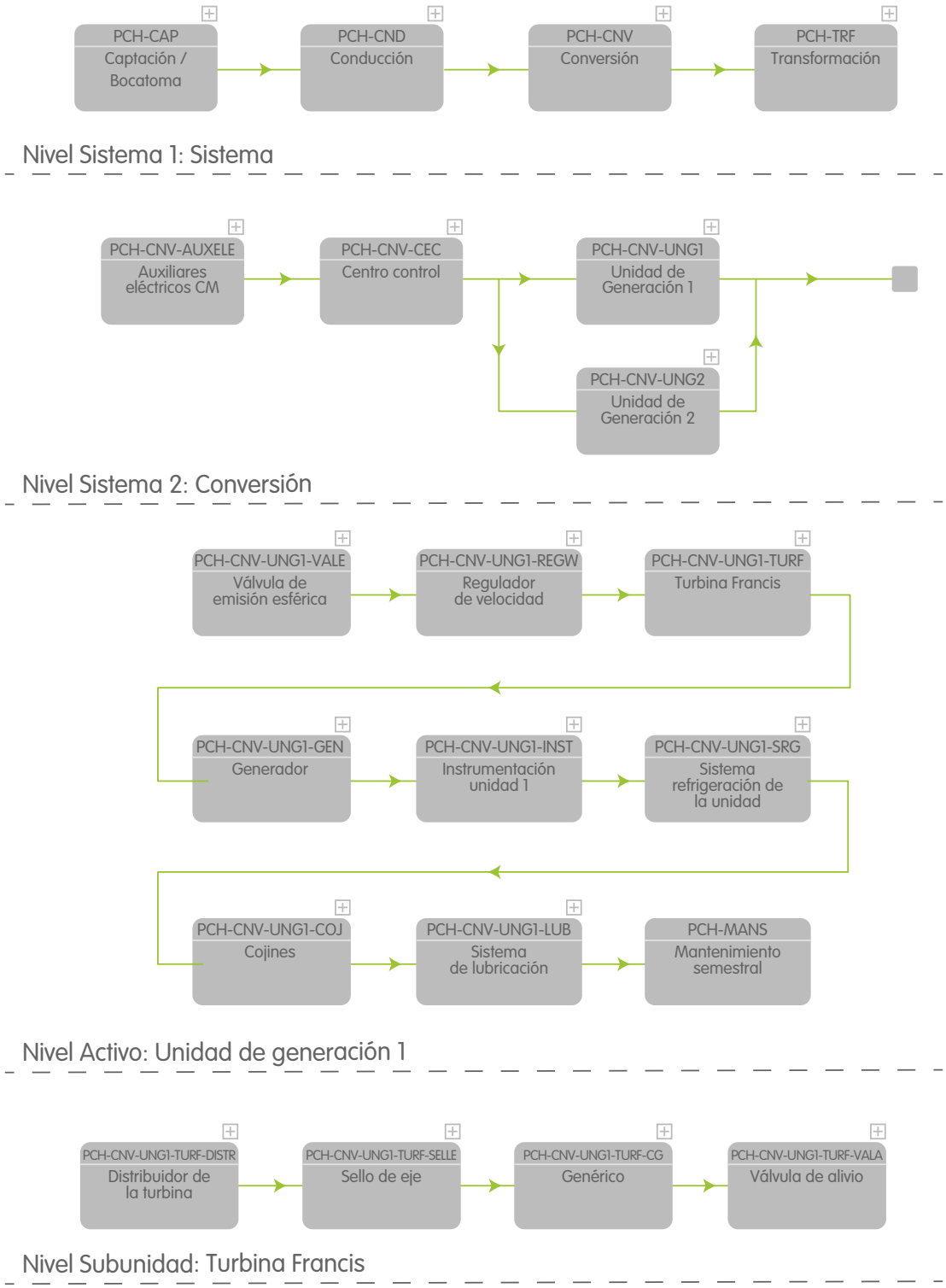


Figura 3. RBD del modelo digital de la PCH La Herradura

- **Proyección del desempeño**

Con el modelo digital construido y las distribuciones de probabilidad asignadas, se genera la proyección del desempeño del sistema o activo modelado para el tiempo de operación establecido. Esta se realiza a través de un método estadístico, en este caso específico: el Montecarlo.

El desempeño del activo o sistema dependerá de las relaciones que cada componente o equipo tenga con los demás, las cuales se darán conforme a la función objetivo. De esta forma el desempeño se proyectará considerando los eventos de falla y mantenimiento que cada componente o equipo presente, así como la afectación que esto genere al activo o sistema, es decir aquellos eventos que afecten la operación normal del activo o sistema.

En la figura 4 se presenta la proyección de disponibilidad de la subestación Industriales, para un periodo de tiempo de 30 años (262.800 horas), en la cual se puede observar la pérdida de disponibilidad del sistema en el tiempo (línea verde oscura).

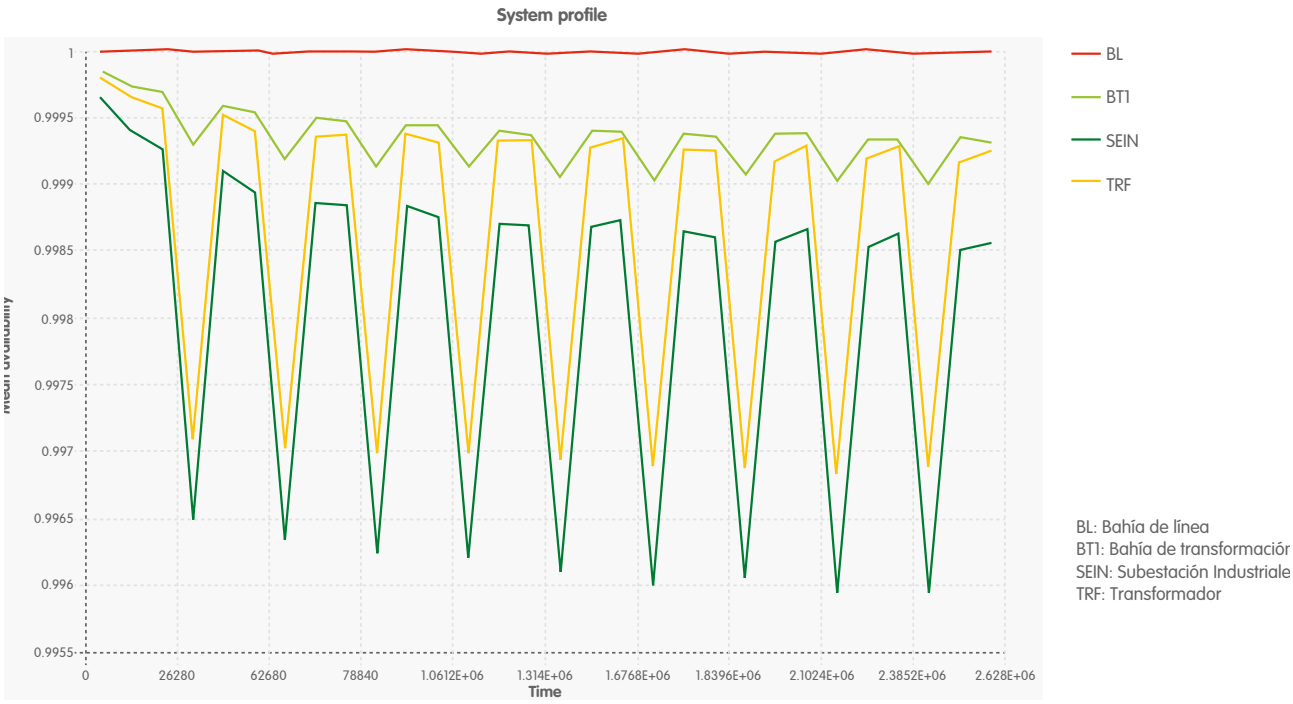


Figura 4. Disponibilidad media proyectada para la Subestación Industriales.

2.3. Valoración de riesgos

El riesgo se evalúa considerando los dos parámetros que lo definen: la probabilidad de que ocurra el evento (P), y la magnitud de la afectación que dicho evento genera (L). La probabilidad de ocurrencia corresponde a la distribución de falla de cada activo ($P = F_{(t)}$). Para cada evento de falla se valora la consecuencia que genera su ocurrencia en los objetos de impacto definidos por EPM: calidad (disponibilidad del servicio), costo, personas, ambiente y reputación.

Para definir el grado de afectación en cada objeto de impacto se establecen las escalas de consecuencia de acuerdo con los eventos de materialización de riesgos ocurridos, basados en los históricos de la instalación analizada, instalaciones similares dentro del sistema integrado de EPM o instalaciones similares de referencia de industrias parecidas, ya sean nacionales o internacionales. En la tabla 1 se presenta un ejemplo de la escala de valoración de la consecuencia para la seguridad operacional.

Seguridad operacional		
Riesgo de que el sistema/activo entre en falla y deje de ejecutar la función para la cual fue dispuesto.		
Severidad	**Descriptor***	**Nivel**
Menor	Menor a 1 hora al año	1
Moderado	Entre 1 y 5 horas al año	2
Mayor	Entre 5 y 8 horas al año	3
Severo	Entre 8 y 24 horas al año	4
Catastrófico	Mayor a 24 horas al año	5

*Afectación de la función y/o servicio

Tabla 1. Ejemplo de escala de valoración de la consecuencia para la seguridad operacional (objeto de impacto Calidad).

2.4. Estimación de costos del ciclo de vida

Como paso final está la estimación del Costo del Ciclo de Vida (LCC[3]) del activo o sistema. En este punto se genera lo que se conoce como la Estructura de costos, esta está basada en la norma (ISO, 2021). Si bien esta norma establece los lineamientos para el coste del ciclo de vida de las industrias del petróleo, petroquímicas y de gas natural, es una referencia válida para la estimación del LCC en otras industrias con un sistema intensivo de activos como el de EPM.

En términos generales el costo del ciclo de vida se estima considerando cuatro agrupadores principales, como se indica en la figura 5: Costos de capital (CapEx), Costos de operación (OpEx), Costos de riesgos (Rex) y Costos de la disposición final (FedEx).

En la metodología RAM, se construye la estructura de costos considerando el sistema evaluado y el alcance del análisis. Como regla general se establece una estructura que abarca las generalidades de cada agrupador, como se indica en la tabla 2.

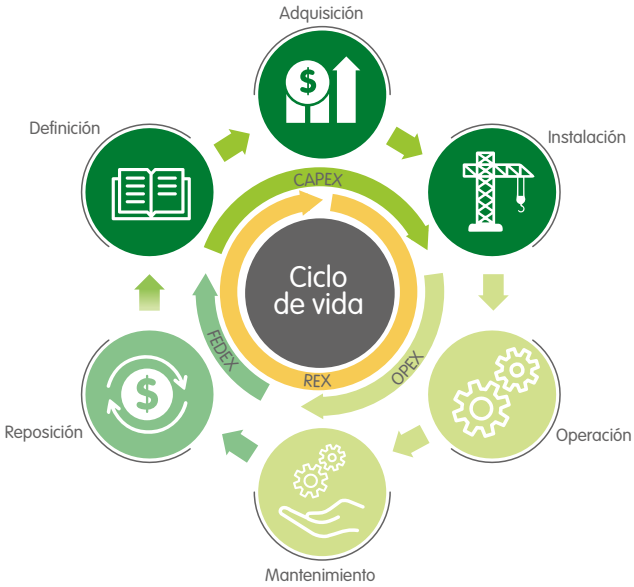


Figura 5. Agrupadores del costo del ciclo de vida de los activos.

1.	Costos de investigación y desarrollo:
1.1	Ingeniería y diseño
1.2	Gestión de la información
2.	**Costos de la inversión – capital no recurrente:**
2.1	Compra de equipos y repuestos
2.2	Permisos, trámites y licencias
2.3	Construcción de la instalación
2.4	Pruebas y documentación
2.5	Montaje y desmontaje
2.6	Logística y capacitaciones
3.	**Costos de la operación – capital recurrente:**
3.1	Ingeniería y recursos de mantenimiento
3.2	Uso de la instalación (insumos)
3.3	Recursos de operación
4.	**Costo de la materialización de los riesgos:**
4.1	Ingeniería de riesgos
4.2	Pólizas y seguros
4.3	Multas, sanciones y remediaciones
4.4	Planes de contingencia
5.	**Costos de la disposición final**
5.1	Ingeniería y recursos de demolición y/o disposición
5.2	Permisos, trámites y licencias
5.3	Baja contable
5.4	Limpieza y ecología
5.5	Aprovechamiento

Tabla 2. Estructura de costos para la metodología RAM.

Con esta estructura se estima el costo del ciclo de vida en función del tiempo de operación evaluado y la proyección del desempeño en este periodo, por ejemplo, una estación de bombeo se desarrolla para un tiempo de operación de 25 a 30 años, durante este periodo los costos de operación variarán de acuerdo con el comportamiento de cada activo, es decir, con los eventos de mantenimiento correctivos (fallas) y planeados, así como el consumo eléctrico y los recursos necesarios para la gestión de dichas tareas. De igual manera, la posibilidad de la materialización de un riesgo variará con respecto a ese tiempo de operación, dado que los activos se desgastan y la posibilidad de que presenten una falla aumentará con el nivel de desgaste.

3. Implementación en etapa de formulación y estructuración técnica

Con el fin de lograr una implementación escalonada de la metodología, se estableció una hoja de ruta con tres (3) fases de implementación como se muestra en la figura 6. La fase 1 consiste en la implementación del análisis RAM en las estructuraciones técnicas hasta el paso 2 de la metodología (parámetros de desempeño). Esta tuvo como objetivo consolidar el uso de información y las herramientas para el desarrollo de los análisis.

La fase 2 consiste en la incorporación de los pasos 3 y 4 de la metodología (análisis de riesgo y costo del ciclo de vida). Esta tiene como objetivo abordar los niveles de evaluación en las tres dimensiones del activo: desempeño, riesgo y costo. Por último, la fase 3 consiste en llevar la metodología a las demás fases del ciclo de vida de los activos, logrando garantizar la realimentación del modelo en las diferentes etapas del ciclo de vida.

Figura 6. Implementación de la metodología en el tiempo.

A continuación, se presentan el proceso y los resultados de la implementación del análisis RAM en la formulación de dos casos de estudio.

3.1. Proyecto nueva subestación industriales 110 kV

La nueva SE Industriales hace parte del plan de Expansión del Valle de Aburrá Centro – Sur, el cual tiene como objetivo garantizar la continuidad del servicio. En este caso de aplicación se requería evaluar el desempeño y la relación costo-beneficio de las diferentes configuraciones del sistema de potencia.

Con este alcance se definió la frontera de estudio y se estableció el árbol de equipos. La frontera de estudio se enfocó principalmente en los equipos del nivel de tensión 110 kV. Con esto definido se pasó a la identificación de los modos de falla y sus respectivas distribuciones de probabilidad, para lo cual fue necesario consultar varias fuentes de información: registros históricos de EPM (EAM Máximo, SCADA, etc.), fabricantes y bases de datos exógenas como IEEE. La información obtenida fue validada por medio de talleres con especialistas en la operación y el mantenimiento de subestaciones similares en EPM.

Posteriormente se establecieron las configuraciones a analizar, entre estas se consideraron para el sistema de potencia: 1) barra sencilla, 2) doble barra más seccionador de transferencia y 3) barra sencilla más transferencia. Para cada configuración se construyó el modelo digital bajo la metodología de diagramas de bloques de confiabilidad o RBD, considerando como nivel superior los sistemas: bahías 110 kV, cables 110 kV, transformadores, automatización, control y telecomunicaciones. Cada uno de estos sistemas se desagregó en los diferentes subsistemas y activos aplicables. Igualmente, se consideraron tres (3) escenarios de carga: 1) Escenario de carga menor a 60 MVA, 2) Escenario de carga menor a 60 MVA más cambio rápido y 3) Escenario de carga mayor a 60 MVA.

Con los modelos construidos se procedió a proyectar el desempeño, en términos de disponibilidad, de las diferentes configuraciones del sistema de potencia en los tres escenarios considerados. Como se presenta en la figura 7, las configuraciones de barra doble más seccionador de transferencia (BD) y barra sencilla más transferencia (BP+T), presentan una mayor disponibilidad con respecto a la configuración de barra sencilla (BS). La indisponibilidad en ninguno de los escenarios supera el 1%.

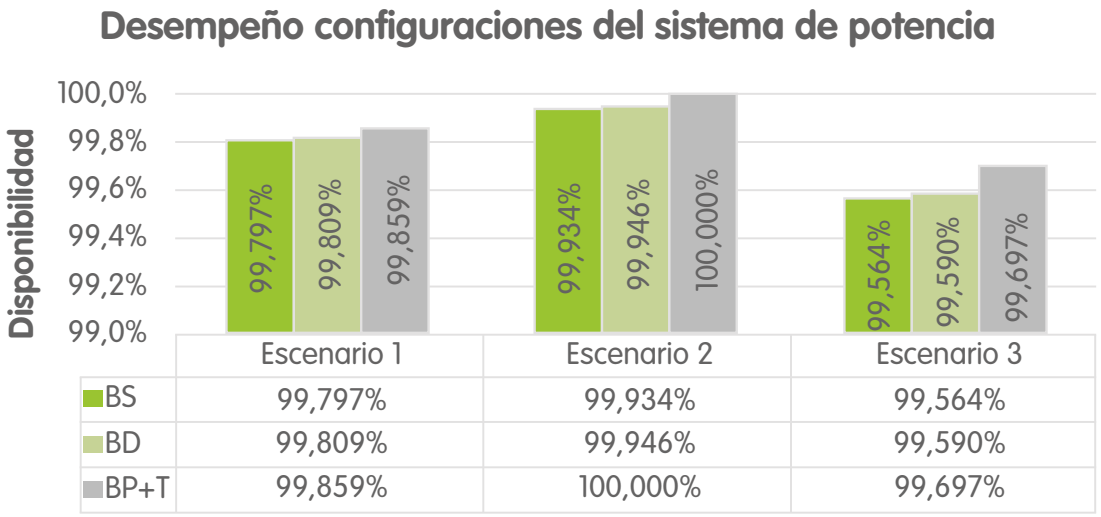


Figura 7. Desempeño de las configuraciones en los diferentes escenarios.

La relación costo-beneficio, se evaluó estimando el costo del ciclo de vida de cada configuración, con lo cual se pudo determinar que la configuración que presenta un menor costo corresponde a la de barra sencilla, secundada por la barra sencilla más transferencia y en tercer lugar la doble barra más seccionador de transferencia, estos resultados se pueden detallar en la figura 8.

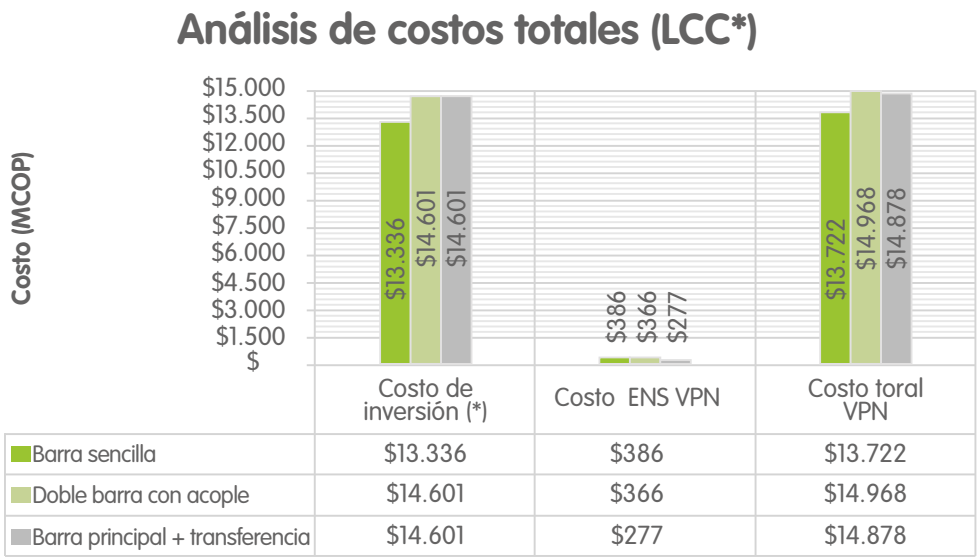


Figura 8. Análisis del costo del ciclo de vida de las diferentes configuraciones del sistema de potencia.

Al analizar el costo de las diferentes configuraciones con respecto a los resultados del desempeño, se concluye que las mejoras en el desempeño logradas con las configuraciones barra doble más seccionador de transferencia y barra principal más transferencia, implican una inversión adicional que ronda los $1,265 MCOP y representan un beneficio aproximado de $20 MCOP y $110 MCOP por disponibilidad, respectivamente, por lo que el beneficio capturado no compensa la inversión requerida, como se muestra en la figura 9.

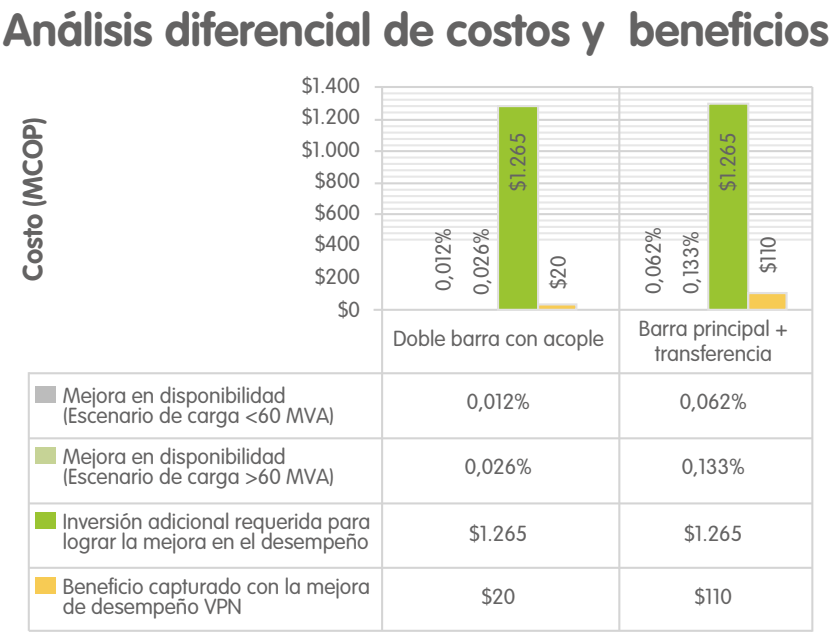


Figura 9. Análisis diferencial de los costos y beneficios.

A partir de estos resultados se pudo concluir que la configuración que ofrece mayor valor para EPM corresponde a la barra sencilla, la cual ofrece un alto desempeño, mayor a 99.5% en disponibilidad y menores costos en su ciclo de vida. (Osorio, Cano, Montero, Quintero, & González, 2022).

3.2. Modernización de pequeñas centrales de generación – PCH La Herradura

El proyecto modernización de la pequeña central hidroeléctrica La Herradura tiene como objetivo asegurar la operación y mejorar la disponibilidad del sistema. En este caso de aplicación se requería identificar si las intervenciones planteadas en el alcance del proyecto favorecían la disponibilidad de la pequeña central y en qué porcentaje.

Para efectos del análisis, se consideró como frontera de estudio los activos comprendidos entre la bocatoma de la central y los bornes del transformador de potencia, considerando dentro de esta frontera todos los equipos hidromecánicos y electromecánicos, así como los equipos de suministro eléctrico, automatización, control y telecomunicaciones.

Una vez analizados los reportes de eventos, se estableció el árbol de equipos considerando cuatro grandes sistemas: captación, conducción, conversión y transformación, llegando a un nivel de detalle de subunidad de acuerdo con la taxonomía.

Posteriormente, se identificaron los modos de falla a los que se le asignaron las distribuciones de probabilidad tanto de falla como de tiempos de reparación, así como las tareas de mantenimiento programadas. Considerando estos modos de falla y las intervenciones planteadas en el proyecto de modernización, se crearon dos (2) modelos digitales bajo la metodología RBD: el primer modelo representa el estado actual de la central (escenario 1), es decir sin intervenciones, y el segundo modelo incluyendo las intervenciones (escenario 2).

La proyección del desempeño se evaluó para 30 años de operación futura para ambos escenarios, en la tabla 3 se presentan el beneficio porcentual en disponibilidad proyectado en cada sistema de la pequeña central, siendo este del 3,04% para todo el sistema, el cual equivale a 257 horas adicionales de operación por año.

Sistema	A(t) Actual	A(t) Futura	ΔA(t)
Captación	96,250%	96,600%	0,35%
Conducción	94,750%	95,620%	0,87%
Conversión	**95,350%**	**97,250%**	**1,90%**
Transformación	99,620%	99,830%	0,21%

Tabla 3. Beneficio porcentual en disponibilidad por sistema.

Al evaluar la disponibilidad proyectada en los activos que conforman el subsistema conversión, se evidenció que las intervenciones proyectadas en las unidades de generación son las que aportan el mayor beneficio en la disponibilidad de la central, siendo las más representativas las planteadas para el sistema de lubricación, la turbina y la válvula de admisión como se presenta en la tabla 4.

Nivel	Código	Descripción	A(t) Actual	A(t) Futura	ΔA(t)
1	**PCH-CNV**	**Conversión**	**95,35%**	**97,25%**	**1,90%**
2	PCH-CNV-AUXELE	Auxiliares eléctricos C/M	99,95%	99,95%	0,00%
2	PCH-CNV-CEC	Centro control	99,85%	99,85%	0,00%
2	PCH-CNV-UNG1	Unidad de Generación 1	78,15%	85,29%	7,14%
3	PCH-CNV-UNG1-COJ	Cojinetes	99,64%	99,64%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG1-GEN	Generador	96,55%	96,56%	0,01%
3	PCH-CNV-UNG1-INST	Instrumentación unidad 1	99,67%	99,67%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG1-LUB	Sistema de lubricación	93,70%	97,91%	4,21%
3	PCH-CNV-UNG1-REGW	Regulador de velocidad	96,10%	96,14%	0,04%
3	PCH-CNV-UNG1-SRG	Sistema refrigeración de la unidad	99,81%	99,81%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG1-TURF	Turbina Francis	92,06%	95,55%	3,49%
3	PCH-CNV-UNG1-VALE	Válvula de admisión esférica	99,12%	99,69%	0,57%
2	PCH-CNV-UNG2	Unidad de Generación 2	79,61%	82,67%	3,06%
3	PCH-CNV-UNG2-COJ	Cojinetes	99,72%	99,72%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG2-GEN	Generador	96,39%	96,39%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG2-INST	Instrumentación de la unidad 2	99,92%	99,92%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG2-LUB	Sistema de lubricación	95,35%	95,48%	0,13%
3	PCH-CNV-UNG2-REGW	Regulador de velocidad	96,59%	96,60%	0,01%
3	PCH-CNV-UNG2-SRG	Sistema refrigeración de la unidad	99,95%	99,95%	0,00%
3	PCH-CNV-UNG2-TURF	Turbina Francis	92,19%	94,69%	2,50%
3	PCH-CNV-UNG2-VALE	Válvula de admisión esférica	98,15%	99,08%	0,93%

Tabla 4. Beneficio porcentual en disponibilidad por activo en el sistema Conversión.

A partir de estas proyecciones se evaluaron tres (3) escenarios para estimar el beneficio capturado en el tiempo de evaluación considerado (30 años): Escenario 1. Generación baja, Escenario 2. Generación media y Escenario 3. Generación alta. Los resultados se presentan en la tabla 5.

Con los resultados obtenidos se validó la priorización de las intervenciones con las cuales se puede lograr significativas mejoras en la disponibilidad de la pequeña central, de acuerdo con los planes de inversión y ejecución. (Paredes, Ruiz, Sánchez, Urán, & García, 2022).

Costos de inversión de intervenciones evaluadas (MCOP)	10.937
Escenario	**Beneficio capturado VPN (MCOP)**
Escenario 1. Generación baja	8.981,40
Escenario 2. Generación media	13.424,10
Escenario 3. Generación alta	17.866,70

Tabla 5. Beneficios capturados por las intervenciones de modernización.

Conclusiones

- El análisis RAM es una herramienta que aplicada en las etapas tempranas de los proyectos permite soportar la toma de decisiones con base en proyecciones de probabilidad, considerando no solamente la capacidad de proveer la demanda del servicio, sino también la optimización de inversiones y la mitigación de los riesgos, propiciando así la maximización de la utilización del activo (UA), lo que para EPM se traduce en la rentabilización de los negocios.

- La metodología planteada ha evolucionado y seguirá evolucionando en el tiempo, en la medida que se adquiera mayor experiencia en su aplicación. Es un proceso de mejora continua a fin de lograr las mejores prácticas de confiabilidad adaptadas a la realidad de EPM y su modelo de Gestión de Proyectos.

- Los casos de estudio permitieron validar la aplicabilidad de la metodología y requerimientos de información en etapas tempranas del ciclo de vida de los activos, así como definir las herramientas e información necesarias para lograr la implementación en las demás etapas del ciclo de vida de los activos.

Notas al final

[1] Componente que se puede intervenir para reponer su estado operativo.

[2] RBD: Reliability Block Diagram, Diagrama de Bloques de Confiabilidad

[3] LCC: Life Cycle Cost, Costo del ciclo de vida

Agradecimientos

A la Gerencia Centros de Excelencia Técnica y a las unidades que de una u otra manera contribuyeron al desarrollo e implementación de estas metodologías.

Referencias

- Galván, B. J. y Primera, E. (2017). *Estudios e Ingeniería RAM*. MRI Institute.
- International Organization for Standardization. (2021). *Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Life cycle costing* (ISO 15663).
- Osorio, J., Cano, L., Montero, J., Quintero, M., & González, D. (2022). Modelo y Análisis de Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad: Nueva subestación Industriales 110 kV. Medellín: Empresas Públicas de Medellín ESP.
- Paredes, C., Ruiz, D., Sánchez, C., Urán, L., & García, J. (2022). Modelo Digital y Análisis CMD: Pequeña Central Hidroeléctrica La Herradura. Medellín: Empresas Públicas de Medellín ESP.
- Schuman, C.A. & Brent, A.C. (2005). Asset life cycle management: towards improving physical asset performance in the process industry. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 25 No. 6, pp. 566-579. https://rb.gy/m7mjya

Cómo citar este artículo:

Sánchez, C. (2023). Ingeniería de confiabilidad en etapas tempranas del ciclo de vida de los proyectos. *Revista EPM*, (21), 100-117.

Metodología para la desincorporación de activos en redes de distribución – Interacción técnica y financiera

Methodology for assets disposal in distribution networks – Technical and financial interaction

Dairo Alberto Valencia Rojas
Dirección Gestión de Activos, EPM
dairo.valencia@epm.com.co

Luisa Fernanda Zuluaga Villa
Dirección Gestión de Activos, EPM
luisa.zuluaga@epm.com.co

Resumen

En las empresas del Grupo EPM, existe una cantidad importante de activos que cumplen con la definición de activo lineal o redes, y su principal característica es la longitud. Teniendo en cuenta que los activos lineales están desagregados por componentes en el módulo de activos fijos del ERP (Enterprise Resource Planing) cumpliendo con las Normas Internacionales de Información Financiera (NIIF), más no con un nivel de detalle que permita identificar de forma directa el bien que se desincorpora de la operación, porque puede ser una parte de una red o circuito que se encuentra detallado en otros sistemas de información como el EAM (Enterprise Asset Management); es así como en este documento se da a conocer una metodología que refleja la interacción entre la parte técnica y financiera, estableciendo la forma para calcular el valor de la proporción del activo razonable para dar de baja en la contabilidad.

Palabras clave:
Activo, Activos lineales, Desincorporación, Gestión de activos, Sistema de información, Taxonomía, Baja de activos, Redes, Unidad constructiva, Vida útil regulatoria, Valor neto en libros regulatorio, Depreciación regulatoria, ERP

Keywords:
Asset, Linear assets, Disposal, Asset management, Information system, Taxonomy, Derecognition of assets, Networks, Construction units, Regulatory useful life, Regulatory netbook value, Regulatory depreciation, ERP

Introducción

Los activos lineales o redes están reconocidos en la contabilidad como elementos de propiedades, planta y equipo y desagregados por componentes, tal como lo indican las Normas Internacionales de la Información Financiera .Si bien dicha desagregación por componentes permite asignar la misma vida útil a aquellos activos con características comunes, no llega a un nivel de detalle que permita, al momento de la desincorporación, seleccionar la porción del activo de forma exacta; ese detalle se tiene en otros sistemas de información para gestión de activos como el EAM (Enterprise Asset Management) y/o sistemas de información geográfica de la infraestructura como SIGMA (Sistemas de Información Geográfica).

Es por ello y considerando que en la mayoría de los casos los activos lineales se reponen por tramos, que al momento de la desincorporación del activo se requiere la proporción asociada, la cual debe ser calculada. Anteriormente se calculaba esta proporción basada solo en la cantidad (longitud).

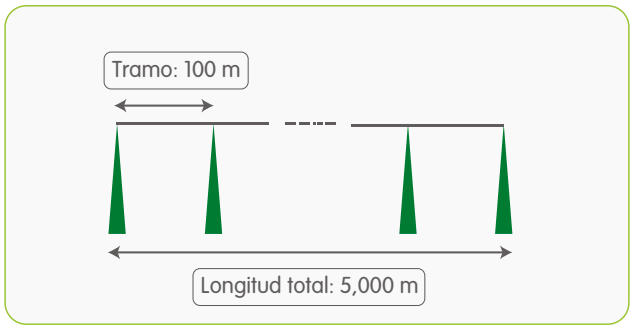


Figura 1. Esquema gráfico para cálculo proporción de la baja de activos lineales.

De acuerdo a lo que se muestra en la figura 1, cuando se desincorpora un activo lineal que tiene una longitud de 100 metros, se divide en la longitud total del circuito que en este caso es 5000 metros, se calcula una proporción sin considerar el tipo de activo, el calibre y la edad del mismo. Para este caso estaríamos hablando de una proporción de 2%, afectando en esta al activo que se encuentra en la contabilidad que tiene acumulado el valor total del circuito, capitalizado a través de todo su ciclo de vida.

1. El concepto de la desincorporación de activos y su importancia

De acuerdo con lo indicado en la norma ISO 55000, la gestión de activos permite la aplicación de enfoques analíticos para la administración de un activo a lo largo de las diferentes etapas de su ciclo de vida e incluye la gestión de cualquier obligación potencial posterior a su disposición (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2014). Basados en que la disposición final o dar de baja un activo es el retiro de un bien que forma parte del patrimonio de la empresa, se resalta que además de incluir la parte física del retiro del bien, se debe considerar la actualización y registro en los diferentes sistemas de información involucrados.

Debe considerarse que en el maestro de activos del ERP se registra los bienes para su gestión contable y que en el maestro de activos del EAM se tiene la gestión técnica y operacional de dichos bienes, por lo anterior, la integración entre ambos sistemas facilita la alineación financiera y técnica. Se hace énfasis en que el no realizar la baja de los activos en el sistema de información financiera ERP puede ocasionar afectaciones en el estado de pérdidas y ganancias de la organización, como la depreciación, y esto impacta decisiones financieras como es el pago de impuestos, valor de las pólizas de seguros y la repartición de dividendos.

2. Taxonomía de un circuito de distribución de energía

Teniendo en cuenta que el detalle de los componentes de un circuito de distribución se encuentra en el sistema de información para gestión de activos EAM, los registros asociados a dichos componentes están organizados de manera jerárquica, de acuerdo con la metodología para definir la taxonomía de activos; dado lo anterior, es posible identificar cada uno de los tramos de conductor para el caso de los circuitos de distribución de energía con su respectiva longitud, según se observa en la figura 2, en el nivel de activos (N6) de la taxonomía, para el alimentador principal y los ramales del circuito de distribución de energía. Lo anterior se logra porque se cuenta con una integración entre el sistema de información geográfico (SIGMA) y el EAM.

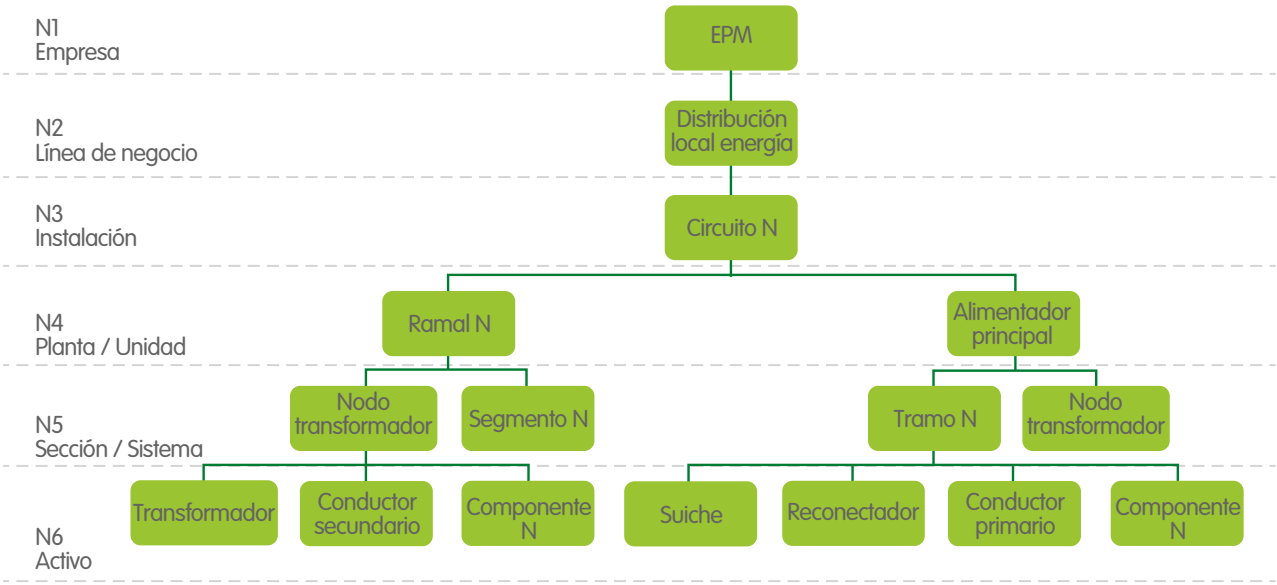


Figura 2. Taxonomía de un circuito de distribución de energía eléctrica. Recuperado de: (Dirección Gestión de Activos, 2022).

3. Información requerida en el EAM para cada tramo del circuito

La figura 3 muestra la información necesaria para cada tramo del circuito y que habilita la metodología para dar de baja.

Para el caso específico de EPM, el activo lineal circuito de distribución se encuentra desagregado en el ERP en sus componentes primario (media tensión – nivel II) y secundario (baja tensión – nivel I). Cada uno de los componentes mencionado contiene el valor de todos los tramos de conductor del circuito en toda su extensión y por cada nivel de tensión.

En el EAM, el mismo circuito de distribución se encuentra en un mayor detalle de desagregación, al detallar cada tramo de conductor, con su identificación, fecha de puesta en servicio, el valor neto regulatorio, la unidad constructiva con su valor y el tiempo de reconocimiento.

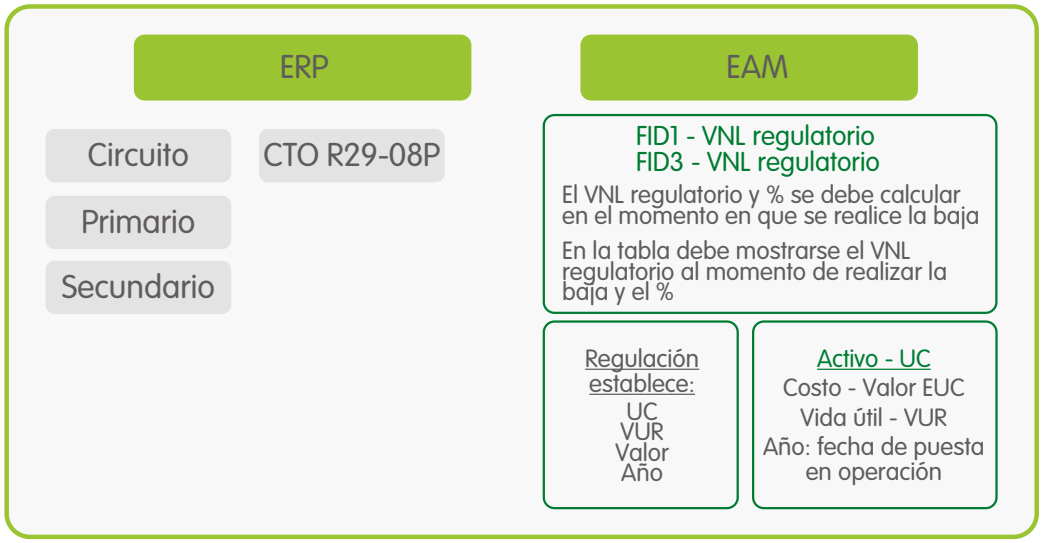


Figura 3. Información en el ERP y el EAM para un circuito de distribución de energía.

4. Formulación para calcular la proporción en el momento de la desincorporación de cada tramo o cada activo

Como se indicó anteriormente, el objetivo es identificar de forma directa el activo que se da de baja, y no determinar una proporción por encima o por debajo y que realmente se refleje la realidad del activo que se está desincorporando, considerando que puede ser una parte de una red o circuito que se encuentra detallado en otros sistemas de información como EAM; por lo que se puede estimar el valor neto en libros por el cual se debe dividir y dar de baja el activo utilizando una metodología que refleje de forma razonable el valor de la porción del activo a dar de baja en la contabilidad.

La metodología que se plantea es teniendo en cuenta el valor del activo de acuerdo con los valores regulatorios que establece la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en su resolución CREG 015 del 2018 por cada unidad constructiva

regulatoria; esta permite tener una valoración del activo teniendo en cuenta el material, el tipo de aislamiento, si es subterráneo o aéreo y el calibre. Adicionalmente se tiene en cuenta la fecha de instalación y la vida útil regulatoria.

Con esta información, se calcula la proporción del activo lineal a desincorporar y que se debe reflejar o aplicar en la parte financiera del activo, la fórmula que se emplea es la siguiente:

$$\% = \frac{\text{Valor neto en libros regulatorios del activo (1)}}{\text{Valor neto en libros regulatorios de todos los activos que conforman el mismo circuito primario o secundario (2)}}$$

$$\underline{\text{Valor neto en libros regulatorios del activo (1)}} = \underline{\text{Valor regulatorio de la UC}} - \underline{\text{Depreciación acumulada regulatoria del activo (3)}}$$

$$\text{Depreciación acumulada regulatoria (3)} = \frac{\text{Valor regulatorio UC}}{\text{Vida útil}} * \text{(fecha actual - fecha de instalación)}$$

Es necesario que cada activo lineal en el EAM tenga su información regulatoria, así: unidad constructiva, la vida útil, los valores de cada unidad constructiva y la fecha de instalación. En términos generales, la baja se realiza con base en la información regulatoria del activo, considerando que teóricamente el costo de los activos debe acercarse a dicho valor y en el caso de los activos de distribución la vida útil de igual forma.

5. Procedimiento

De acuerdo con lo que se muestra en el esquema de la figura 4, el Sistema de Información Geográfico (SIGMA), a través de su integración con el EAM, informa el activo lineal específico (tramo de red) que se está reportando en un estado fuera de operación; para este tipo de elementos que no son rotables una vez se desinstalan se dan de baja.

Figura 4. Esquema de integración SIGMA – EAM - ERP.

Esta información se procesa en una aplicación específica del EAM, donde se va recolectando todos los activos lineales que se están reportando para la baja; una vez se tienen los registros en dicha aplicación, el sistema se encarga de calcular la proporción de acuerdo con su valor neto en libros regulatorio y con base en la formulación definida en la parte anterior.

En la aplicación del EAM es posible seleccionar los tramos de circuito que se deben enviar al ERP para desincorporarse de la contabilidad, realizar una simulación previa para validar los datos y verificar que no se tenga ningún error, por último, se envía al ERP de forma definitiva.

Con la información enviada por el EAM, el ERP identifica el activo correspondiente, que tiene agrupado el valor de todo el circuito, aplica ésta proporción tanto en el costo como en la depreciación y finalmente, realiza la transacción para afectar los estados financieros.

6. Simulación realizada para validar la metodología

Para validar el funcionamiento de la metodología y su conveniencia, se realizo el siguiente caso de simulación en el ERP, con un circuito determinado, el cual agrupa el costo histórico de todo lo invertido en dicho circuito primario (nivel II) y que en su totalidad está compuesto por 26 km de conductor y cuyos saldos que se muestran en la tabla 1:

Activo JDE	14412
Longitud conductor primario (km)	26.11073
Valor contable JDE	
OP Redes distribución	2,222,344,285.19
Redes, líneas y cables	-534,125,280.55
Valor Neto en Libros	1,688,219,004.64

Tabla 1. Saldos del circuito en el ERP.

Al retirar 564 m de conductor de este circuito, y al aplicar la metodología que considera los aspectos técnicos – regulatorios, se obtiene un porcentaje de baja de 1.3%, como se muestra en la tabla 2:

Metodología - % VNL	
VNL conductores baja	30,645,036.07
VNL Total	2,352,326,209.29

Tabla 2. Saldos del circuito en el EAM.

De acuerdo a lo anterior, el valor a dar de baja en el activo del ERP sería aplicar este porcentaje (%) al costo histórico y a la depreciación, generando una pérdida en baja de activos por un valor de $22,0 millones. Al utilizar solo el factor de longitud (cantidad) de conductor, el factor de proporción de la baja será del 2.2%, como se muestra en la tabla 3:

Metodología - % calculado por cantidad	
Longitud de baja [km]	0.56418
Porcentaje [%]	2.2%

Tabla 3. Factor de proporción de la baja por cantidad.

Con la metodología por cantidad, el valor a dar de baja en el activo del ERP genera una pérdida en baja de activos por un valor de $37,2 millones, lo que resulta en una diferencia porcentual del 0.85% con respecto al resultado con la metodología que considera los factores técnicos – regulatorios y que equivale a un costo superior de $15,0 millones.

La anterior simulación se realizó para varios escenarios, como iniciando la vida útil en la mitad de la misma o al fin de ésta y en todos los casos, el porcentaje (%) siempre es superior al utilizar solo el criterio de cantidad para dar de baja. Lo anterior evidencia que la utilización de la metodología que utiliza los criterios técnicos – regulatorios, además de generar beneficios para la organización, puesto que las cifras son más precisas y permite reflejar esto en los estados financieros, habilita la toma de decisiones con información precisa obtenida de los diferentes sistemas de información disponibles.

Conclusión

En la práctica de desincorporar un activo lineal teniendo en cuenta solamente la longitud que se está desincorporando, se ignoran aspectos importantes como la edad del activo y las características del mismo, esto es, material, calibre, fecha de puesta en operación, entre otros, haciendo que el porcentaje (%) aplicado para la baja quede subvalorado o sobrevalorado. En la mayoría de los casos es un porcentaje sobrevalorado para un activo contablemente que tiene un valor significativo, pues este agrupa el dinero de todo el circuito desde el punto de vista contable. Con la metodología que integra los aspectos técnicos y financieros, y utiliza las integraciones de los sistemas de información disponibles, el cálculo del porcentaje (%) aplicado para dar de baja un activo lineal considera aspectos técnicos que aumentan la precisión y optimizan el valor financiero que debe ser declarado como baja en el sistema contable ERP y que a su vez se traduce en beneficios económicos para la organización.

Referencias

- Resolución 015 de 2018 [Comisión de Regulación de Energía y Gas]. Por la cual se establece la metodología para la remuneración para la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional. Ministerio de Minas y Energía. 29 de enero de 2018. https://rb.gy/fwpl
- Dirección Gestión de Activos (2022). *Metodología para definir la Taxonomía de Activos del Grupo EPM.* Documento disponible en la intranet corporativa.
- Organización Internacional de Normalización. (2014). *Asset management - Overview, principles and terminology* (ISO 55000). https://rb.gy/ryoa

Cómo citar este artículo:

Valencia, D. & Zuluaga, L. (2023). Metodología para la desincorporación de activos en redes de distribución - interacción técnica y financiera. *Revista EPM*, (21), 118-125.

Betr.-Druck max
Probedruck
LED LENSER
epm

Análisis de desempeño y costo de ciclo de vida de bombas sumergibles de turbina vertical

Performance and life cycle cost analysis of vertical turbine submersible pumps

Diana Carolina Ruiz Rojas
Gerencia Centros de Excelencia Técnica, EPM
diana.ruiz.rojas@epm.com.co

Luisa Fernanda Tamayo Correa
Gerencia Centros de Excelencia Técnica, EPM
Luisa.Tamayo@epm.com.co

Cindy Lloraine Sánchez Rincón
Gerencia Centros de Excelencia Técnica, EPM
cindy.sanchez@epm.com.co

Resumen

Este artículo determina el impacto de las fallas, reparaciones y planes de mantenimiento en el desempeño de los sistemas mencionados y cómo afectan estos eventos al costo total del ciclo de vida del proyecto, donde a partir de los resultados se definen estrategias y decisiones de inversión, para procurar maximizar el retorno de esta y garantizar el cumplimiento de la promesa de valor.

Palabras clave:
Confiabilidad, Costo del ciclo de vida, Desempeño, Falla, Mantenibilidad.

Keywords:
Reliability, Life Cycle Cost, Performance, Failure, Maintainability.

Introducción

La red primaria del sistema de acueducto de EPM cuenta con 48 estaciones de bombeo, de las cuales 30 utilizan equipos de bombeo superficiales y 18 de estos sumergibles de turbina vertical, también conocidas en EPM como motobombas *tipo lapicero*.

Los sistemas de bombeo con motobombas tipo lapicero fueron incorporados al sistema de distribución primaria de EPM en el año 2005. Estos equipos fueron presentados como una alternativa para la construcción de estaciones de bombeo, en instalaciones con limitaciones de espacio y restricciones de ruido, con la promesa de un costo de inversión competitivo, vida útil de hasta 10 años y libres de mantenimiento durante este tiempo. Sin embargo, en los últimos años se ha evidenciado el aumento en el costo del mantenimiento de los sistemas de bombeo con equipos tipo lapicero que generan alerta sobre estas instalaciones y su desempeño.

En este artículo se expone la aplicación de las metodologías de Ingeniería de confiabilidad, realizada al interior de la Gerencia CET de EPM, para determinar el impacto de las fallas, las reparaciones y los planes de mantenimiento en el desempeño de los sistemas de bombeo y cómo este desempeño afecta al costo total del ciclo de vida del proyecto.

1. Antecedentes

Las primeras motobombas tipo lapicero en EPM fueron instaladas en el año 2005. Durante los primeros años de operación de estas instalaciones no se tuvo registro de fallas; sin embargo, en los últimos años se han presentado una serie de eventos que han evidenciado incumplimientos de la promesa de valor de estos equipos. A continuación, se listan algunos:

- 2017. Fallas tempranas de 10 motobombas tipo lapicero, compradas para reposición de equipos fallados.
- 2018. Bombeo Robledo – Porvenir: se presenta falla en los motores de los grupos 4 y 5 durante la puesta en servicio. Los equipos fueron reparados por el proveedor y en el informe de causas de falla se indicó que el origen de los eventos fueron altos picos de voltaje, se recomendó el uso de filtros activos[1] por parte del fabricante.
  Estas bombas fueron reparadas por el fabricante y se volvieron a instalar con el respectivo filtro; en 2020 vuelven a fallar.
- 2018. Bombeo Porvenir – Aures: se compran motobombas tipo lapicero y se incluyen filtros activos para proteger los motores.
- 2019. Bombeo Cucaracho – Pajarito: se define que las motobombas deben ser suministradas con filtros activos.
- 2020. Como plan de mantenimiento preventivo se instalan filtros activos a 41 motobombas tipo lapicero.
- 2021. Se establece como plan de acción el cambio del líquido refrigerante del motor (glicol) de las motobombas tipo lapicero de las estaciones: Pajarito - Hamacas, Cañaveralejo – Pan de Azúcar y Sabaneta – Cumbres, que presentaron desviaciones importantes en las tendencias de aislamiento de los motores. Sin embargo, no hubo mejorías en las condiciones de las variables eléctricas de estos.
- 2022. Bombeo Mangos – Llanaditas: se presenta la falla de dos motobombas por motor quemado debido a altos picos de voltaje.
- 2022. Bombeo Ayurá – Esmeraldal: se reportan caídas del 20% en el caudal, se desmonta el equipo y en el informe entregado por el proveedor, se establece que hubo ruptura de la costura de soldadura de la carcasa del motor, sin posibilidad de recuperar la estanqueidad de este. También hubo ruptura del eje.

Frente a estos y otros eventos de fallas de las motobombas tipo lapicero, causadas principalmente por problemas en el motor, y que representan un riesgo constante para la prestación del servicio, el equipo de mantenimiento predictivo de la Unidad Mantenimiento Equipos Provisión Agua (UMEPA) ha aumentado la frecuencia de las pruebas de seguimiento que realiza al estado de las motobombas, para establecer acciones anticipadas a posibles fallas, sin embargo, con el fin de definir acciones que permitan disminuir y/o mitigar estas fallas desde las etapas tempranas del ciclo de vida de los proyectos, se propone analizar: el desempeño que han presentado los equipos, el comportamiento con la incorporación de los filtros activos y a cuánto ascienden los costos en los que se incurre al seleccionar estos equipos frente a otros que puedan desempeñar la misma función, en este caso específico las motobombas superficiales.

2. Desempeño de motobombas tipo lapicero

Las motobombas tipo lapicero se caracterizan por ser no reparables, es decir que, frente a un modo de falla de cualquiera de sus componentes, el equipo deberá ser reemplazado por completo. Aunque se intentó la reparación de algunos equipos fallados, estas intervenciones no recuperaron las condiciones operativas.

Estos equipos hasta finales del 2020 habían operado con variador de frecuencia y sin filtro activo, esta configuración se toma como el escenario inicial o escenario 1, con el cual se establece el desempeño de los equipos hasta el momento. El escenario 2 corresponderá a la operación de dichos equipos con el variador y el filtro activo.

En promedio cada estación de bombeo con motobombas tipo lapicero cuenta con 3 grupos o pozos, en estos se han instalado equipos de diferentes fabricantes y rango de potencia, a partir de esto se establecen los agrupadores que se indican en la tabla 1. En la tabla 2 se listan las estaciones de bombeo con motobombas sumergibles analizadas.

El análisis realizado incluye la población de equipos de motobombas sumergibles de turbina vertical que se encontraban en operación desde el año 2005 hasta el 31 de marzo del 2022, fecha de cierre para la captura de información.

Agrupador 1: Fabricante	Agrupador 2: Rango de potencia
Fabricante 1	Hasta 50 HP
Fabricante 2	Mayores a 50 hasta 100 HP
Fabricante 3	Mayores a 100 hasta 150 HP
Fabricante 4	Mayores a 150 hasta 200 HP
	Mayores a 200 HP

Tabla 1. Agrupadores.

Sistema	ID*	Número de grupos	Rango de potencia
Aures 1 – Aures 2	A1A2	2	0-50 HP
San Antonio - Naranjitos	SANA	3	0-50 HP
Tesoro – La Ye	TEYE	3	50-100 HP
Tesoro – Las Brisas	TEBR	3	50-100 HP
San Nicolas - Bocatoma	SABO	4	50-100 HP
Carrizales -Pinos	CAPI	3	100-150HP
Ayurá - Esmeraldal	AYES	2	100-150HP
Ayurá – El Chocho	AYCH	2	100-150HP
Santa Catalina – San Antonio	SASA	3	100-150HP
Mangos – Llanaditas	MALL	3	150-200HP
Pajarito – Hamacas	PAHA	3	150-200HP
Robledo - Porvenir	ROPO	3	>200HP
Sabaneta - Cumbres	SACU	4	>200HP
Cañaveralejo – Pan de Azúcar	CAPA	3	>200HP
San Nicolás - Carrizales	SACA	3	>200HP
San Nicolás – La Fe	SAFE	5	>200HP
La Estrella – Santa Catalina	ESSA	4	>200HP
Porvenir - Aures	POAU	4	>200HP

*Este ID solo aplica para identificación en el análisis.
No hace referencia a un identificador formalizado u estandarizado

Tabla 2. Estaciones de bombeo con motobombas tipo lapicero analizadas.

2.1 Información consultada y tratamiento de datos

Para conocer la cantidad de equipos, los eventos de falla y las causas, se realizó la búsqueda de los activos que se han usado en cada grupo o pozo, sus fechas de instalación y desmontaje o falla utilizando la información registrada en los sistemas de información EAM Máximo y JD Edwards, y a partir de los registros, reportes y entrevistas realizadas al equipo de mantenimiento predictivo, se identificaron 83 activos, de los cuales 26 presentaron falla.

De acuerdo con la norma de diseño de sistemas de acueducto de EPM (2013), un sistema de bombeo para la red primaria debe estar configurado para que sus equipos operen un máximo de 18 horas al día; sin embargo, cada bombeo consultado presenta factores de operación diferentes dentro de este rango. Para establecer el factor operacional de cada bombeo se tuvo en cuenta el promedio de utilización real de los bombeos en los últimos 3 años, presentado por la Unidad Mantenimiento Equipos Provisión Aguas - UMEPA.

Las fechas de instalación y falla o traslado, en algunos casos no es exacta en cuanto a hora, día o mes, por lo cual se establecieron las siguientes reglas para definir el tiempo operativo:

- Cuando se conoce el día, el mes y el año, pero no la hora, se asume inicio o fin de operación a las 12:00 del mediodía.

- Cuando se conoce mes y año, pero no el día, se asume el día 15 del mes.
- Cuando se conoce solo el año, se asume el mes 6 y el día 15 de dicho mes.

Con las reglas anteriores se establece el tiempo calendario[2] de instalación del equipo, este es afectado por el factor operacional del bombeo donde haya operado para establecer el tiempo operativo[3].

2.2 Identificación de modos de falla y generación de distribuciones de probabilidad

Una vez identificados los activos y estimados sus tiempos de operación, se identificaron los activos fallados y se determinó la causa de falla, principalmente se presentan las siguientes:

- Daño del aislamiento del devanado del motor.
- Desgaste del buje guía de la bomba.
- Daño del cojinete axial del motor.

El principal modo de falla corresponde al daño en el aislamiento térmico del devanado del motor, este se debe principalmente a los picos de tensión producidos por los variadores de frecuencia. Estos picos tienden a ser superiores al máximo que es capaz de soportar el aislamiento de los motores de las motobombas tipo lapicero, dicho aislamiento está en el orden de los 500 V. a estos modos de falla se les asignaron los datos de tiempo en que ocurrieron y se generaron las distribuciones de probabilidad de falla, por marca y potencia de los bombeos.

2.3 Creación del diagrama RBD[4] y proyección de confiabilidad

Para cada agrupador (Fabricante y Potencia) se generó el Diagrama de Bloques de Confiabilidad (RBD) que corresponde a un modelo gráfico que permite evaluar la confiabilidad de un activo o sistema, identificando los modos de falla que afectan al motor y a la bomba respectivamente, esto para proyectar la confiabilidad del activo de acuerdo con la información registrada. En la figura 1 se presenta un ejemplo del diagrama para el agrupador Fabricante 1 de entre 50 y 100 HP.

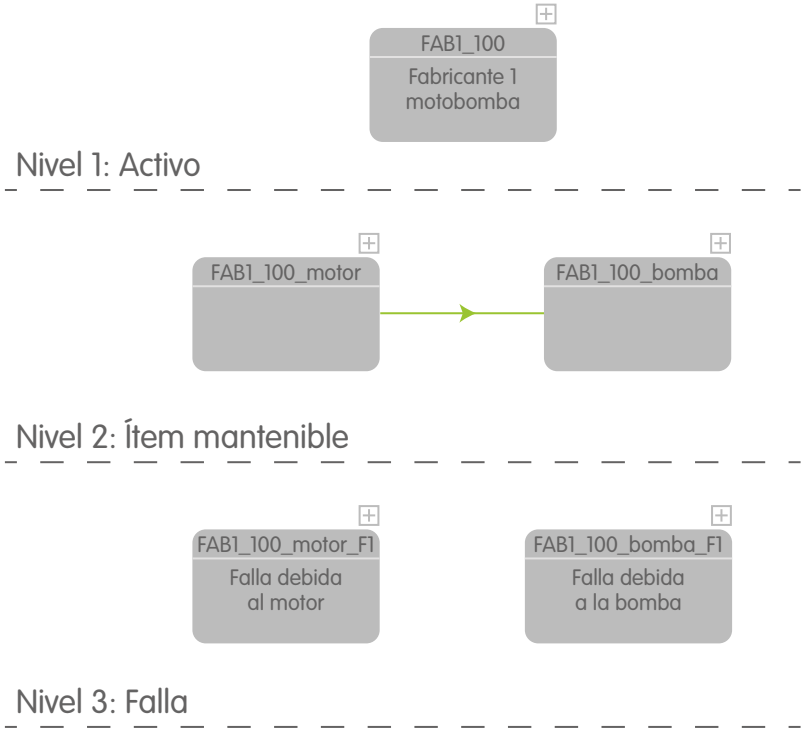
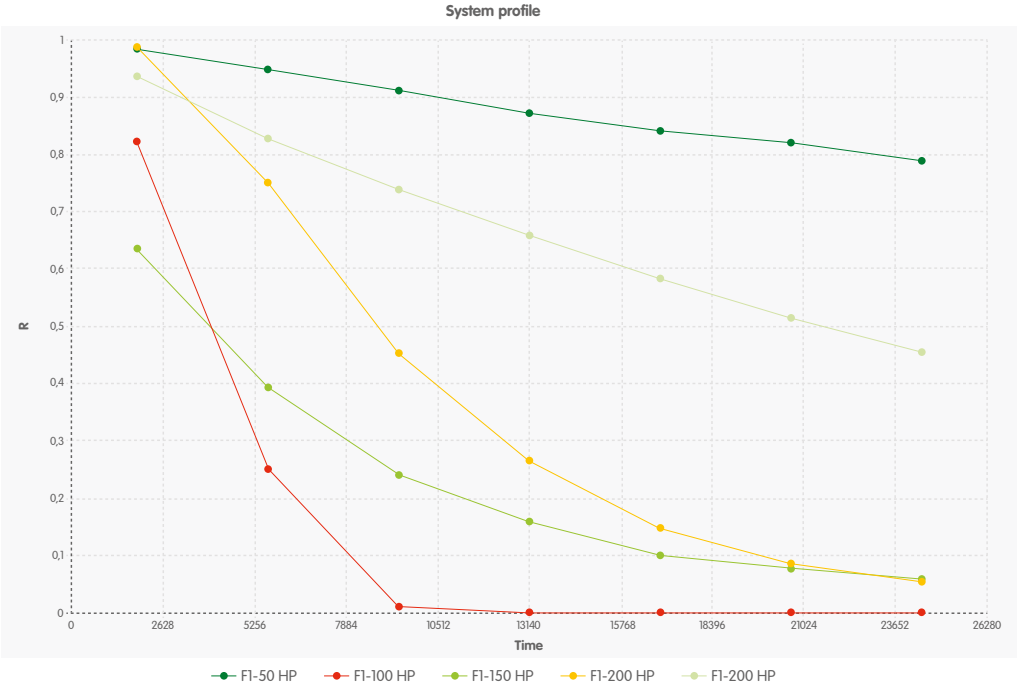


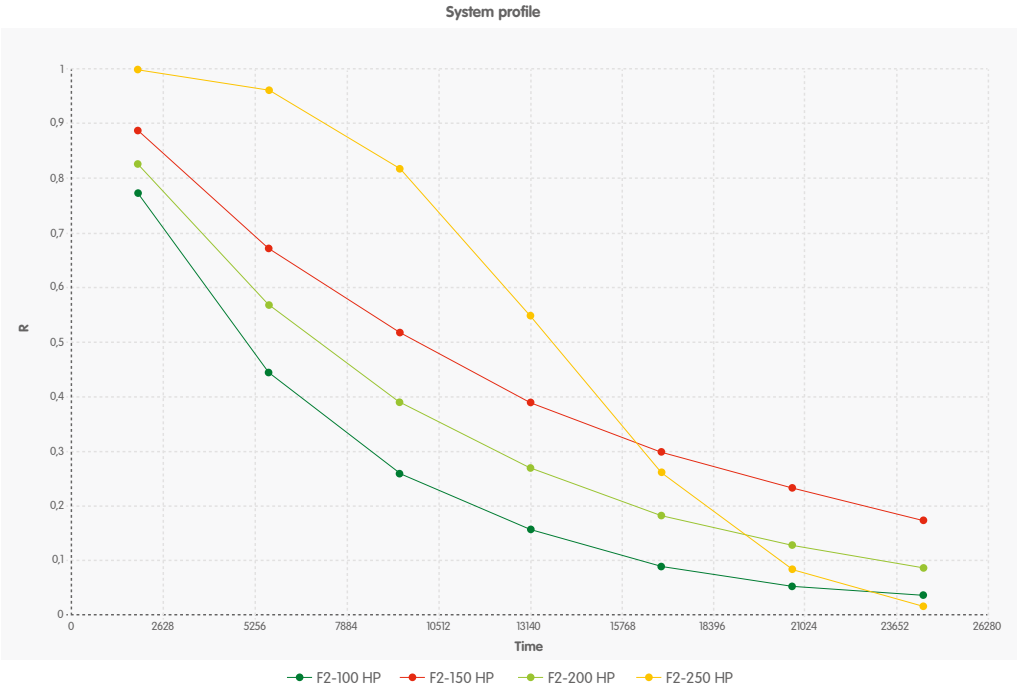
Figura 1. RBD para el activo Fabricante 1 - Rango 50 a 100 HP.

Escenario 1 - Configuración sin filtro activo. Para los análisis realizados se proyectó un tiempo operativo de las motobombas de 26.280 horas, lo que equivale a 3 años de operación continua (24 horas/ 7 días). En la figura 2 se presentan las gráficas de comportamiento de la confiabilidad para cada fabricante, discriminadas por rango de potencia y en configuración sin filtro activo o escenario 1.

a) Fabricante 1



b) Fabricante 2



c) Fabricante 3

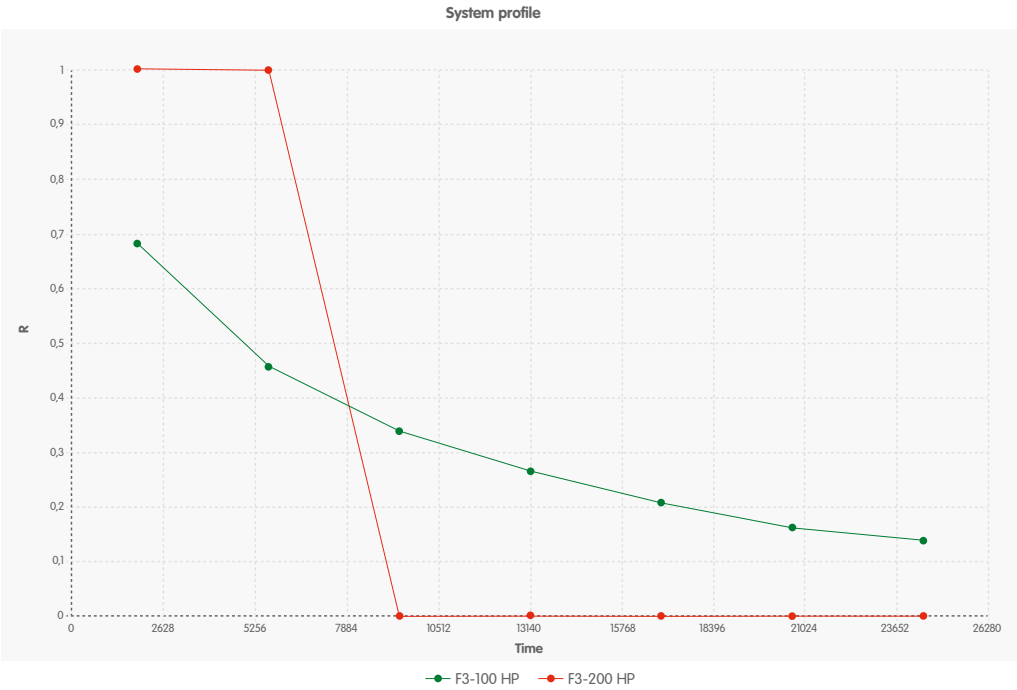


Figura 2. Proyección de confiabilidad de las motobombas sumergibles - Escenario 1: Sin filtro. Generado en el módulo AVSim de Isograph 4.0.

De acuerdo con la proyección realizada, se identifica que la confiabilidad de los activos cae al 50% alrededor del primer año operativo (8.760 horas), siendo los de mejor comportamiento las motobombas del fabricante 1 menores a 50 HP y superiores a 200 HP, y las motobombas del fabricante 4 de entre 50 y 100 HP (estas no presentaron fallas durante el tiempo evaluado). En la tabla 3 se presentan los resultados de la proyección para cada agrupador.

Marca	Rango	Confiabilidad al 50% (horas)	Confiabilidad al 50% (años)	Confiabilidad al 10% (horas)	Confiabilidad al 10% (años)
Fabricante 1	<50 HP	-*	-*	-*	-*
Fabricante 1	50–100 HP	3.952	0,5	8.146	0,93
Fabricante 1	100–150 HP	3.952	0,5	16.819	1,92
Fabricante 1	150–200 HP	9.108	1,0	20.235	2,31
Fabricante 1	>200 HP	-*	-*	-*	-*
Fabricante 2	50–100 HP	4.810	0,5	15.980	1,82
Fabricante 2	100–150 HP	9.723	1,1	32.300	3,69
Fabricante 2	150–200 HP	6.886	0,8	23.652	2,70
Fabricante 2	>200 HP	13.690	1,6	20.060	2,29
Fabricante 3	50–100 HP	4.542	0,5	36.900	4,21
Fabricante 3	150–200 HP	6.901	0,8	7.389	0,84
Fabricante 4	50-100 HP	-*	-*	-*	-*

* No se identificaron activos fallados

Tabla 3. Proyección de confiabilidad al 50% y 10% para equipos sumergibles – Escenario 1.

Escenario 2 - configuración con filtro activo. Para proyectar este escenario, se utilizó la curva de confiabilidad del fabricante con el mejor desempeño en cada rango de potencia y se evaluó el comportamiento con la nueva configuración de acuerdo con lo consignado en el Informe de Condición Bombas Sumergibles (junio 2022) del equipo de Mantenimiento Predictivo de la UMEPA. Esta consideración se adopta debido a que el filtro activo se instala con el propósito de mejorar la calidad del voltaje enviado por el variador de frecuencia al motor, mitigando la aparición de picos de voltaje que puedan afectar el aislamiento térmico del devanado, siendo estos los eventos que han provocado cerca del 80% de las fallas de los motores sumergibles. En la tabla 4 y figura 3 se presentan los resultados de confiabilidad para cada agrupador, proyectado a 10 años operativos, es decir 87.600 horas.

Rango	Confiabilidad al 50% (h)	Confiabilidad al 50% (años)	Confiabilidad al 10% (h)	Confiabilidad al 10% (años)
<50 HP	73.930	8,4	245.600	28,0
50 – 100 HP	23.490	2.7	69.960	8,0
100 – 150 HP	29.350	3,4	43.590	5,0
150 – 200 HP	26.250	3,0	60.520	6,9
>200 HP	44.080	5,0	146.400	16,7

Tabla 4. Proyección de confiabilidad al 50% y 10% para equipos sumergibles – Escenario 2.

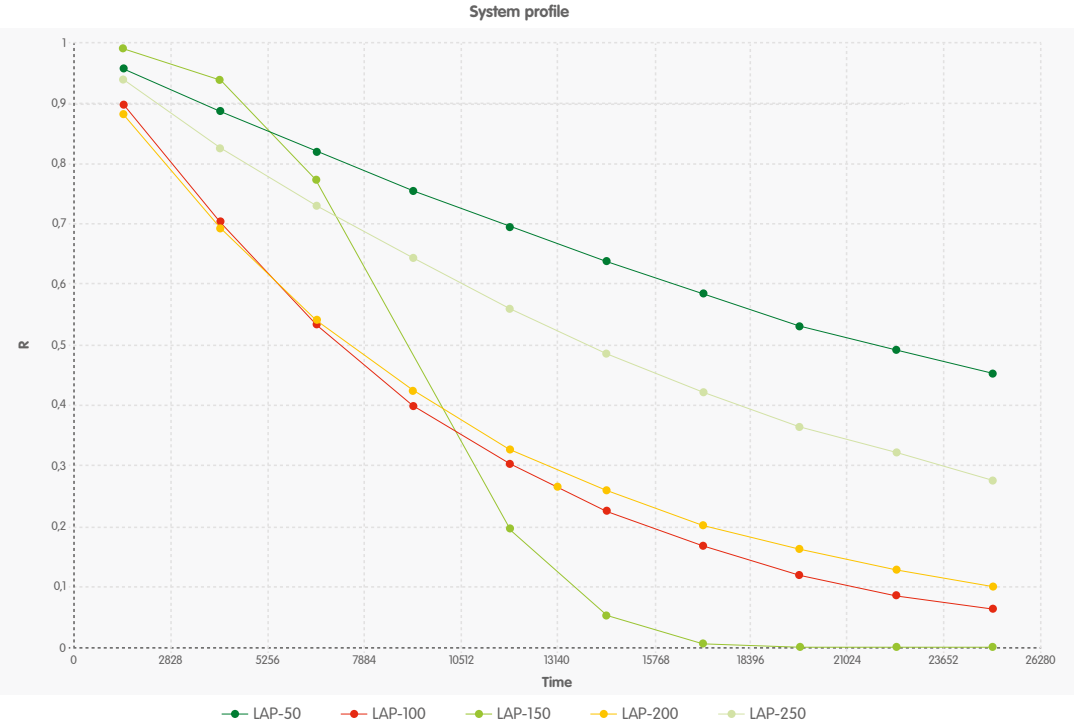


Figura 3. Proyección de confiabilidad media de las motobombas sumergibles – Escenario 2: Con filtro.

3. Desempeño de motobombas superficiales

Para establecer un punto de comparación que permita evaluar el desempeño de las motobombas tipo lapicero, se evaluó el desempeño de las motobombas superficiales, tomando una muestra de los sistemas de bombeo que utilizan esta tecnología y conservando los rangos de potencia identificados en el numeral 2. En la tabla 5 y la figura 4 se presentan las proyecciones de desempeño obtenidas para las motobombas superficiales, por un tiempo operativo de 219.000 horas, lo que equivale a 25 años de operación continua (24 horas/7 días).

Rango	Confiabilidad al 50% (h)	Confiabilidad al 50% (años)	Confiabilidad al 10% (h)	Confiabilidad al 10% (años)
<50 HP	95.630	10,92	317.700	36,27
50 – 100 HP	118.400	13,52	393.300	44,90
100 – 150 HP	148.000	16,89	491.600	56,12
150 – 200 HP	127.500	14,55	423.600	48,36
>200 HP	49.090	5,60	163.100	18,62

Tabla 5. Proyección de confiabilidad al 50% y 10% para motobombas superficiales.

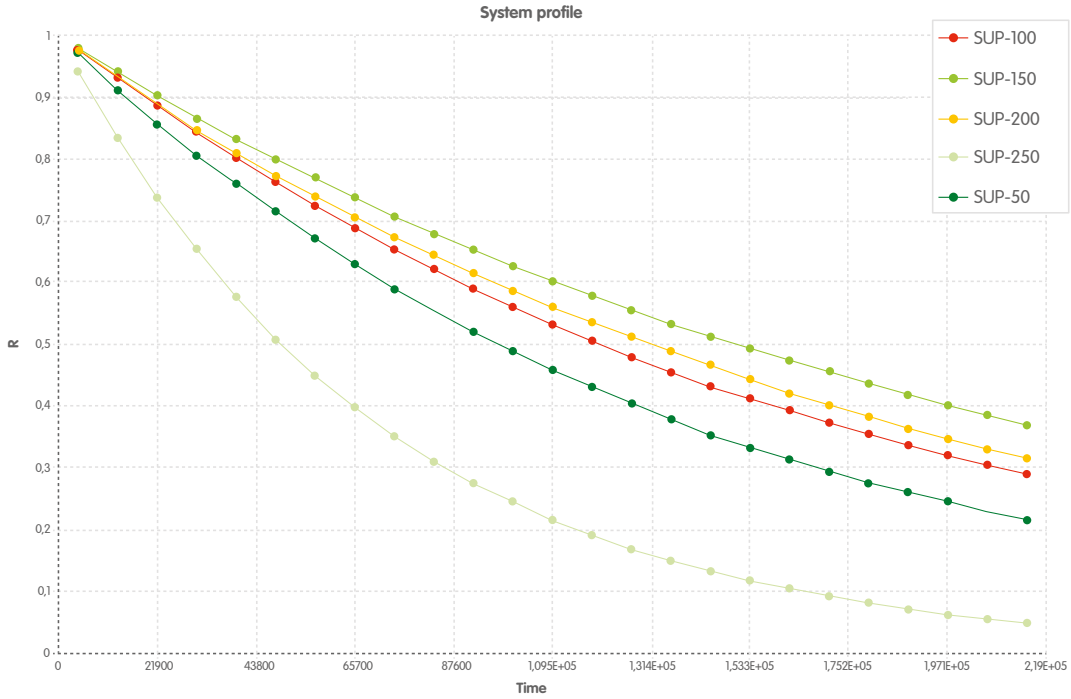


Figura 4. Proyección de confiabilidad media de las motobombas superficiales.

4. Consideraciones para la estimación del costo del ciclo de vida - LCC[5]

Con el fin de identificar el impacto del uso de las dos tecnologías en la infraestructura de EPM, se llevó el análisis a un nivel superior al del activo *Motobomba*, por lo tanto, se establece la frontera de estudio en el nivel *Estación de bombeo* para la estimación del costo del ciclo de vida.

Para la estimación del costo del ciclo de vida de una estación de bombeo, se valoraron dos alternativas de solución, una con la tecnología sumergible (motobombas sumergibles de turbina vertical o tipo lapicero) y otra con bombas superficiales horizontales. Para valorar las dos alternativas de forma equitativa, se identificaron los aspectos técnicos comunes y diferenciadores entre ambas, presentados en la tabla 6. A estos elementos diferenciadores se suman las particularidades de la operación de la motobomba: filtro activo y variador de frecuencia, cuando aplican.

Aspectos técnicos diferenciadores	Aspectos técnicos comunes
Transformador de servicios auxiliares	Sistema de control
Obra civil (Caseta de equipos de bombeo y caseta de equipos eléctricos)	Sistema de telecomunicaciones
Sistema de insonorización	
Sistema de izaje	Equipos de instrumentación
Sistema de ventilación	
Sistema de refrigeración	Tuberías y válvulas
Sistema de detección y alarma	Subestación eléctrica a 13.200 V
Sistema contra incendio	Nivel de tensión (480 V para bombas superiores a 50 HP y 220 V para bombas menores a 50 HP)
Sistema de apantallamiento y puesta a tierra	
Sistema de protección contra transitorios hidráulicos	El terreno se considera el mejor para la construcción de la infraestructura
Consumo energético	
Planes de mantenimiento	El tanque de succión es de tipo superficial

Tabla 6. Aspectos técnicos comunes y diferenciadores entre estaciones de bombeo con motobombas superficiales y lapicero.

El tiempo de proyección del costo del ciclo de vida se establece en 25 años calendario, considerando que los equipos de bombeo operan un máximo de 18 horas por día, esto equivale a 164.250 horas de operación.

4.1 Estructura de costos

Con base en lo indicado en la norma ISO 15663 (ISO, 2021), se estableció una estructura de costos genérica para ambas tecnologías y para cada rango de potencia, la cual se presenta en la tabla 7.

Costo	Descripción
CAPEX-SUM	1.0 - Costo de los equipos diferenciadores
CAPEX-SUM-EQ	1.1- Suministro de equipos
CAPEX-SUM-TRN	1.2-Transporte al almacén
CAPEX-SUM-PF	1.3 - Pruebas en fábrica
CAPEX-SUM-PO	1.4-Pruebas operativas
CAPEX-SUM-INS	1.5-Instalación de equipos
CAPEX-SUM-RP	1.6-Repuestos
CAPEX-OC	2.0-Costo de la instalación
CAPEX-OC-CEQ	2.1- OC Bombas y EQ Eléctricos
CAPEX-OC-CV	2.2-Caseta Vigilancia
CAPEX-OC-IN	2.3-Insonorización
CAPEX-SA	3.0-Costo de sistemas auxiliares
CAPEX-SA-IZ	3.1-sistema de izaje
CAPEX-SA-VN	3.2-Sistema de ventilación
CAPEX-SA-RF	3.3-Sistema de refrigeración
CAPEX-SA-DA	3.4-Sistema de detección y alarma
CAPEX-SA-SCI	3.5-Sistema contra incendio
CAPEX-SA-PT	3.6-Sistema puesta a tierra y apantallamiento
CAPEX-SA-TH	3.7-Sistema control de transitorios
OPEX-CON	4.0-Costo del consumo de energía
OPEX-MTTO	5.0-Costo de mantenimientos
OPEX-MTTO-COR	5.1-Costo de mantenimiento correctivos
OPEX-MTTO-COR-LB	5.1.1-Costo del personal en mantenimiento correctivo
OPEX-MTTO-COR-EQ	5.1.2-Costo de equipos en mantenimiento correctivo
OPEX-MTTO-COR-RP	5.1.3-Costo de los repuestos para el mantenimiento correctivo
OPEX-MTTO-PRO	5.2-Costo de mantenimiento programado
OPEX-MTTO-PRO-LB	5.2.1-Costo del personal en mantenimiento programado
OPEX-MTTO-PRO-EQ	5.2.2-Costo de equipos en mantenimiento programado
OPEX-MTTO-PRO-RP	5.2.3-Costo de los repuestos para el mantenimiento programado
OPEX-MTTO-INS	5.3-Costo de inspecciones de mantenimiento
OPEX-MTTO-INS-LB	5.3.1- Costos del personal
OPEX-MTTO-INS-EQ	5.3.2- Costos Equipos
OPEX-MTTO-INS-RP	5.3.3- Costos de repuestos

Tabla 7. Estructura de costos.

En el CapEx se consideró el costo del suministro, pruebas, transporte y montaje de los equipos y sistemas principales y auxiliares, así como los materiales, construcción y puesta en servicio de la instalación u obra civil. En el OpEx se consideraron los costos asociados a recursos de personal, equipos, herramientas y repuestos de las diferentes tareas de mantenimiento, igualmente se incluyó el costo de la energía necesaria para la operación.

5. Resultados

Al comparar el costo de ciclo de vida entre las dos tecnologías se presenta una diferencia considerable; el LCC para los equipos tipo lapicero, en ambos escenarios, tiende a ser superior que el de los equipos superficiales en alrededor del 25%. Para los equipos en el rango de menos de 50 HP, se presenta una diferencia de más del 70% en ambos escenarios, aunque los equipos de este rango, en las proyecciones presentaron un mejor desempeño. Los resultados del análisis se pueden observar en la siguiente tabla:

Rango	Superficiales	Lapiceros Escenario 1	Δ% Sup Vs Lap 1	Lapiceros Escenario 2	Δ% Sup Vs Lap 2
< 50 HP	$ 1.683.920.815	$ 2.895.207.180	72%	$ 2.857.738.291	70%
< 100 HP	$ 6.072.191.583	$ 7.965.525.179	31%	$ 7.416.846.185	22%
< 150 HP	$ 11.211.686.166	$ 14.604.066.171	30%	$ 14.132.063.971	26%
< 200 HP	$ 12.800.612.810	$ 16.504.985.257	29%	$ 15.448.835.922	21%
> 200 HP	$ 19.855.621.916	$ 23.242.307.268	17%	$ 23.459.528.048	18%

Tabla 8. Costo del Ciclo de Vida de estaciones de bombeo con motobombas superficiales vs lapicero.

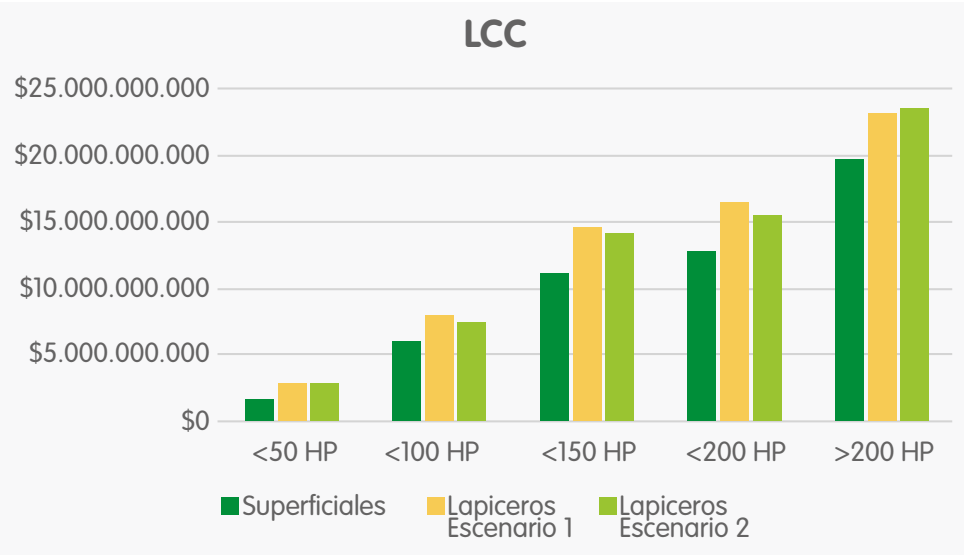


Figura 5. Costo del Ciclo de Vida de estaciones de bombeo con motobombas superficiales vs lapicero.

5.1 Contribución al costo

Al evaluar los aspectos que más influyen en el costo del ciclo de vida de los equipos, se establece que en todos los agrupadores tanto para los equipos sumergibles como para los superficiales, el factor que genera mayor contribución es el consumo energético (OPEX-CON), el cual representa alrededor del 80% del costo total. En las figuras 6 y 7, se presenta como ejemplo, la contribución al costo de cada factor evaluado para el rango de motobombas de 50 – 100 HP.

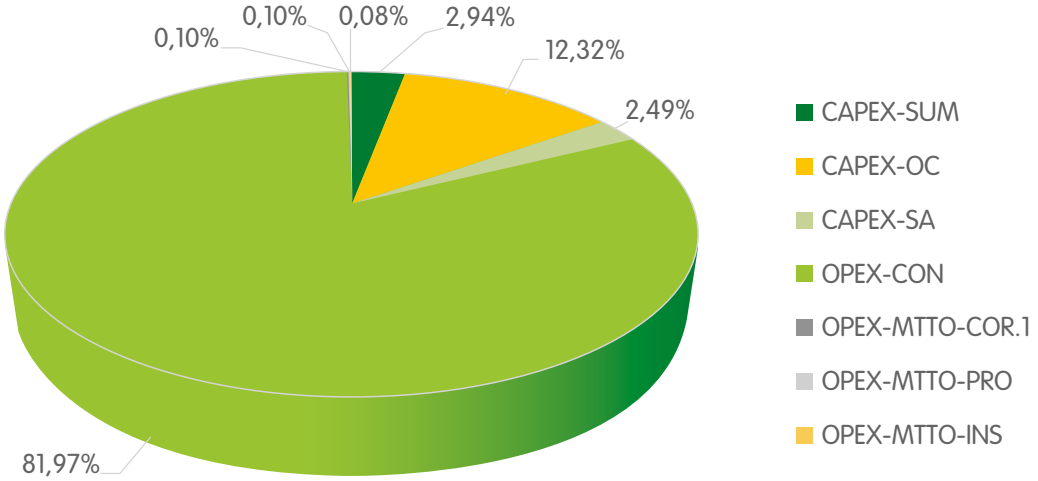


Figura 6. Contribución al costo – Motobombas lapicero 50-100HP.

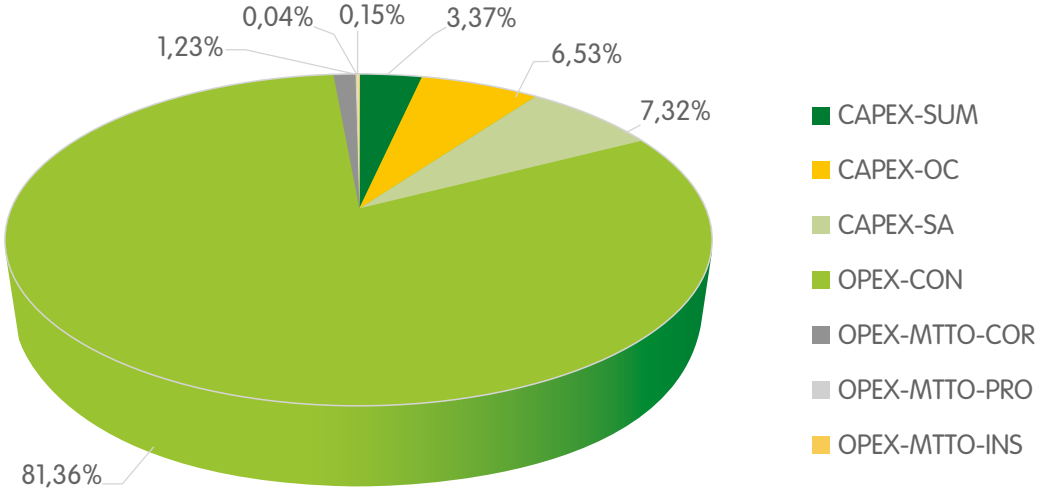


Figura 7. Contribución al costo – Motobombas Superficiales 50-100HP.

Al evaluar los costos de operación (OpEx) donde se encuentran los costos del consumo de energía, así como los de mantenimiento correctivo, programado e inspecciones, se evidenció que este costo tiende a ser superior en los equipos sumergibles en comparación con los equipos superficiales. Para el escenario 1 esta diferencia ronda el 30% en promedio para los rangos superiores a 50 HP, mientras que en el escenario 2 esta diferencia ronda el 25% en promedio para los rangos superiores a 50HP; en ambos escenarios, para el rango menor a 50HP esta diferencia está en el orden del 50%, como se presenta en la tabla 9 y figura 8.

Rango	Superficiales	Lapiceros Escenario 1	Δ% Sup Vs Lap 1	Lapiceros Escenario 2	Δ% Sup Vs Lap 2
< 50 HP	$ 1.228.118.127	$ 1.904.889.586	55,1%	$ 1.840.155.136	49,8%
< 100 HP	$ 5.035.390.885	$ 6.771.069.976	34,5%	$ 6.207.085.525	23,3%
< 150 HP	$ 10.106.486.096	$ 13.229.101.097	30,9%	$ 12.730.266.925	26,0%
< 200 HP	$ 10.850.261.690	$ 14.992.551.483	38,2%	$ 13.886.680.800	28,0%
> 200 HP	$ 17.638.936.003	$ 21.634.457.646	22,7%	$ 21.813.043.505	23,7%

Tabla 9. OpEx de estaciones de bombeo con motobombas superficiales vs lapicero.

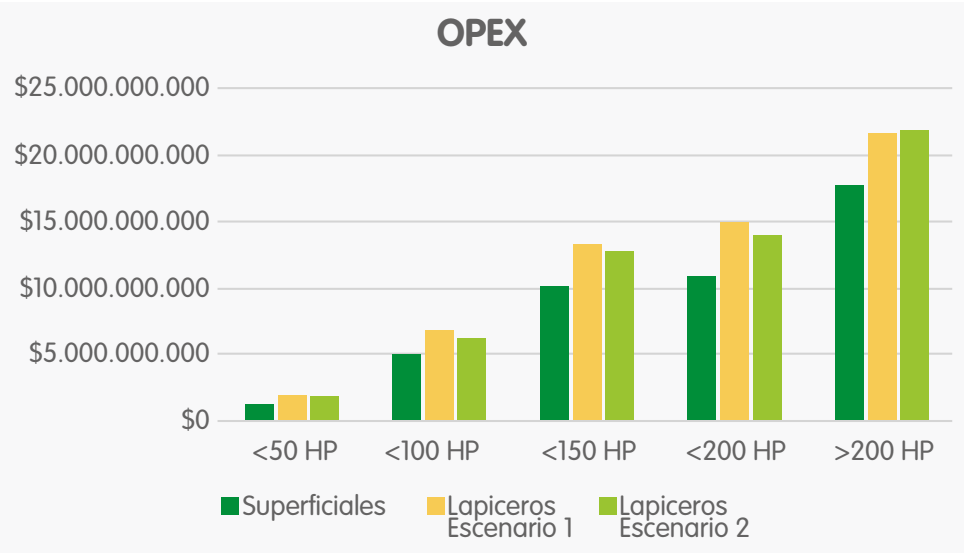


Figura 8. OpEx de estaciones de bombeo con motobombas superficiales vs lapicero.

Al indagar sobre estas diferencias en el costo de operación entre las dos tecnologías, se evidencia que el costo del consumo de energético (OPEX-CON), en los dos escenarios, es el rubro dominante, como se muestra en la tabla 10 y la figura 9.

Rango	Superficiales	Lapiceros	Δ% Sup Vs Lap 1
< 50 HP	$ 1.182.600.000	$ 1.747.784.250	47,79%
< 100 HP	$ 4.949.509.500	$ 5.640.837.750	13,97%
< 150 HP	$ 10.041.916.500	$ 12.036.240.000	19,86%
< 200 HP	$ 10.809.621.000	$ 12.956.040.000	19,86%
> 200 HP	$ 17.516.441.250	$ 21.393.616.500	22,13%

Tabla 10. Costo del consumo de energía de motobombas superficiales vs lapicero.

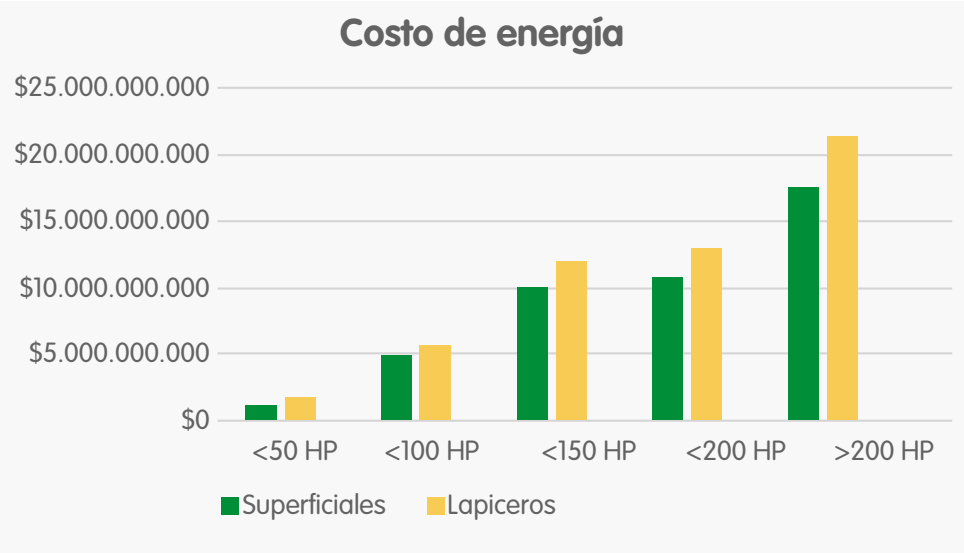


Figura 9. OpEx de estaciones de bombeo con motobombas superficiales vs lapicero.

El costo de la energía en los equipos tipo lapicero es superior a los equipos superficiales en un 18% en promedio para equipos mayores a 50 HP, esto se debe principalmente a la baja eficiencia que presentan los motores de tecnología sumergible, la cual está por debajo del 86%. Los motores superficiales pueden alcanzar hasta el 96% de eficiencia.

Desde el punto de vista del mantenimiento, el costo que presentan las motobombas sumergibles puede ser hasta 10 veces más al que presentan las motobombas superficiales. Esta diferencia se debe principalmente al mantenimiento correctivo, el cual está ligado al tiempo de vida útil de los equipos sumergibles y la necesidad de reponerlos. En la tabla 11 y figura 10 se presentan la comparación del costo de mantenimiento entre los equipos superficiales y los equipos tipo lapicero en el escenario 2, el cual corresponde a la configuración actual de las estaciones de bombeo.

Rango	Superficiales	Lapiceros Escenario 2
< 50 HP	$ 45.518.127	$ 92.370.886
< 100 HP	$ 85.881.385	$ 566.247.775
< 150 HP	$ 64.569.596	$ 694.026.925
< 200 HP	$ 40.640.690	$ 930.640.800
> 200 HP	$ 122.494.753	$ 419.427.005

Tabla 11. Costo del consumo de mantenimiento de motobombas superficiales vs lapicero.

Figura 10. Costo del consumo de mantenimiento de motobombas superficiales vs lapicero.

Conclusiones

- Aún con la proyección mejorada considerando el uso del filtro activo en bombas tipo lapicero, la vida útil del activo no supera los 5 años operativos (43.800 horas), muy por debajo de la promesa de valor de 10 años de vida útil, que ofrecen los proveedores.

- La baja eficiencia que ofrecen los motores de tecnología sumergible de las motobombas tipo lapicero encarece el costo del ciclo de vida de estos sistemas en un 19% en promedio para los equipos con potencia superior a 50 HP y en un 47% para los equipos de menos de 50 HP de potencia, afectando el retorno de la inversión de los proyectos, lo que genera la pérdida de valor.

- Las bombas tipo superficial ofrecen un menor costo de ciclo de vida en comparación con las bombas sumergibles; no obstante, esta afirmación solo es válida si se mantienen la configuración y condiciones actuales de operación.

- Con el fin de optimizar el costo del ciclo de vida de los sistemas de bombeo con bombas tipo lapicero y garantizar la máxima utilización de estos activos, se sugiere instalar bombas con mayor eficiencia que los equipos actuales, esto corresponderá con un cambio de especificaciones y en los casos que sea posible el uso de otra tecnología.

Notas al final

[1] Un filtro activo es un circuito selectivo en frecuencia que se emplea para eliminar cierto intervalo de frecuencia, en general es un filtro electrónico analógico distinguido por el uso de uno o más componentes activos, que proporcionan una cierta forma de amplificación de energía. Miyara, F. (2004). Filtros Activos. Universidad del Rosario. https://acortar.link/Qt2QXp

[2] El tiempo calendario corresponde al tiempo que el activo lleva instalado en el sistema.

[3] El tiempo operativo corresponde al tiempo real que está en operación el activo. Es igual al tiempo calendario de instalación afectado por el factor operacional.

[4] Reliability Block Diagram

[5] Life Cycle Cost

Agradecimientos

A la unidad de Mantenimiento Equipos Provisión Aguas – UMEPA y a su equipo por permitirnos desarrollar este análisis y darnos su apoyo para lograrlo.

Referencias

- Empresas Públicas de Medellín E. S. P. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E. S. P.* https://rb.gy/nwnlsh
- International Organization for Standardization. (2021). Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Life cycle costing (ISO 15663).

Cómo citar este artículo:

Ruiz, D., Tamayo, L. y Sánchez, C. (2023). Análisis de desempeño y costo de ciclo de vida de bombas sumergibles de turbina vertical. *Revista EPM,* (21), 126-143.

Riego por goteo, estrategia en el cuidado del agua

Drip irrigation, water care strategy

Heider Jader Isaza Ochoa
Unidad CET normalización y laboratorios, EPM
heider.isaza@epm.com.co

Resumen

Este artículo aborda el concepto de riego por goteo como una solución para la conservación del agua frente a la posibilidad de escasez, considerando que la agricultura es la principal consumidora del recurso hídrico y que las zonas áridas en Colombia y el mundo podrían aprovecharse como zonas cultivables. El objetivo de este artículo es dar a conocer la tecnología de riego por goteo con una visión global, orientado a su aplicación en Colombia.

Se presentarán datos y conceptos generales sobre el agua. Posteriormente, se describirán algunos tipos de riego hasta llegar al riego por goteo, incluyendo su evolución tecnológica. Finalmente, se hará un análisis de las ventajas y desventajas de este sistema de irrigación.

Palabras clave:
Gestión del agua, Uso eficiente del agua, Medición del agua, Protección del agua, Riego por goteo, Eficiencia en el uso del agua.

Keywords:
Water management, Efficient water use, Water metering, Water protection, Drip irrigation, Water use efficiency.

Introducción

El riego por goteo es una solución antigua pero poco usada que se plantea como una solución ante la creciente demanda de agua en los cultivos en pequeña, mediana y gran escala. Es una solución prometedora que tiene grandes ventajas, pero que también supone retos importantes frente a lo que se considera como desventajas significativas.

El ciclo del agua, llamado ciclo hidrológico, consiste en el cambio del estado físico del agua al ser evaporado desde el mar y los acuíferos (figura 1) a la tierra, donde las fuentes de agua se consideran una caldera de destilación y la tierra como el condensador. La cantidad de agua que se evapora y caen en forma de lluvia sobre las masas continentales constituye el agua disponible para todos los usos y para la conservación de la vida misma. El agua, aunque se considera un recurso renovable, también es un recurso limitado. (Miracle, 2006)

Las lluvias juegan un papel muy importante en la disponibilidad de agua en el mundo, es un ciclo que debería ser interminable, no modificado y estudiado a fondo. Se estima que cada año caen unos 113.000 km^3 de lluvia sobre la tierra, de esta porción unos 42.000 km^3 se encargan de recargar los acuíferos y ríos. Se puede continuar revisando datos y se estima que entre 9.000 km^3 a 14.000 km^3 es el verdadero volumen de agua disponible, aunque es importante destacar que este término no significa que sea almacenable o fácilmente accesible, ya que el 70% del agua es necesario para sostener los ecosistemas terrestres, que dependen en gran medida de ella. En promedio, si el agua pudiera distribuirse de manera equitativa, a cada persona le corresponderían unos 700m^3 de agua al año. Sin embargo, esta distribución solo sería posible si se tuviera acceso a todas las fuentes de agua y si se pudiera distribuir de manera equitativa. (Toledo, 2002)

Figura 1. Distribución del agua lluvia.

El recurso del agua está determinado por disponibilidad, pero también por la variabilidad a lo largo del año, incluyendo periodos de sequía. En términos de consumo, el riego es el mayor consumidor de agua, con aproximadamente el 70%, seguido por la industria, que utiliza alrededor del 23% del suministro total. Por último, el consumo doméstico se estima en alrededor de 56m^3 por persona y año. (Toledo, 2002, p.11).

Aunque el agua es un elemento presente en la mayor parte del planeta, no todas las personas tienen acceso a cantidades *ilimitadas* de este recurso vital. Mientras algunas personas disfrutan de un suministro abundante de agua, otras pueden sufrir sequías durante la mayor parte del año. Se estima que más de 2.800 millones de personas en todo el mundo sufren escasez de agua potable durante al menos un mes al año. Además, se prevé que el problema de la falta de suministro de agua potable segura empeore en un futuro cercano debido al cambio climático, la deforestación, el crecimiento de la población y el aumento de la demanda (Forde et al., 2019, p.34).

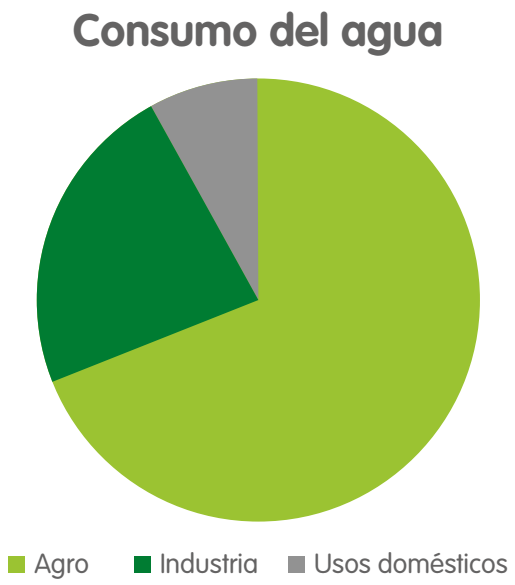


Figura 2. Proporción del consumo de agua.

Es fundamental tomar medidas que promuevan el uso eficiente del agua, ya que la población mundial aumenta cada año y con ella la demanda creciente de este recurso vital. Adoptar prácticas sostenibles de uso del agua puede traer beneficios a todos los actores involucrados: desde las empresas y los usuarios hasta el medio ambiente:

- **Para las empresas prestadoras del servicio de agua potable y alcantarillado:**
  - Ahorros en el desarrollo y construcción de nueva y constante infraestructura.
  - Disminución en pérdidas técnica y no técnicas.
  - Disminución de costos operativos.
  - Disminución del riesgo de sequías.

- **Para los usuarios:**
  - Ahorro de dinero por la disminución en el consumo de acueducto y alcantarillado
  - Reducción del riesgo de padecer cortes de agua por falta de oferta.

- **Para el ambiente:**
  - Disminución de la presión en la demanda del recurso, es decir baja el consumo de agua para usos humanos y puede ser aprovechada en otros usos.

- Disminución en las descargas generadas a las fuentes hídricas receptoras, por lo tanto, una disminución en la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales. (Silva et al., 2012, como se citó en Romero y Pulido, 2021).

La disponibilidad de agua potable se estima en promedio, pero esto conlleva a analizar otra gran problemática en el tema de la distribución del agua, que tiene que ver con la concentración de la población en grandes ciudades. Por ejemplo, en más del 80% de América Latina, la población se encuentra concentrada en grandes ciudades. Esta situación hace que la provisión de agua sea insuficiente, debido a la alta demanda y la falta de oferta. "Más aun, el 70% de las aguas residuales no tienen tratamiento, lo cual dificulta alcanzar el ciclo del agua, particularmente por el reúso del agua debido a su contaminación" (Larios et al., 2015, p.10). La ONU estima que el día cero para la Ciudad de México, para quedarse sin el adecuado suministro de agua, podría llegar en el 2028 (Ramos, 2023).

Manejar adecuadamente el agua no tiene una única estrategia o fórmula que permita solucionar el problema de desabastecimiento con una sola acción. Como especie que hace parte de un ecosistema y principal contaminador, se requieren acciones individuales, en los hogares, en la sociedad, acciones jurídicas y gubernamentales para reducir disminuir y controlar el consumo de agua. (Isaza, 2022).

Debemos estar de acuerdo en que el agua para ser consumida por los seres humanos debe tener características físico químicas especiales, las cuales no se encuentran en el agua salada, que es el principal tipo de agua disponible en el planeta. Además, es importante dejar claro que el agua no es un recurso infinito.

El Instituto Internacional de Manejo del Agua, con sede en los Países Bajos, sostiene que el actual conflicto por la disponibilidad hídrica es básicamente un problema económico, porque las necesidades son infinitas y los recursos resultan escasos. Aunque parecía hasta hace poco que el agua era un recurso infinito debido a que estamos completamente rodeados de ella, la situación ha cambiado de forma radical y se exige un consumo más eficiente y racional (Segrelles, 2007, como se citó en Olarte, 2021, p.27). Por ello, es previsible que haya un aumento espectacular en el precio del agua y que se produzcan luchas cada vez más enconadas por el control de las fuentes hídricas. Esto sin duda tendrá importantes repercusiones geopolíticas, económicas, sociales, culturales y ambientales.

Imagen 1. Embalse Guatapé.

1. El agua necesaria para la agricultura

La principal actividad humana que consume más agua es la agricultura. Por lo tanto, es importante prestar mucha atención al desperdicio y encontrar estrategias y tecnologías adecuadas para el ahorro de agua en este sector.

> Al fin del siglo XVII, las áreas irrigadas en el mundo solamente representaban el 2% de la extensión presente y básicamente se concentraban en parte del continente asiático; en el delta del río Nilo, en África, y en pequeñas porciones del continente americano. Durante el siglo XVIII estas áreas crecieron a tasas del 2% anual. Pero fue hasta mediados del siglo XX, con la revolución tecnológica conocida como *revolución verde*, que las áreas irrigadas se incrementaron exponencialmente. En el último medio siglo, la tasa media anual de crecimiento de las superficies irrigadas aumentó dos a tres veces. Para fines del siglo ya existían 2.5 millones de km^2 de este tipo de área en el mundo. (Toledo, 2002, p.14).

La agricultura es una actividad que consume una gran cantidad de recursos hídricos, en especial por el método de irrigación en el que no solo se riega la planta o sus raíces, sino que también se riega constantemente el terreno; lo que deja como evidencia que este tipo de agricultura tiene límites ecológicos, y uno de ellos es el uso desmedido del agua. Con una población mundial en constante crecimiento, es necesario replantear otros métodos para la producción agrícola con el fin de satisfacer las necesidades alimentarias sin agotar los recursos hídricos disponibles. (Toledo, 2002, p.15). Es evidente que la producción de alimentos requiere de una gran cantidad de agua, y que la agricultura irrigada se ha convertido en un dilema. ¿Existe entonces alguna otra manera de llevar agua a las plantas sin consumir una cantidad excesiva de agua? En realidad, sí existen otros métodos de riego que, sin duda, pueden ayudar a disminuir el consumo de agua, y por lo tanto, las consecuencias que genera la escasez de este recurso.

El recurso del agua es cada vez más apreciado, tanto para uso doméstico, industrial como agrícola. La escasez de agua, sobre todo en las zonas áridas y semiáridas, la convierte en un problema de vital importancia para el desarrollo de las poblaciones que enfrentan la problemática del agua para la vida. Si no hay agua, no hay agricultura, y si no hay agricultura, no hay comida. Si no hay agua ni comida, no hay vida.

Existen otros métodos de riego que generan un menor consumo de agua y que podrían implementarse sin incurrir en altos costos Métodos que son de mayor eficiencia teniendo en cuenta la cantidad de agua vs la productividad lograda en el cultivo.

2. Algunos tipos de riego superficiales

2.1 Riego por aspersión

El principio de operación de los sistemas de riego por aspersión se basa en la conversión de la energía de velocidad a la salida de la boquilla del aspersor en forma de chorro. A medida que este chorro de agua pasa sobre el terreno del campo, se esparce en forma de gotas que, al juntarse con el aire, caen a la superficie del suelo. Este sistema es muy utilizado debido a que no requiere altos caudales, por lo que no consume grandes cantidades de agua. En este sistema se aprovecha la disminución de la salida de la boquilla para aumentar la velocidad. Si bien este sistema ayuda a reducir el consumo de agua, una parte de ella se evapora rápidamente debido a la alta presión del sistema o al contacto con la capa superficial del suelo, lo que resulta en una pérdida de agua que debería ser utilizada en el riego (Solórzano, 2012).

Este sistema de riego podría mejorarse, por ejemplo, si se realiza en horas con poca radiación solar para disminuir la evaporación del agua debido al calentamiento del aire o del terreno.

2.2 Riego por microaspersión

Es un método de riego que forma una especie de niebla o de gotas muy pequeñas, casi que puntuales sobre un terreno determinado, en este sistema se busca que el agua caiga al suelo en gotas muy pequeñas, por lo tanto, requiere una presión mucho menor al sistema por aspersión, logrando un mojado de alrededor de unos 3 a 4 metros. Este sistema es recomendado para cultivos en viveros o en plantaciones de hortalizas, no es un sistema de riego recomendado para plantas altas o árboles muy grades. Los más comunes son los micro aspersores en los que se clava un soporte en el suelo de acuerdo con la altura necesarias, y en los que se abastece de agua de una manguera que suele estar superficial. (Demin, 2014, p.16)

Este sistema es básicamente una niebla que cae sobre las plantas o el suelo debido a su peso. Como las velocidades del agua no son tan altas como en el sistema de aspersión, se reduce la posibilidad de evaporación al entrar en contacto con el aire. Además, se podría disminuir la evaporación por calentamiento del agua y el aire si se realiza la irrigación en horas con baja o nula radiación solar (5 p.m. a 5 a.m.).

Sin embargo, la principal dificultad de este sistema de riego radica en que solo realiza una irrigación de 3 a 4 metros, lo que requiere una gran cantidad de aspersores. Además, por la niebla tan mínima que genera es común que se presenten taponamientos en la salida de los aspersores.

2.3 Riego por surcos

Es un sistema de riego muy antiguo que depende mucho de la capacidad de absorción y retención del suelo, así como del tipo de planta que se está irrigando. Al liberar el agua en los canales, las raíces pueden quedar completamente sumergidas en agua, y afectar su crecimiento. El funcionamiento del sistema de riego por surcos no requiere sistemas mecánicos, si no que se basa en la gravedad para el flujo del agua. Para su correcto funcionamiento, se requiere una inclinación adecuada del terreno que permita una inundación lenta y uniforme a lo largo de cada canal, lo que asegura una distribución homogénea del agua en el terreno. (Ramos y Báez, 2013).

2.4 Riego por inundación

Este sistema de riego se realiza en pantano, donde no existen bordos o composturas. Al operar caudales grandes es necesario operar con varias personas para manejar el agua dentro de la parcela y distribuirla por todo el terreno. Este sistema debe utilizarse en terrenos planos para permitir el flujo lento del agua de riego. Sin embargo, como se trata de un sistema de riego en el que el terreno se inunda por completo, se debe conocer muy bien el tipo de planta que se desea regar (Arbat et al., 2018).

Todos los sistemas de riego mencionados anteriormente son superficiales, que automatizados o no, están expuestos a sufrir del fenómeno de la evapotranspiración. Este concepto se refiere a la cantidad máxima de agua que puede evaporarse de un suelo completamente cubierto de vegetación y que se desarrolla en condiciones óptimas, y en el caso hipotético de que no existan limitaciones en la disponibilidad de agua. La evapotranspiración une los conceptos de evaporación y transpiración (Gómez y Cadena, 2018).

"La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor)." (Gómez y Cadena, 2018, p.6). La recomendación sería evitar el uso de los sistemas de riego mencionados anteriormente entre las 10 de la mañana y las 4 de la tarde, que es el espacio de tiempo en el que se presenta mayor radiación (Moncada, 2003). Durante la noche la temperatura disminuye y no hay radiación, lo que permite mejorar el sistema de riego y aprovechar mejor el recurso hídrico.

A continuación, se presenta el sistema de riego por goteo, el cual puede realizarse de manera superficial, subterráneo o de manera híbrida.

3. El riego por goteo

Desde que se tiene registro del desarrollo de la agricultura por parte del ser humano, los agricultores y profesionales han tenido que vencer el reto de la irrigación. Este desafío se ha superado gracias a la adopción y desarrollo de nuevas tecnologías, la integración de esfuerzos de otras disciplinas del saber, así como a través del ensayo y error, usando la experiencia y experticia de cada agricultor para enfrentar los retos que tienen al frente.

> Uno de dichos conceptos ha sido la aplicación localizada del agua directamente a la zona de enraizamiento de los cultivos. Un concepto adicional fue la aplicación del agua bajo la superficie del suelo (BSS), a fin de eliminar las pérdidas por evaporación de la superficie del suelo.

> Una tecnología de riego localizado de esta índole fue empleada en la Persia de la antigüedad y aún hoy día se emplea en algunos países de Asia y en África. Ya hace más de 2 siglos que en el sureste de Asia se usan tubos hechos de tallos de bambú. Se capta el agua de un manantial o de una corriente y se la conduce por dicha tubería de bambú hacia la plantación que se desea regar. (Sneh, 2006, p.19)

Desde mediados del siglo XIX, se han presentado patentes de dispositivos ahorradores de agua. Entre ellos, se destacan los dispositivos de riego por goteo, cuyo principio se desarrolló en Israel en los años 60´s y posteriormente se comenzó a utilizar en Estados Unidos y otros países.

La innovación en la gran revolución ha sido atribuida a Simcha Blass, quien descubrió por accidente que un árbol que estaba en contacto con una manguera con una fuga mínima de agua crecía más rápido que los otros árboles de su misma especie cercanos a su entorno, con esto se demostró que un lento y constante goteo sobre una planta garantizaba un mayor crecimiento. Blass llevó este descubrimiento en un dispositivo mecánico y lo probó exitosamente en una comunidad de agricultores -kibutz Hatzerim- ubicada en el desierto del Negev (Maayan, 2015, p.50).

El riego por goteo se clasifica en los métodos de riego localizado, que también incluyen los sistemas de riego con micro emisores. También, se clasifica en los sistemas de riego superficiales y subterráneos, e incluso se pueden utilizar ambos sistemas en una misma plantación. En el riego por goteo se busca aplicar pequeños volúmenes de agua directamente al suelo, para que las plantas la absorban de manera eficiente y no se produzca desperdicio de agua. (Sneh, 2006).

En Israel, un país ubicado en una zona desértica, se puede demostrar con una alta experiencia que el riego por goteo tiene un alto potencial para ahorrar agua, mejorar los rendimientos y aumentar la productividad agraria. La introducción del riego por goteo no limita sus efectos a la gestión del agua, también impulsa la adopción de otras tecnologías complementarias que afectan a casi todos los aspectos de la producción agraria. De esta forma, al permitir un mejor control del crecimiento de los cultivos, puede llevar al desarrollo y adopción de sistemas informáticos en la producción agraria. El riego por goteo es una tecnología en evolución que exige mucha investigación. Israel es una prueba sólida de la innovación en el riego por goteo y del riego informatizado (Dinar y Zilberman, 1994).

Podría decirse que el riego por goteo no excluye otras tecnologías y, en cambio, se complementa con ellas, tal es el caso de los sistemas de riego por goteo más modernos que utilizan sistemas de bombeo, aspersores, procesamiento de datos, toma de decisiones automáticas, almacenamiento y control de datos, entre otros.

3.1 El riego por goteo en Colombia

El exitoso caso en la Guajira

Hoy en día, la tecnología de riego por goteo está presente en más de 110 países alrededor del mundo, incluyendo Colombia, donde este sistema se ha aplicado en algunos proyectos a mediana y gran escala, principalmente en Uribia y Papayal, en La Guajira. Allí, los campesinos nunca pensaron que de esa tierra pudieran brotar 11 toneladas de papa.

> Los cultivos hacen parte de un proyecto experimental impulsado desde hace varios años por la Fundación Cerrejón para el Progreso que, con la asesoría del Centro de Investigación de la Papa en Climas Calientes de Israel (CIP), pensó adaptar en Colombia sistemas de riego en suelos secos para producir papa en La Guajira. Los extranjeros capacitaron a un grupo de 20 personas, entre ellas indígenas wayú y otros habitantes de la región, en los sistemas de riego por goteo, que en la actualidad han vuelto productivos los suelos de sus municipios. (Maayan, 2015, p.50)

Con esto se demuestra también que las zonas áridas tienen un potencial altísimo para la agricultura y que, con un adecuado suministro de agua, pueden convertirse en zonas de suministro agrícola.

El riego por goteo en cultivos de Olivo

En otro proyecto, en los cultivos de Olivo, para la extracción de aceite se realizó una combinación entre un sistema de riego por goteo y sistema de bombeo a través de paneles solares para el cultivo de olivo; se destaca que:

- El uso de riego por goteo utilizando bomba, mejora el rendimiento del sistema manteniendo una presión y un caudal constante en todas las redes de tubería, de manera que el riego es uniforme en todos los sectores, comparado con sistema de riego utilizando la gravedad.

- Es viable la implementación del proyecto en las zonas propuestas, ya que se obtiene un retorno de la inversión inicial en menos de 5 años, comparado con un sistema que utilice gasolina, no genera costos en

mantenimiento y en combustibles y tiene una vida útil mayor a 20 años garantizada en las hojas técnicas de los fabricantes.

- Los sistemas no generan efectos negativos ambientales ni sociales, en cambio muestra a las comunidades uno de los usos de la energía fotovoltaica, permitiendo que los agricultores se animen a utilizar energías alternativas en sus cultivos sabiendo que tienen un recurso energético inagotable.

- El estudio de proyectos con energías renovables obtiene un gran interés positivo en las comunidades y en las organizaciones, debido a las soluciones sustentables e innovadoras que trae. (Mendivelso, 2016, p.77)

Las palmas de aceite

En un proyecto de cultivo de palmas de aceite en el que se utilizó el riego por goteo, se suministró a las plantas no solo agua, sino también una dosis de fertilizantes a cada palma en el tiempo. Esto permitió una disminución de tiempo en vivero y la eficiencia del fertirriego permitió reducir el consumo de agua en un 36%, así como la cantidad de nutrientes aplicados en un rango que va del 7,5% al 34,7%. Por el problema de velocidad de los fuertes vientos, el sistema de fertirriego es el más indicado para la operación (Castillo, 2010). El riego por goteo es recomendable para proyectos de viveros de varios años consecutivos, debido a que todo el sistema se reutiliza.

Una solución en el minifundio

Así mismo, estudios sobre el riego por goteo en el minifundio colombiano permite concluir que el riego por goteo:

Es una alternativa de solución a los problemas que afectan a la familia campesina por cuanto aporta los siguientes beneficios:

- Mejora el nivel de nutrición al propiciar la inclusión de las hortalizas en la dieta campesina.

- Fortalece la estructura familiar campesina, por cuanto los predios pueden ser cultivados durante todo el año, evitando el abandono en épocas de sequia.

- Menor distanciamiento entre los dos sectores agrícolas, el moderno y el minifundista, al lograr que este acepte y haga uso de la tecnología agrícola que permuta al ingresar al mercado con precios más competitivos.

- Mejor nivel de ingresos con todas sus consecuencias favorables, al poderse explotar los pequeños predios con alta rentabilidad. (Forero, 1984, p.474)

3.2 Para qué sirve el riego por goteo en Colombia

Colombia es un país ubicado en la zona norte de Suramérica, es conocida por ser una tierra de páramos los cuales se localizan en:

las tres cordilleras y en la Sierra Nevada de Santa Marta, cubriendo un área de 14.434 km2, equivalente al 49% de los páramos del mundo y al 1,3 % de la extensión continental del país. El departamento con mayor cantidad es Boyacá, con un 16% de los páramos del mundo. (Garavito, 2015, p.128)

Se podría concluir que Colombia es un país lleno de agua, porque posee cerca de la mitad de los páramos del mundo, pero también es un país con zonas áridas, es decir secas, estériles o carentes de humedad (Real Academia Española, s.f., definición 1).

En Colombia se han clasificado 20 zonas áridas desde 1964:

Desierto de la Guajira, Zona árida del Litoral Caribe, Zona semiárida del Norte, Zona La Gloria – Gamarra, Zona de Ocaña, Desierto del Táchira, Valle del Río de Oro, Desierto del Chicamocha, Desierto de La Candelaria, Zona semiárida de Ubaté, Zona semiárida de la Sabana de Bogotá, Cañón del Río Negro, Alto Magdalena, Cañón del Río Cauca, Cuenca Alta del Río Sucio, La Planada del Valle del Cauca, Zona del Darién, Cañón del Dagua, Cuenca de los Ríos Patía, Juanambú y Gwáitara, Llanos Orientales (Molano, 1964, p.2).

En mapas más recientes se podría determinar que en Colombia, toda la costa atlántica (excluyendo la Sierra Nevada de Santa Marta), la Zona norte de la Orinoquía, los Santanderes, el cañón del río Magdalena y gran parte del cañón del río Cauca son consideradas zonas áridas o semiáridas (Alarcón, 2017). El riego por goteo podría ser una solución adecuada para el manejo del agua en estas zonas consideradas, si se implementa un manejo integral del agua, tomando como ejemplo las prácticas realizadas en Israel.

Adicionalmente, por la posición geográfica de Colombia, el ciclo hidrológico normal o histórico puede verse interrumpido por dos fenómenos atípicos, la fase seca que es conocida como *fenómeno del niño* y la fase de altas lluvias, conocida como *fenómeno de la niña*. En la fase de oscilación del sur (ENSO) o *fenómeno del niño*, se presentan temporadas extremadamente secas, siendo la temporada 2010-2011 la más catastrófica de los últimos 40 años. Por su parte, el *fenómeno de la niña* ha prolongado las temporadas de lluvia en Colombia, desde el año 2021, creando situaciones de emergencia en la mayor parte del país. (Villarreal et al., 2014).

3.3 La medición del agua, una clave esencial para su protección

La instalación de medidores de agua en hogares o el cambio de este por tecnologías que permitan mejorar la medición y la relación metrológica, es decir, la medición eficiente de caudales bajos ha demostrado una reducción en el consumo de agua en un rango del 10% al 30%, y algunas veces hasta el 50%. Es decir, la medición permite que el usuario tome conciencia de sus consumos y tienda a mejorar sus hábitos (Terrebonne, 2005).

De la misma manera se podría realizar la medición del agua consumida en la agricultura, con medidores capaces de medir caudales bajos en los sistemas de riego por goteo, y ayudar al agricultor a tomar decisiones sobre el caudal y la cantidad de agua suministrada (volumen). Para ello, se podrían utilizar medidores de caudal por ultrasonido, de los cuales existen dos tipos: caudalímetros de ultrasonido de tiempo de tránsito y caudalímetros de efecto Doppler. El primero utiliza la variación de la velocidad del sonido en un medio en movimiento y el segundo emplea el cambio de frecuencia que sufre una onda sonora al reflejarse en un cuerpo en movimiento y ser observada por un sensor que permanece fijo en todo momento (Larreategui, 1994).

Es necesario medir adecuadamente el consumo de agua no solo a nivel residencial, comercial e industrial sino también en la agricultura, para tomar decisiones adecuadas, pero también para conocer y respetar los caudales de agua concesionados en cada caso.

3.4 Telegestión

Como riego por goteo simplemente se podría establecer un sistema con un adecuado suministro de agua, el cual está *controlado*. Se puede comenzar desde lo más simple, que es una manguera perforada con un diámetro específico que suministra una cantidad determinada de agua durante un período de tiempo y luego se corta el suministro. Este método ya se considera riego por goteo, similar al suministro de suero por vía intravenosa, con un dispositivo mecánico que regula el paso del líquido gota a gota. Sin embargo, como hemos visto, el riego por goteo involucra otras tecnologías, que están en constante avance, y nos llevarían desde la instalación de recolectores de agua, bombas, sistemas de control por horas o temperatura, medición de la humedad del suelo, hasta la telegestión o el sistema de riego computarizado, en el que se instalan sistemas de comunicación en las raíces de las plantas, que envían señales para suministrar diferentes nutrientes, incluyendo el agua, a las plantas.

Se recomienda el uso del sistema IoT de telecontrol en la agricultura a gran escala con el objetivo de optimizar recursos al momento del regadío. Se debe considerar los costos y realizar los estudios previos requeridos para su implementación. Se recomienda que antes de pensar en un sistema de telecontrol se dimensionen los equipos necesarios como el

sistema de bombeo, el tablero de control eléctrico y todo el sistema de mangueras necesarias para un adecuado funcionamiento. (Caisa, 2022).

3.5 Ventajas del riego por goteo

- Ahorro de agua: la cantidad de agua que se aplica se ajusta en cantidad y oportunidad a la evapotranspiración de los cultivos. Se eliminan las pérdidas por conducción, ya que el agua es transportada por tuberías hasta la planta y se reducen las pérdidas por infiltración profunda y de escurrimiento al pie, lo cual es muy común en el riego por superficie. El riego por goteo se hace efectivo en aquellas zonas donde el agua por costo o por oferta hace que el consumo deba ser reducido.

- Aumento de la eficiencia: la eficiencia de riego es muy alta (90 al 95 % en goteo y 85 % en microaspersión). Es decir que, en el sistema de riego por goteo el suministro de agua va directamente a la planta, evitando perdidas por evaporación, exceso de humedad del suelo, o que el agua suministrada escurra al subsuelo.

- Uniformidad de aplicación: debido a que la aplicación se realiza por emisores con igual caudal y ubicados a distancias regulares, es posible la entrega de agua con muy buen grado de uniformidad, inclusive en terrenos con topografía irregular, los dispositivos también son regulables, entonces es posible suministrar igual cantidad de agua si así se requiere, o abrir y cerrar los dispositivos donde el terreno y las condiciones así lo requieran.

- Aumento de la superficie bajo riego: es posible incrementar la superficie con la misma disponibilidad de agua en un 30-35 %. Esto se debe al incremento de la eficiencia de uso y a la menor cantidad de agua necesaria para el riego, es decir que se puede regar una cantidad específica de terreno con menos agua o regar mayor cantidad de terreno con la misma cantidad de agua.

- Menor presencia de malezas: contribuye a facilitar el control de las malezas al humedecer el suelo en forma localizada, ya que el agua se entrega directamente al lado de las plantas y a lo largo de la hilera del cultivo, quedando seca gran parte de la superficie entre las líneas (aproximadamente una tercera parte). Además, la población de malezas disminuye porque el agua se aplica filtrada, libre de semillas. Esto permite que alrededor de las plantas no crezcan malezas que puedan robar el agua, los nutrientes, el suelo o la luz solar, conservando la eficiencia.

- Fertirriego: la posibilidad de poder fertilizar continuamente y cuando se desee a través del sistema constituye una ventaja. Se aumenta la eficiencia de fertilización y se economiza en fertilizantes. Además, si se tiene un sistema de información automatizado es posible conocer qué nutriente requiere el suelo y así suministrar solo lo necesario.

- Empleo de aguas salinas: aquellas aguas de mala calidad que son peligrosas por la concentración de sales pueden ser utilizadas con el riego de alta frecuencia. Al mantener el suelo con un alto grado de humedad la tensión efectuada por las partículas del suelo (tensión mátrica) es muy pequeña. Esto puede aumentar la tensión osmótica originada por la solución del suelo.

- Automatización: es posible automatizar parcial o totalmente el equipo, lo que facilita la operación y permite la aplicación de programas de fertirrigación. El trabajo del operario se vuelve más eficiente, preciso y cómodo, ya que se puede destinar parte del tiempo para otras tareas. Por ejemplo, al automatizar el riego se prescinde de tener que abrir y cerrar válvulas manualmente cada vez que se cambie de operación de riego. Además, facilita la obtención y el almacenamiento de información para el conocimiento y análisis de los riegos aplicados en un periodo o en toda la temporada de riego. (Liotta et al., 2015, p. 22)

3.6 Desventajas del riego por goteo

Las desventajas que a continuación se presentan están pensadas sobre todo en sistemas de riego por goteo automatizados, donde el costo del sistema, los accesorios y la mano de obra resulta ser un factor de revisión para evaluar el costo beneficio del sistema.

- Costo elevado de adquisición e instalación: antes de realizar la inversión, es necesario analizar los costos y los beneficios que se obtendrán. Se debe considerar el incremento probable de la producción, la mejor calidad del producto y su precio. Los cultivos con rentabilidad suficiente justifican su empleo, o también cuando los costos de nivelación y preparación del suelo para riego por superficie son elevados (rebaje de médanos, suelos de piedemonte con pedregosidad en superficie y erosión).

- Necesidad de mano de obra especializada: requiere de personal calificado para operar el sistema y solucionar problemas. Es necesaria una verificación permanente del buen funcionamiento de los goteros, control de obstrucciones, rotura de tuberías, válvulas y funcionamiento del equipo en general. Esto requiere de personal con conocimiento eléctrico, mecánico, electrónico e hidráulico.

- Necesidad de un buen diseño: es condición fundamental que el equipo se diseñe correctamente, tanto desde el punto de vista agronómico como del hidráulico, y una correcta operación de la fertirrigación. Un diseño inadecuado puede producir deficiencias en los rendimientos y la calidad de los cultivos, gastos de energía innecesarios y problemas de manejo.

- Consumo de energía: el costo de la electricidad para el funcionamiento de la instalación y los combustibles es otro factor a tener en cuenta, dado que el bombeo, los sistemas de comunicación y las válvulas consumen electricidad.

- Dependencia de la electricidad: en el riego presurizado se almacena agua en un menor volumen de suelo y el cultivo tiene muy poca capacidad de soportar periodos prolongados sin riego; por esto representa un problema en zonas donde los cortes de energía son frecuentes, que podría solucionarse con energía solar, siendo necesario nuevamente el análisis de costo beneficio.

Necesidad de un sistema de filtrado: el sistema requiere de un especial cuidado en el filtrado del agua. Los emisores son sensibles a las obstrucciones por materia orgánica, algas y sólidos en suspensión. Esta condición se hace más exigente cuando el agua posee gran cantidad de sedimentos. Los sistemas de goteo tienen orificios muy pequeños que podrían verse afectado hasta por una hoja, esto hace necesario el uso de filtros en todo el sistema.

- Necesidad de mantenimiento y limpieza del sistema: es necesario la limpieza periódica del sistema tanto en la zona del cabezal como en tuberías y laterales. Dependiendo de la calidad del agua e impurezas esta operación varía entre una a tres veces por temporada.

- Acumulación de sales: en zonas áridas y de bajas precipitaciones el empleo permanente de estos sistemas puede ocasionar acumulación salina a niveles peligrosos, en particular cuando el agua de riego es de regular a mala calidad y la textura del suelo no favorece el lavado de sales en profundidad. (Liotta et al., 2015, p.24)

Es viable la adopción del sistema por goteo en cualquier sistema de riego

Lo analizado anteriormente permite determinar que el sistema de riego por goteo es una tecnología que va desde poder suministrar agua a una planta a través de hilos de algodón conectados a un balde, pasar por el suministro gota a gota, tal cual se hace con el suero intravenoso, hasta pasar por sistemas de riego más complejos en grandes plantaciones.

Estos sistemas pueden ir desde la apertura manual de una llave cada cierto tiempo, hasta sistemas de riego completamente automatizados que interactúan con la plantación, determinando cuándo necesita agua o algún otro elemento líquido, encendiendo bombas de agua o de mezclas de diversos componentes, y tomando decisiones autónomas en relación con el tiempo, el clima, la radiación solar, la hora del día, la cantidad de agua reservada, etc.
El sistema de riego por goteo es un sistema para hacer laboratorios, para aprender, para determinar qué y cuándo tomar decisiones. En todo uso de cualquier tecnología lo que está inmerso es el tema económico y el análisis de costo beneficio. Es allí donde toma relevancia que en el sistema de riego por goteo siempre será necesario el tema estratégico, saber cuánto y cuándo invertir, para saber cuándo y en cuánto se podrá ver revertido el beneficio.

Es importante que las empresas de servicios públicos domiciliarios promuevan el uso de estos sistemas de riego

Las empresas prestadoras de servicios públicos domiciliarios promueven constantemente el adecuado uso y consumo del agua. Es de vital importancia que los usuarios conozcan estas tecnologías, se familiaricen con ellas y puedan adoptar una actitud de consumo eficiente. A continuación, se presentan las apreciaciones para determinar que se debe promover el uso de estas tecnologías:

1. Se puede implementar en casas con jardines, urbanizaciones con grandes zonas verdes, viveros, clubes y estadios, disminuyendo con esto los consumos de agua.

2. Las fuentes de agua de la cual se abastecen las empresas, como EPM, la mayoría de veces se comparten con zonas de agricultura y/o ganadería. Si los agricultores disminuyen los consumos de agua para el riego de sus plantaciones o pastos, se tendrá más agua disponible en la fuente para ser potabilizada y comercializada.

3. Es un tema de responsabilidad social empresarial cuidar y promover la protección del recurso hídrico, que se agota y que es fuente fundamental para la prestación del servicio de acueducto.

Conclusiones

La población mundial sigue creciendo y todas las actividades humanas tienen un impacto sobre la disponibilidad y calidad del agua. Para producir comida, realizar actividades industriales o hasta para el propio aseo se necesita mucha cantidad de agua; es allí donde juega un papel importante el cuidado del recurso. En países donde el agua no es abundante, como Israel, hace mucho tiempo se vienen tomando acciones que le han ido ganando terreno a la situación de oferta y demanda del agua. El riego por goteo se convierte en una alternativa para el uso y protección adecuado del recurso hídrico y Colombia no puede verse ajena a esta situación, aunque sea un país de abundantes ríos y páramos, también es un país donde se identifican zonas áridas y fenómenos climáticos de sequías prolongadas.

El riego por goteo puede sacar el ingenio de las personas y establecer sistemas caseros a bajo costo y con una eficiencia adecuada para el riego de jardines y pequeñas huertas, o llevarse a grandes sembrados, donde a través de un análisis de costos y beneficios se podría tecnificar por completo el sistema de riego y suministro de nutrientes para el crecimiento de las plantas. La posición geográfica de Colombia, sin estaciones climáticas y con el adecuado manejo del agua para el riego, sugiere que se puede potenciar para producir más comida con menos agua, hacer uso de zonas áridas para la siembra, convirtiéndolo en una potencia agrícola.

Las grandes extensiones verdes y ricas para el riego, donde normalmente abunda el agua, podrían verse beneficiados con la implementación de riego por goteo, pues no se dependerá de las lluvias, sino que se podrá suministrar las cantidades de agua adecuadas en todo momento. Así mismo, estas amplias zonas áridas con las que cuenta el país podrían experimentar y establecer modelos de producción agrícola, como el que ha implementado Israel, y tener también abundante producción de comida en todo momento.

Hay grandes retos por superar, pero sin duda los beneficios también son inmensos. Es por eso que se deben enfocar los esfuerzos para lograr una mayor eficiencia en el consumo de agua, desde los hogares hasta las grandes plantaciones de cultivos, sin incurrir en costos elevados.

Referencias

- Alarcón, J. (2017). *El cambio climático como factor transformador del territorio.* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. https://rebrand.ly/glolc91
- Antón, D. (1996). *Ciudades sedientas: agua y ambientes urbanos en América Latina.* Unesco.
- Arbat, G., Parals, S., Duran-Ros, M., Pujol, J., Puig-Bargués, J. y Ramírez, F. (2018). *Dinámica del agua en el suelo, productividad del agua y economía en riego por inundación y goteo en arroz.* XXXVI Congreso Nacional de Riegos, Valladolid, España. https://rebrand.ly/11b81d
- Avilés, H. (2006). El valor del agua en la agricultura. *La granja*, 5(1), 28-31. https://rebrand.ly/s8tj94c
- Caisa, A. (2022). *Prototipo IOT de telecontrol del riego a goteo para la agricultura inteligente con tecnología LORA.* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. https://rebrand.ly/5r89n2y

- Castillo, E. (2010). Experiencias en riego por goteo en vivero de palma de aceite en los Llanos Orientales de Colombia. *Revista Palmas, 31*(especial), 255-264. https://rebrand.ly/v5kbj9c

- Demin, P. (2014). *Aportes para el mejoramiento del manejo de los sistemas de riego. Métodos de riego: fundamentos, usos y adaptaciones.* Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. https://rebrand.ly/pwst1tj

- Dinar, A. y Zilberman, D. (1994). Economía de las tecnologías modernas de riego: lecciones de la experiencia israelí. *Revista de Estudios Agro-Sociales*, (167), 155-183. https://rebrand.ly/ckcv2l8

- Forde, M., Izurieta, R., Ôrmeci, B., Arellano, M. y Mitchell, K. (2019). Agua y salud. En Unesco, *Calidad del Agua en las Américas: riesgos y oportunidades* (29-38). https://rb.gy/17uikx

- Forero, J. (1984). Riego por goteo en el minifundio colombiano. *Revista ICA*. 469 – 486. https://rebrand.ly/9fgjts0

- Garavito, L. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Ingeniare, 11* (19), 127-136. https://rebrand.ly/fepz488

- Gómez, J. y Cadena, M. (2018). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ETo) para Colombia.* IDEAM. https://rb.gy/g3uf0m Isaza, H. (2022). Gestión metrológica domiciliaria, conociendo el medidor de agua y las acciones para el control eficiente de los consumos. *Revista EPM,* (20). 8 - 18.

- Larios F., González, C y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y hacer,* 2(2), 8-25. https://rb.gy/hwdr7b

- Larreategui, A. (1994). Estado del arte en la medición de magnitudes hidráulicas (I): medición de caudales en conducciones cerradas, en diámetros pequeños y medianos. *Ingeniería del agua,* 1(2), 33-68. https://rebrand.ly/7cplkb5

- Liotta, M., Carrión, R., Ciancaglini, N. y Olguin, A. (2015). *Manual de capacitación: riego por goteo.* INTA. https://rebrand.ly/a2gzowa

- Maayan, M. (2015). Cómo Israel le ganó la batalla al desierto. *Pensamiento urbano,* (1), 49-50 https://rb.gy/xuw2q

- Mendivelso, C. (2016). *Sistema de riego por goteo con paneles solares en cultivo de árboles de olivo en la finca olivanto en Boyacá, Colombia y una parcela en Tacna, Perú.* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás]. https://rebrand.ly/v8so56d

- Miracle, M. (2006). Consideraciones y casos en torno al ciclo del agua. Polis: Revista Latinoamericana, (14), 7. https://rebrand.ly/qxx06bb

- Molano, J. (1964). *Zonas áridas de Colombia.* Sociedad Geográfica de Colombia. https://rebrand.ly/nfvn2hk

- Moncada, J. (2003). La radiación ultravioleta y la piel del deportista. *Revista Educación*, 27(2), 165-172. https://rebrand.ly/zanetu3

- Olarte, Y. (2021). *Medidas de conservación para el agua en el río Túa en Monterrey-Casanare desde la perspectiva de gestión ambiental.* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Javeriana]. https://rebrand.ly/uoewvnv

- Ramos, J. (14 de marzo de 2023). Agudiza desabasto de agua y crisis hídrica, miles de personas ya viven el día cero en CDMX. *Publimetro*. https://rebrand.ly/6zost2u

- Ramos, M. y Báez, D. (2013). *Diseño y Construcción de un Sistema de Riego por Aspersión en una Parcela Demostrativa en el Cantón Cevallos.* [Tesis de pregrado, ESPOCH]. https://rebrand.ly/xtc73ph

- Real Academia Española. (s.f.). Árido. En *Diccionario de la lengua española.* Recuperado el 2 de noviembre de 2022. https://dle.rae.es/%C3%A1rido

- Romero, J. y Pulido, E. (2021). *Prueba piloto de un sistema automatizado para el uso racional del agua y la energía eléctrica en una unidad sanitaria en la Universidad Antonio Nariño Sede Villavicencio–Meta* [Tesis de pregrado, Universidad Antonio Nariño]. https://rebrand.ly/c60147

- Sneh, M. (2006). *El riego por goteo.* MASHAD-CINADCO. https://rebrand.ly/frfkrrw

- Solórzano, A. (2012). *Diseño e implementación de un sistema de riego por aspersión, en cacao (theobroma cacao l) en el campus de la ESPAM-MFL* [Tesis de pregrado, ESPAM-MFL]. https://rebrand.ly/rf79h1l

- Terrebonne, P. (2005). *Residential Water Demand Management Programs: A Selected Review of Literature.* Environmental Policy Group at the Andrew Young School of Policy Studies. https://rebrand.ly/tqv2ay4

- Toledo, A. (2002). El agua en México y el mundo. *Gaceta ecológica*, (64), 9-18. https://rebrand.ly/5a45nym

- Villarreal, A., Aguirre, W. y Hoyos, L. (2014). Fenómeno de la niña: impacto en la producción de uchuva en Cundinamarca, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas, 31*(1), 118-127. https://rebrand.ly/2ttqnju

Cómo citar este artículo:

Isaza, H. (2023). Riego por goteo, estrategia en el cuidado del agua. *Revista EPM,* (21), 144-160.

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 2022.pdf.

Fechas para el envío de los artículos

Edición No. 23 (Ene.-Jun. 2024):
fecha límite de recepción 23 de febrero de 2024

Edición No. 24 (Jul.-Dic. 2024):
fecha límite de recepción 28 de junio de 2024

Recepción de artículos y contacto

Revista EPM
dep01980568@epm.com.co
gestiondeinformacion@fundacionepm.org.co

epm®

estamos ahí.

www.epm.com.co