

Revista

epm[®]

Publicación especializada en la gestión de servicios públicos

No. 26 | Enero - Junio 2026



Integración del patrimonio cultural en infraestructura hídrica: manejo de un hallazgo fortuito en la reposición del acueducto variante Monjita-Batallón

Movilidad eléctrica en Colombia: potencial, desafíos y rol estratégico de EPM

Esbeltas, pero extraordinariamente resistentes: validación experimental de torres de transmisión sometidas a grandes cargas



energía | gas natural | aguas

Revista EPM No.26
Enero - Junio 2026
ISSN: 2145-1524

Grupo Directivo EPM que participa:

Jhon Alberto Maya Salazar

Gerente General

Humberto José Iglesias Gómez

Vicepresidencia Negocios EPM

Natalia Andrea Ramírez Ángel

Gerencia Talento Humano y Organización

Silvia Agudelo Jaramillo

Gerencia Comunicaciones y Relaciones Externas

Edición y coordinación de la Revista EPM:

Gabriel Jaime Arango Zapata

Área Soluciones Talento Humano y Organización

Evelyn Correa Zabala

Profesional Desarrollo Humano

María Elizabeth Pérez Arango

Profesional Desarrollo Humano

Mónica María Osorio Múnera

Área Relaciones Externas

Paola Andrea Valencia Valencia

Área Comunicaciones y Marca

Equipo editorial Biblioteca EPM

Amparo Eliza Peña Peña

Dahianna Elisey Vanegas Moreno

Alejandro Ruiz Bonilla

Stevens Aguirre Pérez

Elkin Gabriel Parra Calderón

Alejandra Acevedo Sánchez

Melina del Mar Orgullosa Quiroz

Kelly Tatiana Cárdenas Sánchez

Juliana Gutiérrez Cadavid

Periodicidad: semestral

Solicitud de Canje a:

Biblioteca EPM

Carrera 54 No.44-48 Plaza de Cisneros

Teléfono: 3807500

bibliotecaepm@epm.com.co

Medellín – Colombia

Empresas Públicas de Medellín E.S.P.

Carrera 58 No. 42 – 125 Apartado 940

E-mail: epm@epm.com.co

Tel: 3808080

Medellín – Colombia

www.epm.com.co

Presentación

En esta vigésima sexta edición de la Revista EPM, invitamos a nuestros lectores a recorrer una selección de artículos que tienen como punto de encuentro el agua, la energía y la innovación aplicada al servicio de los territorios. Cada texto refleja una manera distinta de comprender los retos actuales de los servicios públicos: desde la planeación de infraestructura hídrica y la protección de los recursos naturales, hasta la transición energética, la confiabilidad operativa, la gestión basada en datos y el fortalecimiento de capacidades técnicas dentro de la organización.

Esta edición nos recuerda que innovar no siempre significa partir de cero. A veces, innovar es mirar con nuevos ojos la infraestructura existente, aprovechar mejor los recursos disponibles, anticiparse a los riesgos, conectar saberes y encontrar soluciones más eficientes, sostenibles y cercanas a las necesidades de las comunidades. En ese sentido, los artículos reunidos en estas páginas muestran cómo el conocimiento técnico, cuando se pone al servicio del territorio, se convierte en una herramienta para cerrar brechas, proteger la vida, mejorar la operación y construir futuro.

El recorrido inicia con una reflexión sobre **el alcantarillado por vacío como alternativa para gestionar brechas de cobertura y acompañar el crecimiento urbano en el eje Turbo-Apartadó**. Este artículo plantea una solución especialmente relevante para territorios con condiciones complejas de suelo, niveles freáticos altos y zonas de expansión, donde los sistemas tradicionales por gravedad pueden resultar insuficientes o inviables. Así, el saneamiento se presenta no solo como una necesidad técnica, sino como una condición fundamental para el desarrollo ordenado, la salud pública y la calidad de vida.

Desde otra mirada sobre la infraestructura hídrica, el artículo sobre **la integración del patrimonio cultural en la variante Monjita-Batallón** muestra cómo una obra de acueducto puede convertirse también en una oportunidad para reconocer y proteger la memoria del territorio. A partir de un hallazgo arqueológico fortuito, el texto evidencia la importancia de actuar con oportunidad, articulación institucional y responsabilidad patrimonial, demostrando que la sostenibilidad también implica cuidar aquello que habla de nuestra historia.

La gestión del agua continúa con una propuesta metodológica para **articular actores públicos, privados, academia y ciudadanía en torno a la gobernanza de cuencas hídricas urbanas**. En un contexto marcado por el cambio climático, el deterioro socioambiental y la necesidad de acciones sostenidas en el tiempo, este escrito basado en la experiencia de la autora en planificación y ordenación de cuencas, así como de su tesis doctoral, desarrollada durante siete años, resalta el valor de la confianza, la cooperación, el liderazgo comunitario y el diálogo entre el saber técnico y el saber local como condiciones necesarias para proteger el recurso hídrico.

También desde el campo hídrico, el artículo sobre **válvulas tipo pico de pato en descargas sumergidas** aborda una solución para reducir riesgos de reflujo, inundación y afectación de infraestructura en condiciones hidráulicas exigentes. Más allá del componente técnico, este texto invita a pensar en la resiliencia de los sistemas urbanos frente a eventos extremos y en la necesidad de diseñar obras capaces de responder a escenarios cada vez más retadores.

En la conexión entre agua y energía, la edición presenta un caso de **generación eléctrica**

en redes de acueducto mediante bombas centrífugas operando como turbinas. Esta experiencia permite aprovechar la presión disponible en la infraestructura de distribución de agua potable para generar energía renovable, regular la presión del sistema y avanzar hacia modelos más eficientes, sostenibles y replicables. Aquí, la infraestructura existente se convierte en una oportunidad para crear valor, aportar a la transición energética y fortalecer la economía circular.

La energía aparece luego desde la perspectiva de la **movilidad eléctrica, uno de los frentes más visibles de la transición energética.** Aquí se analiza el potencial de este ecosistema en Colombia, sus desafíos regulatorios, comerciales y tecnológicos, así como el rol estratégico que puede desempeñar EPM gracias a su experiencia en gestión de activos energéticos, infraestructura, relación con usuarios y prestación de servicios públicos.

La confiabilidad del sistema eléctrico también se aborda a través de la **validación experimental de torres de transmisión sometidas a grandes cargas.** Este artículo presenta pruebas a escala real que permiten contrastar el diseño teórico con el comportamiento físico de las estructuras, aportando evidencia para garantizar su estabilidad, optimizar recursos y fortalecer la seguridad de la infraestructura crítica que sostiene la continuidad del servicio de energía.

En esta misma línea de continuidad y calidad del servicio, el **modelo predictivo para la gestión de vegetación en redes de distribución eléctrica** muestra cómo la analítica avanzada, la inteligencia artificial y los datos geoespaciales pueden transformar la planeación del mantenimiento. Al anticipar el momento óptimo de intervención y priorizar zonas de riesgo, esta herramienta contribuye a reducir fallas, optimizar recursos y avanzar hacia una operación más preventiva, eficiente y sostenible.

La innovación también se expresa en el fortalecimiento de capacidades internas. El artículo sobre el **Taller Industrial 4.0** presenta la evolución de este espacio como una estrategia para robustecer la autonomía tecnológica, la confiabilidad operativa y la sostenibilidad de los activos de generación. A través de manufactura avanzada, ingeniería inversa, escaneo 3D, soldadura robotizada y ensayos no destructivos, el taller se proyecta como un eje clave para responder con mayor oportunidad, trazabilidad y conocimiento propio a los retos del mantenimiento industrial.

Finalmente, esta edición presenta un **modelo de base fenomenológica para estimar la autonomía en estaciones de regasificación de Gas Natural Licuado,** una herramienta orientada a fortalecer la planeación de despachos, anticipar riesgos de desabastecimiento y mejorar la toma de decisiones operativas. A partir del uso de datos, señales de campo y modelos físicos, el artículo evidencia cómo la transformación digital también contribuye a la continuidad, eficiencia y confiabilidad en la prestación del servicio de gas.

En conjunto, los artículos de esta edición nos muestran una EPM que aprende de sus propios retos, que convierte la experiencia técnica en conocimiento compartido y que entiende la innovación como una práctica cotidiana al servicio de la sostenibilidad, la eficiencia y el bienestar de las comunidades. Esperamos que estas páginas inspiren nuevas conversaciones, fortalezcan la gestión institucional y sigan abriendo caminos para construir soluciones que conecten el presente con los desafíos del futuro.

**Comité Editorial
Revista EPM**



Alcantarillado por vacío: Instrumento para gestionar brechas en cobertura de alcantarillado y zonas de expansión en el eje Turbo – Apartadó

Vacuum sewerage: Instrument to manage gaps in sewerage coverage and expansion areas on the Turbo–Apartadó axis

PÁG 8



Integración del patrimonio cultural en infraestructura hídrica: manejo de un hallazgo fortuito en la reposición del acueducto variante Monjita–Batallón

Integration of cultural heritage in water infrastructure: management of a chance find during the replacement of the Monjita–Batallón aqueduct line

PÁG 20



Metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua

Methodology for articulating public, private, academic and citizen actors as a water governance scheme in Latin American urban water basins

PÁG 36



Generación de energía eléctrica en redes del sistema de acueducto empleando bombas centrífugas como turbinas

Generation of electric power in the water supply system networks using centrifugal pumps as turbines

PÁG 50



Válvula pico de pato en descargas sumergidas

Duckbill valve in submerged discharges

PÁG 66



Movilidad eléctrica en Colombia: Potencial, desafíos y rol estratégico de EPM

Electric mobility in Colombia: Potential, challenges, and strategic role of EPM

PÁG 87



Esbeltas, pero extraordinariamente resistentes: validación experimental de torres de transmisión sometidas a grandes cargas

Slender but highly resistant: experimental evaluation of transmission towers subjected to high load demands

PÁG 98



Modelo predictivo para la gestión de vegetación en redes de distribución eléctrica

Predictive model for vegetation management in power distribution networks

PÁG 115



Taller Industrial 4.0: Evolución tecnológica, formación de talento y confiabilidad para la generación de energía

Industrial Workshop 4.0: Technological Evolution, Talent Development, and Reliability for Power Generation

PÁG 132



Modelo de base fenomenológica del proceso de regasificación de Gas Natural

Phenomenological model of the natural gas regasification process

PÁG 148



Alcantarillado por vacío: Instrumento para gestionar brechas en cobertura de alcantarillado y zonas de expansión en el eje Turbo – Apartadó

Vacuum sewerage: Instrument to manage gaps in sewerage coverage and expansion areas on the Turbo–Apartadó axis

**Claudia
Figueroa Vanegas**

Área Centro de Control e Ingeniería de
Operación Acueducto y Alcantarillado, EPM

claudia.figueroa@epm.com.co

Resumen

La entrada en operación de Puerto Antioquia y del túnel del Toyo convertirá la región de Urabá en uno de los principales nodos económicos del país, lo que generará nuevas empresas y empleos. Estos hechos traen enormes desafíos a nivel regional, especialmente en temas como ordenamiento territorial, acceso a servicios básicos y transporte, porque se prevé un crecimiento poblacional acelerado a lo largo del eje Turbo–Apartadó entre 2025 y 2040. Esta dinámica poblacional trae consigo la necesidad de implementar soluciones

que respondan a las nuevas demandas y contribuyan al cierre de brechas, entre otros aspectos, en materia de alcantarillado. El sistema de alcantarillado por vacío se proyecta como un instrumento de gestión, ya que responde de manera adecuada y técnica a los desafíos que presentan los suelos de Urabá, caracterizados por niveles freáticos altos, mala calidad, mínimas pendientes y zonas costeras, condiciones que en ocasiones inviabilizan el sistema por gravedad.

Palabras clave:

Alcantarillado por vacío, Nivel freático alto, Sistemas descentralizados, Estación de vacío, Brechas de cobertura de servicios, Crecimiento urbano acelerado.

Keywords:

Vacuum sewerage, High water table, Decentralized systems, Vacuum station, Service coverage gaps, Accelerated urban growth.

Introducción

Puerto Antioquia inicia operaciones en firme en el año 2026, con una capacidad para movilizar anualmente 7 millones de toneladas de carga y la creación de 17,000 empleos directos e indirectos, lo que traerá un alto crecimiento poblacional, con tendencia a ubicarse mayoritariamente en el eje Apartadó-Turbo y, en menor proporción, en los municipios de Carepa y Chigorodó. Se suma a esta dinámica la finalización de la construcción del túnel del Toyo que, además de acortar el tiempo de viaje, incrementará la demanda y el crecimiento de servicios hoteleros y asociados, hechos que conllevarán a la expansión de los servicios de agua potable y alcantarillado existentes o la construcción de nuevos sistemas para sustentar dicho crecimiento. Esto requerirá la planeación y análisis de si se estructuran servicios centralizados con alcance regional o descentralizados, todo ello de acuerdo con las ventajas e inconvenientes identificados.

Un caso concreto de este tipo de análisis correspondió al realizado para materializar un sistema robusto de agua potable de alcance regional, para atender las dificultades que tienen actualmente algunas de las captaciones locales. El proyecto de acueducto denominado Sable, actualmente en fase de diseño, contempla la captación de 1 m³/s de agua cruda del río León, en Turbo, con lo cual se espera dotar de agua potable a cerca de 245.000 habitantes localizados en Turbo, Apartadó y Carepa, así como en algunos corregimientos ubicados entre estas cabeceras. Una vez ejecutado, este proyecto disminuirá la brecha en la prestación del servicio de agua potable y apalancará el desarrollo de la región.

Frente a la consolidación del proyecto Sable, surgen las preguntas: ¿cómo se está analizando la gestión del alcantarillado,

que presenta mayores brechas en la región? ¿es válido analizar un sistema de alcantarillado regional y centralizado, dadas las características de los suelos del eje Turbo-Apartadó-Carepa? ¿O tendrá mayor viabilidad estructurar sistemas descentralizados que complementen los existentes para habilitar zonas de expansión y estén acordes con las densidades poblacionales, las características de los suelos de Urabá y la capacidad económica para ejecutar nuevas inversiones?

Estas preguntas son pertinentes porque la legislación colombiana, de acuerdo con el Decreto 1077 de 2015, establece que para contar con el servicio de acueducto se debe estar conectado al sistema de alcantarillado, a menos que se cumplan requisitos especiales, con el fin de gestionar adecuadamente las aguas residuales y evitar la contaminación de las fuentes de agua.

Mayor relevancia tiene el análisis y las respuestas a estos interrogantes, por cuanto el aumento poblacional en la región tendrá inicialmente un crecimiento acelerado y luego tasas más constantes, por lo que la nueva infraestructura debe desarrollarse a ritmos acordes a la población. Es conocido que la construcción de alcantarillado en Urabá requiere mayores tiempos debido a la calidad de sus suelos.

Se espera que el modelo de crecimiento poblacional de algunas localidades del eje Apartadó-Turbo se asemeje al que tuvo Buenaventura en los inicios del puerto marítimo. Según los datos del informe de la Alcaldía Distrital de Buenaventura y Cámara de Comercio de Buenaventura, (2013) sobre Buenaventura, entre el inicio del puerto y los primeros doce años, la población urbana creció el 37 %. Según lo anterior, podría

asumirse en general que el crecimiento de la población del eje Apartadó-Turbo en los próximos 10 años tenga un incremento cercano al 15 %, escalonado y diferenciado para las siguientes décadas, que no obedece a métodos exponenciales o geométricos, e incluso difiere del decrecimiento registrado en algunos poblados del país. Este porcentaje se propone menor, teniendo en cuenta que, a diferencia de Buenaventura, el eje en mención ya está consolidado económicamente y Puerto Antioquia entra a potenciarlo.

Se resalta que este modo de crecer consolidará el proceso de peri-urbanización que ya se evidencia en los municipios de Apartadó y Turbo, difuminando los límites entre lo rural y lo urbano y/o la conurbación de poblados como Currulao, El Tres, Riogrande, Nueva Colonia, ubicados en el eje Apartadó-Turbo. (Cano y Durán, 2025). En la siguiente figura se ilustra la situación anteriormente descrita y se observa la tendencia a construir viviendas de un solo nivel, incluso en pequeñas parcelas.



Figura 1. Poblados ubicados entre las cabeceras de Apartadó y Turbo.

Urge gestionar el agua residual de manera oportuna, si se tiene en cuenta que los nuevos desarrollos de vivienda tendrán resuelto el suministro de agua potable con el proyecto Sable. Por esta razón, se hace prioritario involucrar en los diferentes análisis de soluciones para el tema de saneamiento alternativas con otros tipos de sistemas de alcantarillado diferentes al de gravedad, que permitan cerrar la brecha y atender las expansiones, y así contar con nuevos proyectos de alcantarillado que entren a operar oportunamente, haciendo viables, desde lo técnico y lo económico, los nuevos desarrollos.

En Colombia es generalizada la construcción de sistemas de alcantarillado por gravedad, y en menor cantidad, de sistemas a presión. Esto se debe a que las zonas que cuentan con mayores coberturas de alcantarillado están ubicadas en sitios con geografías favorables para transportar el agua por gravedad o con suelos

estables que no requieren cimentaciones especiales para la instalación de las redes. En el caso de las ciudades y municipios ubicados en territorios con menores pendientes, los sistemas por gravedad se complementan con estaciones de bombeo de aguas residuales (EBARs), para consolidar la recolección y el transporte del agua residual hasta el sitio final de tratamiento.

La combinación del sistema por gravedad con las EBARs es frecuente en la región de Urabá, como en el caso del Distrito de Turbo, que cuenta con varias de estas estaciones. Sin embargo, para expandir la cobertura del servicio de alcantarillado a todas las zonas del Distrito, la implementación del sistema por gravedad en algunas de ellas sería muy costoso o incluso no aplicaría debido a las restricciones de zonas palafíticas, costeras y a suelos planos con niveles freáticos muy altos.

1. Alcantarillado por vacío

Para enfrentar el reto de este tipo de suelos, se desarrolló y consolidó en Europa, a mediados del siglo XX, el sistema de alcantarillado por vacío (AxV), mediante el cual es posible dotar del servicio de alcantarillado a poblaciones ubicadas en zonas con las características anteriormente indicadas. Este sistema se ha convertido en una alternativa confiable, eficiente, de rápida construcción y ha sido instalado en muchos países del mundo, incluso en zonas costeras de México.

Con el presente ensayo se plantea que, implementando AxV, bien sea como complemento de los sistemas existentes o como sistemas descentralizados, es posible atender la demanda del servicio de saneamiento que traerá el crecimiento poblacional del eje Apartadó–

Turbo y, sobre todo, construir en menores tiempos sistemas eficientes y económicos, que en el largo plazo tendrán costos razonables de operación y mantenimiento.

1.1 Definición

¿Y qué es el sistema de alcantarillado por vacío? Es un sistema de transporte de aguas residuales que utiliza la presión negativa o vacío generado por un conjunto de bombas instaladas en una estación de vacío para succionar los residuos a través de una red de tuberías. Es un sistema alternativo cuando las condiciones del territorio hacen inviable la construcción del sistema tradicional por gravedad o por presión. Se implementa en terrenos muy planos, rocosos, o con niveles freáticos muy altos y/o

mala calidad del suelo. No requiere de grandes excavaciones, utiliza menores diámetros que el sistema por gravedad y evita infiltraciones por estar presurizado.

1.2 Componentes y funcionamiento del AxV

El sistema por vacío se compone básicamente de los elementos que se indican en la siguiente figura. En ella se ilustran de manera general

sus componentes, todos ellos diseñados y contruidos de acuerdo con los caudales de aguas residuales generados, siendo un sistema destinado exclusivamente a recoger, transportar y almacenar aguas residuales.

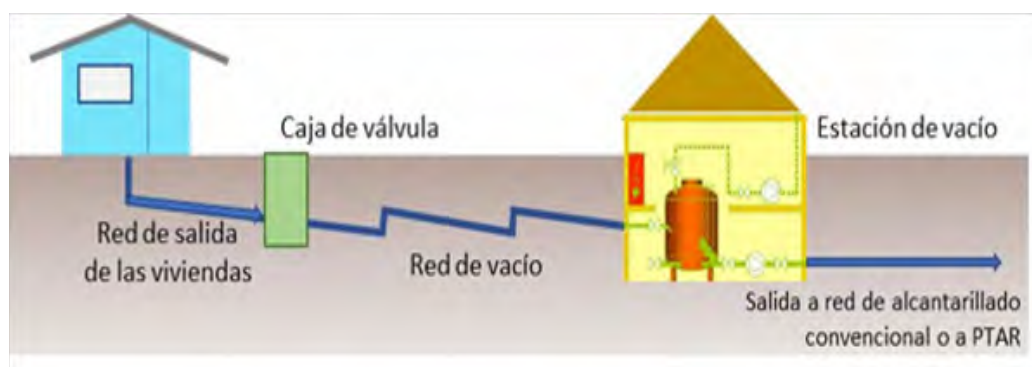


Figura 2. Esquema básico de un sistema de alcantarillado por vacío.

A continuación se ilustran y describen algunos de los elementos del sistema, de manera individualizada.

1.2.1 Caja de válvula y válvula



Figura 3. Ejemplos de cajas y de válvula para el AxV, sin instalar e instaladas.

1.2.2 Red de vacío

Compuesta por tuberías instaladas en forma de sierra para generar vacío, instaladas a una profundidad entre 0.80 m y 1.20 m, generalmente en polietileno. La red cuenta con válvulas para realizar subcircuitos o áreas menores, con el fin de controlar el flujo cuando sea necesario y hacer reparaciones o extensiones del sistema.

1.2.3 Estación de vacío

Compuesta por conjuntos de bombas para succión e impulsión, tanques de almacenamiento, controles, filtros y servicios auxiliares como plantas de energía. En términos generales, tiene mucho parecido a las EBARs, solo que, en este caso, hay un conjunto adicional de bombas para generar la presión negativa.



Figura 4. Aspectos generales de la Estación de vacío #59 en Charlotte County, Estados Unidos.

1.3 ¿Cómo funciona?

1.3.1 Recolección del agua de las viviendas

Las aguas residuales fluyen por gravedad a través de la conexión domiciliar desde la vivienda o edificación hasta una caja ubicada en el exterior que contiene una válvula. Esta caja es hermética y puede recibir las aguas residuales de una o varias viviendas, de acuerdo con el diseño.

1.3.2 Generación de vacío

Las bombas de estación de vacío generan la presión negativa que recorre toda la red de tuberías.

1.3.3 Transporte del agua residual

Al acumularse un determinado volumen de agua en la caja, la válvula allí instalada se abre

y el vacío succiona la mezcla de aire y agua hacia la red principal, transportándola hasta la estación de vacío, donde se acumula en tanques de almacenamiento.

1.3.4 Impulsión

En la estación de vacío, las bombas encargadas de la impulsión llevan el agua residual hacia la planta de tratamiento cuando se trata de un sistema descentralizado, o hacia una cámara de inspección de un sistema existente cuando el AxV complementa un sistema por gravedad existente.

1.4 Características principales

1.4.1 Instalación sencilla

Tuberías poco profundas en zanjas estrechas y con cimentaciones sencillas dispuestas

en perfil de diente de sierra para adaptarse al terreno, sin necesidad de cámaras de inspección profundas.

1.4.2 Económico

Menores costos de construcción en terrenos difíciles y planos. La red de transporte oscila entre 0.80 m y 1.20 m de profundidad, por lo que en movimientos de tierra y llenos la diferencia es considerable.

1.4.3 Menores tiempos de construcción

Por no requerir de cimentaciones especiales, excavaciones profundas ni tuberías de grandes diámetros, su instalación toma menos tiempo. Este aspecto también genera menores impactos ambientales y sociales.

1.4.4 Costos de operación

Menores costos de operación por no recoger ni transportar aguas lluvias, tampoco hay

infiltraciones ni fugas por el tipo de sistema. Cualquier fuga es detectada desde la estación de vacío.

1.4.5 Confiabilidad

Fáciles de instalar, mantener y controlar, con una detección sencilla de cualquier daño o fuga.

Si bien en Colombia hay muchas zonas aptas para implementar el AxV, hasta la fecha no se cuenta con sistemas de AxV construidos para la gestión de aguas residuales domésticas. Sin duda, en algunas industrias y con menores diámetros se debe hacer uso de esta tecnología para transportar fluidos y sólidos, por ser eficiente y confiable.

2. Análisis de sistemas por gravedad

Con el fin de facilitar la comprensión de por qué es conveniente la inclusión de la alternativa del AxV en circunstancias como la de los suelos descritos anteriormente, se desarrolla este numeral.

2.1 Cimentaciones especiales para niveles freáticos altos

Cuando los suelos tienen niveles freáticos altos, entre 0.80 m y 1.50 m, y son de mala calidad, como es el caso de algunas zonas

en Urabá, es posible construir sistemas de alcantarillado por gravedad. Sin embargo, es necesario diseñar cimentaciones especiales para garantizar la estabilidad de la tubería y, además, simular su espesor para que el empuje del agua no la afecte. Una cimentación típica para estas condiciones de suelo se ilustra en la siguiente figura.

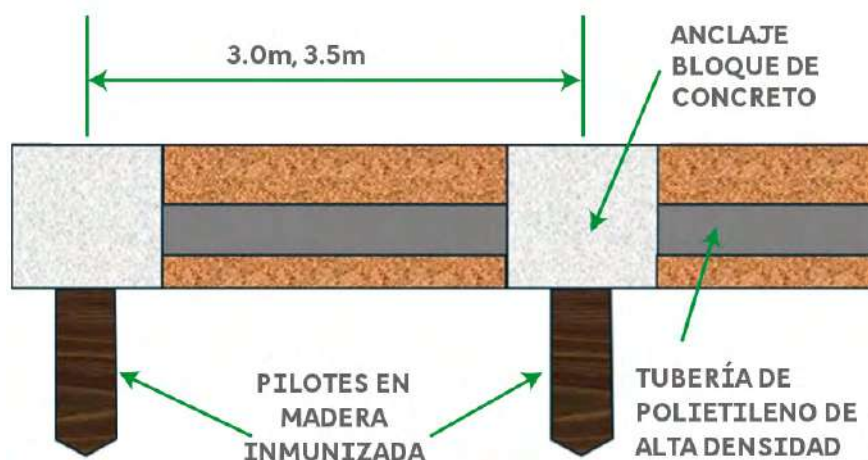


Figura 5. Esquema típico de cimentaciones para suelos con niveles freáticos altos y de mala calidad.

2.2 Caso analizado en el Distrito de Turbo para implementar AxV

Un caso analizado en la región de Urabá para implementar el AxV, corresponde a los barrios Pescadores 1 y 2 del Distrito de Turbo, que corresponden a una población cercana a 700 familias, desplazadas en su mayoría del Chocó, que se asentaron en zona de manglar con construcciones palafíticas hace más de 30 años y que, con el paso del tiempo, fueron realizando llenos artesanales con madera, tierra y escombros. Con la ejecución del proyecto *Acueducto Aéreo y Senderos de Vida*, finalizado en el año 2019 por el Grupo EPM, se suministró el servicio de acueducto en estos dos barrios, quedando por implementar el servicio de alcantarillado.

Posterior a la entrada en funcionamiento del acueducto aéreo, se estudiaron y analizaron

las condiciones del territorio y sus limitantes, tales como el alto nivel freático, la composición y estabilidad del suelo y la imposibilidad de cimentar tuberías en las zonas palafíticas. Luego de los análisis preliminares, se contó con la asesoría de una firma extranjera para validar la pertinencia del AxV como alternativa en Pescadores 1 y 2, concluyendo que es la única opción viable técnicamente para recoger las aguas residuales.

Implementando el AxV en los barrios Pescadores 1 y 2 se haría la recolección del agua residual para, posteriormente, entregarla al sistema por gravedad existente. De este modo, el AxV se proyecta como complemento al sistema por gravedad, y no como un sistema descentralizado. En la siguiente figura se presenta el esquema de las redes por vacío en medio del manglar y la conexión al sistema por gravedad.



Figura 6. Planteamiento del AxV para los barrios Pescadores 1 y 2, del Distrito de Turbo.

Durante el análisis del AxV para los barrios Pescadores 1 y 2, se validó el tema de costos para construir y operar el sistema, realizando un comparativo con el sistema por gravedad —como si ese sistema pudiera construirse—. El sistema por vacío presenta los siguientes ahorros: entre 50 % y 60 % en excavaciones y en llenos, porque requiere menos excavaciones. Esto, a su vez, impacta la huella de carbono, porque demanda excavar menos materiales para conformar llenos y transportar el respectivo material, evitando la explotación en cantera de cerca de 4.065 m³ de materiales. También se evitan alrededor de 1.070 viajes para recoger escombros y transportar materiales de lleno.

También, se hizo el comparativo entre una EBAR y una estación de vacío, y se determinó que ésta última es más eficiente en su funcionamiento que el sistema de presión. En resumen, presenta ahorros durante la construcción y la operación. El comparativo de costos se realizó entre una EBAR existente en el municipio de Santa Fe de Antioquia y una estación de vacío típica en Estados Unidos, encontrando que la estación de vacío tiene un 4 % menos de costos. Además de consolidarse como el único sistema posible para cerrar la brecha de cobertura, presenta ventajas económicas en construcción y operación.

Conclusiones

Para gestionar adecuadamente las aguas residuales en la región de Urabá, en zonas con niveles freáticos altos, se debe incluir en los análisis el AxV, por ser un sistema eficiente que requiere menos tiempo de ejecución y menores costos en la fase de operación y mantenimiento. Además, en algunos casos puede constituirse en el único sistema viable.

El AxV es un sistema confiable, con muchos casos construidos y documentados en el mundo, que cuenta con normas de diseño, construcción y operación. Por lo tanto, al implementarlo y *tropicalizarlo* en la región de Urabá, se parte de experiencias y recomendaciones que, sin duda, facilitarán su implementación.

Hasta la fecha, los análisis de alternativas para implementar sistemas de alcantarillado en la región de Urabá, no han incluido el AxV, lo que ha llevado a que, en los casos de suelos con niveles freáticos altos, se construyan redes con cimentaciones especiales que, además de hacerlas más costosas y difíciles de construir, implican mayores recursos durante la operación, porque en general se diseñan con

pendientes muy bajas. Incluso, en algunos sistemas en los que no se consideraron los efectos del nivel freático, las redes han sufrido el fenómeno de flotación, lo que afecta los alineamientos vertical y horizontal e incide en su correcto funcionamiento.

Es un hecho que muchas de las zonas de expansión o de cierre de brecha en Urabá, van a requerir de sistemas que incluyan EBAR, constituyéndose en sistemas descentralizados que complementan el sistema principal, es precisamente en estos casos en los que el AxV ofrece las mayores ventajas y debe ser la primera opción que se analice.

En general, para los prestadores del servicio de alcantarillados de la región de Urabá, la operación de las EBARs es conocida, lo que favorece la transición hacia el AxV con su estación de vacío, esto permitiría que en la región se puedan construir AxV que sirvan de pilotos para replicar la experiencia en otras zonas del país.

Referencias

- Alcaldía Distrital de Buenaventura y Cámara de Comercio de Buenaventura. (2013). *Anuario estadístico Buenaventura en cifras 2011*. Alcaldía Distrital de Buenaventura. <https://test.rb.gy/317>
- Cano, Y. y Durán, D. (2025). *Impactos del crecimiento urbano en la configuración socioespacial desigual urbana en el municipio de Apartadó Antioquia entre los años 2011 al 2023*. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional de la Universidad de Antioquia. <https://hdl.handle.net/10495/48139>
- Decreto 1077 de 2015 [Presidencia de la República]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. 01 de septiembre de 2025.

Cómo citar este artículo:

Figuerola Vanegas, C. (2026). Alcantarillado por vacío: Instrumento para gestionar brechas en cobertura de alcantarillado y zonas de expansión en el eje Turbo – Apartadó. *Revista EPM*, (26), 8-19.



Integración del patrimonio cultural en infraestructura hídrica: manejo de un hallazgo fortuito en la reposición del acueducto variante Monjita-Batallón

Integration of cultural heritage in water infrastructure: management of a chance find during the replacement of the Monjita-Batallón aqueduct line

**Andrea Carolina
Chía Góngora**

Gerencia de Acueducto y Alcantarillado /
Área Ambiental y Social, EPM

andrea.chia@epm.com.co

Resumen

Durante la ejecución de las obras civiles para la variante de la conducción de acueducto Monjita-Batallón se presentó un hallazgo arqueológico fortuito, que activó los protocolos institucionales de gestión patrimonial de EPM, dado que el proyecto no contemplaba un Programa de Arqueología Preventiva (PAP). La articulación entre la supervisión técnica de EPM, el contratista Redyco y el componente arqueológico especializado permitió documentar materiales con cronologías que

abarcan desde finales del siglo XVIII hasta el periodo contemporáneo, en cumplimiento de la normativa vigente. La intervención garantizó la salvaguarda del patrimonio cultural sin afectar significativamente el cronograma del proyecto. Esta experiencia evidencia que la gestión oportuna y articulada de hallazgos fortuitos constituye una buena práctica empresarial que fortalece la sostenibilidad territorial y mitiga riesgos normativos y reputacionales.

Palabras clave:

Hallazgo arqueológico fortuito, Gestión patrimonial, Infraestructura hídrica, Sostenibilidad territorial, Cumplimiento normativo, Articulación institucional.

Keywords:

Chance archaeological find, Heritage management, Water infrastructure, Territorial sustainability, Regulatory compliance, Public utilities.

Introducción

La reposición y modernización de redes de acueducto en entornos urbanos consolidados constituye una tarea esencial para garantizar continuidad, calidad y seguridad en la prestación del servicio. Sin embargo, este tipo de intervenciones no ocurre en un vacío territorial: se ejecuta sobre capas superpuestas de historia, transformaciones del paisaje y ocupaciones humanas sucesivas. En Medellín, y particularmente en las riberas del río Medellín, estas capas se expresan tanto en infraestructura contemporánea como en depósitos culturales que pueden permanecer preservados bajo superficies duras, rellenos antrópicos y obras de canalización.

En este marco se inscribe el proyecto Construcción de las obras civiles para la variante de la conducción de acueducto Monjita-Batallón, una intervención orientada a reubicar y optimizar un tramo estratégico de la línea de conducción, mediante obras civiles asociadas a excavaciones profundas, nichos de investigación, pozos y actividades complementarias de conexión con redes existentes. La obra se desarrolla en un entorno de alta complejidad operativa, por su cercanía a la Avenida Regional y al sistema vial metropolitano y con condiciones sociales dinámicas que exigen una gestión permanente del riesgo y de la coordinación interinstitucional.

Durante la ejecución de estas actividades, y pese a que el proyecto no contemplaba un Programa de Arqueología Preventiva (PAP), se presentó un hallazgo arqueológico fortuito que activó los procedimientos institucionales

de EPM y los lineamientos del Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) para la atención de este tipo de eventos. El episodio evidenció un desafío frecuente en proyectos de infraestructura hídrica: cómo sostener la continuidad operativa sin comprometer la salvaguarda del patrimonio cultural, garantizando trazabilidad técnica, cumplimiento normativo y manejo responsable del territorio.

El presente artículo documenta dicha experiencia como un caso aplicado de integración entre gestión patrimonial e infraestructura, resaltando la articulación entre la supervisión técnica de EPM, el contratista, los componentes sociales y el acompañamiento arqueológico especializado. Además de exponer el procedimiento de atención del hallazgo, se presentan los principales resultados del registro arqueológico y los aportes institucionales derivados del proceso, demostrando que la activación oportuna de protocolos no solo mitiga riesgos legales y reputacionales, sino que también fortalece la sostenibilidad territorial y la cultura organizacional orientada a la prevención.

1. Localización del proyecto

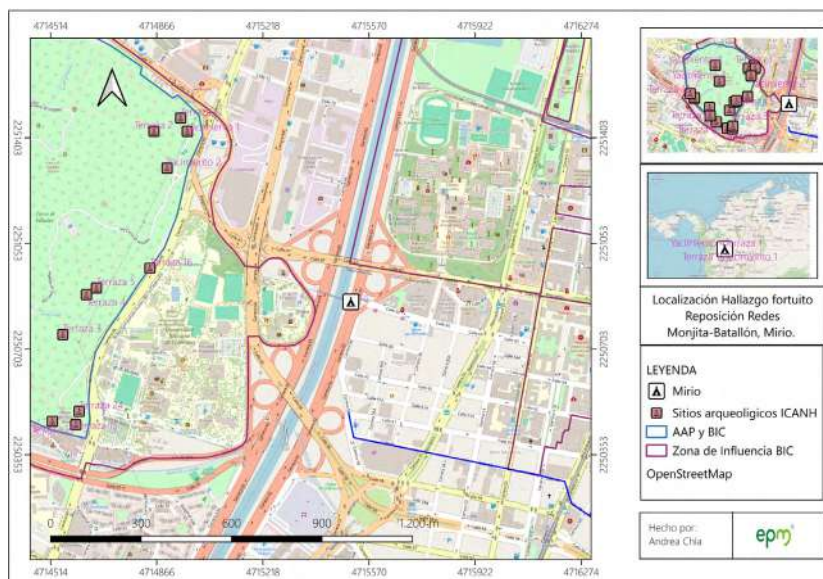


Figura 1. Localización hallazgo fortuito Aula Ambiental del Instituto Mi río.

El hallazgo arqueológico fortuito se localizó en la margen oriental del río Medellín, en inmediaciones del Puente Peatonal al Aula Ambiental del Instituto Mi Río, específicamente contiguo al carril oriental de la Avenida Regional en sentido sur-norte, dentro del área urbana del municipio de Medellín.

Administrativamente, el punto corresponde al barrio El Chagualo, comuna 10, La Candelaria, en el centro de la ciudad. El contexto inmediato del hallazgo se ubica en una franja intervenida por infraestructura vial de alto flujo vehicular y superficies peatonales duras, próxima a las riberas del río Medellín (ver figura 1).



Figura 2. Nicho de investigación Hallazgo fortuito.

2. Metodología o desarrollo

El área donde se produjo el hallazgo fortuito se ubica en un entorno urbano de alta complejidad social y operativa, caracterizado por la presencia recurrente de habitantes de calle, dinámicas asociadas al microtráfico y un elevado flujo vehicular debido a su proximidad inmediata a la Avenida Regional. Estas condiciones configuraron un escenario de riesgo que influyó directamente en la planeación y ejecución de las actividades arqueológicas.

Durante la excavación manual de un nicho de investigación de 2 × 2 m (ver figura 2), realizada con el propósito de verificar la conexión del tubo proyectado y su articulación con el sistema existente de agua y alcantarillado, así como de descartar interferencias con redes activas en el área destinada al pozo del túnel liner, el personal de obra identificó la presencia de restos óseos a 1,60 m de profundidad. Ante esta situación, se informó de manera inmediata a la supervisión de EPM, la cual a su vez notificó a la arqueóloga del área ambiental y social.

De acuerdo con la información disponible, el personal de obra habría participado en la inducción impartida por EPM, en la cual se explicaron los procedimientos para la identificación de posibles evidencias arqueológicas en campo y los mecanismos de reporte correspondientes.

A partir de este reporte, la intervención arqueológica se desarrolló bajo estrictos criterios de seguridad y control operativo, manteniendo una articulación permanente entre el equipo técnico de EPM, la interventoría y el contratista Redyco. A la llegada al sitio, desde la supervisión arqueológica se realizó una evaluación preliminar del contexto expuesto por la excavación mecánica del nicho. Posteriormente, se procedió a efectuar una limpieza controlada del perfil con el fin de garantizar una lectura estratigráfica adecuada y determinar la naturaleza del hallazgo.

Tras la identificación de materiales culturales durante actividades de excavación reportadas en el sector del puente vehicular de Aula Ambiental del Instituto Mi Río (ver figura 1), se activaron los lineamientos establecidos por el Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH) para la atención de hallazgos fortuitos. La metodología aplicada comprendió:

- Suspensión inmediata de actividades en el punto específico.
- Inspección técnica preliminar.
- Protección y delimitación del área.
- Registro mediante ficha única de reporte.
- Notificación formal a la autoridad competente ICANH (Ver figura 3. Geovisor ICANH).

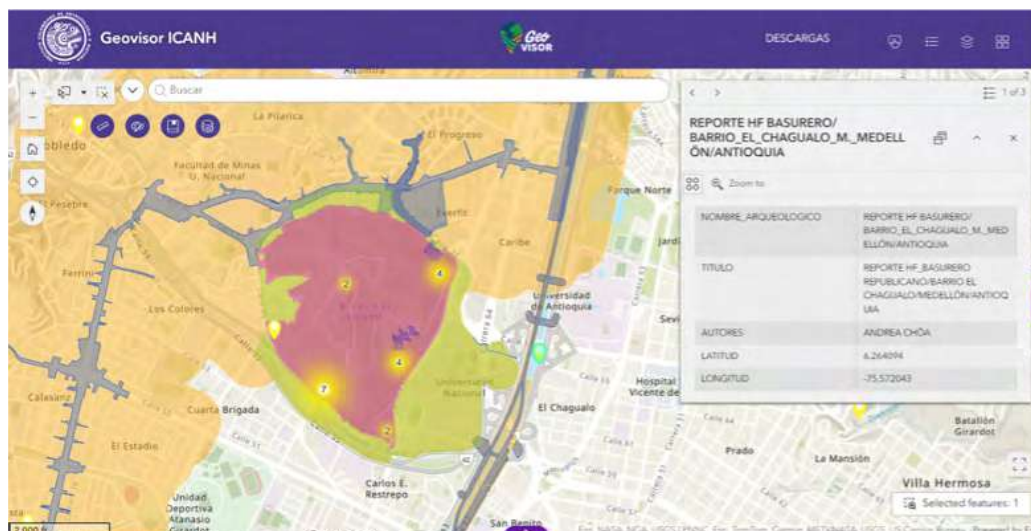


Figura 3. Reporte hallazgos arqueológicos señalado en el pin verde. Tomado de: (ICANH, s.f.).

La gestión se desarrolló con una articulación permanente entre la supervisión técnica de EPM y el contratista Redyco. En este marco, el contratista gestionó la vinculación de la arqueóloga Pilar Morato, especialista en análisis de restos óseos, quien trabajó en coordinación con la arqueóloga de EPM para fortalecer la identificación técnica de los materiales.

El análisis morfológico preliminar de los restos óseos se realizó siguiendo criterios osteológicos comparativos lo que permitió descartar su naturaleza humana y confirmar su origen animal, asociado a dinámicas domésticas.

2.1. Desarrollo de la intervención en campo

La intervención se ejecutó mediante excavaciones verticales (nichos) con control estratigráfico por niveles de 10 cm, lo que permitió registrar la distribución y profundidad de los materiales culturales.

Las excavaciones alcanzaron profundidades entre 5 y 7 m, dependiendo de las condiciones técnicas del proyecto.

Se realizaron las siguientes actividades:

- Registro sistemático en fichas de campo.
- Documentación fotográfica.
- Lectura y dibujo de perfiles.
- Georreferenciación mediante puntos GPS.
- Extracción de muestras de suelo para análisis especializados.
- Clasificación, embalaje y traslado de materiales al laboratorio.

Los materiales recuperados incluyeron cerámica, loza, vidrio, metales, restos óseos animales y otros elementos asociados a dinámicas de descarte urbano entre los siglos XVIII y XX, con presencia de elementos cuya cronología se remonta al periodo republicano tardío (ver figura 4).



Figura 4. Materiales de interés arqueológico hallados en el rasgo del Nicho 1.

La intervención se desarrolló bajo el acompañamiento permanente del componente arqueológico por parte del contratista Redyco y la arqueóloga Pilar Morato en las fases críticas de excavación, especialmente en sectores con superficies duras y alto flujo peatonal y vehicular, garantizando condiciones de seguridad y control técnico.

El análisis de los 4.600 fragmentos recuperados, entre materiales óseos, loza fina del siglo XVIII, materiales líticos y otros elementos asociados, permite interpretar este hallazgo fortuito como un documento histórico. La recuperación de estos materiales bajo las condiciones anteriormente mencionadas, demuestra la capacidad técnica del equipo de Redyco en articulación con la supervisión técnica de EPM para ejecutar obras civiles de alta complejidad (Variante Monjita-Batallón), al tiempo que contribuye al rescate de la memoria histórica presente en las riberas del Río Medellín. Este rigor científico en el procedimiento, sino que garantiza que la empresa no solo cumple con

la Ley 1185 de 2008, sino que también aporta nuevo conocimiento a la academia antioqueña.

2.2. Análisis técnico del inventario arqueológico

La recuperación de fragmentos de loza fina y envases de vidrio en la variante Monjita-Batallón no constituye un hallazgo aislado, sino un indicador arqueológico de la inserción de Antioquia en las redes del comercio transatlántico durante los siglos XVIII y XIX. Ante la limitada industria manufacturera local de la época, la sociedad del Valle de Aburrá dependía de bienes importados de centros industriales europeos, principalmente de las cuencas alfareras de Staffordshire, Inglaterra.

La recuperación de fragmentos de loza fina y envases de vidrio en la variante Monjita-Batallón no constituye un hallazgo aislado, sino un indicador arqueológico de la inserción del Valle de Aburrá en redes de comercio

transatlántico durante los siglos XVIII y XIX. La presencia de lozas industriales como *Pearlware* y *Whiteware* con decoraciones transfer print se asocia a procesos documentados de cambio en los patrones de consumo doméstico en América Latina, donde la cerámica industrial europea reemplazó progresivamente las producciones locales (Society for Historical Archaeology [SHA], 2024).

La datación de estos materiales se apoya en criterios técnicos de clasificación cronológica de lozas industriales del siglo XIX, lo que permite situar el contexto del hallazgo en un periodo de transición hacia la modernización republicana.

La logística de estos bienes implicaba una compleja cadena de transporte: los objetos cruzaban el Atlántico en barcos de vapor, desembarcaban en puertos del Caribe y remontaban el Río Magdalena, descrito por el presidente José Hilario López a mediados del siglo XIX como *el primer interés industrial de la Nueva Granada*, para luego ser transportados a lomo de mula hasta Medellín (Sánchez, 2022). Complementariamente, el análisis de los envases de vidrio soplado y en molde hallados en el Nicho 1 se sustenta en los protocolos de identificación de la Society for Historical Archaeology, confirmando una procedencia mayoritariamente europea y norteamericana vinculada a la industria farmacéutica y de licores.

Finalmente, la presencia masiva de material óseo con diversos grados de termoalteración fue analizada bajo los métodos osteológicos de Ubelaker y White et al.¹, permitiendo diferenciar restos de fauna de posibles elementos humanos y confirmar la existencia de contextos de disposición de residuos domésticos en las riberas del Río Medellín.

La intervención en el sector del Puente del Aula Ambiental del Instituto Mi río permitió

recuperar una muestra diversa que refleja la estratigrafía cultural del Valle de Aburrá. El inventario se desglosa en las siguientes categorías principales:

2.2.1. Material óseo (Bioarqueología)

Es el grupo que contiene un horizonte relevante de presencia en el hallazgo con un total de 465 fragmentos recuperados.

- **Distribución:** La mayor concentración se halló en el Nicho 1 (279), seguido por el Nicho 2 (115) y el Nicho 3 (71).
- **Análisis de Termoalteración:** siguiendo la escala técnica de Etzeberria² se identificó material en estados:
 - Grado 1 (N-Quemado): huesos en estado natural.
 - Grado 3 (Carbonizado): coloración negra, indicando exposición directa al fuego en contextos domésticos o de disposición de residuos.
 - Grado 4-5 (Calcinado): coloración blanca/grisácea, indicando altas temperaturas y pérdida de colágeno.
- **Importancia:** la presencia de estos restos sugiere áreas de desecho de cocina o actividades de limpieza de terrenos en periodos históricos.

2.2.2. Material cerámico e histórico (Cultura material)

El informe destaca la presencia de loza fina decorada (ver figura 5), clave para la datación del sitio. Aproximadamente 3.368 fragmentos.

- **Tipologías:** se identificaron fragmentos de Pearlware (con su característico tinte azulado en el vidriado) y Whiteware (loza blanca industrial).
- **Decoraciones:** fragmentos con técnicas de Transfer Print (impresión por transferencia) en colores azul, rojo y verde, con motivos florales y geométricos.
- **Cronología:** estos materiales sitúan el contexto entre finales del siglo XVIII y el siglo XIX, periodo en el que estas lozas británicas comenzaron a desplazar a la cerámica criolla en Antioquia.

- **Cerámica vidriada y gres:** utilizada principalmente para envases de almacenamiento y botellas de gres

(cerámica de alta temperatura), comunes en el comercio del siglo XIX.

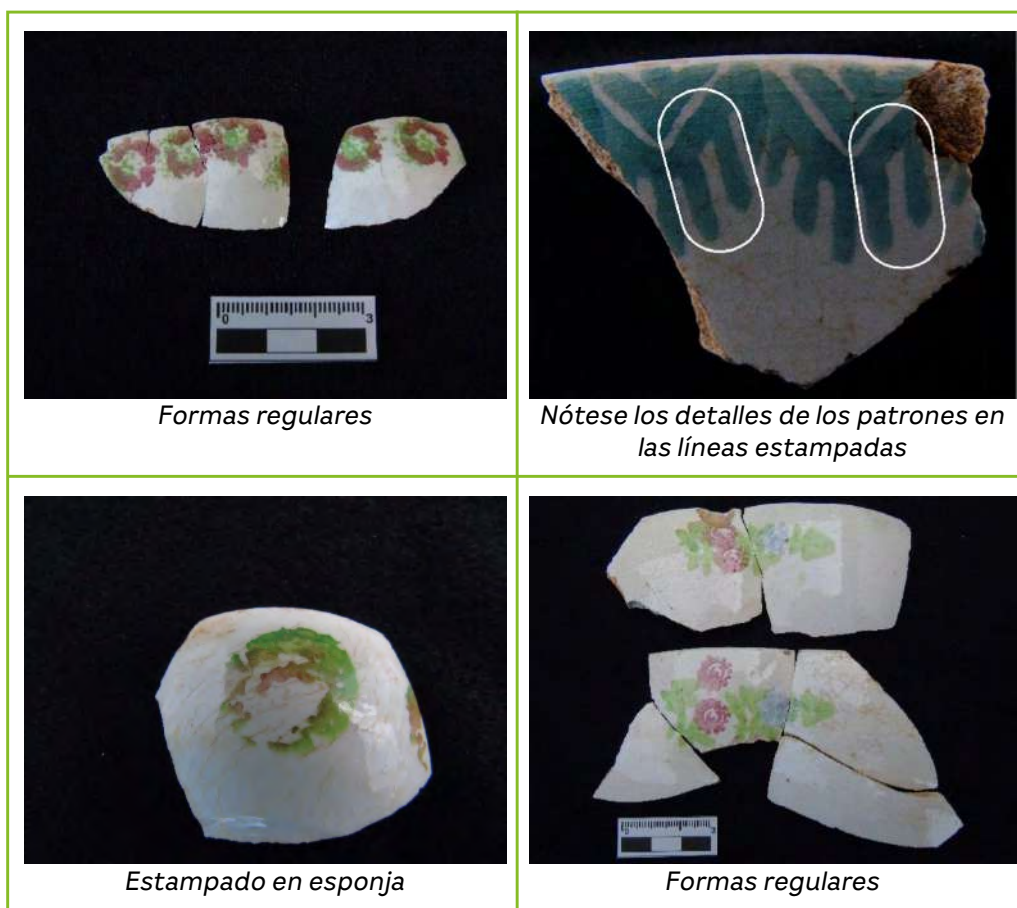


Figura 5. Representación de sponge or stamp.

2.2.3. Vidrios y envases

- **Análisis:** se recuperaron 697 fragmentos, que incluyen botellas fabricadas en molde de dos piezas y botellas de soplado manual.
- **Funcionalidad:** envases de color ámbar y verde relacionados con el consumo de

licores, y botellas transparentes de pequeño formato asociadas a usos farmacéuticos o de perfumería (ver figuras 6 y 7).

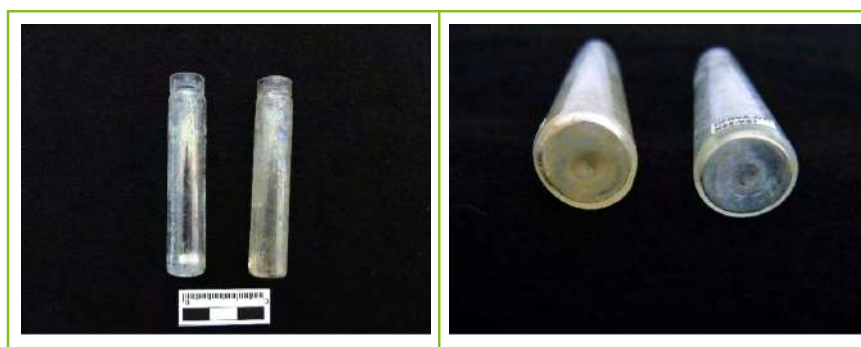


Figura 6. Tubos de vidrio para contener medicamentos.

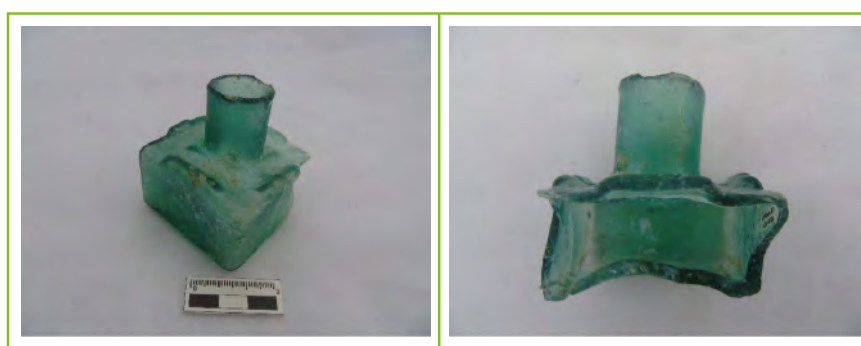


Figura 7. Posible tintero.

2.2.4. Material lítico y metales

- **Líticos:** 2 fragmentos de roca con evidencia de talla o uso (modificación antrópica).
- **Metales:** 43 elementos, caracterizados por la presencia de clavos de sección cuadrada (típicos de construcciones antiguas) y elementos de hierro oxidado que confirman la transición hacia la urbanización del sector (ver figura 8).

2.2.5. Análisis especializados y arqueometría

Para trascender la descripción macroscópica y comprender las dinámicas antrópicas en el Valle de Aburrá, se aplicaron técnicas de arqueometría que permiten reconstruir la dieta, la tecnología cerámica y los procesos de formación del sitio. Los datos, procesados por el laboratorio Arqueoproxy, indicaron lo siguiente:

- **Arqueobotánica:** almidones y fitolitos
El análisis de microrestos vegetales reveló el

procesamiento de recursos alimenticios y la configuración del entorno vegetal:

- **Almidones:** se identificaron granos de almidón de ñame (*Dioscorea* sp.) en baja cantidad, los cuales presentan marcas de presión (trillado/molido) y gelatinización (termoalteración). Estos indicadores confirman que el ñame fue procesado térmicamente para el consumo humano en el sitio.
- **Polen y fitolitos:** se hallaron granos de polen de las familias Asteraceae (botón de oro) y Nyctaginaceae (bugambilia), plantas resistentes que sugieren un entorno de clima templado a cálido. Los fitolitos muestran una dominancia del 80% de la familia Poaceae (pastos), junto con fitolitos esféricos facetados asociados a cucúrbitas (auyama/calabaza) y palmas, evidenciando una dieta mixta y un entorno de bosque intervenido.

- **Petrografía cerámica: tecnología y procedencia**

Se analizaron secciones delgadas de fragmentos cerámicos para identificar sus pautas de manufactura:

- **Atmósferas de Cocción:** la presencia de hematita indica cocciones en atmósferas oxidantes estables entre los 600 °C y 900 °C. No se alcanzó la vitrificación (que ocurre a >1000 °C), manteniendo una porosidad del 60 %.
- **Composición:** el desgrasante predominante es la cuarcita (90 %), con inclusiones de anfíbolitas y plagioclasas sódicas de origen volcánico. La angulosidad de los granos sugiere el uso de rocas fragmentadas intencionalmente y no materiales aluviales, lo que demuestra una selección consciente

de materias primas para mejorar la resistencia al choque térmico de las vasijas.

- **Micromorfología de suelos**

El análisis de muestras inalteradas de suelo permitió identificar la historia deposicional del sitio:

- **Evidencias de quema:** se observaron abundantes partículas de carbón con estructura celular conservada y, fundamentalmente, fragmentos de grasa animal quemada. Estos elementos, sumados a la presencia de fragmentos cerámicos incrustados en la matriz, confirman una intensa actividad de preparación de alimentos y descarte térmico en el lugar.



Figura 8. Tipos de objetos metálicos de la muestra.

3. Resultados y aportes institucionales

La intervención arqueológica en la variante Monjita-Batallón se ejecutó mediante excavaciones controladas por niveles estratigráficos de 10 cm., permitiendo un registro sistemático a través de fichas de campo, levantamiento fotográfico detallado, lectura de perfiles y georreferenciación de precisión. Se realizaron nichos y pozos de sondeo con profundidades que oscilaron entre los 5 y 7 m.

Los materiales recuperados, cerámica criolla, loza industrial, vidrios, metales, restos óseos animales y carbón confirman la existencia de un depósito de descarte urbano con cronologías que transitan desde finales del siglo XVIII hasta el periodo Republicano. Esta actuación se desarrolló bajo un modelo de compatibilidad operativa, garantizando que el avance de la obra civil no comprometiera la integridad del patrimonio nacional, cumpliendo así con la Resolución ICANH 797 de 2020 del Protocolo de Hallazgos Fortuitos y la normativa municipal vigente.

3.1. Gestión del conocimiento y sensibilización: *vigías del tiempo y guardianes del pasado*

Un aporte institucional diferenciador de este proyecto fue el programa de capacitación integral dirigido al personal operativo y cuadrillas de obra. Lejos de ser solo ejecutores de excavación, los trabajadores fueron empoderados como *Vigías del Tiempo y Guardianes del pasado*.

Este componente educativo se enfocó en desmitificar la visión extractivista de la arqueología (basada en la ambición por materiales preciosos como el oro) para reorientarla hacia los fines divulgativos y científicos de la disciplina. Los puntos clave de esta gestión incluyeron:

- **Capacitación in situ:** talleres constantes para identificar materiales que, aunque carecen de valor comercial, poseen un valor histórico incalculable.
- **Visita al Museo Universitario de la Universidad de Antioquia (MUUA):** el personal de obra tuvo la oportunidad de conocer el destino final de los hallazgos. Esta experiencia permitió que los trabajadores comprendieran que cada fragmento de loza o hueso recuperado en la Variante Monjita-Batallón se convierte en una pieza de investigación que será conservada y exhibida para el disfrute de las presentes y futuras generaciones.
- **Reconocimiento:** Se destacó y premió la proactividad del personal en el reporte oportuno de hallazgos fortuitos y en la adecuada aplicación de los protocolos correspondientes. Este reconocimiento fortaleció el sentido de pertenencia, la valoración del rol individual dentro del proyecto y consolidó la noción de que la arqueología preventiva es un esfuerzo colectivo, alineado con la gestión integral del Grupo EPM, sus aliados y contratistas.



Figura 9. Reconocimiento con diplomas a vigías. Socialización y visita al MUUA.

3.2. Lecciones aprendidas

La experiencia confirma que la gestión efectiva de hallazgos fortuitos requiere:

- Protocolos institucionales claros y socializados.
- Articulación permanente entre supervisión y contratista.
- Incorporación de experticia especializada cuando el contexto lo exige.

- Comunicación interna eficiente.
- Equilibrio entre continuidad operativa y cumplimiento normativo.

Este caso demuestra que una cultura organizacional orientada a la prevención y al respeto por el patrimonio cultural fortalece la sostenibilidad territorial y la reputación institucional.

Conclusiones

La atención del hallazgo arqueológico fortuito en el proyecto Monjita-Batallón dejó aprendizajes relevantes para la gestión de infraestructura urbana en contextos históricamente consolidados.

En primer lugar, contar con protocolos institucionales claros y socializados permite reaccionar de manera inmediata ante eventos no previstos, reduciendo la incertidumbre operativa y evitando decisiones improvisadas en campo. La suspensión oportuna y focalizada de actividades demostró que es posible proteger el patrimonio sin comprometer de forma significativa el avance general del proyecto.

En segundo lugar, la articulación temprana entre equipos técnicos, interventoría, supervisión y componente arqueológico facilita una gestión integral del riesgo, equilibrando el cumplimiento normativo y la continuidad constructiva. La comunicación interna efectiva resultó determinante para coordinar acciones, definir alcances y mantener la trazabilidad técnica del proceso.

En tercer lugar, la experiencia evidenció la importancia de incorporar la dimensión patrimonial como parte de la cultura organizacional, incluso en proyectos que no requieren un Programa de Arqueología

Preventiva (PAP). La existencia de lineamientos internos para la atención de hallazgos fortuitos se consolida como una herramienta estratégica de sostenibilidad territorial.

Finalmente, el caso confirma que la gestión adecuada de eventos imprevistos no solo

mitiga riesgos legales, sino que también fortalece la reputación institucional y reafirma el compromiso de EPM con la protección del patrimonio cultural en el desarrollo responsable de los servicios públicos.

Recomendaciones finales

La experiencia del hallazgo fortuito en el proyecto Construcción de las obras civiles para la variante de la conducción de acueducto Monjita-Batallón evidencia que la alta intervención antrópica del entorno no excluye la posibilidad de aparición de evidencias arqueológicas. A pesar de tratarse de un sector profundamente transformado por la canalización del río Medellín, la construcción de la Avenida Regional, el desarrollo del complejo Mi río y la consolidación de superficies asfaltadas y estructuras urbanas, el registro material recuperado demuestra que los depósitos culturales pueden preservarse en contextos urbanos consolidados.

En este sentido, se recomienda:

- Fortalecer las capacitaciones de inicio de obra dirigidas a frentes operativos, interventoría y supervisión técnica, enfatizando la identificación temprana de posibles evidencias arqueológicas y la activación oportuna del protocolo de hallazgos fortuitos.
- Incorporar alertas arqueológicas tempranas en la etapa de comisionamiento y planeación de proyectos, incluso en áreas altamente intervenidas, como medida preventiva de gestión del riesgo normativo y reputacional.
- Establecer lineamientos contractuales claros, incluyendo cláusulas específicas que contemplen la gestión de hallazgos fortuitos como posible actividad adicional u

obra extra cuando el proyecto no contemple un Programa de Arqueología Preventiva (PAP), garantizando recursos técnicos y tiempos de respuesta adecuados.

- Promover que, ante hallazgos de impacto arqueológico leve o depósitos secundarios, se priorice la continuidad operativa del proyecto en otros frentes de trabajo mientras se evalúa técnicamente el contexto identificado, optimizando tiempos sin comprometer la salvaguardia patrimonial.
- Consolidar mecanismos internos para visibilizar el valor agregado que representa la gestión patrimonial dentro de los proyectos de infraestructura, integrando los resultados arqueológicos en la narrativa de sostenibilidad territorial, gestión integral del riesgo y responsabilidad empresarial.

Este caso reafirma que la arqueología en proyectos de infraestructura no debe entenderse únicamente como una obligación normativa, sino como un componente estratégico de la gestión territorial que fortalece la sostenibilidad, la trazabilidad institucional y la memoria histórica del territorio.

Agradecimientos

Este proceso me recordó que la gestión del patrimonio nunca es un ejercicio individual. Son muchos los actores que, desde distintos lugares, hacen posible que la memoria del territorio sea respetada incluso en medio de la dinámica propia de la infraestructura.

Quiero agradecer de manera especial a la Gerencia de Acueducto y alcantarillado, como a María del Pilar Restrepo, jefe del Área Ambiental y Social de Acueducto y Alcantarillado, por su confianza y por respaldar una gestión que reconoce que el desarrollo técnico puede y debe dialogar con la historia.

A Luz Omaira Restrepo, mi gestora, gracias por el acompañamiento cercano, por la coordinación permanente y por sostener el proceso con criterio y responsabilidad. A César Alejandro Méndez Hernández, gestor técnico del contrato del Área de Intervenciones en Infraestructura de Acueducto y Alcantarillado, le agradezco la apertura y el rigor técnico con el que asumió la situación, entendiendo que activar un protocolo no es frenar una obra, sino hacerla con mayor conciencia.

Reconozco la actuación del contratista Redyco, que implementó de inmediato el protocolo de hallazgos fortuitos: se detuvo la actividad, se aisló el área y se preservó el contexto hasta la verificación arqueológica. Ese primer paso fue determinante.

De manera especial, quiero destacar a la arqueóloga Pilar Morato, quien realizó toda la implementación del protocolo de

hallazgos fortuitos con el cuidado técnico que exige este tipo de situaciones. Su trabajo garantizó que el procedimiento se desarrollara conforme a los lineamientos establecidos y con el rigor profesional necesario.

Agradezco también la gestión social de Katherine Hoyos, cuya articulación permitió que la comunicación entre las partes fuera clara y oportuna.

Y mi reconocimiento sincero al personal de obra que reportó la evidencia con responsabilidad: Jesús Alberto Sierra Miranda, Diego Fernando Arias Grisales, Wilson Mendoza Molina y Joaquín Emilio Macías Builes. La protección del patrimonio comienza en ese instante decisivo en el que alguien elige informar en lugar de continuar.

Finalmente, agradezco a Mónica Gómez, ingeniera líder del contrato por parte de Redyco, por integrar la dimensión patrimonial dentro de las decisiones técnicas del proyecto.

Este hallazgo no solo activó un protocolo; evidenció una red de compromiso. Demostró que cuando la infraestructura y el patrimonio se gestionan de manera articulada, el territorio no se fragmenta: se comprende mejor.

Notas al final

¹Se siguieron los lineamientos metodológicos propuestos por: Ubelaker, D. (2007). *Enterramientos humanos: excavación, análisis e interpretación*. Sociedad de Ciencias Aranzadi. y por White, T., Black, M. & Folkens, P. (2012). *Human Osteology*. Academic Press. para la clasificación de restos óseos.

² De igual manera se implementó con la metodología de Etxeberria, F. (1994). *Aspectos macroscópicos del hueso sometido al fuego*. *Munibe Antropologia - Arkeologia*, (94), 111-116. para los análisis de termoalteración.

Referencias

- Instituto Colombiano de Antropología e Historia. (s.f.). Geovisor INCAH. Geovisor ICANH
- Sánchez, E. (2022). El río Magdalena en el siglo XIX: la "espinas dorsal de Colombia". Banrepcultural. <https://rebrand.ly/f89b44>
- Society for Historical Archaeology. (2024). Historic ceramics and bottles. <https://sha.org/>

Cómo citar este artículo:

Chía Góngora, A. (2026). Integración del patrimonio cultural en infraestructura hídrica: manejo de un hallazgo fortuito en la reposición del acueducto variante Monjita-Batallón. *Revista EPM*, (26), 20-35.



Metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua

Methodology for articulating public, private, academic and citizen actors as a water governance scheme in Latin American urban water basins

**María del Pilar
Restrepo Mesa**

Gerencia Acueducto y Alcantarillado, EPM

Maria.Restrepo.Mesa@epm.com.co

Resumen

Este trabajo surge de la preocupación por mejorar y fortalecer la gestión del recurso agua en cuencas hidrográficas, en un contexto de cambio y variabilidad climática, creciente deterioro socioambiental y multiplicidad de esfuerzos interinstitucionales para mejorar sus condiciones. La idea es superar los enfoques tradicionales, que muchas veces fracasan por desconfianza, desarticulación, falta de continuidad y poca participación social mediante una metodología innovadora que permita articular a todos los actores en

una gobernanza participativa y sostenible. La propuesta se basa en fortalecer redes de liderazgo comunitario, crear observatorios de cuencas, y promover diálogos que valoren tanto el conocimiento técnico como el saber local. Las conclusiones resaltan que la clave está en promover relaciones humanas basadas en la confianza, la reciprocidad y el liderazgo consciente, lo que se traduce en altos niveles de cooperación y mejoramiento de las condiciones ambientales y sociales de la cuenca hidrográfica a intervenir.

Palabras clave:

Gobernanza, Agua, Actores, Sinergias, Confianza, Reciprocidad, Cooperación, Restauración.

Keywords:

Governance, Water, Stakeholders, Synergies, Trust, Reciprocity, Cooperation, Restoration.

Introducción

Luego de muchos años de reflexión y preocupación genuina por encontrar los mecanismos que permitan consolidar efectivamente modelos de generación de sinergias entre todos los actores de un territorio para alcanzar objetivos comunes, y teniendo en cuenta los diferentes roles profesionales que he tenido en mi vida laboral —especialmente los últimos 20 años alrededor de la planificación y ordenación de cuencas hidrográficas, la puesta en marcha de proyectos para mejorar sus condiciones ambientales y sociales, y recientemente como servidora pública en EPM (Empresas Públicas de Medellín) donde participo en la orientación para la toma de decisiones frente a la conservación del agua—, siendo consciente del creciente deterioro de las cuencas hídricas, agravado por las consecuencias del cambio y la variabilidad climática, que ponen en riesgo la seguridad de hídrica de la población, realicé mi tesis doctoral titulada *Metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas*, partiendo de la premisa de que han sido muchos los esfuerzos que se han hecho a lo largo del tiempo por diversos actores, con el fin de dinamizar procesos sostenidos en el tiempo que contribuyan a mejorar las condiciones ambientales y sociales de los territorios.

Lamentablemente, el deterioro ambiental sigue aumentando en el planeta, así como las necesidades básicas insatisfechas de sus pobladores. Este trabajo de investigación que inició en el año 2018, se realizó durante siete (7) años e inspiró la realización del proyecto Alianza para la emergencia climática y sanitaria en el Valle de Aburrá, el cual contó

con la participación de dos autoridades ambientales del Departamento de Antioquia, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia, el Distrito de Medellín, el Municipio de Barbosa, la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto Tecnológico Metropolitano, empresas del sector privado, EPM como empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios y las comunidades de las áreas de influencia, entre otros actores. A su vez, contó con el apoyo económico del Ayuntamiento de Barcelona.

Esta propuesta surge de la necesidad de contar con una herramienta metodológica que permita generar dinámicas disruptivas de apropiación social por parte de los actores asentados en las cuencas hídricas, con el fin de posibilitar el despliegue de acciones eficientes y eficaces que permitan avanzar de manera decidida en la consolidación de una cultura del agua que garantice la seguridad hídrica para los habitantes.

Abordar conceptualmente la Gobernanza del Agua, implica comprender inicialmente que la relación entre los seres humanos y los recursos naturales se ha visto mediada por un acceso sin restricciones y por el aumento considerable en su demanda. Esto ha traído como consecuencia que cada vez se planteen escenarios de posible escasez y conflictos sociales. Por tanto, deben trabajarse de manera simultánea estrategias para consolidar ejercicios de gobernanza del agua que apunten de manera efectiva a garantizar el suministro de agua con la calidad y cantidad que requiere la población para su consumo diario y para el desarrollo de sus actividades productivas.

El estudio de caso se desarrolló en la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, conformada por diez (10) municipios, donde Medellín es el Municipio núcleo y capital del Departamento de Antioquia, República de Colombia.

Antioquia se ha caracterizado por contar con líderes preocupados por el progreso tanto de su territorio como del país en general, el trabajo en equipo siempre ha sido una constante para sacar adelante planes, programas y proyectos de interés común. En todos los sectores se han obtenido avances significativos que, de no ser por la pujanza y sentido de pertenencia de sus dirigentes, no se habrían logrado. Este esfuerzo ha hecho que el departamento y el país se proyecten como referente a nivel latinoamericano.

Sin embargo, ha costado tener una visión de futuro, así como objetivos comunes que optimicen en el tiempo los recursos técnicos, humanos y financieros movilizados y procuren una sostenibilidad de las acciones implementadas, lo que ha llevado a repensar, una y otra vez, gobierno tras gobierno, las metas y proyecciones con realidades económicas, sociales y ambientales cada vez más preocupantes y difíciles de superar en el corto plazo. Aun así, el interés por propiciar condiciones de vida más dignas a los pobladores, tanto urbanos como rurales, ha sido una constante y una intención transversal que ha caracterizado a la región.

Mirando en retrospectiva, de haber dado continuidad a los proyectos iniciados en cuencas hidrográficas en décadas anteriores o de haber realizado un adecuado seguimiento a estos, la realidad del recurso hídrico sería diferente. Es por ello que se hace muy importante contar con metodologías que trasciendan en el tiempo y lleven a que las buenas iniciativas y los logros obtenidos en una época determinada se aprovechen de mejor manera, libres de

egoísmos y reticencias, en una mirada integral, posibilitante y de futuro que genere hábitats plurales e incluyentes, donde la confianza en la institucionalidad tanto pública como privada sea la constante y esta propicie una verdadera participación activa de la ciudadanía, de la academia y de la institucionalidad pública y privada, con miras a consolidar una seguridad hídrica en estas cuencas de tanta importancia para los habitantes en escenarios cada vez más retadores.

Se espera que esta metodología, dados los contextos socioambientales similares que se presentan en otras regiones de América Latina, pueda ser replicada; de ahí el interés y el apoyo que se ha tenido desde el inicio del proceso por parte de la Universidad Politécnica de Cataluña, la cátedra UNESCO de Sostenibilidad, el Ayuntamiento de Barcelona, entre otras entidades, para lograr un producto que sirva de referente, dada la creciente necesidad de afianzar los esquemas de Gobernanza del agua y justicia ambiental, resaltando la importancia del recurso dentro del nexo agua-energía-alimentos, lo cual constituye un elemento vital para la supervivencia humana en el planeta.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Proponer una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas en el marco de la emergencia climática.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento.
- Desarrollar un proceso participativo para el co-diseño de una intervención piloto en tres (3) cuencas seleccionadas de la ciudad de Medellín en el contexto de la emergencia climática y sanitaria.

- Validar el modelo de articulación entre todos los actores relevantes como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas, a partir de un estudio de caso en la ciudad de Medellín, Colombia.

Este proyecto doctoral buscó, ante escenarios de cambio y variabilidad climática, desarrollar una metodología que aborde las problemáticas de cuencas urbanas altamente antropizadas, donde diversos actores han movilizado recursos en torno a su protección y estén dispuestos a seguir haciéndolo, para obtener mejores resultados en términos de seguridad hídrica, en coordinación con la ciudadanía y comunidades rurales.

2. Metodología

El proyecto parte del establecimiento de un plan de transformación acorde a la teoría del cambio, que busca definir, partiendo de una línea base que dé cuenta del estado actual de las cuencas priorizadas, una hoja de ruta que permita mostrar cómo se alcanzan los objetivos deseados a partir de la puesta en práctica de la metodología.

Esta investigación inspiró el desarrollo del programa alianzas por la emergencia climática y sanitaria en el Valle de Aburrá, que se llevó a cabo entre los años 2020 y 2023, y contó con el apoyo económico del Ayuntamiento de Barcelona, bajo la coordinación de la Universidad Politécnica de Cataluña. El programa fue operado por el Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, y en él participaron entidades del sector

público como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia —ambas autoridades ambientales en la región—, Distrito de Medellín, Municipio de Barbosa, Universidad Nacional de Colombia, EPM como Empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios, Instituciones educativas, Fondo del agua Corporación Cuenca Verde, empresas del sector privado como Pork Colombia, Mesas ambientales, Líderes comunitarios, entre otros.

Para lograr este propósito, se escogieron unas cuencas hídricas que ya habían sido priorizadas años atrás por otros programas gubernamentales, en los cuales se elaboraron:

- Plan de Ordenación de la Cuenca Aburrá-Medellín (año 2006).

- Planes integrales de ordenación y manejo de cuencas - PIOM (año 2007).
- Proyectos priorizados en el marco del Plan Quebradas, liderado por la autoridad ambiental urbana Área Metropolitana del Valle de Aburrá, del cual hacen parte varias entidades públicas y privadas, organizaciones comunitarias, universidades, entre otros. (2017 a la fecha).
- Actualización del Plan de Ordenación de la Cuenca Aburrá-Medellín (2018).
- El Plan de Manejo Ambiental del Acuífero - PMAA (2019).

Las cuencas seleccionadas para realizar el ejercicio propuesto fueron:

- Cuenca de la quebrada Doña María, ubicada en el Distrito de Medellín, el municipio de Itagüí y el municipio de La Estrella.
- Cuenca de la quebrada Santa Elena, ubicada en el distrito de Medellín.
- Cuenca de la quebrada La Iguaná, ubicada en el Distrito de Medellín.

A continuación, se realiza una descripción del abordaje metodológico que se empleó en este estudio, mediante paquetes de trabajo (PT) con el ánimo de facilitar su comprensión. Esta propuesta empleó un enfoque de investigación mixto, en el que se hizo uso tanto de métodos de tipo cualitativo como cuantitativo.

PT 1. Revisión y análisis bibliográfico.

PT2. Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento.

PT3. Construir línea base que permita entender cómo se encuentra o cuál es el estado del recurso hídrico en el territorio.

PT4. Realizar ejercicios de interacción con expertos técnicos, representantes de entidades públicas, privadas, academia, fondos del agua y líderes comunitarios.

PT5. Realizar ejercicios pilotos en las cuencas urbanas seleccionadas y validar el modelo de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de

gobernanza en cuencas hídricas urbanas.

Se conformaron los siguientes espacios de trabajo:

- Mesa Comunitaria (aprovechando las mesas del Plan Quebradas).
- Mesa Interinstitucional con representantes de las comunidades.

Además de las mesas descritas, se conformó una Comisión Técnica Intersectorial y un Consejo Asesor para dinamizar la Alianza por la emergencia climática en el Valle de Aburrá; de esta cual se obtuvieron experiencias muy importantes que harán parte de las conclusiones de este estudio.

Herramientas:

- Talleres grupales iniciales con grupos de interés para el co-diseño de las actividades. Estos grupos estarán conformados por líderes comunales, la comisión técnica intersectorial, y los habitantes del área de influencia del proyecto.
- Estructuración de un plan de trabajo conjunto, en el que se definan las actividades, plazos y responsabilidades para el logro de los objetivos y metas trazados.
- Jornadas de seguimiento y evaluación de resultados, que permitan la retroalimentación del proceso y la difusión del esquema de relacionamiento entre los habitantes y sus comunidades.

Entregable:

Actas e informes de resultados de cada mesa de trabajo, así como el documento del plan de trabajo diseñado a partir del esquema de relacionamiento definido.

Esta estrategia se basa, por tanto, en la conformación de dos mesas de trabajo: una mesa de trabajo comunitaria liderada en este caso por la autora como estudiante de la Universidad Politécnica de Cataluña y representante de la empresa prestadora de servicios públicos domiciliarios EPM,

y una mesa de trabajo interinstitucional, con representantes de las comunidades y organizaciones sociales.

Teniendo en cuenta que varios de los líderes comunitarios se conocían de tiempo atrás por ejercicios también liderados por la autora, como el Plan Quebradas en su rol como autoridad ambiental en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se les invitó a hacer parte de estas mesas comunitarias para que se articulen en la realización de recorridos de campo y talleres orientados a definir claramente la problemática de las cuencas seleccionadas e identificar de manera conjunta las iniciativas sociales para la recuperación socioambiental del área de incidencia.

En la fase inicial, se parte de la revisión de toda la información técnica que tienen las entidades públicas y académicas de las cuencas priorizadas y, con base en el saber local, se elabora una línea de tiempo que dé cuenta de las intervenciones realizadas anteriormente, así como una lectura situacional que identifique las principales problemáticas actuales en cada

una de ellas, reconociendo los logros previos por otros ejercicios y las brechas que aún persisten.

A partir de ahí, en sesiones de trabajo con las mesas comunitarias e interinstitucionales, mediante la metodología de co-creación, se identifican los proyectos prioritarios a realizar en el territorio, visualizando el futuro que quiere emerger en cada una de las cuencas, las posibilidades reales para concretarlas, las instituciones que pudieran movilizar recursos para ello y, en términos generales, los movimientos sinérgicos que se deben potenciar para alcanzar el objetivo común.

Con las mesas de trabajo instaladas, se generará un pacto por la cuenca o acuerdo social que constituirá una visión conjunta del territorio y un ejercicio de gobernanza del agua, plasmado en un documento o Plan Maestro de Acciones e Iniciativas para la Apropiación Socioambiental y la Emergencia Climática en las cuencas seleccionadas.



3. Discusión de resultados

A pesar de los innumerables esfuerzos realizados por décadas para generar una metodología que permita gestar cambios significativos en los mecanismos de relacionamiento entre actores, con el fin de mejorar las condiciones ambientales y sociales del planeta, la realidad es que el deterioro de los recursos naturales se incrementa cada vez más, poniendo en riesgo la supervivencia de los seres humanos y de los demás seres vivos que lo habitan. Esto da cuenta que los esfuerzos no son suficientes para revertir el daño ambiental y que es necesario realizar ejercicios de innovación social para generar un cambio colectivo desde la transformación de cada individuo, identificando objetivos comunes y movilizand acciones entre todos para materializarlos.

Es por ello que se plantea este trabajo de investigación y, luego de siete (7) años de desarrollarlo, renace la esperanza al poder plantear y desarrollar una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua en cuencas hídricas latinoamericanas. Esta parte de abrir la mente, el corazón y la actitud, trascendiendo las miradas netamente tecnicistas que consideran su saber cómo único y que, por lo general, han buscado, consciente o inconscientemente, orientar la toma de decisiones de los actores, máxime cuando se cuenta con recursos de tipo económico que se deben ejecutar en vigencias fiscales o períodos de gobierno con horizontes de tiempo muy restringidos.

La aplicación de la metodología propuesta en las cuencas priorizadas incluye como premisas fundamentales:

- Definir una cuenca hidrográfica como la unidad de planeación por excelencia.
- El ejercicio es válido tanto para cuencas menores, como para macrocuencas y puede ser empleado en países latinoamericanos, dado sus similares contextos y problemáticas comunes.
- Identificar los actores asentados en las cuencas es fundamental para potenciar la creación de redes por tipo de actor y, finalmente, redes multiactor; así se potencian las sinergias y se dinamiza la movilización de recursos, con un líder natural que jalone el proceso y que permanezca a pesar de los cambios administrativos que puedan darse en algunas entidades. En este sentido, es necesario elaborar mapas de actores y de objetivos que visibilicen intereses en juego para el diseño de las estrategias a implementar.
- Los observatorios de cuencas, que deben partir de una cualificada síntesis ambiental, además de ser ejercicios de apropiación social, son herramientas clave para la construcción de una línea base que permita tener claro los puntos de partida donde se puedan registrar sus cambios en el tiempo, bien sea por la aplicación de recursos técnicos, económicos y financieros vía proyectos, o por cambios generados por las dinámicas antrópicas y/o naturales que se puedan presentar en horizontes de tiempo definidos. Contar con varios observatorios de cuencas para monitorear la calidad, cantidad de cada fuente, así como la demanda del recurso, bien sea para consumo humano o para actividades productivas, es una necesidad sentida para el ordenador del recurso; por ello pensar en Hidrotorios del territorio se constituye en una prioridad a la luz del trabajo mancomunado del saber técnico con el saber local de las comunidades rurales y la ciudadanía en lo urbano.

Identificar las barreras que limitan la gobernanza del agua fue un ejercicio de co-creación muy valioso, donde el diálogo horizontal multiactor fue más que importante, permitió abrir la puerta del conocimiento, entender que es necesario escuchar de manera activa al otro, que todos los actores están preocupados por el destino de su cuenca ante los posibles escenarios de escasez o sobreabundancia de agua, que hay desgaste y frustración por todos los esfuerzos que se han hecho en el tiempo, pero que, en la mayoría de los casos, mueren con los cambios de gobierno y se deben iniciar de nuevo, muchas veces partiendo desde cero, perdiendo tiempos valiosos en la consolidación del propósito de intervenir de manera integral el territorio para mejorar sus condiciones ambientales y sociales.

Elaborar de manera conjunta la hoja de ruta para implementar los proyectos priorizados es necesario, toda vez que cada actor se empodera del objetivo común, independiente de su rol, competencia y capacidad de movilizar recursos económicos. El movimiento sinérgico requiere aplicar la balanza múltiple de recursos y así visibilizar el aporte de cada actor, lo cual es significativo para concretar el modelo de gobernanza del agua, toda vez que motiva el trabajo colaborativo y la visión de conjunto.

Estas reflexiones y esta propuesta van en concordancia, de manera efectiva, a lo planteado en las hipótesis del proyecto de investigación:

- La aplicación de una metodología de articulación entre actores públicos, privados, academia y ciudadanía, como esquema de gobernanza, genera escenarios de transformación participativa, y viabiliza la gestión colectiva en cuencas hídricas urbanas.
- La generación de un esquema de gobernanza que promueva el trabajo colaborativo y la articulación entre actores públicos, privados, academia y ciudadanía incide de manera positiva en la gestión del recurso hídrico

en las cuencas urbanas de Latinoamérica, partiendo de las potencialidades y debilidades del territorio, especialmente en el contexto de la emergencia climática.

- Descentralizar la gestión del recurso hídrico y formular mecanismos de participación colectiva integral genera hábitats plurales e incluyentes para la seguridad hídrica en el territorio.

Así, se soluciona lo planteado en la pregunta de investigación: ¿Cómo generar una transformación participativa en torno a la gestión del recurso hídrico en cuencas urbanas en Latinoamérica dentro de un escenario de cambio y variabilidad climática que apunte a su mejoramiento con procesos sostenidos en el tiempo?

La síntesis metodológica que se esbozó anteriormente es la siguiente:

- Selección de la cuenca a regenerar o intervenir.
- Elaboración de mapa de actores asentados en la cuenca y su respectiva matriz de relacionamiento.
- Identificación de competencias de cada actor a la luz de la legislación vigente - mapa de objetivos.
- Creación de mesa de gobernanza del agua.
- Elaboración de diagnóstico socioambiental con información de cada uno de los actores - información secundaria.
- Recorridos de campo para evaluar el estado actual de la cuenca a intervenir o a regenerar - información primaria.
- Síntesis ambiental y social de la cuenca con línea de tiempo (mínimo cinco años atrás).
- Levantamiento de línea base que refleje el estado actual de la cuenca.
- Talleres de co-creación para priorización de acciones con participación de todos los actores que hacen parte de la mesa de gobernanza del agua.
- Priorización de acciones a realizar en la cuenca hídrica.
- Balanza múltiple de recursos a movilizar por parte de cada actor.

- Suscripción de pacto o acuerdo por la cuenca.
- Inicio de movilización de acciones en puntos priorizados.
- Seguimiento a acciones y propuestas de seguimiento en sesiones de la mesa de gobernanza del agua, potenciando la red de actores en cada cuenca y motivando la interacción con redes de otras cuencas para compartir lecciones aprendidas y avanzar hacia el mejoramiento del proceso en general.

Lo anterior, atiende lo planteado en el objetivo general: proponer una metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas, en el marco de la emergencia climática, así como los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los actores que integrarán una visión conjunta sobre el recurso hídrico en el territorio y su esquema de relacionamiento.
- Desarrollar un proceso participativo para el co-diseño de una intervención piloto en 3 cuencas seleccionadas de la ciudad de Medellín, en el contexto de la emergencia climática y sanitaria.
- Validar el modelo de articulación entre todos los actores relevantes como esquema de gobernanza para la transformación participativa en cuencas hídricas urbanas, a partir de un estudio de caso en la ciudad de Medellín, Colombia.

A pesar de la dificultad que se tuvo en la puesta en marcha de uno de los proyectos piloto, por situaciones de tipo administrativo donde se

ralentizó la entrega de recursos para llevar a cabo la actividad planteada, finalmente se materializó con muy buenos resultados a la fecha. De igual manera, la red de actores que se potenció, en especial la Red SOS cuenca, persiste, motivada por los mismos líderes comunitarios y por entidades como EPM, con su Programa Hidrofonías voces y sonidos comunitarios del Agua, que han potenciado todo el esfuerzo realizado en el marco del Programa Alianza para la Emergencia Climática y Sanitaria en el Valle de Aburrá, donde aún se mantienen vigentes las mesas de gobernanza del agua y los pactos por la cuenca suscritos por los actores de cada una de las cuencas priorizadas.

De igual manera, las interacciones entre las comunidades, las entidades públicas, privadas y las instituciones educativas se siguen fortaleciendo cada día, a través de un compartir e intercambio permanente de experiencias que cualifican el saber de todos los actores. Esto da cuenta de que la metodología propuesta para articularlos efectivamente funcionó.





Conclusiones generales

La metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza en cuencas hídricas urbanas latinoamericanas parte de la premisa de que es necesario valorar en igual medida el conocimiento técnico que, a lo largo del tiempo, han cualificado las instituciones públicas con el objetivo de implementar políticas de orden local, regional y nacional, así como apuestas globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, junto con el saber local que, por décadas, también han cualificado las comunidades asentadas en los territorios.

En este orden de ideas, es fundamental en cada cuenca diseñar un observatorio ambiental que permita afianzar los procesos de co-creación de conocimiento e interacción entre los diferentes tipos de usuarios, a la luz de su rol y competencia, a fin de abordar los

ambientales y sociales de forma simultánea. Este observatorio requiere un compromiso directo de los usuarios y el fortalecimiento de la investigación de acción participativa y, en la medida de lo posible, debe estar acompañado por una institución académica que, preferiblemente, tenga asiento en la cuenca y por una entidad que tenga como foco de atención el cuidado y protección de los recursos hídricos. Identificar un líder comunitario que movilice a los demás integrantes de la comunidad para realizar esta acción colectiva de registro de información es más que necesario y relevante.

El contar con información precisa proveniente de la aplicación, por más de diez (10) años, de instrumentos de planificación para las cuencas hidrográficas seleccionadas, como planes de ordenación y manejo de microcuencas,

planes de ordenamiento territorial, planes de manejo del recurso hídrico y planes de manejo del acuífero, así como de los resultados de los diferentes ejercicios que se han hecho en el territorio producto de alianzas, convenios y o consultorías, junto con los informes de supervisión de cuencas elaborados por la Corporación Cuenca Verde en asocio con EPM, constituyó un insumo fundamental para obtener información de primera mano sobre las cuencas priorizadas.

Se obtuvo un gran aprendizaje al evidenciar que muchos de estos planes integrales de ordenamiento de cuencas, realizados en el año 2007, no se materializaron en proyectos concretos, perdiendo tiempo valioso para el mejoramiento integral de estas cuencas abastecedoras. Esto motiva aún más a contar con herramientas participativas construidas de la mano de todos los actores, que puedan permanecer en el tiempo, trascendiendo los períodos de gobierno y el inicio y fin de convenios de cooperación.

Esta es la verdadera apuesta que hay que hacer para tener un esquema de trabajo que trascienda los tradicionales mecanismos de interacción entre instituciones y la ejecución de recursos que, en el caso de las entidades públicas están sujetos a vigencias fiscales que limitan la continuidad de los procesos, generando frustraciones, retrasos y, por tanto, desconfianza, desestimulo y mayor degradación ambiental y social.

Para que esta metodología sea exitosa, se deben realizar varios pasos que incluyen análisis conjuntos entre técnicos de las diversas instituciones y líderes comunitarios que, por lo general, permanecen en el tiempo en sus territorios, a diferencia de los funcionarios públicos y, en algunos casos, de representantes de empresas del sector privado e instituciones académicas que rotan con más facilidad, dificultando la consolidación de procesos sostenidos en el tiempo.

Uno de los primeros pasos que se deben realizar es la construcción de la línea base, la cual es más que necesaria para comprender el estado actual de cada microcuenca en sus aspectos sociales, ambientales y económicos. Esto implica hacer una medición y un registro de los impactos que se han generado sobre el recurso agua en el tiempo, su nivel de relevancia y la eficacia de la implementación de estrategias que permitan mitigarlos, con el fin de extraer la experiencia y motivar lecciones aprendidas con todos los actores para evitar reprocesos y dilapidación de recursos.

Si bien la línea base se puede obtener de los informes técnicos que preparan los diferentes profesionales, los recorridos de campo con los líderes comunitarios, autoridades ambientales, entes territoriales, instituciones académicas y fondos de agua constituyen un complemento perfecto para validar en campo las problemáticas identificadas y priorizarlas.

Esta práctica está en total consonancia con lo recomendado por Ostrom (2000), en relación con la necesidad de tener los límites claramente definidos, conocimiento de las condiciones locales, mecanismos para resolución de conflictos, identificación de entidades existentes y si hay coherencia entre las reglas de apropiación y provisión, entre otros aspectos.

En este sentido, la creación y el fortalecimiento de mesas interinstitucionales y mesas comunitarias, con participación de las entidades que finalmente se consolidan en mesas de gobernanza del agua por cada cuenca a intervenir, es una estrategia altamente importante, porque genera:

- Sentido de pertenencia en cada uno de los actores, tanto los asentados en ellas como los que tienen competencias en ordenación de uso del suelo, cuidado y protección de los recursos naturales, educación a la comunidad y movilización de recursos.
- Visión integradora de la cuenca y diálogos

entre todos los actores de la parte alta, media y baja, fomentando la hidrosolidaridad, la acción colectiva y la cooperación.

Para optimizar la movilización de recursos requeridos en la implementación de los proyectos priorizados, con miras a realizar intervenciones integrales en las cuencas abastecedoras, que efectivamente regeneren los ecosistemas y reorienten su vocación protectora, sobre todo en las partes altas, mediante mecanismos como pago por servicios ambientales, saneamiento básico, adecuada separación de residuos en la fuente y cultura del agua, es necesario contar con operadores eficientes que puedan hacer una gestión oportuna y ágil al interior de sus entidades, de manera que se pueda disponer los recursos en los plazos establecidos. Cualquier retraso en esta dinámica pone en riesgo el ejercicio de corresponsabilidad, la confianza y la reputación, y deteriora la intención de cooperación que se buscó potenciar al instalar las mesas de gobernanza del agua.

Con miras a mejorar las condiciones de los recursos de uso común, en nuestro caso el agua, la hoja de ruta propuesta en los diversos ejercicios de co-creación debe contener proyectos realizables y medibles en el corto, mediano y largo plazo, donde la gobernabilidad del proceso trascienda las esferas de los períodos de gobierno. Por ello, es importante:

- Diseñar planes estratégicos de largo plazo, con metas a alcanzar en el corto plazo, con el fin de generar confianza y animar la cooperación de todos los actores, velando porque en la construcción de los ejercicios de prospectiva, planes empresariales, planes de gestión ambiental regional y planes de gobierno, queden plasmadas las actividades que se identificaron como prioritarias, así como aquellas que se deben seguir desarrollando de manera atemporal. Esto va en consonancia con lo propuesto por Scharmer (2024), al liderar desde el futuro

que quiere emerger. Visualizar los resultados de la inacción, puede ser muy productivo, así como entender que, si se actúa ya para mejorar de manera asertiva las condiciones de las cuencas, se va cerrando la brecha que existe y se acortan los tiempos para una verdadera regeneración de los ecosistemas estratégicos.

- Trabajar con todos los estamentos de la institucionalidad tanto pública, como privada y académica. En este sentido, promover reuniones de socialización del estado actual del movimiento sinérgico, plasmando el modelo de gobernanza del agua, tanto con los funcionarios de carrera administrativa en el sector público, como con profesionales de las empresas del sector privado y docentes de las instituciones educativas, que, por lo general, permanecen en el tiempo en las entidades, así como con sus directivos (secretarios de despacho, alcaldes, presidentes de compañías, rectores), es estratégico para que los diálogos escalen y se realice un trabajo integrador que pueda permanecer en el tiempo, sin verse afectado por los movimientos inherentes a los cambios de administración.
- Comprender que la gobernanza del agua no solo es posible plasmarla con la movilización de recursos económicos, sino que, en muchos casos, es más importante consolidar redes de líderes como SOS Cuenca y redes de instituciones educativas, como las que propone el Laboratorio Vivo de la Cuenca de la quebrada La Volcana en Medellín, Colombia, toda vez que se generan dinámicas con alto contenido social que invitan al cuidado de las fuentes de agua y dejan huella indeleble en cada participante. Al ser observadas las dinámicas de estas redes por otros actores, se motivan redes multiactor que consolidan visiones compartidas y orientan su accionar para construir nuevas realidades en cada territorio, sumando esfuerzos y sinergias.

En este mismo orden de ideas, fortalecer los diálogos horizontales entre todos los actores,

motivando una participación genuina, es necesario. En algunos casos, empresas del sector privado que generan algún tipo de afectación esporádica a las fuentes de agua, por sus actividades productivas, no generan un diálogo asertivo con las autoridades ambientales, y viceversa. Al hacer parte de mesas de gobernanza del agua, se logra entendimiento de los esfuerzos que cada actor está realizando; la escucha activa motiva acercamiento y dispone a los demás a seguir actuando en pro del objetivo común. Esto en palabras de Ostrom (2000), corresponde a la comunicación cara a cara, necesaria en relaciones recíprocas y propositivas.

La única forma de superar las barreras que limitan la gobernanza del agua es, tal como lo define Scharmer (2024), disponernos interiormente trabajando desde un liderazgo consciente y participativo, poniendo en práctica una mente, corazón y actitud abiertos al servicio del cambio que quiere emerger, donde el buen líder reconoce en los

demás actores unos aliados estratégicos y, para ello, debe saber conectar con el otro, valorando su ser y su saber e integrándose a un movimiento colectivo con visión integral de la cuenca a intervenir. Este líder natural comprende que la articulación de actores, públicos, privados, academia y ciudadanía es un ejercicio atemporal, que se nutre de la visión de todos y de esfuerzos compartidos, donde cada uno debe salir de su centro poniendo todo de sí para el cumplimiento del objetivo común en cada cuenca hídrica priorizada.

La gobernanza del agua es la herramienta que asegura la seguridad hídrica para la población. Todos los esfuerzos que se realicen para consolidarla y cualificarla en cada cuenca abastecedora son más que necesarios. Los modelos de integración territorial son una estrategia que ayudan a dinamizar esta apuesta de desarrollo sostenible y regeneración de ecosistemas.

Referencias

- Ostrom, E. (2000). Private and common property rights. In Bouckaert, B. & De Geest, G. (Eds.), *Encyclopedia of Law and Economics* (Vol. 2, pp. 332–379). Edward Elgar Publishing.
- Scharmer, C. O. (2024). *Lo esencial de la Teoría U: Principios básicos y aplicaciones*. Editorial Eleftheria.

Cómo citar este artículo:

Restrepo Mesa, M. (2026). Metodología de articulación de actores públicos, privados, academia y ciudadanía como esquema de gobernanza del agua. *Revista EPM*, (26), 36–49.

5 Ton



Generación de energía eléctrica en redes del sistema de acueducto empleando bombas centrífugas como turbinas

Generation of electric power in the water supply system networks using centrifugal pumps as turbiness

**John Edison
Álvarez Arroyave**

Área Centro de Control e Ingeniería
de la Operación Acueducto y
Alcantarillado, EPM

john.alvarez.arroyave@epm.com.co

**Pedro Alejandro
Eusse Bernal**

Dirección Corporativa Innovación
y Negocios Emergentes, EPM

pedro.eusse@epm.com.co

**Gabriel Jaime
Correa Henao**

Área Planeación y Desempeño
Generación Energía, EPM

gabriel.jaime.correa@epm.com.co

**Elizabeth
Naranjo Cardona**

Dirección Corporativa Innovación
y Negocios Emergentes, EPM

elizabeth.naranjo@epm.com.co

**Beatriz Elena
Munera Rojo**

Dirección Corporativa Innovación
y Negocios Emergentes, EPM

beatriz.munera@epm.com.co

Resumen

En este artículo se expone un caso de estudio aplicado, asociado a la implementación de un proyecto piloto de generación de energía renovable en redes de acueducto. El proyecto constituye una solución innovadora para beneficio de las comunidades usuarias de los servicios públicos, en el marco de la

transición energética con foco en la eficiencia energética y la economía circular. El caso de estudio consiste en el aprovechamiento de la infraestructura de distribución de agua potable en zonas urbanas, mediante la adaptación de las bombas centrífugas, como turbinas de generación distribuida,

las cuales aprovechan la altura y caudal de agua de los tanques de almacenamiento de agua y la presión disponible en las redes de acueducto. El caso particular del proyecto piloto de generación corresponde a dos emplazamientos, con capacidad nominal

de 75kW y 25kW respectivamente. De esta manera, se logra el doble propósito de regulación de la presión del agua y se genera energía eléctrica, que se inyecta al sistema de distribución de energía.

Palabras clave:

Bomba como turbina, Válvulas disipadoras energía, Válvulas reguladoras presión, Hidráulica, Generación distribuida.

Keywords:

Pump as turbine, Energy dissipating valves, Pressure regulating valves, Hydraulics, Distributed generation.

Introducción

El uso de bombas como turbinas (PAT – Pump As Turbine por sus siglas en inglés) en proyectos de minigeneración de energía eléctrica en redes de acueducto es una alternativa eficiente, sostenible y de bajo costo, gracias al aprovechamiento de la infraestructura existente para generación de energía eléctrica limpia, mediante aprovechamiento de la energía hidráulica disponible en redes de agua potable y en sistemas de riego.

En esta contribución técnica se presenta la experiencia adquirida durante el desarrollo del proyecto piloto asociado a la tecnología PAT en válvulas del acueducto de la ciudad de Medellín (Colombia) y municipios aledaños (denominados municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá), propiedad de Empresas Públicas de Medellín (EPM). La información que se recopiló en los primeros meses de operación del proyecto piloto

constituye un insumo para determinar la escalabilidad en toda la red de acueducto en la ciudad de Medellín y su área metropolitana, teniendo en cuenta la disponibilidad de más de 800 válvulas (en cuyo caso, se estima un potencial energético de 6MW). En la contribución técnica también se presentan resultados asociados al desempeño de un proyecto piloto de generación de energía renovable utilizando tanques y redes de acueducto urbanas. Lo anterior, a partir del caso de estudio implementado por EPM desde el año 2023, correspondiente al aprovechamiento de la infraestructura de distribución de agua potable en zonas urbanas, mediante la adaptación de las bombas centrífugas en turbinas para generación distribuida, las cuales aprovechan la cabeza de altura y caudal de agua de los tanques de almacenamiento de agua potable.

La experiencia asociada a este proyecto piloto por parte de EPM determina la oportunidad de implementar un nuevo modelo de negocio con una solución tecnológica innovadora y eficiente, bajo el concepto de recurso energético distribuido, que pueda ser

escalable y replicable en otros sistemas de acueducto con condiciones topográficas similares, ubicados no solamente en zonas urbanas, sino también en zonas aisladas y no interconectadas con la red eléctrica.

1. Marco teórico

El uso de sistemas PAT en redes de acueducto, constituye una solución innovadora para generar energía eléctrica, mediante aprovechamiento de los excedentes de presión en las tuberías de agua potable. La tecnología contribuye a reducir costos de inversión y mantenimiento (por su economía y accesibilidad respecto a las turbinas tradicionales), mejora objetivos de eficiencia energética (recuperación de energía que normalmente se desperdicia en los puntos de reducción de presión), optimiza el uso de infraestructura existente (se aprovechan las redes de acueducto ya instaladas) y aporta a la sostenibilidad de los servicios públicos (generación energía limpia y descentralizada).

1.1 Principio de funcionamiento

Las bombas convencionales, diseñadas originalmente para mover agua en una sola dirección, pueden operar de forma inversa. Cuando se les permite trabajar en sentido contrario, la energía del flujo de agua (presión y caudal) se convierte en energía mecánica, que luego se transforma en electricidad mediante un generador acoplado. Este principio se basa en la transformación de la energía hidráulica en energía eléctrica, similar al funcionamiento de una turbina hidroeléctrica (Ortiz, 2008). En la figura 1 se aprecia la funcionalidad de un sistema PAT, las partes constitutivas de este tipo de máquinas y las particularidades de su operación en las redes de distribución de agua.



Figura 1. Esquema de un sistema Bomba como Turbina (PAT), con partes constitutivas. Tomado de: (Ortiz, 2008; Pérez et al., 2020).

Debido a su gran disponibilidad y variedad de puntos de funcionamiento, los sistemas PAT representan una estrategia plausible para estos propósitos, siempre que se instalen en emplazamientos adecuados.

Los dispositivos más comúnmente usados para reducir la presión en redes de acueducto son las válvulas disipadoras de energía (VDE) y las válvulas reguladoras de presión (VRP). Las VRP tienen como función reducir una elevada presión aguas arriba de la válvula a un valor menor constante aguas abajo de la misma, empleando una compuerta interna que se cierra o se abre, según los requerimientos de la red. En el caso de las VDE, el estrangulamiento al que es sometido el fluido al interior de la válvula hace que la energía que trae consigo hasta ese punto de la red se disipe y siga fluyendo con una energía menor.

1.2 Criterios de selección sistema PAT

Para seleccionar un sistema PAT es necesario analizar el potencial de recuperación

energético en redes de distribución con flujo a presión, con el objetivo de reducir la huella energética asociada a los procesos del agua en su ciclo captación-potabilización -distribución-tratamiento.

Las centrales hidroeléctricas en función de la potencia instalada pueden clasificarse en micro (<100 kW), mini (100-500 kW) y pequeñas (500-10000 kW) (Lu et al., 1988). El análisis de la correlación existente entre las curvas de caudal-altura cuando las máquinas trabajaban como bomba, así como cuando lo hacían como turbina, establece que, en función del número específico de revoluciones, su eficiencia varía entre el 60-80 % (López y Pérez, 2021). El aprovechamiento de estas máquinas será de gran utilidad en sistemas que necesitan disipar energía con unos impactos mucho más bajos que los introducidos en grandes saltos, y con costes de instalación menores (Pérez et al., 2020; López y Pérez, 2021), que harán viables a los proyectos con una tipología de diagrama colinar acorde con la figura 2.

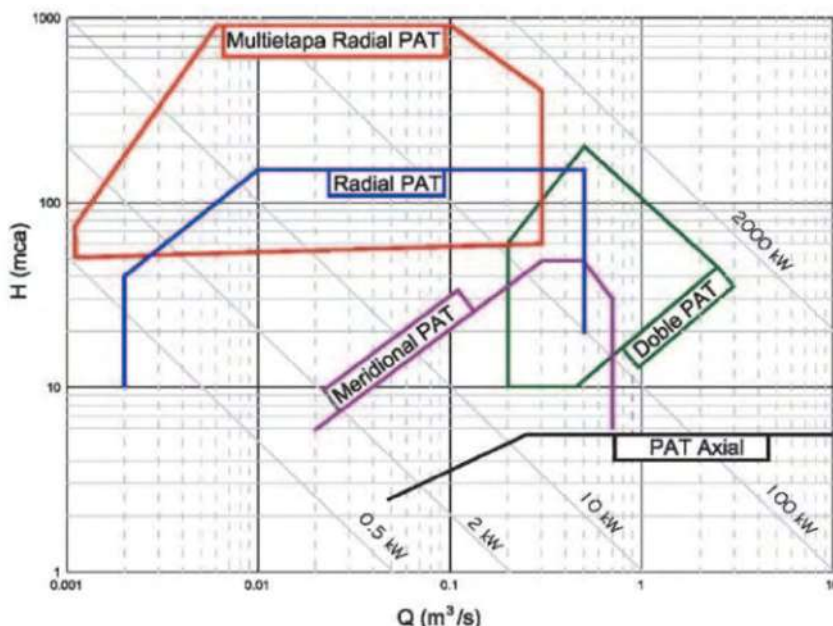


Figura 2. Diagrama colinar del rango de operación de bombas operando como turbinas. Tomado de: (Pérez et al., 2020).

1.3 Operación de los Sistemas PAT

Los sistemas PAT no han sido diseñados para operación sin supervisión. Por tal motivo se debe operar con estrecha supervisión cuando se trabaja de manera remota desde la sala de control del acueducto. Durante el tiempo que operen los sistemas PAT, se debe verificar frecuentemente que las diferentes variables operativas —tales como la velocidad de rotación (rpm), el caudal por cada ramal, la potencia generada por cada unidad, las presiones de entrada y salida de las unidades PAT, las temperaturas en los devanados de cada unidad— se encuentren dentro de los valores esperados.

La prioridad del sistema de generación, en este caso, es la necesidad de suministro de agua. Dependiendo del consumo del acueducto a lo largo de las horas del día, cada sistema individual PAT generará en función del consumo de agua en cada sitio. En períodos de bajo consumo, se tendrá una capacidad de generación menor y, en períodos de mayor consumo de agua, se tendrá la posibilidad de generar la máxima capacidad. Esto ocurre tanto en los sistemas que utilizan las VDE como en los que utilizan las VRP.

2. Descripción del caso de estudio en EPM

El agua que abastece a la ciudad de Medellín y el resto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá es captada por EPM de los embalses Río Grande II, Piedras Blancas y la Fe, ubicados por encima de los 2,150 msnm (metros sobre el nivel del mar). La ciudad de Medellín y los municipios aledaños se encuentra a una altitud media de 1,495 msnm, y por esta diferencia de altura, es posible transportar el agua hasta el punto de consumo por gravedad. No obstante, dadas las características topográficas y la

magnitud del gradiente de altura entre los puntos de captación y los de abastecimiento, la presión inducida por la columna de agua es tan alta que es necesario el uso de dispositivos que reduzcan la presión al interior de la red de transporte para evitar roturas de las tuberías y, en consecuencia, fugas de agua. El esquema general del sistema de acueducto de EPM en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se puede apreciar en la figura 3.

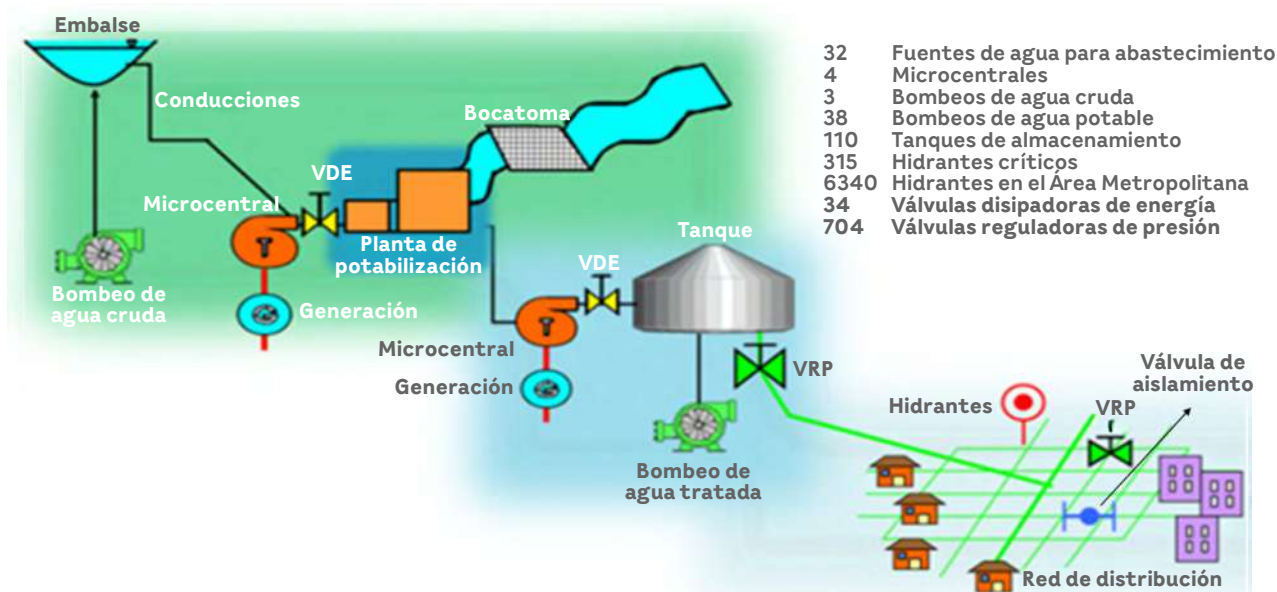


Figura 3. Esquema general del sistema de acueducto de EPM en el Área Metropolitana.

2.1 Promesa de Valor del Proyecto Piloto PAT

El proyecto piloto constituye una alternativa de ingresos para el negocio de Agua y Saneamiento de EPM, el cual puede ser replicado y escalado en los diferentes puntos en donde se cuente con VRP y VDE en de la infraestructura de acueducto de las Empresas Públicas de Medellín. Con la implementación costo eficiente de este proyecto se espera, entre otros, los siguientes beneficios para EPM:

- Ingresos para el negocio de Aguas y Saneamiento por la venta de la energía generada con la tecnología sistemas PAT.
- Ahorros por autoconsumo de energía en los sitios donde se tengan sistemas PAT.
- Mejores indicadores operativos (energía generada, costos, eficiencia operacional, entre otros).
- Transformación energética: aprovechamiento de la energía que hoy se disipa mediante VDE y VRP, convirtiéndola en energía eléctrica, optimizando así la infraestructura de acueducto.

- Implementación de tecnología asequible sistemas PAT en las VRP y VDE de la infraestructura de acueducto.

Además, el proyecto piloto permite adquirir capacidades, conocimientos, competencias técnicas y organizacionales asociadas a la tecnología PAT para su potencial integración a los modelos de operación de cualquier red de acueducto en cualquier lugar del mundo que presente unas condiciones topográficas similares a las de la ciudad de Medellín, con la finalidad de configurar un caso de negocio que genere ingresos adicionales por la venta o utilización de la energía eléctrica en este modelo de generación distribuida.

Actualmente, EPM cuenta con 704 VRP y 34 VDE instaladas en la red de acueducto de la ciudad de Medellín y municipios vecinos. La línea base del alcance del proyecto piloto consistió en las actividades de diseño, montaje y puesta en operación de un sistema de generación distribuida con capacidad de 75 kW (tres

bombas como turbina de 25 kW cada una) en el sitio denominado El Dorado con una VDE (válvula VDE-327), y otro sistema de generación de 25kW en el sitio denominado La Estrella con una VRP (válvula VRP-90074). La formulación de todas las fases del proyecto consistió en:

- Realización de estudio de mercado que arrojó que las turbinas hidrocínicas son tecnologías maduras con presencia en el mercado, con un amplio número de proveedores, pero que no se ajustan a las características de la red del acueducto de EPM, por estar sometida a altas presiones. Esta condición llevó a descartarlas.
- En cuanto a la tecnología PAT, se identificó que no está completamente madura ni disponible en el mercado, aunque se encontraron pilotos demostrativos, y casos de éxito de estudios realizados por universidades en España, Holanda, Italia y Malasia.
- La anterior condición hizo que el proyecto fuera innovador y novedoso y que sus resultados sean de interés para implementar soluciones de suministro de agua y, simultáneamente, de generación de energía, mediante la instalación de turbinas hidráulicas (bombas como turbinas), capaces de aprovechar no solo la velocidad del agua (como lo hacen las turbinas hidrocínicas), sino también la presión del sistema, lo que finalmente se traduce en una solución más eficiente desde la producción energética.
- Realización de mediciones previas en distintas válvulas VDE y VRP para determinar el potencial de generación de energía. La selección de los mejores emplazamientos de VDE y VRP no solo tienen en cuenta los aspectos operativos, sino también de ubicación y facilidad de acceso.
- Realización del diseño detallado de los sistemas PAT asociados a la VDE y VRP (cálculos de ingeniería y selección de equipos).
- Adquisición de los equipos principales (bombas, motores o generadores).
- Adquisición de los equipos auxiliares (tableros de potencia y control con toda la instrumentación, medida y comunicaciones).

- Ejecución de actividades de adecuaciones de obra civil.
- Montaje de los equipos de los sistemas PAT.
- Ejecución de pruebas operativas preliminares y pruebas de entrada en operación de los sistemas PAT.
- Capacitación al personal operativo en las actividades de operación y mantenimiento de los sistemas PAT.
- Realización de medición continua de las variables operativas principales, una vez los sistemas PAT entran en operación. El sistema automático de control verifica frecuentemente que las diferentes variables operativas, tales como la generación de energía (kWh/día), voltaje y corriente de operación, caudales y presiones, velocidad de rotación, temperaturas en devanados de cada unidad, etc., se encuentren dentro de los valores esperados, sin afectar la prestación del servicio de acueducto a los usuarios.

2.2 Configuración Mecánica PAT para Válvulas VDE y VRP

El proyecto piloto consideró la instalación en paralelo (bypass) de sistemas PAT con las válvulas disipadoras de energía, o bien, con las válvulas reguladoras de presión existentes en cada sitio. Para el caso del proyecto El Dorado, el montaje en paralelo se realizó en el sitio de entrada de agua potable hacia el tanque, en donde se cuenta con una válvula disipadora de energía (válvula VDE-327) cuyo emplazamiento se muestra en figura 4.

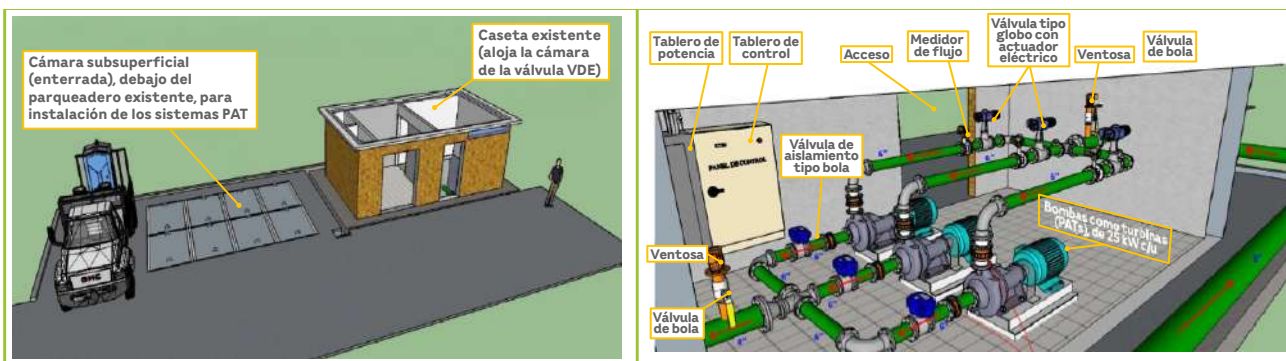


Figura 4. Emplazamiento de VDE-327 (El Dorado) en caseta exterior y representación esquemática del sistema PAT.

Para el caso del Proyecto La Estrella, el bypass se realizó en la cámara de la válvula reguladora

de presión (válvula VRP-90074), cuyo emplazamiento se presenta en la figura 5.

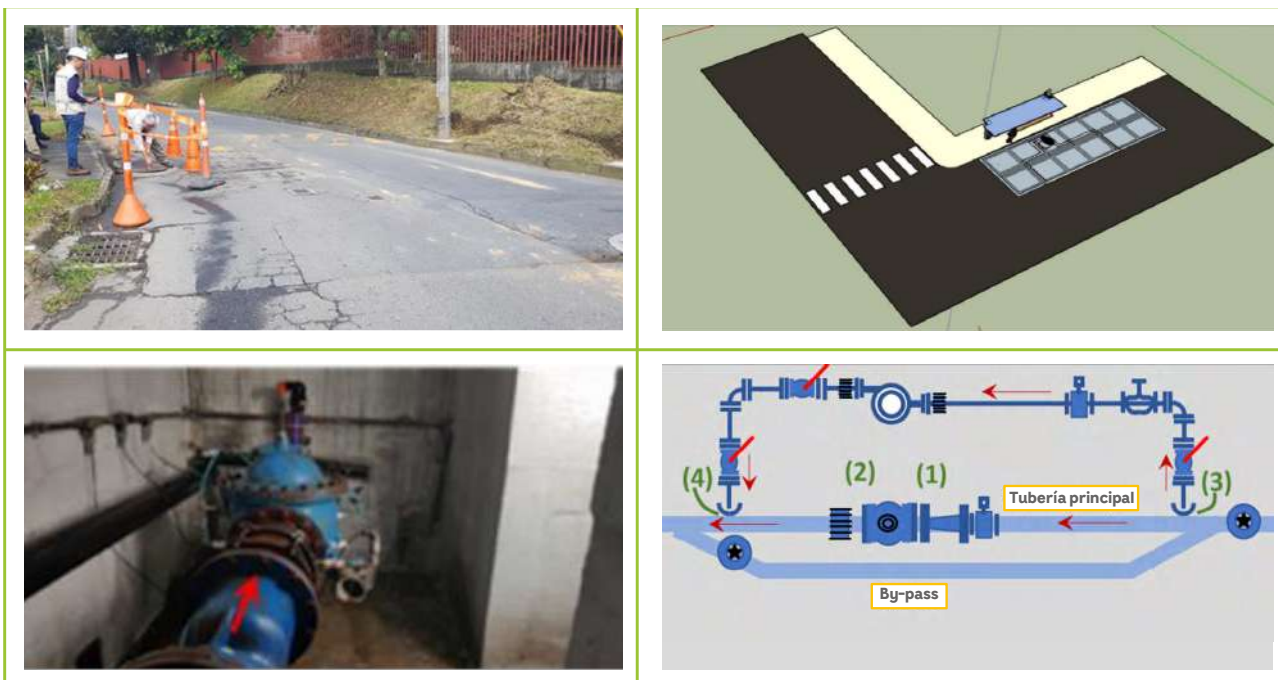


Figura 5. Emplazamiento de VRP-90074 en cámara subterránea (La Estrella) en vía y representación esquemática del sistema PAT.

La potencia eléctrica (P en kW) que puede generarse a través de la unidad PAT instalada en cada ramal A, B, C, está dada por la ecuación: (Ortiz, 2011)

$$P = \rho \times g \times H \times Q \times \eta$$

En el proyecto piloto se determinó la observación de las siguientes características nominales, con las cuales se determina el tipo de tubería para conexión de las unidades de generación:

- Caudal nominal por sistema PAT: $Q = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$ (45 l/s) para la PAT de El Dorado y $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (100 l/s) para la PAT de La Estrella
- Diferencia de alturas nominal o salto neto nominal: $H = 92 \text{ m.c.a.}$ (metros de columna

de agua) para la PAT de El Dorado y 39,8 m.c.a para la PAT La Estrella.

- Eficiencia mínima estimada de cada unidad PAT: $\eta = 60 \% - 73 \%$
- Densidad del agua: $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$
- Gravedad: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$

La unidad PAT que se adapta a las características nominales previamente descritas, corresponde a la solución de configuración radial, según se valida en el diagrama colinar de la figura 2, con potencia nominal de 25kW.

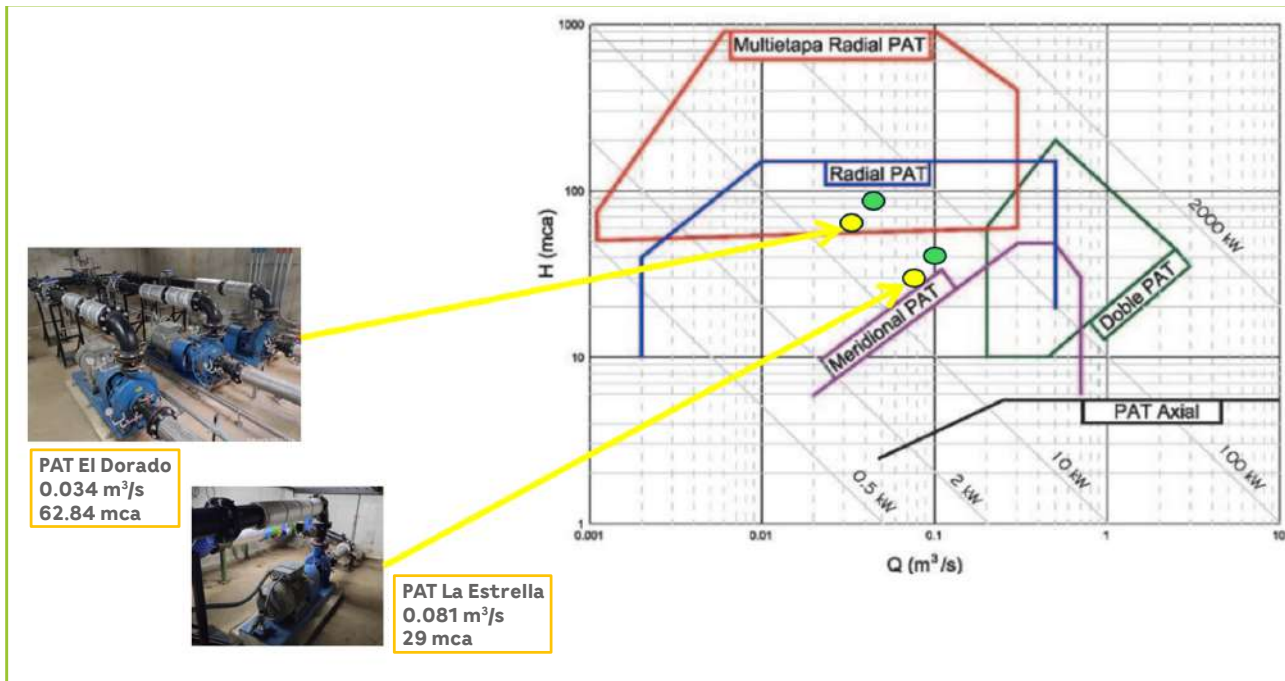


Figura 6. Rango de operación bombas operando como turbinas. Tomado de: Eusse, Álvarez y Correa, 2025).

Esta información también permitió realizar el dimensionamiento hidráulico y los ajustes de maniobra de las tuberías, válvulas globo y válvulas de aislamiento en el sistema PAT, en cuyo caso, para el proyecto piloto, se

configuraron con tubería de 6", según se presenta en la figura 7 (Válvula VRP La Estrella 25kW) y en la figura 8 (Válvula VDE El Dorado 75kW)

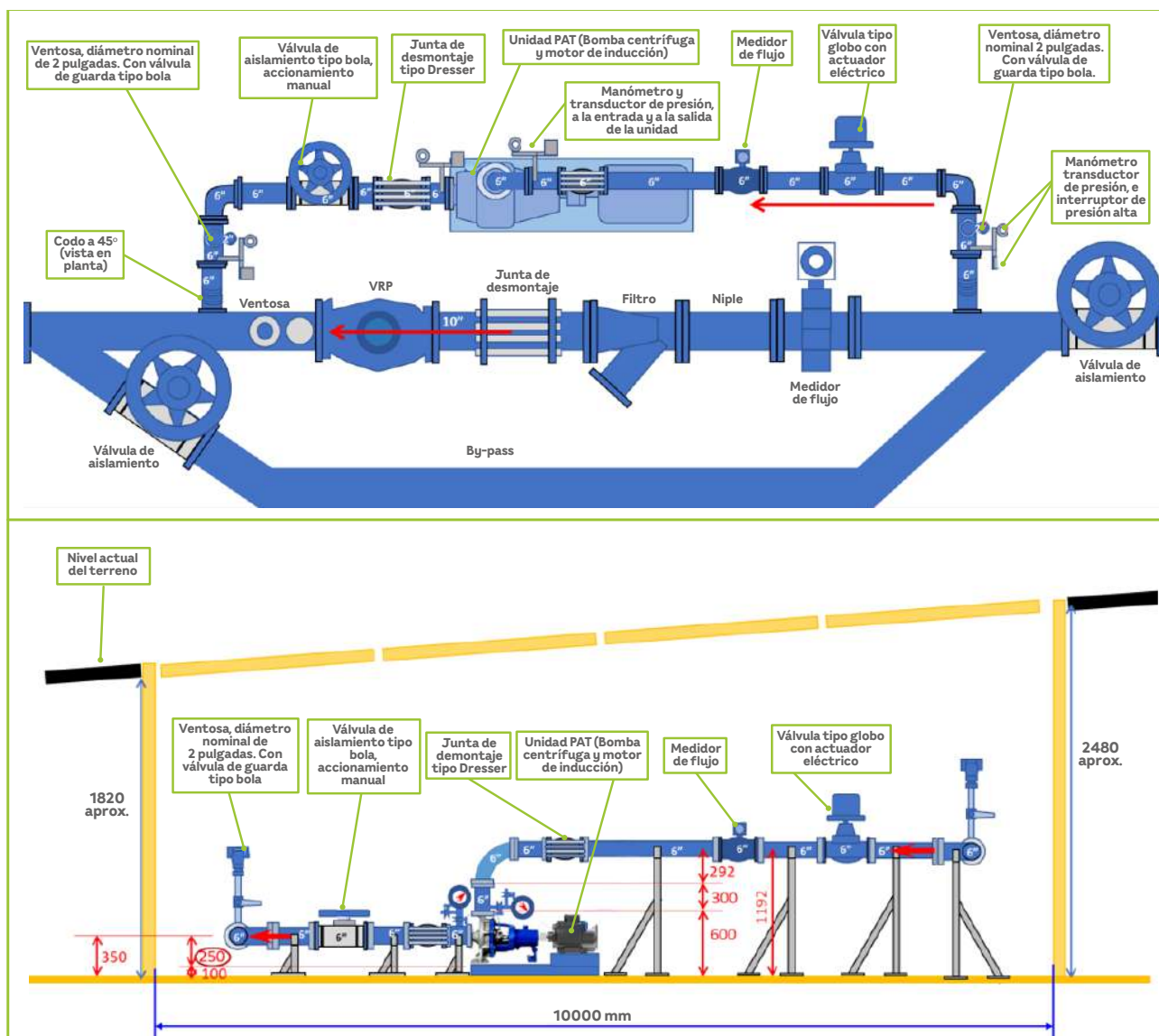


Figura 7. Configuración del Sistema PAT de 25kW en válvula VRP La Estrella (Vista de Planta y de Perfil).



Figura 8. Montaje del Sistema PAT de 75kW en válvula VDE El Dorado (Montaje final).

2.3 Configuración eléctrica PAT

Las unidades PAT generan energía mediante la utilización de motores eléctricos de inducción, los cuales se operan como generador, según corresponde al uso común de las bombas operadas como turbinas. Los motores

eléctricos que se describen en la Tabla 1 están protegidos de la intemperie, dentro de una cámara subterránea debajo de la vía en el sitio de la VRP La Estrella (1 generador de 25kW) y en cámara subterránea en el emplazamiento VDE El Dorado (3 generadores de 25kW c/u).

Descripción	Valor
Tipo	Trifásico, Inducción Jaula de Ardilla
Potencia de placa del motor	29.84 kW
Voltaje Nominal	480 VCA en vacío
Frecuencia	60 Hertz
Velocidad	1800 RPM
Ciclo de Operación	Continua
Tipo de Cerramiento	TEFC (Totally Enclosed Fan-Cooled)
Eficiencia como motor	93 %
Factor de Potencia	85 %
Aislamiento de los devanados	Clase F (155° C)
Factor de Servicio	1,15

Tabla 1. Datos técnicos de cada motor (generador) de las unidades PAT.

El motor de inducción, al ser reversible, puede convertirse en un generador de potencia activa al acoplarse a un dispositivo mecánico que genere energía mecánica rotacional, y logre superar la velocidad sincrónica, como ocurre con las unidades PAT. Adicionalmente, no se requiere de equipo de sincronización, poseen buena capacidad para admitir sobre velocidades por encima de la velocidad nominal, y la protección contra cortocircuitos es relativamente sencilla (Ortiz, 2008). La principal desventaja es que no dispone de instrumentos que le permitan regular la potencia reactiva, por lo tanto, ésta debe ser suministrada externamente. Para el caso del proyecto piloto se determinó la conexión de banco de condensadores de 11,3kVAR conectado a las terminales de cada unidad PAT.

Adicionalmente, este proyecto tuvo el tratamiento de una instalación de generación distribuida, por cuanto también se estimaron las siguientes actividades, como parte del alcance del proyecto:

- Trámite del servicio de certificación de la instalación, según normativa del RETIE.
- Instalación de medidores en la frontera energética para efectos de supervisión en el desempeño del sistema PAT, dado que se realiza la venta de excedentes energéticos, para aplicar la resolución CREG 174 de 2021.
- Suministro, instalación y puesta en funcionamiento de equipos mecánicos y electromecánicos, los cuales se han relacionado en este capítulo, incluyendo los

respectivos acondicionamientos de obras civiles y mecánicas, en los emplazamientos (VRP 90074 y VDE 327) designados para el proyecto.

- Suministro, instalación y puesta en funcionamiento de hardware, tableros de control y protección, para acondicionamiento de la energía que se inyecta al sistema de distribución del operador de red, en los puntos autorizados por éste.
- Acometidas y conducciones de cableado de potencia a los circuitos eléctricos, según normativa vigente.
- Conexión de puesta a tierra para la tecnología de generación y para el punto de conexión.

El sistema de control de las PAT realiza la medición continua de las variables eléctricas y mecánicas (energía generada, voltaje y corriente, caudales y presiones, velocidad de rotación, estado de apertura de las válvulas de sistema, etc). El sistema de control toma acciones automáticamente, para generar dentro de los parámetros establecidos, o para apagar el sistema en caso de que se presenten no conformidades (por ejemplo, caudal o presión insuficiente para generar, velocidad de rotación insuficiente, rechazo de carga, etc). No obstante, los sistemas PAT permiten la supervisión y monitoreo continuo, gracias a su conexión al Centro de Control de Acueducto de EPM para operación remota.

3. Rentabilidad del proyecto piloto

El proyecto piloto se enmarca como una tecnología de generación distribuida, la cual es susceptible de acceder a estímulos financieros en Colombia, contemplados en la Ley 1715 de 2014 y en la Ley 2099 de 2021. Dicho marco legal establece los instrumentos para la

promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética

y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda en el marco de la política energética en Colombia. La Tabla 2 presenta las consideraciones económicas para estimar la rentabilidad del proyecto piloto. Debe considerarse la oportunidad de acceso a los

beneficios tributarios contemplados en la Ley 1715, en cuanto al menor aporte en el pago del impuesto de renta y exoneración de impuestos (IVA, aranceles, etc), así como la depreciación acelerada de activos en menos de 5 años (Correa y Yusta, 2018).

	CAPEX Unitario (USD \$/kWh)	Precio Generación Energía (USD \$/kWh)	Producción Energética (kWh/año)	VPN (USD)	TIR
PAT VRP Estrella 25kW	\$ 241.241	0,0575	131.400	\$ 19.318	10,9 %
PAT VDE Dorado 75kW	\$ 229.344	0,0575	394.200	\$ 158.677	21,1 %

Tabla 2. Datos de evaluación económica proyecto piloto PAT (Datos Formulación).

La evaluación de rentabilidad económica del proyecto en la Tabla 2 tiene en cuenta un factor de planta del 60 %, así como datos macroeconómicos en Colombia asociados a las proyecciones económicas de largo plazo, es decir, inflación anual del 3,5 %, devaluación anual (Peso/Dólar) del 2 %, tasa representativa del mercado de COP/USD Col\$4000, WACC del 9 %, en un periodo de 33 años. Adicionalmente, en la Tabla 2 se establecen las inversiones CAPEX para cada caso (PAT La Estrella 25kW y PAT El Dorado 75kW), las cuales incluyen el suministro

de equipos, instalación, puesta en operación, acondicionamiento con obras civiles, mecánicas y eléctricas. También se tienen en cuenta las intervenciones de mantenimiento mayor que requieren estos equipos PAT con periodicidad de 5 años (American-Marsh Pumps, s. f.). Al acceder al beneficio tributario en la declaración de renta, los proyectos presentan rentabilidades mayores al 10 % a pesar de que, en un escenario de precios bajos de energía (contratos de venta de energía de 230 Col\$/kWh (0,0575 USD/kWh)), se tienen rentabilidades en dólares con VPN > 0.

Conclusiones y resultados

En la contribución técnica se ha presentado una tecnología de generación de energía PAT, la cual aprovecha los excesos de presión que se presentan en la red de acueducto de la ciudad de Medellín. Además de implementar una tecnología innovadora en el contexto de la prestación de servicios públicos de acueducto, el proyecto piloto ha permitido adquirir conocimiento, capacidades, competencias técnicas y organizacionales asociadas a esta tecnología para su potencial integración a los modelos de operación de redes de acueducto y de gestión de energía en donde, la velocidad y la presión del agua permitan su implementación.

La contribución técnica permitió evidenciar resultados asociados al desempeño de un proyecto piloto de generación de energía renovable utilizando tanques y redes de acueducto urbanas, gracias al aprovechamiento de la infraestructura existente de distribución de agua potable en zonas urbanas, mediante la adaptación de las bombas centrífugas, como turbinas de generación distribuida, las cuales aprovechan la cabeza de altura y caudal de agua de los tanques de almacenamiento de agua.

En la contribución técnica se ha proporcionado la base de la estructuración de un proyecto piloto para la generación de energía en dos sitios definidos por EPM, con aplicación en una válvula reguladora de presión (VRP) y una válvula disipadora de energía (VDE). Adicionalmente, se proporcionó el fundamento para los

estudios técnicos, CAPEX, OPEX y mecanismos de beneficios tributarios para este tipo de proyectos de generación distribuida.

El proyecto piloto permitirá demostrar la viabilidad, replicabilidad y escalabilidad de este tipo de instalaciones de doble propósito (generación distribuida y suministro de agua) para las comunidades urbanas, validando la apropiación tecnológica, la rentabilidad económica y el impacto positivo en las comunidades urbanas usuarias de los servicios públicos.

Como resultado, la contribución técnica permite documentar una nueva oportunidad de negocio asociado a la generación distribuida, mediante la adaptación de infraestructura de acueducto, para beneficio de comunidades urbanas y rurales ubicadas en zonas con topografías similares a las de la ciudad de Medellín.

Actualmente, el proyecto se encuentra en periodo de evaluación, ya que se consideraron como mínimo 3 años de seguimiento para definición de su viabilidad y posterior escalamiento. Sin embargo, ya se determina que los factores clave y de mayor impacto y relevancia están relacionados con el precio en bolsa de energía del kWh y con las políticas gubernamentales de país, que afectan directamente la rentabilidad financiera de este tipo de aplicaciones.

Referencias

- American-Marsh Pumps. (s. f.). *Inline End Suction Pumps*. Wilo. <https://rebrand.ly/ycoihko>
- Correa, G. & Yusta, J. (2018). Feasibility of generation projects with renewable energy resources, via tax stimuli. Case study with colombian 1715 law. *2018 IEEE ANDESCON*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564705>
- Eusse, P., Álvarez, J., Correa, G. (2025). Generación de energía en las redes de acueducto de la ciudad de Medellín, empleando la tecnología PAT (bombas como turbinas). En: XVII Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRÉ. <https://cigre.org.py/document/tomo-i-equipos/>
- López, P. y Pérez, M. (2021). *¿Qué es una bomba funcionando como turbina (PAT)?* RiuNet. <https://rebrand.ly/f2v8tr0>
- Lu, Q., Sun, Y., & Lee, G. (1988). Nonlinear optimal excitation control for multimachine systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 21(11), 27-32. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)53720-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)53720-9)
- Ortiz, R. (2008). *Máquinas reversibles aplicadas a microcentrales hidroeléctricas* [Proyecto de investigación]. <https://rebrand.ly/sjp6wil>
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Ediciones de la U.
- Pérez, M., Sánchez, F., Ramos, H., y López, A. (2020). Bombas operando como turbinas (Pat): *Principios de funcionamiento y selección*. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://rebrand.ly/7eea43>

Cómo citar este artículo:

Álvarez Arroyave, J; Eusse Bernal, P; Correa Henao, G; Naranjo Cardona, E; Munera Rojo, B. (2026). Generación de energía eléctrica en redes del sistema de acueducto empleando bombas centrífugas como turbinas. *Revista EPM*, (26), 50-65.



Válvula pico de pato en descargas sumergidas

Duckbill valve in submerged discharges

**Andrés Camilo
Cardona Zapata**

Área Diseño e Ingeniería Acueducto
y Alcantarillado, EPM

andres.camilo.cardona@epm.com.co

Resumen

El presente documento analiza el diseño teórico y el funcionamiento de una válvula tipo pico de pato (duckbill valve) instalada en estructuras de descargas sumergidas dentro del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, considerando que el punto de descarga se encuentra por debajo del nivel asociado a la creciente con período de retorno de 100 años. Bajo estas condiciones, el sistema presenta riesgo de inundación por refluo, ingreso de

caudal desde el cauce hacia la red urbana y afectación a la infraestructura y a la seguridad hidráulica de la zona, así mismo, se presentan casos de diseños específicos. Este estudio proporciona una base técnica sólida para la implementación y estandarización de este tipo de válvulas en obras de drenaje urbano del Valle de Aburrá, contribuyendo a mejorar la seguridad hidráulica y la resiliencia del sistema frente a eventos extremos.

Palabras clave:

Válvula pico de pato, Descargas sumergidas, Diferencial de presión, Pérdidas de carga.

Keywords:

Duckbill Valve, Submerged discharges, Pressure differential, Load losses.

Introducción

Las válvulas tipo pico de pato (duckbill valves) se han consolidado como una alternativa eficiente y de bajo mantenimiento para el control de descargas en sistemas hidráulicos y sanitarios, especialmente en aplicaciones donde se requiere prevenir el reflujo bajo condiciones de operación sumergida. Su diseño flexible, basado en un elastómero que actúa como un conducto deformable con cierre pasivo, permite el paso unidireccional del caudal sin necesidad de mecanismos metálicos, resortes ni fuentes externas de energía. Esta simplicidad estructural se traduce en alta confiabilidad operativa, resistencia a la corrosión y desempeño estable incluso en ambientes agresivos o con presencia de sólidos en suspensión.

En descargas sumergidas, las duckbill valves ofrecen ventajas significativas frente a las válvulas de retención tradicionales, debido a su capacidad para mantener un sello hermético bajo cargas externas variables y a su comportamiento hidráulico favorable en términos de pérdida de carga, cavitación y mitigación de turbulencias. Además, al evitar el reflujo y la intrusión de cuerpos extraños, contribuyen a mejorar la integridad del sistema, reducir riesgos sanitarios y minimizar la entrada de sedimentos o fauna acuática en las líneas de conducción.



Figura 1. Válvulas pico de pato en instalaciones portuarias. Tomado de: (Wang, 2013).

A pesar de su adopción creciente en obras hidráulicas, emisarios (ver figura 1), sistemas pluviales y plantas de tratamiento, el desempeño de las válvulas pico de pato depende de manera crítica de su diseño geométrico, las propiedades del material y las condiciones de operación. Factores como la presión diferencial, el ángulo de apertura, la rigidez de la pared, la interacción con el flujo circundante y el régimen hidráulico de la

descarga sumergida influyen directamente en la eficiencia y vida útil del dispositivo. En consecuencia, es necesario avanzar en el análisis técnico y experimental que permita optimizar su configuración y garantizar su funcionamiento en escenarios reales.

Este artículo presenta el diseño, la evaluación y la aplicación de válvulas tipo pico de pato en descargas sumergidas, considerando

tanto los criterios hidráulicos como los aspectos estructurales y operativos que determinan su desempeño. Los resultados contribuyen a ampliar el entendimiento sobre su comportamiento bajo diversas condiciones y proporcionan lineamientos para su selección e implementación en sistemas de ingeniería hidráulica.

La válvula pico de pato, fabricada en elastómero con memoria estructural, opera como una válvula de retención pasiva que permite el flujo unidireccional desde la red hacia el cuerpo receptor y se cierra automáticamente cuando la presión externa (hidroestática del río o quebrada) supera la presión interna del drenaje. Esta característica la convierte en una solución adecuada para entornos donde las descargas permanecen sumergidas durante crecientes, evitando el refluo, la intrusión de sedimentos y el retorno de caudales contaminados a la red de aguas lluvias.

El diseño teórico realizado considera variables fundamentales como:

- Presión diferencial mínima de apertura,

función del espesor y rigidez del caucho.

- Pérdida de carga al caudal de diseño, determinada mediante curvas Q-H del fabricante.
- Profundidad de sumergencia durante eventos Q100, que controla la presión de cierre.
- Geometría de salida y disipación del chorro sumergido, para evitar socavación local.
- Compatibilidad con la estructura existente, incluyendo bridas, anclajes y confinamiento hidráulico.

El análisis hidráulico evidencia que, aun bajo niveles de crecientes superiores al punto de descarga, la válvula mantiene un sello hermético, que evita la entrada de agua hacia la red urbana, protege las estructuras aledañas y reduce la probabilidad de inundaciones internas. A su vez, el comportamiento del flujo en descarga libre y sumergida demuestra que el dispositivo no genera pérdidas energéticas significativas durante eventos de precipitación ordinaria, garantizando una capacidad de evacuación acorde con los requerimientos de diseño pluvial en Medellín.

1. Estado del arte

Para el desarrollo del presente estudio se realizó una revisión exhaustiva de la literatura especializada que incluyó libros técnicos, normas de referencia y artículos académicos publicados en revistas científicas indexadas. Esta revisión permitió identificar los principales enfoques teóricos, metodologías de análisis y resultados experimentales relevantes reportados por diversos autores, así como reconocer las tendencias actuales y las líneas de investigación predominantes en el área de estudio.

En el artículo *CFD modeling of inclined dense jets discharged from round and duckbill nozzles* se evalúa y se corrobora que el uso de boquillas tipo pico de pato proporciona una mayor dilución inicial y trayectorias de chorro más largas en comparación con las boquillas circulares. Además, se determinó que un ángulo de 45° es el más adecuado para su funcionamiento eficiente. En conjunto, estos resultados ofrecen información clave para mejorar el diseño y la optimización de sistemas de descarga marina (Günay & Anilan, 2026).

El artículo *Fabrication and in vivo testing of a sub mm duckbill valve for hydrocephalus treatment* documenta el desarrollo de una válvula tipo pico de pato miniaturizada fabricada en 2024 en la Arizona State University (ASU), dentro del Department of Electrical, Computer and Energy Engineering. Allí fue diseñada mediante técnicas de microfabricación en PDMS (Polidimetilsiloxano, un polímero elastomérico de silicona) y posteriormente probada tanto en ensayos de laboratorio como en experimentos in vivo aprobados por el comité IACUC (Institutional Animal Care and Use Committee).

El estudio concluye que esta válvula *duckbill* miniaturizada demostró flujo unidireccional confiable, fugas inversas prácticamente nulas

y una presión de apertura ajustable, lograda mediante la modificación de parámetros geométricos como el espesor, la longitud del pico y el ancho del canal, tal como se evidencia en la figura 2. Además, las pruebas en animales confirmaron que la válvula puede reducir eficazmente aumentos de presión intracraneal, drenando exceso de fluido de manera pasiva y segura. Los autores destacan también que, aunque se observaron variaciones entre animales, el desempeño general validó su funcionamiento y su potencial como alternativa a las válvulas tradicionales, y recomiendan estudios crónicos y mejoras en herramientas de inserción para aplicaciones futuras (Jung et al., 2024).

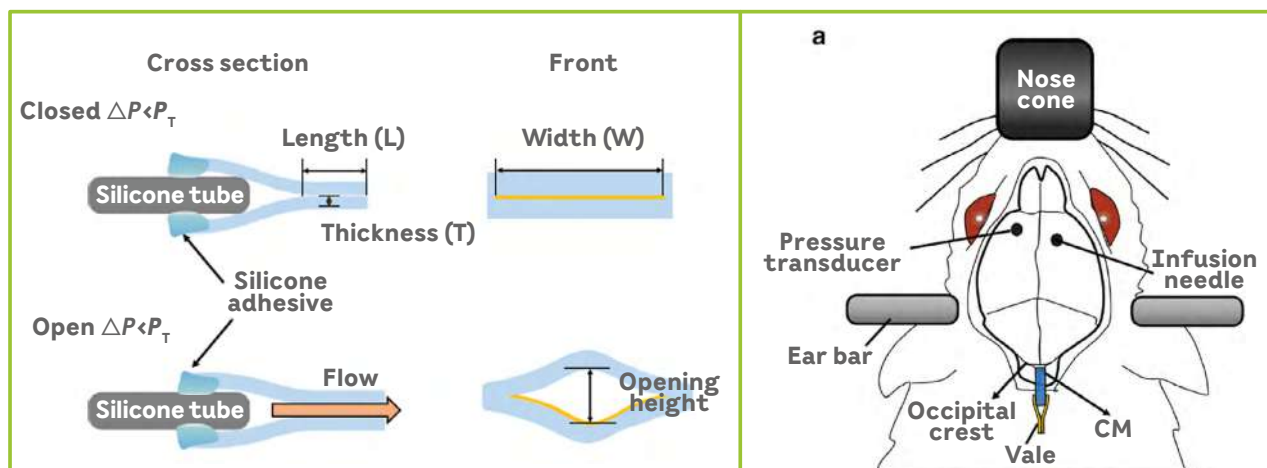


Figura 2. Fabricación de válvula de pico de pato miniatura para flujo unidireccional (CM). Tomado de: (Jung et al., 2024).

La tesis de Wang (2013) desarrolla un marco teórico avanzado para modelar la interacción fluido-estructura (FSI) en válvulas elastoméricas tipo pico de pato, cuya apertura depende de un acoplamiento no lineal entre la presión interna, la deformación del material y la geometría del conducto. Se formula un

modelo estructural laminado (ver figura 3), en el que la válvula se representa como un cascarón compuesto por capas hiperelásticas y ortotrópicas, lo que permite capturar el comportamiento altamente no lineal del caucho reforzado con fibra y las grandes deformaciones inducidas por el flujo.

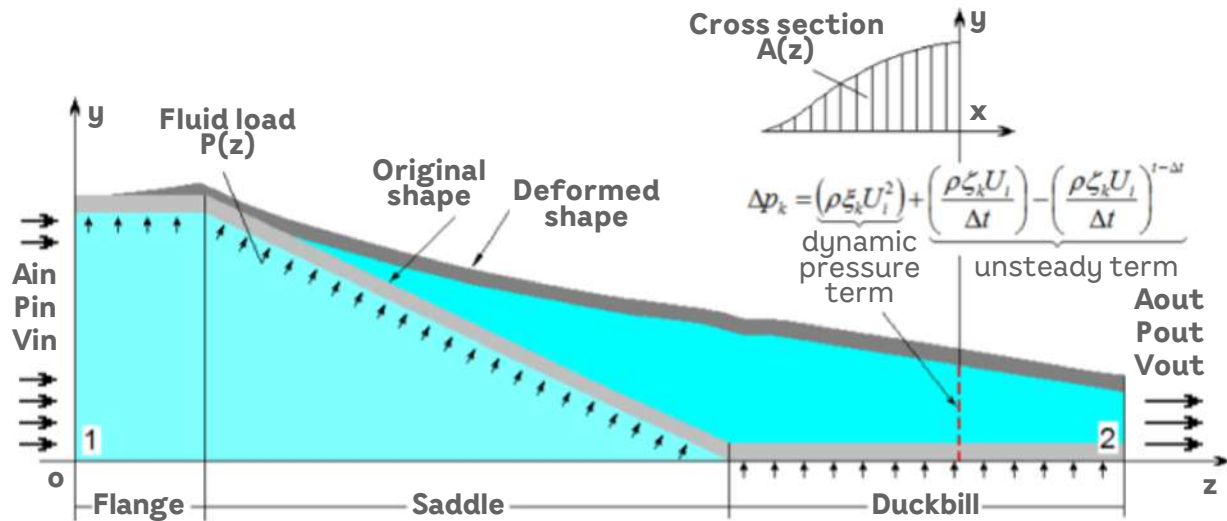


Figura 3. Deformación de la sección según la carga del fluido. Tomado de: (Wang, 2013).

Este modelo se acopla a un modelo unidimensional transitorio de flujo ideal, derivado de las ecuaciones integrales de conservación de la cantidad de movimiento, el

cual permite describir el desarrollo del campo de presiones y las velocidades a lo largo del túnel de la válvula, así como su efecto sobre la apertura, como se muestra en la figura 4.

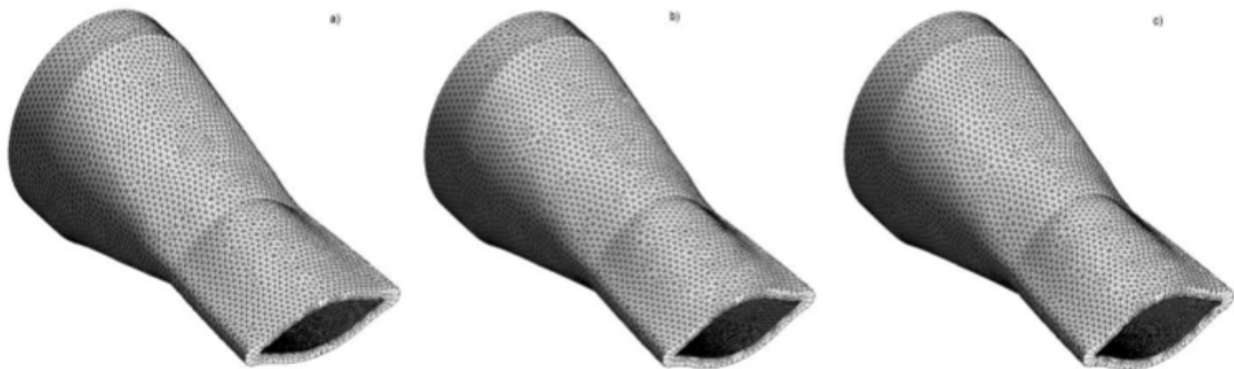


Figura 4. Apertura válvula pico de pato para presiones de 18 Kpa, 29 Kpa y 36 Kpa. Tomado de: (Wang, 2013).

El enfoque monolítico empleado garantiza la consistencia matemática entre la dinámica del fluido y la respuesta estructural, evitando las limitaciones de los métodos de acoplamiento particionado. La validación teórica incluye comparaciones con simulaciones tridimensionales basadas en las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas en Reynolds (RANS) y modelos de turbulencia tipo SST $k-\omega$, lo que demuestra que el flujo a través de la válvula puede considerarse esencialmente unidimensional, salvo en regiones de capa límite. Los ensayos experimentales en túnel de agua confirman las predicciones del modelo, incluyendo la relación carga-caudal casi lineal, la distribución de presiones y la evolución geométrica de la apertura.

Además, el análisis teórico revela que la capa de refuerzo fibroso controla la rigidez axial y la extensión material, mientras que las capas externas de caucho gobiernan la flexión, lo que explica la capacidad de la válvula para mantener grandes aperturas con pérdidas de energía moderadas. Finalmente, el estudio de Wang (2013) demuestra que el modelo FSI predice condiciones en las que pueden aparecer vibraciones inducidas por el flujo (FIV) en regímenes de baja inercia, aportando bases teóricas para evaluar la estabilidad dinámica de estas válvulas (ver figura 5).

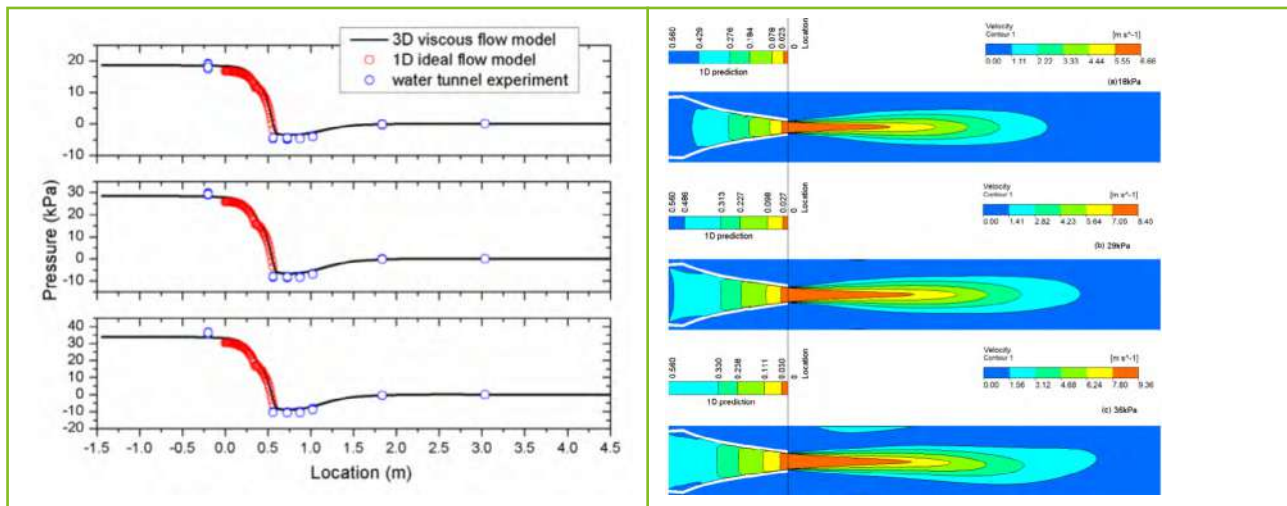


Figura 5. Descarga sumergida para variaciones de presiones de 18 Kpa, 29 Kpa y 36 Kpa. Tomado de: (Wang, 2013).

Las predicciones del modelo del flujo 1D coinciden con los resultados experimentales (ver figura 6). El modelo de flujo 3D predice

velocidades de flujo ligeramente más altas, atribuyéndose la influencia de la capa límite viscosa cerca de la pared de la válvula.

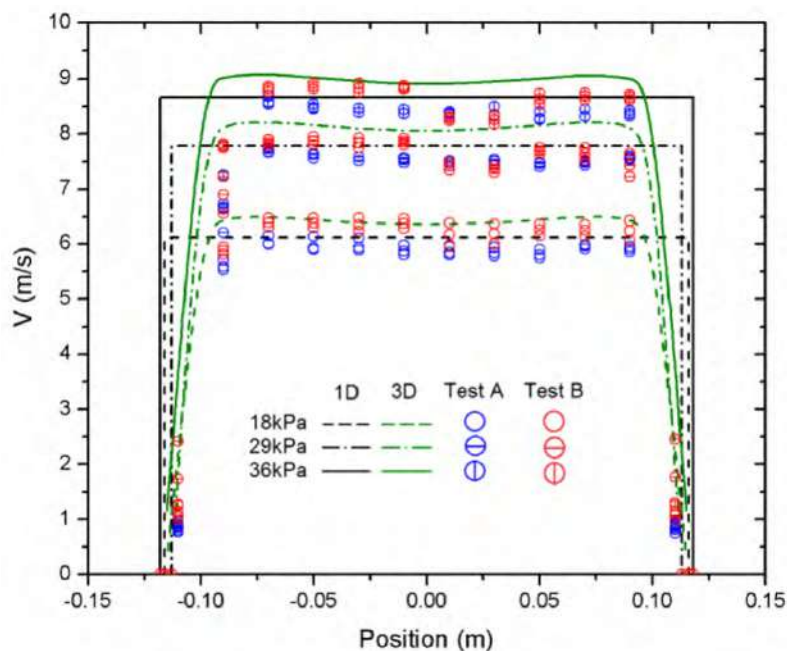


Figura 6. Resultados de modelos 1D y 3D para presiones de 18 Kpa, 29 Kpa y 36 Kpa. Tomado de: (Wang, 2013)

El artículo *Hydraulics of DuckBill Valve Jet Diffusers* (Lee Jung et al., 1997) presenta uno de los primeros análisis sistemáticos del comportamiento hidráulico de los difusores equipados con válvulas elastoméricas tipo pico de pato (*duckbill*), utilizados principalmente en emisarios submarinos y descargas de aguas residuales. Estas válvulas han sido incorporadas en múltiples *outfalls* oceánicos para evitar la intrusión de agua salina y sedimentos, un problema recurrente en difusores convencionales durante condiciones de bajo caudal.

A diferencia de los puertos de diámetro fijo, las *válvulas duckbill* presentan un área de apertura variable, lo que genera una relación no lineal entre el caudal descargado y la velocidad del chorro. El artículo compila y analiza resultados experimentales de diferentes estudios y ensayos hidráulicos realizados en Estados Unidos, Australia y Hong Kong, logrando derivar dos relaciones adimensionales fundamentales

que describen el porcentaje efectivo del área de apertura del chorro y la pérdida de carga introducida por la válvula.

Estas relaciones, desarrolladas para diámetros nominales entre 100 mm y 305 mm, son aplicables de forma general a válvulas elastoméricas similares y pueden integrarse en modelos de hidráulica interna, cálculos de difusores y herramientas de simulación ambiental.

El estudio también evalúa la mezcla en campo cercano de chorros emitidos por válvulas *duckbill* usando técnicas de fluorescencia inducida por láser (LIF). Los resultados muestran que el chorro con forma de *labio*, propio de estas válvulas, produce diluciones iniciales sustancialmente mayores en comparación con un chorro circular convencional en coflujo, mejorando el desempeño ambiental del difusor.

En conjunto, los hallazgos indican que el uso de válvulas tipo *duckbill*:

- Mejora la uniformidad de la distribución de caudales en los puertos del difusor.
- Incrementa las velocidades del chorro, favoreciendo la dilución.
- Implica mayores requerimientos de energía para el sistema debido a la pérdida de carga adicional asociada.

El artículo concluye que estas válvulas representan una alternativa eficaz para controlar el reflujo, optimizar la mezcla inicial y proteger la integridad de los emisarios, siempre que se integren adecuadamente en los modelos hidráulicos y ambientales utilizados en el diseño de descargas submarinas.

Estas relaciones fueron derivadas para diámetros nominales entre 100 y 305 mm, y se consideran aplicables de manera general a las válvulas elastoméricas similares; así mismo, estas ecuaciones permiten determinar la velocidad del chorro y el área de apertura, parámetros esenciales para modelos numéricos de plumas de descarga, evaluaciones ambientales y diseño de emisarios. Los resultados también pueden incorporarse en códigos hidráulicos de difusores. En términos generales, se concluye que el uso de válvulas

tipo pico de pato produce una distribución más uniforme del caudal en los puertos, velocidades de chorro más altas y mayores requerimientos de energía, efectos que deben considerarse en el diseño hidráulico del sistema (Lee Jung et al., 1998).

Las válvulas de retención elastoméricas tipo *duckbill* se utilizan en descargas de aguas lluvias y alcantarillado para evitar el reflujo y la intrusión de agua marina o de cuerpos receptores. A diferencia de los puertos de diámetro fijo, estas válvulas generan una velocidad de chorro que varía de manera no lineal con el caudal descargado, lo que modifica el comportamiento hidráulico del sistema. El análisis de datos experimentales disponibles demuestra que las relaciones entre carga y caudal pueden correlacionarse eficazmente con los parámetros del flujo que llega a la válvula en el puerto de descarga. A partir de estos datos, se desarrollaron dos relaciones adimensionales que describen: el porcentaje efectivo del área de apertura del chorro y la pérdida de carga introducida por la válvula (Lee Jung et al., 2001).

2. Diseño válvula pico de pato

El uso de la válvula pico de pato (*duckbill valve DBV*) presenta diversas aplicaciones en sistemas de alcantarillado, que generan descargas sumergidas, así como un sistema de flujo presurizado. Estas válvulas están

diseñadas para prevenir el flujo en dirección contraria, no requieren mantenimiento, conservan el sello —incluso en presencia de sólidos—, soportan el desgaste y son resistentes ante la abrasión (ver figura 7).

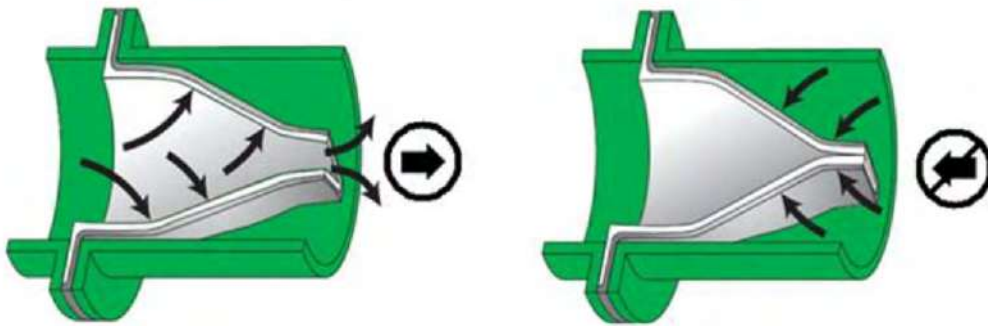


Figura 7. Operación válvula pico de pato. Tomado de: (Wang, 2013).

Una válvula pico de pato es una manga flexible construida en un caucho reforzado con tejido. Su geometría convencional consiste en una pieza corta formada por una brida metálica o abrazadera, una reducción gradual en la sección

de la boquilla de caucho —la cual es flexible y se adecúa según el caudal descargado— y un extremo en forma de pico de pato que controla el flujo en sentido inverso. En la figura 8 se ilustra lo descrito anteriormente.

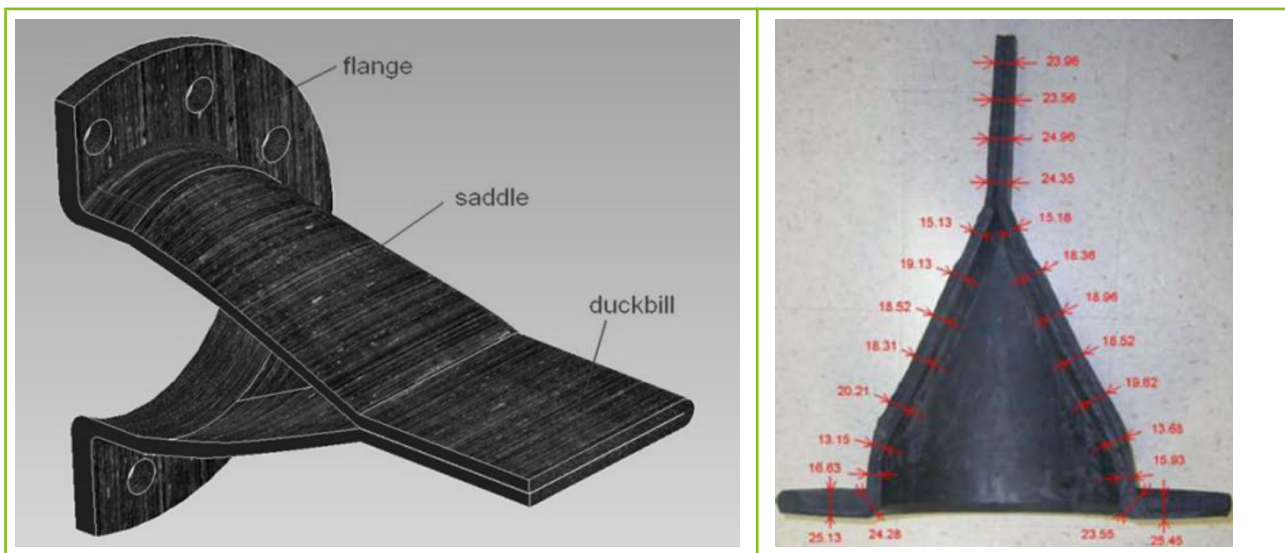


Figura 8. Partes y espesores de una válvula pico de pato. Tomado de: (Wang, 2013).

El comportamiento de la válvula pico de pato es un problema de interacción fluido-estructura. Los experimentos han mostrado que la velocidad del chorro en la descarga incrementa el caudal durante la apertura inicial de la válvula. La relación entre la cabeza de descarga y el caudal es aproximadamente lineal. La caída de

presión es proporcional a la velocidad para una cabeza total de 2 mca (18kPa), y se consideran dos áreas de control para cálculo del caudal: test A, obtenido con respecto al área de aguas arriba, y test B con el área de aguas abajo. Estos resultados se presentan en la figura 9.

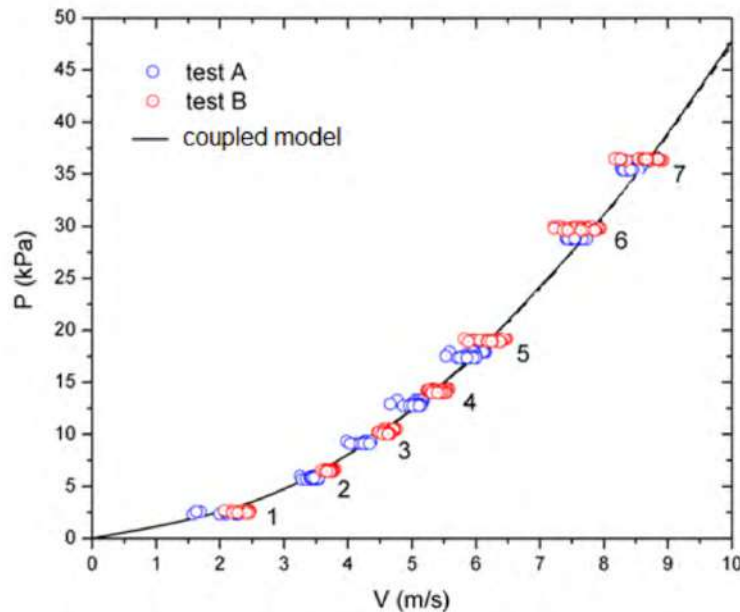


Figura 9. Relación caída de presión vs velocidad para una válvula de pico de pato específica, obtenida experimentalmente y mediante un modelo FSI acoplado. Tomado de: (Wang, 2013).

Nótese que, sin importar el diámetro, la velocidad aumenta proporcionalmente al gradiente de presión. Cada válvula pico de pato presenta una relación presión-velocidad propia, determinada por su geometría, material y condiciones de operación.

La distribución de velocidad y presión a lo largo de la válvula es diferente si se encuentra

en estado de flujo libre o presurizada, en flujo asumido como unidimensional (1D), se incluye dicho cambio de presión y, por ende, de velocidad, basado en la apertura de la válvula, con el factor k para una expansión.

$$p_2 - p_1 = (K_i - K) \frac{\rho v_1^2}{2}$$

Donde:

p_1 y p_2 : cabeza de presión.

K_i : coeficiente ideal de recuperación de presión, definido como $K_i = 1 - (A_1/A_2)^2$.

K : coeficiente de pérdida en función de la expansión del radio de A_1 a A_2 (Streeter & Wylie, 1985).

v_1 : velocidad promedio del flujo a la salida de la válvula.

A_1 : sección transversal de salida de la válvula.

A_2 : sección transversal de la tubería aguas arriba.

Teniendo en cuenta que la válvula pico de pato presenta una reducción del área efectiva cuando se transita caudales bajos, se tiene que la pérdida local por efecto de la geometría de la válvula se calcula teniendo presente que D_2 es inferior a D_1 , por lo que su división es menor a 1, generándose una curva recogida hacia la izquierda, y a partir del ángulo de reducción cercano a los 90° , el valor de k es aproximadamente 1.2 de manera conservativa, tal como se aprecia en la figura 10.

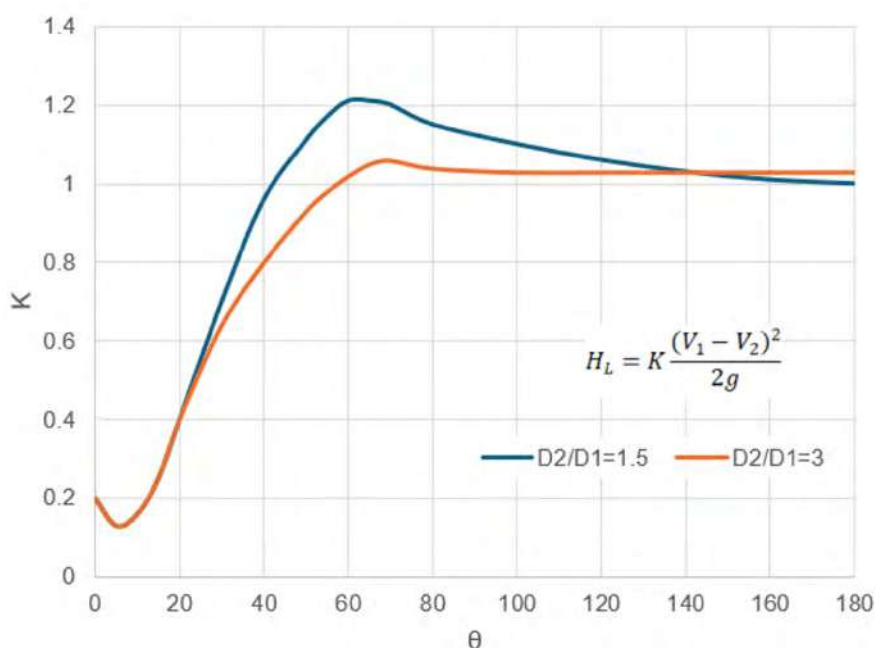


Figura 10. Coeficientes de pérdida para expansiones cónicas. Tomado de: (Idelchik, 1994).

La figura 11 presenta una gráfica comparativa de las curvas de descarga de la válvula pico de pato, en la cual se analiza la relación entre la cabeza de energía y el caudal descargado para diferentes proveedores. Esta comparación

permite evaluar el comportamiento hidráulico del dispositivo y evidenciar las variaciones en su desempeño bajo distintas condiciones de carga hidráulica, aportando criterios técnicos para el análisis y la selección del equipo.

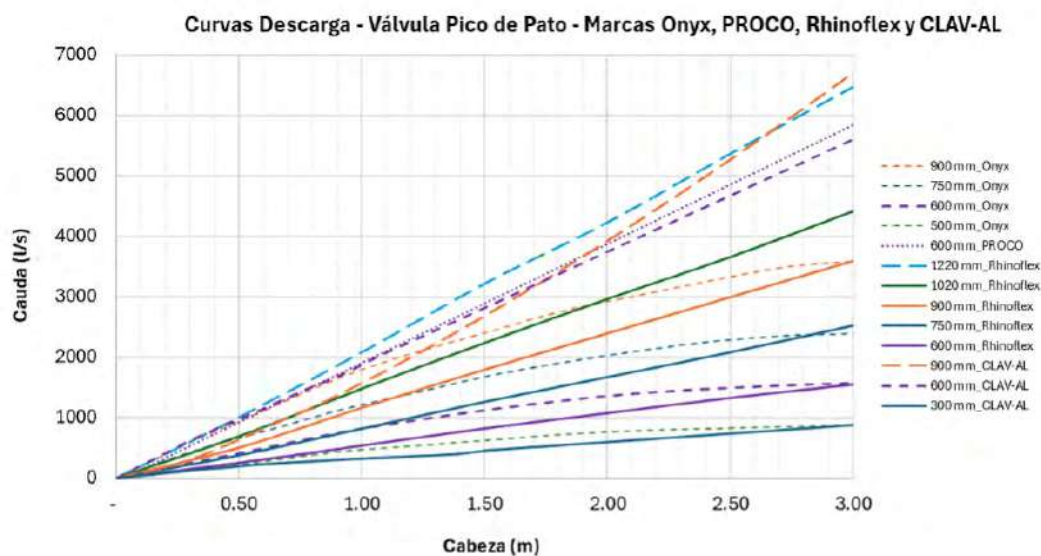


Figura 11. Curvas de descarga para diferentes diámetros de válvula pico de pato de diferentes proveedores.

3. Caso de estudio

Con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico de la descarga del sistema de alcantarillado del barrio Villanueva y su interacción con el río Aburrá-Medellín bajo condiciones extremas de operación, se desarrolló un caso de estudio específico basado en simulaciones hidráulicas y en el análisis de escenarios de crecientes. El estudio se centra en la condición de presurización de la descarga, la cual puede influir significativamente en el desempeño hidráulico del sistema y en la necesidad de dispositivos de control, como válvulas de retención. A continuación, se describen las condiciones de localización, la problemática identificada, los análisis realizados y los principales resultados obtenidos.

comportamiento hidráulico equivalente al de un orificio, por lo que la diferencia de carga hidráulica entre el sistema y el cuerpo receptor resulta determinante. En este sentido, a partir de la simulación del río Aburrá-Medellín para el tránsito de un caudal con período de retorno de 100 años, se determinó que el punto correspondiente a la descarga existente permanece sumergido hasta una profundidad aproximada de 7.16 m. En consecuencia, para la modelación del sistema de alcantarillado analizado se adoptó una cota del nivel del flujo de 1405.64 msnm. Por su parte, la cota de batea de la descarga actual se sitúa en la elevación 1398.48 msnm, condición que se ilustra en la figura 12.

Dado que la válvula opera bajo condiciones de presurización, la descarga presenta un

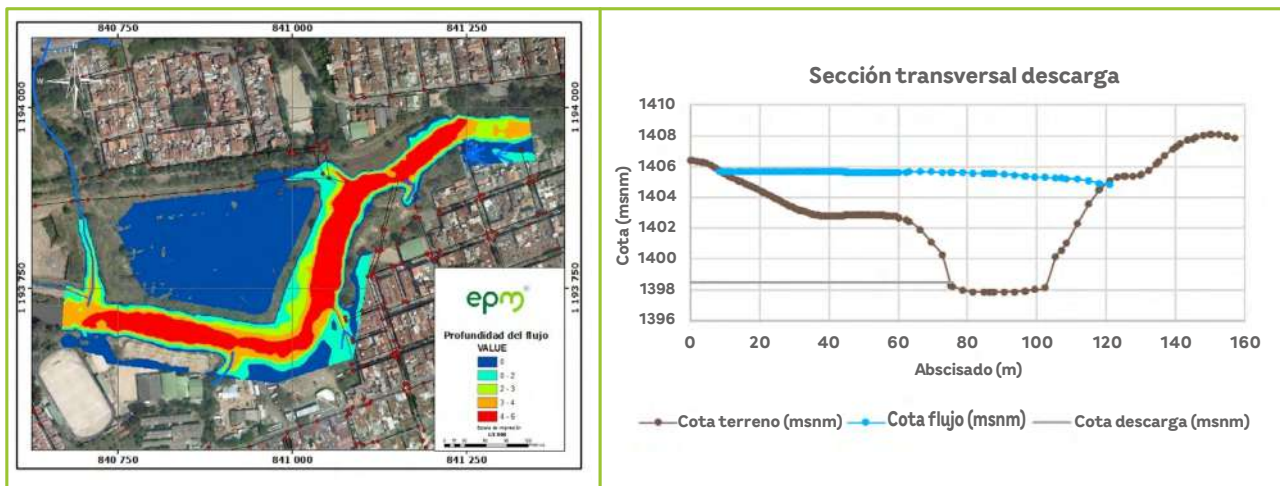


Figura 12. Nivel del flujo río Aburrá – Medellín, tránsito de caudal con tiempo de retorno de 100 años.

Teniendo en cuenta el nivel máximo del río Aburrá-Medellín para el tránsito de un caudal con tiempo de retorno de 100 años (1405.64 msnm), la cota de la descarga actual (1398.45 msnm) y el diseño y perfil del alcantarillado proveniente del barrio Villanueva considerando solo los tres (3) último *manholes* antes de la descarga y transitando un caudal con tiempo de retorno de 10 años (1.80 m³/s),

correspondiente al tiempo para el cual se diseña el alcantarillado. Se verificó que para la evacuación del caudal de diseño a través de una válvula pico de pato de 850 mm de diámetro, es necesaria una cabeza máxima de 2 m, tal como se observa en la figura 13, comprobándose a su vez que la red de alcantarillado cuenta con la capacidad hidráulica disponibilidad sin generar inundaciones.

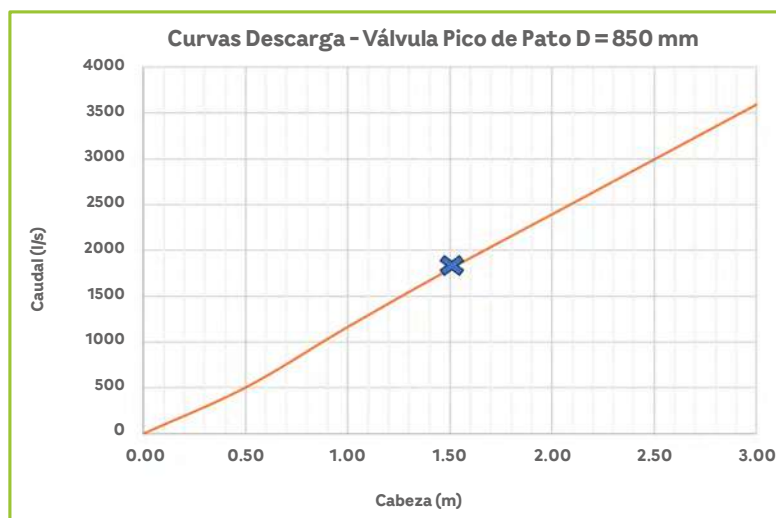


Figura 13. Curva de descarga para válvula pico de pato con diámetro de 850 mm.

En la figura 14 se presenta la válvula tipo pico de pato instalada en un canal a cielo abierto, considerando cuidadosamente las condiciones hidráulicas y geométricas del sitio. La ubicación y el método de instalación se definieron con base en la configuración del canal, el régimen de caudales esperados, las condiciones de

flujo aguas arriba y aguas abajo, así como las restricciones constructivas y operativas existentes. Estas consideraciones permitieron asegurar un funcionamiento adecuado de la válvula, garantizando su desempeño hidráulico y su interacción eficiente con el sistema de drenaje bajo condiciones reales de operación.



Figura 14. Válvula pico de pato instalada en el barrio Villanueva, Copacabana-Antioquia.

4. Construcción e instalación

En el mercado se encuentran dos tipos de válvulas pico de pato; estas dependen directamente del material de la tubería donde se instalará. El primer tipo es el bridado (ver figura 15) si la tubería de descarga es en acero, soldando en esta tubería una brida para posteriormente atornillarse directamente a la

válvula. El segundo tipo es la conocida como *slip-on* o con abrazadera (ver figura 16) la cual se instala si la tubería de descarga es en concreto; en este caso se utilizará esta última. En la unión tipo bridada es indispensable calcular las cargas verticales y momentos en los pernos de sujeción.

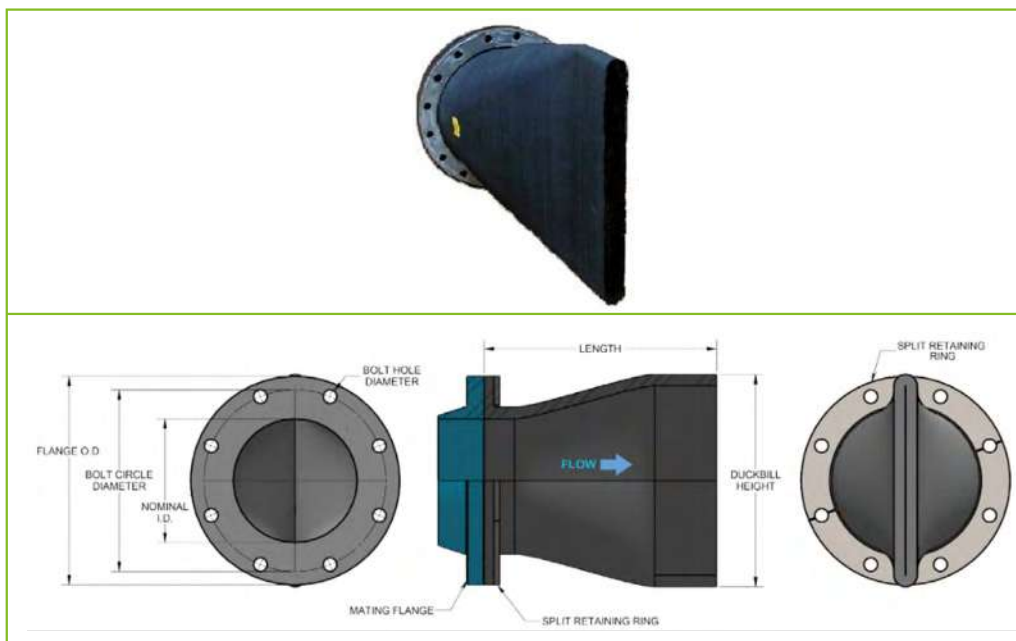


Figura 15. Válvula pico de pato bridada.

En la unión tipo abrazadera o *slip-on* se deberá calcular el espesor de la tubería necesaria

para soportar el peso de la válvula, el agua y el momento generado en su longitud.

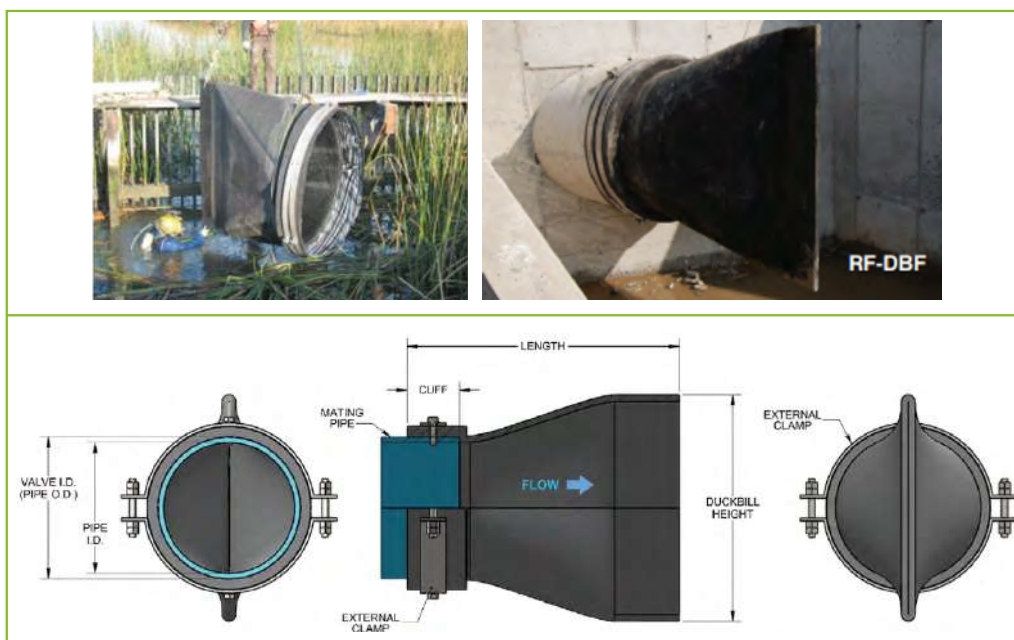


Figura 16. Válvula pico de pato *slip-on* o con abrazadera.

La construcción de una cámara de inspección (MH) de 1,50 m de diámetro, destinada a la instalación de válvulas tipo pico de pato en redes de alcantarillado de diámetro igual o inferior a 400 mm, puede resultar funcional para alojar este tipo de dispositivo, siempre que en su dimensionamiento y configuración

se consideren adecuadamente aspectos como el material de la tubería afluente, la longitud o desarrollo real de la válvula, el ángulo de empalme con el tramo de salida (cañuela) y las holguras mínimas requeridas para garantizar condiciones apropiadas de acceso, inspección y mantenimiento (ver figura 17).

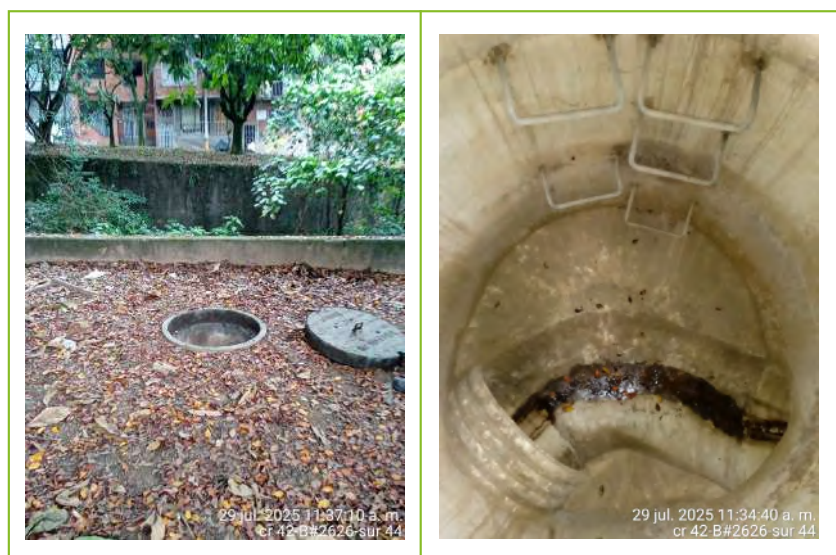


Figura 17. Construcción de MH D=1.5 m para la instalación de válvula pico de pato, descarga aguas lluvias Quebrada La Ayurá, Carrera 42 con la calle 26 Sur, Envigado.

El transporte de la estructura prefabricada y de la válvula debe realizarse mediante retroexcavadora, utilizando eslingas certificadas y puntos de izaje adecuados, a fin de evitar deformaciones o impactos en los labios de cierre. Durante el descenso del MH es necesario mantener un control lateral para prevenir giros o colisiones con las paredes de la excavación.

Para la instalación de la válvula pico de pato se debe evitar cualquier fricción o aplastamiento del elastómero, para asegurar que la brida

o *slip-on* quede completamente alineada con el puerto de descarga y que los pernos se ajusten de forma cruzada para distribuir uniformemente la presión y evitar tensiones puntuales.

Finalmente, antes del relleno lateral, es indispensable verificar que la válvula opere libremente, que no existan obstrucciones y que la cámara mantenga acceso seguro para mantenimiento futuro (ver figura 18).

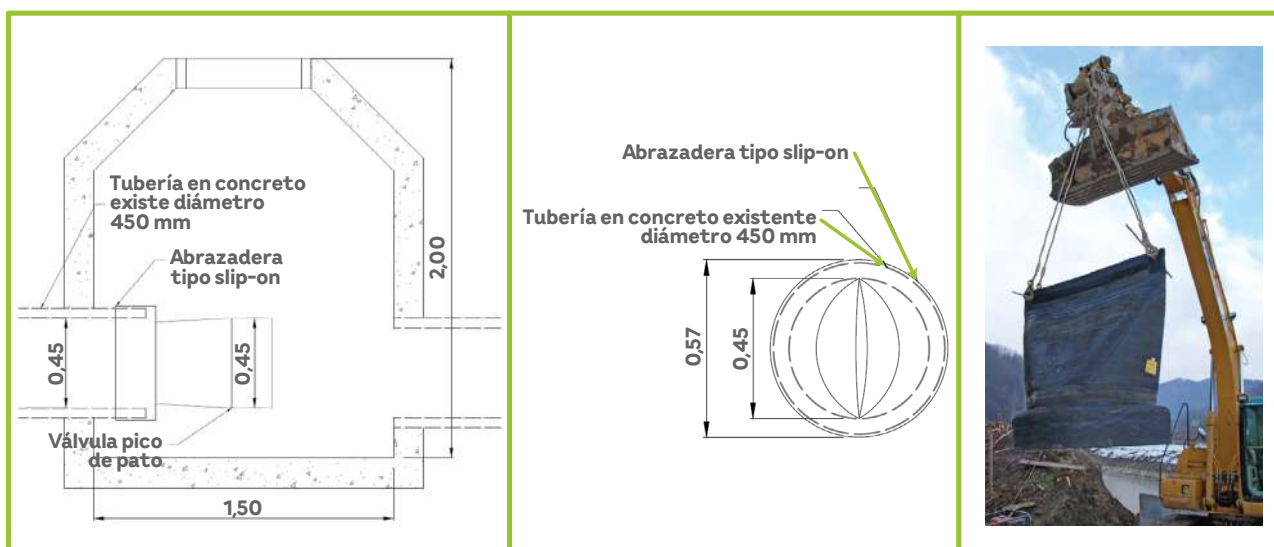


Figura 18. Construcción de MH e instalación de válvula pico de pato.

Dentro del proyecto *Estructuras de desvío del interceptor de aguas residuales*, se diseñaron válvulas pico de pato instaladas en colectores de aguas residuales, que permitieron maniobras de mantenimiento y/o reposición del interceptor oriental (ver figuras 19 y 20).

El diseño consiste en una tubería metálica, en este caso de acero inoxidable, de espesor mínimo de 1/4" y un diámetro externo de 30", adecuada para el montaje de una brida tipo

ASME B16.47 Clase 150, con tornillería de acero inoxidable de diámetro de 1 1/4", además de un anillo pasa muro para controlar el peso de la instalación.

Las válvulas fueron instaladas en una caja de inspección cuadrada, de dimensiones 3.0 m x 2.50 m de ancho y altura 3.50 m, con el fin de posibilitar su total apertura, así como su inspección y mantenimiento.



Figura 19. Construcción de caja en concreto reforzado e instalación de válvula pico de pato 600 mm (24") y 2150 mm (85"), Desvío Interceptor.

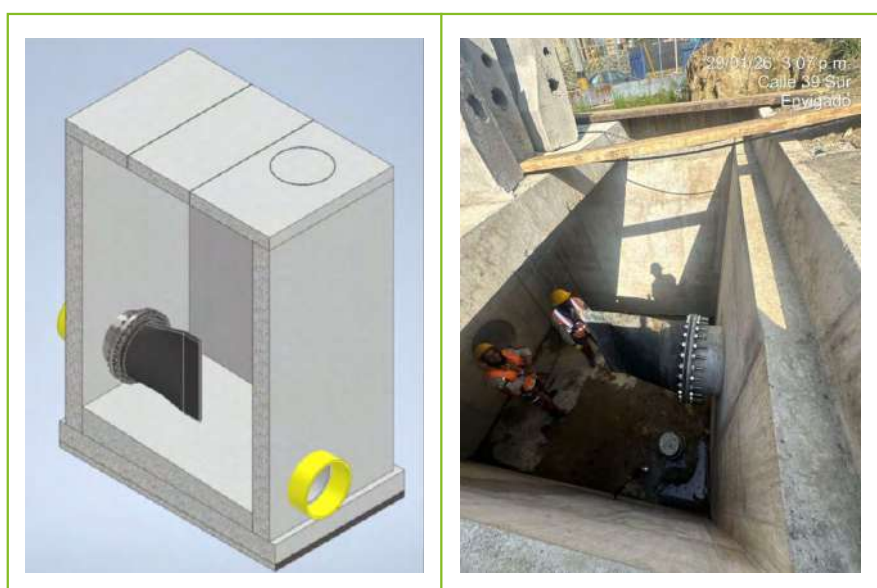


Figura 20. Construcción de caja en concreto reforzado e instalación de válvula pico de pato 750 mm (30"), Desvío Interceptor.

Conclusiones

- Las válvulas pico de pato representan una solución altamente eficiente para descargas sumergidas, ya que aseguran un cierre hermético incluso cuando el nivel del cuerpo receptor supera la cota del vertimiento, lo que las convierte en un mecanismo confiable para prevenir el refluo, la intrusión de sedimentos y el retorno de caudales hacia la red de aguas lluvias.
- El comportamiento hidráulico de estas válvulas tiene un carácter eminentemente no lineal, puesto que su apertura depende simultáneamente del gradiente de presión, la deformación del elastómero y la interacción fluido-estructura (FSI). Esta condición exige modelos que integren adecuadamente la mecánica del material y las ecuaciones de flujo.
- Los estudios teóricos y numéricos revisados demuestran que el flujo a través de la válvula puede considerarse esencialmente unidimensional, salvo en la capa límite cercana a las paredes. La comparación entre CFD tridimensional y el modelo de flujo ideal 1D confirma que este último es una aproximación válida para el diseño y análisis hidráulico.
- Las cargas y velocidades generadas por la válvula siguen relaciones casi lineales, debido a que la apertura del labio aumenta proporcionalmente con el diferencial de presión. No obstante, se deben verificar las curvas de descarga de cada proveedor. Esto permite una operación estable, con pérdidas de energía moderadas y sin afectación significativa de la capacidad del sistema en condiciones de lluvia ordinaria.
- El desempeño estructural de la válvula depende de la configuración de sus materiales, especialmente del refuerzo fibroso interno, que gobierna la rigidez axial y limita la extensión del caucho. Las capas externas de elastómero controlan la flexión. Esta combinación permite grandes deformaciones con altos niveles de confiabilidad.
- Las válvulas pico de pato constituyen una alternativa de alta confiabilidad y bajo mantenimiento, especialmente en descargas vulnerables a inundaciones externas o donde la topografía genera niveles de agua superiores a la cota de salida.
- Se recomienda, de manera complementaria, realizar revisiones periódicas del labio de cierre, evaluar el desgaste por abrasión asociado a sólidos y verificar el comportamiento anual durante eventos de creciente, con el fin de mantener su eficacia a largo plazo.
- Finalmente, se concluye que la incorporación de válvulas pico de pato facilita la estandarización y mejora la resiliencia de la infraestructura hidráulica, permitiendo diseños más seguros frente a eventos extremos y condiciones de operación sumergida.

Referencias

- Günay, A., & Anilan, T. (2026). CFD modeling of inclined dense jets discharged from round and duckbill nozzles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 48(100). <https://doi.org/10.1007/s40430-025-06065-z>
- Idelchik, I. E. (1994). *Handbook of hydraulic resistance* (3rd ed.). CRC Press.
- Jung, Y., Gulick, D., & Blain Christen, J. (2024). Fabrication and in vivo testing of a sub-mm duckbill valve for hydrocephalus treatment. *Microsystems & nanoengineering*, 10(1), 190. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00829-8>
- Lee, J.H.W., Karandikar, J., and Horton, P. R. (1997). "Hydraulics of duckbill nozzle jet diffusers." 13h Australian Coastal and Ocean Engineering Conference, Christchurch, New Zealand, 567-572.
- Lee, J. H. W., Karandikar, J., & Horton, P. R. (1998). Hydraulics of "Duckbill" elastomer check valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(4), 394- 405. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:4\(394\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:4(394))
- Lee, J. H. W., Wilkinson, D.L., & Wood, I.R. (2001). On the head-discharge relation of a "duckbill" elastomer check valve. *Journal of Hydraulic Research*, 39(6), 619 - 627. <https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628291>
- SStreeter, V. L., & Wylie, E. B. (1985). *Fluid mechanics*. McGraw-Hill
- Wang, J. (2013). *Fluid structure interaction of a duckbill valve* [Doctoral dissertation, McMaster University]. <https://prod-ms-be.lib.mcmaster.ca/server/api/core/bitstreams/e3488b72-9e86-45c1-8e58-56bb7d87e0bd/content>

Cómo citar este artículo:

Cardona Zapata, A. (2026). Válvula pico de pato en descargas sumergidas. *Revista EPM*, (26), 66-86.



Movilidad eléctrica en Colombia: Potencial, desafíos y rol estratégico de EPM

Electric mobility in Colombia: Potential, challenges, and strategic role of EPM

Isaac

Hernández Fajardo

Dirección Corporativa de Innovación
y Negocios Emergentes, EPM

isaac.hernandez@epm.com.co

Resumen

La movilidad eléctrica constituye un componente clave de la transición energética que redefine la interacción entre la demanda eléctrica, los modelos de negocio energéticos y la experiencia del usuario. En Colombia, la adopción creciente de vehículos eléctricos y un marco regulatorio favorable configuran un escenario en el que compañías como EPM adquieren un rol estratégico.

Este artículo revisa el estado actual de la movilidad eléctrica en Colombia, analizando sus implicaciones ambientales, económicas y sistémicas. Se abordan las dinámicas de

los ecosistemas de carga privada y carga pública y los retos asociados a la rentabilidad, la interoperabilidad y la maduración de los modelos comerciales respectivos. Finalmente, el documento discute el rol potencial de EPM en esta transformación, argumentando que su experiencia en la gestión de activos energéticos y en la relación con usuarios constituye ventajas estratégicas para participar en un mercado que exige definir esquemas claros de inserción, inversión y desarrollo de servicios.

Palabras clave:

Movilidad eléctrica, Vehículos eléctricos, Infraestructura de carga, Transición energética, Colombia.

Keywords:

Electric mobility, Electric vehicles, Charging infrastructure, Energy transition, Colombia.

Introducción

La movilidad eléctrica emerge como uno de los elementos más visibles de la transición energética a nivel global. Su evolución ha sido impulsada por la convergencia de dinámicas ambientales, económicas, regulatorias y sociales que han transformado la interacción entre los mercados energéticos, el sector del transporte y los consumidores finales de estos servicios (Prakhar et. al, 2024).

Actualmente Colombia se encuentra inmersa en esta transformación. En los últimos años, el país ha experimentado un crecimiento sostenido en la adopción de vehículos eléctricos (Electric Vehicles, EVs, por sus siglas en inglés) acompañado de políticas públicas orientadas a la descarbonización, la eficiencia energética y la mejora de la calidad del aire urbano (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2026).

En este contexto, la movilidad eléctrica trasciende la simple sustitución tecnológica. Se configura como un ecosistema emergente que combina infraestructura, servicios digitales, modelos de negocio innovadores y nuevas dinámicas de demanda de electricidad.

El auge actual de la movilidad eléctrica consiste en su capacidad para generar valor multidimensional. Desde la perspectiva ambiental, la reducción de emisiones y ruidos urbanos y la mejora de la calidad del aire son beneficios notables de la transición del uso de vehículos de combustión interna (Internal

Combustion Engine Vehicles o ICEs, por sus siglas en inglés) a EVs (European Environment Agency [EEA], 2024).

Desde una perspectiva económica, la adopción de EVs implica menores costos operativos para los conductores, nuevos segmentos de demanda para los comercializadores de energía eléctrica y oportunidades emergentes de servicios energéticos asociados al uso de EVs (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2022).

Estos aspectos tienen implicaciones sistémicas entre las cuales se cuentan la flexibilidad de la demanda de la carga de EVs, el potencial de articulación con la producción de energías renovables no convencionales y el uso incipiente de las baterías de los EVs como almacenamiento distribuido.

Este documento analiza las señales antes mencionadas en el contexto del crecimiento global y del despliegue actual de la movilidad eléctrica en Colombia y sus implicaciones estratégicas. Con base a este análisis, el texto describe las oportunidades y retos asociados a la penetración de vehículos eléctricos en el país, con foco en los servicios de carga pública y privada. El artículo concluye discutiendo el rol potencial de EPM frente al desarrollo de los negocios asociados a esta transformación, dadas sus experiencias y capacidades en este ecosistema emergente.

1. La movilidad eléctrica en Colombia y el mundo

Los vehículos eléctricos representan el segmento de más rápido crecimiento dentro de la industria automotriz (IEA, 2025). Dentro de los factores que impulsan esta expansión se encuentra la reducción de costos de baterías, el incremento en las exigencias regulatorias para las emisiones de ICEs, los incentivos gubernamentales para la adopción de EVs y el cambio en las preferencias de los consumidores, con segmentos que optan por una satisfacción consciente de sus necesidades de transporte (IRENA, 2022).

diversas regiones del mundo. La figura muestra que China es el mercado mundial de mayor expansión, seguido, en menor proporción, por Europa y los Estados Unidos. En 2014, las ventas totales de vehículos eléctricos eran menores a 500 mil autos, mientras que 10 años después, su número total de ventas era cercana a los 17 millones de unidades. Si esta cifra se compara con un total estimado de 80 millones de automóviles vendidos en 2024 alrededor del mundo, se tendría una penetración global en ventas de EVs cercana al 21%.

La Figura 1 muestra el crecimiento de las ventas de EVs desde 2014 hasta 2024 en

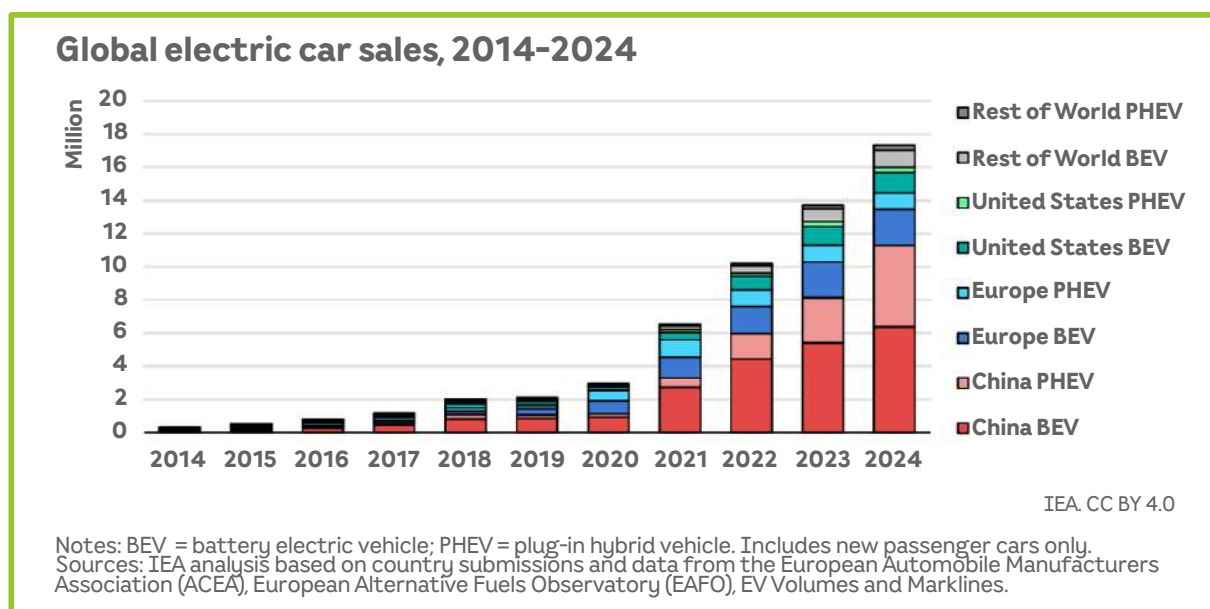


Figura 1. Reporte anual de ventas de vehículos eléctricos en el mundo. Recuperado de: Global EV Outlook 2025: expanding sales in diverse markets (IEA, 2025).

Este giro hacia la adopción de la movilidad eléctrica implica una reconfiguración del mercado del transporte que implica ajustes significativos en toda la cadena de valor, el rol de la infraestructura energética, los modelos comerciales asociados y los servicios digitales que operan como habilitadores del ecosistema (IEA, 2025).

En el caso de Colombia, el país ha experimentado un crecimiento notable en la adopción de vehículos eléctricos, en el despliegue de cargadores públicos y en la instalación de cargadores para el uso privado de cada propietario de EV. Datos de Fenalco (FENALCO, 2026) muestran un incremento sostenido en las ventas de EVs, con una consecuente expansión en la carga privada residencial. La Figura 2 muestra cómo, hasta el año 2017, la penetración de EVs en el país era mínima. Sin embargo, desde 2018 se inicia una tendencia de expansión sustancial del número de híbridos, con un comportamiento similar para los puramente eléctricos a partir de 2020.

Las estadísticas mostradas en la Figura 2 para híbridos incluyen los híbridos no enchufables (HEV), semi híbridos (MHEV), híbridos (PHEV) y 100% eléctricos (BEV). Es clave entender que, desde un punto de vista de consumos eléctricos desde la red, solo los BEV y los PHEV son de interés, dado que los HEV se recargan internamente y los MHEV no permiten carga externa (NEVO, 2023).

Las tendencias evidenciadas en esta figura muestran que los vehículos de tecnologías eléctricas representaron cerca del 34% de todas las nuevas ventas de automóviles en Colombia en 2025 (BBVA Research, 2025). Sin embargo, es previsible que las tendencias de estas estadísticas sean afectadas por la entrada a finales de 2025 de Tesla al mercado colombiano, un jugador clave en la fabricación y venta de EVs en el mundo (Celemín, 2025).

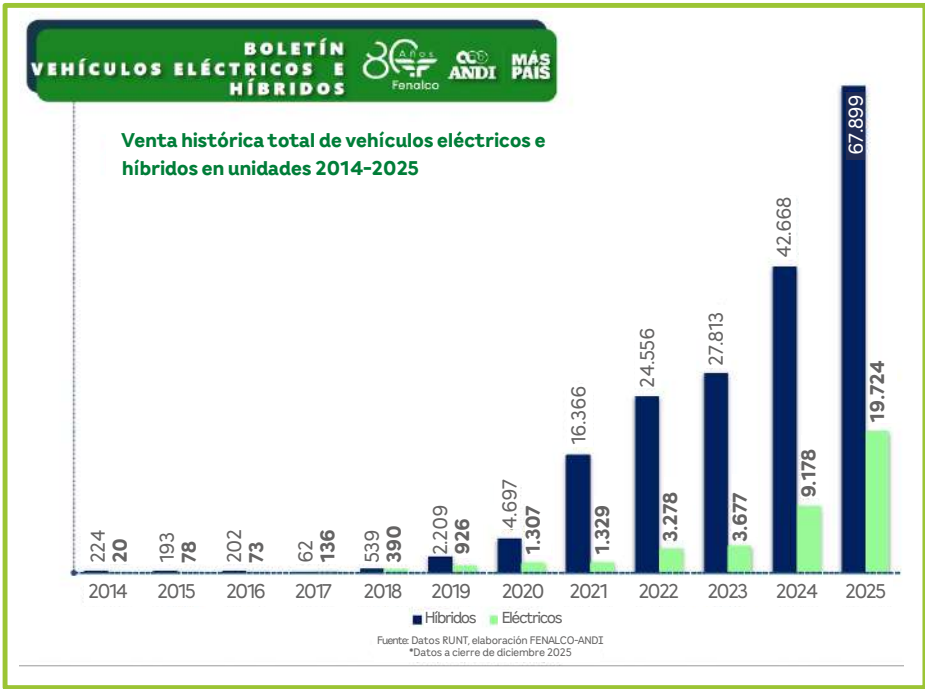


Figura 2. Registro anual de nuevos vehículos eléctricos e híbridos en Colombia. Recuperado de: Informe vehículos eléctricos e híbridos diciembre 2025 (Fenalco y ANDI, 2026).

Esta tendencia de despegue y crecimiento sostenido de EVs en Colombia ha sido impulsada por la agregación y alineación de factores como los incentivos tributarios desplegados por el gobierno nacional los cuales han reducido una de las barreras más evidentes de acceso y contribuido a cerrar la brecha en costo inicial entre ICEs y EVs. Otro factor clave han sido los incentivos locales en ciudades como Bogotá o Medellín donde los EVs gozan del beneficio de circulación sin restricciones por número de placa (Pico y Placa). Así mismo, la mayor oferta tecnológica, usualmente en la forma de automóviles e infraestructura de carga (cargadores y electrolinerías) manufacturados en China (Suarez, 2025) han ayudado a crear un ecosistema donde los EVs son percibidos como ambientalmente sostenibles, innovadores y de última tecnología.

Con respecto a los incentivos tributarios, Colombia ha establecido señales regulatorias claras orientadas a la promoción de la movilidad eléctrica como componente estratégico de la transición energética y la sostenibilidad ambiental.

Desde la formulación de política pública, ministerios como Minas y Energía, Transporte y Ambiente, así como entidades como la Unidad de Planeación Minero-Energética, UPME y la Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG han desempeñado roles esenciales y desarrollado un marco regulatorio que facilita la implementación de medidas para la penetración de vehículos eléctricos y el despliegue de su infraestructura de carga.

Este marco institucional ha permitido la consolidación de instrumentos normativos como la Ley 1715 de 2014, la Ley 1964 de 2019, el Decreto 2143 de 2015 y la resolución UPME 463 de 2018, los cuales, de manera directa o indirecta, configuran un sistema de incentivos para la movilidad eléctrica. Estos instrumentos regulatorios proporcionan beneficios asociados a:

- Una reducción o eliminación de aranceles para EVs e infraestructura de carga.
- Beneficios operativos como la flexibilización de restricciones para la circulación vehicular por parte de autoridades locales.
- Beneficios tributarios en impuestos vehiculares y la exclusión de impuesto al valor agregado y descuento en el impuesto de renta.

Por otra parte, la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) en Colombia (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2019), estructurada por el Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Transporte, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la UPME en 2019, proporciona lineamientos estratégicos para la formulación de política pública para la movilidad eléctrica bajo la perspectiva de estrategias de descarbonización y electrificación asociados, en el contexto de la transición energética nacional.

Un aspecto clave de este marco normativo es que la regulación reconoce que la infraestructura de carga es una habilitadora crítica del mercado nacional de movilidad eléctrica. Esta infraestructura de carga se caracteriza actualmente por una alta concentración geográfica, con un predominio de infraestructura desarrollada por privados y diferentes estándares operativos (Anari, 2025). Estas características hacen que exista una cobertura insuficiente, que la interoperabilidad actual sea limitada, aspecto recientemente regulado con la Resolución 40559 de 2025, y que los modelos de negocio alrededor de la misma estén todavía en maduración (MinMinas, 2025).

2. La infraestructura de carga como oportunidad emergente

Con respecto a la infraestructura de carga privada, el propietario de un EV, o de una flota de EVs, debe adquirir cargadores usualmente vendidos por el concesionario proveedor de los vehículos. Estos cargadores son típicamente instalados en lugares de residencia o de almacenamiento del EV, para ser empleados cuando el vehículo no está en operación.

Cuando el EV está en desplazamientos, el operador del EV depende de propiedades tales como la ubicación, la capacidad, la disponibilidad y la confiabilidad, entre otras, de la red de carga pública del área o zona donde se desplace el vehículo. Dada esta realidad, la carga privada es una carga básica, menos visible desde la perspectiva del ecosistema público. En contraste, la carga pública, la red de estaciones de carga, es el aspecto verdaderamente apreciable de la alimentación de los EVs y se convierte en la red de confiabilidad sobre la que se cimenta el despliegue, operación y confiabilidad de la movilidad eléctrica en cualquier área (IEA, 2025).

Las condiciones técnicas y operativas de ambos tipos de carga difieren de manera importante. La carga privada emplea típicamente cargadores de menor o mediana complejidad (según el segmento atendido: residencial, corporativo o flotas) y se caracteriza por una demanda de energía predecible, consumos y contratos recurrentes, y posibilidad de integración con otros servicios energéticos. Entre estos últimos se cuentan la generación renovable, con o sin almacenamiento, y servicios de valor agregado

como instalación, operación y mantenimiento bajo esquemas como Charging as a Service (CaaS) orientados a la gestión de flotas (Mühlön et al., 2021).

Por su parte, la carga pública debe emplear sistemas e infraestructura de alto desempeño, con demanda variable, captura de localizaciones estratégicas por alto tráfico de EVs, excelentes condiciones técnicas y operativas y, de forma fundamental, con la capacidad de proveer un servicio rápido tanto en la entrega de la electricidad como en la gestión comercial de disponibilidad, monitoreo y pago (IEA, 2025). Estos aspectos de la carga pública implican retos sobre la rentabilidad inicial dadas las inversiones en CAPEX requeridas, la necesidad de una entrada en escala para incrementar las barreras de acceso para nuevos actores y la gestión en tiempo real de la experiencia del usuario, usualmente a través de sistemas informáticos de captura de datos, plataformas de gestión y aplicaciones digitales.



3. Rol Estratégico de EPM en el ecosistema de la movilidad eléctrica en Colombia

EPM se encuentra en una posición privilegiada dentro del ecosistema. Desde una perspectiva técnica, la organización cuenta con el capital humano, la experiencia y la posición estratégica de ser el operador de la red eléctrica regional y el comercializador incumbente en Antioquia. La trayectoria en la gestión robusta de redes de transmisión y distribución, su experticia en el manejo de activos energéticos y su capacidad para operaciones a gran escala posiciona a EPM como un líder natural para la consolidación de infraestructura para EVs tanto en el segmento de carga pública, como en la instalación y operación de la carga privada.

Adicionalmente, EPM posee una experiencia importante en el despliegue inicial de la movilidad eléctrica en Medellín y el Valle de Aburrá. La Figura 3 es una línea temporal con los desarrollos históricos de ese proceso. Como aspectos notables se destaca el proyecto piloto de dos estaciones de carga eléctrica en operación comercial en 2016. Este hito fue el punto de partida para la entrada en operación de la red de estaciones de carga de EPM en el Valle de Aburrá, despliegue que contaba a 2023 con 20 estaciones de carga pública (7 c. rápida, 13 c. lenta), 2.859 usuarios c. pública, 180 instalaciones c. interna (a demanda) y 5.279 EVs – PHEVs acumulados.



Figura 3. Línea temporal del despliegue de Movilidad Eléctrica en EPM. Recuperado de: Equipo Movilidad Eléctrica, EPM.

En este contexto, las ventajas competitivas de EPM frente a otros actores se sustentan en la confianza asociada a su marca y en su presencia multiservicios de electricidad, agua, gas y residuos, ampliamente consolidada. Este factor se complementa con el conocimiento acumulado de su base de clientes, en particular en el segmento residencial, cuyos consumos

tenderían a aumentar bajo esquemas de carga privada. Finalmente, existe un potencial de sinergia con ofertas existentes, tales como Somos, EPM a tu puerta, y con servicios más recientes relacionados con generación solar distribuida y soluciones de eficiencia energética para grandes clientes.

Estas ventajas competitivas se traducen en oportunidades estratégicas para EPM considerando que la movilidad eléctrica es una nueva línea de crecimiento en un mercado aun en maduración regulatoria y comercial. Este escenario abre la puerta a nuevas dinámicas de relacionamiento y conocimiento del cliente-usuario, con potencial de generar innovación tecnológica y comercial.

Adicionalmente, la movilidad eléctrica puede representar para EPM un elemento de diferenciación frente a otras empresas de servicios públicos, contribuyendo al posicionamiento de EPM como un actor innovador en transición energética, digitalización, y desarrollo de territorios inteligentes, así como llegar a ser un jugador

relevante dentro de la economía circular del ecosistema de movilidad eléctrica. Todas estas ventajas y oportunidades, sin embargo, no eliminan los desafíos asociados a la rentabilidad inicial, la velocidad de despliegue y la competencia con actores privados especializados.

En este sentido, la participación de EPM en dicho ecosistema requiere identificar la forma óptima de inserción estratégica, dadas las condiciones de la compañía como una corporación ciento por ciento pública, los aprendizajes de su despliegue de carga pública en el Valle de Aburrá y sus capacidades para la gestión comercial de clientes de un negocio con dinámicas distintas a las de los servicios públicos convencionales.

Conclusiones

La movilidad eléctrica constituye una transformación sistémica que redefine la interacción entre los sectores energéticos, de transporte y de servicios digitales. Tanto a nivel global como en Colombia, su penetración presenta una trayectoria de crecimiento sostenido y una consolidación progresiva dentro del ecosistema energético.

En Colombia, los incentivos regulatorios, tributarios y de política pública han configurado un entorno favorable para la expansión de este mercado emergente. Paralelamente, la creciente presencia fabricantes globales de vehículos eléctricos, como BYD y Tesla, intensifica las expectativas de crecimiento tanto en la carga privada como en la carga pública.

En este contexto, EPM se encuentra en una posición estratégica relevante. Su experiencia histórica en el despliegue de infraestructura

de carga, su rol como operador de red y su relación consolidada con los usuarios finales configuran una base sólida para su participación en este ecosistema. No obstante, la evolución del mercado, la maduración de los modelos de negocio y la dinámica competitiva plantean la necesidad de definir con precisión la forma óptima de inserción estratégica de la compañía.

La movilidad eléctrica, más allá de representar un nuevo segmento de demanda, emerge como un espacio de innovación tecnológica, comercial y de relacionamiento con el cliente, con potencial de contribuir al posicionamiento de EPM dentro de las dinámicas de la transición energética en Antioquia y en Colombia.

Referencias

- BBVA Research. (24 de noviembre de 2025). Colombia | Automotive Situation. Retrieved from <https://url-shortener.me/DHYX>
- Celemin, J. (2025). Tesla Is Back on the Offensive: The USA's EV giant has just entered colombia's market looking for blood. CleanTechnica. <https://cleantechnica.com/2025/11/20/tesla-is-back-on-the-offensive-the-usas-ev-giant-has-just-entered-colombias-market-looking-for-blood/>
- European Environment Agency. (5 de diciembre de 2024). Electric vehicles. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/electric-vehicles>
- FENALCO. (2026). Informe vehículos eléctricos e híbridos diciembre 2025. <https://www.fenalco.com.co/blog/gremial-4/informe-vehiculos-electricos-e-hibridos-diciembre-2025-8593>
- International Energy Agency. (2025). Global EV Outlook 2025: Expanding sales in diverse markets. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>
- International Renewable Energy Agency. (2022). Smart electrification with renewables: driving the transformation of energy services. <https://www.irena.org/publications/2022/Feb/Smart-Electrification-with-Renewables>
- MinisteriodeMinasyEnergía.(24denoviembre de 2025). Gobierno fortalece construcción de infraestructura para vehículos eléctricos con incentivos tributarios. <https://www.presidencia.gov.co/prensa/Paginas/Gobierno-fortalece-construccion-de-infraestructura-para-vehiculos-electricos-con-incentivos-tributarios-251124.aspx>
- Mühlön, F. y Palazzo, G. (25 de octubre de 2021). The future of EV charging infrastructure: executive perspectives. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-future-of-ev-charging-infrastructure-executive-perspectives>
- NEVO. (31 de julio de 2023). Understanding The Difference Between HEVs, MHEVs, PHEVs & BEVs. <https://www.nevo.ie/post/understanding-the-difference-between-hevs-mhevs-phevs-bevs>
- Organization for Economic Co-operation and Development. (28 de enero de 2026). OECD environmental performance reviews: Colombia 2026. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-environmental-performance-reviews-colombia-2026_968398f7-en.html

- Prakhar, P., Jaiswal, R., Gupta, S. y Tiwari, A. K. (2024). Electric vehicles in transition: opportunities, challenges, and research agenda – A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 372, 123415.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724034017>
- Suarez, M. (12 de diciembre de 2025). El boom de los carros eléctricos en Colombia: BYD lidera el mercado y en 2025 duplicó su crecimiento. Bloomberg Línea. <https://www.bloomberglinea.com/latinoamerica/colombia/el-boom-de-los-carros-electricos-en-colombia-byd-lidera-el-mercado-y-en-2025-duplico-su-crecimiento/>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2019). Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica, ENME. <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>

Cómo citar este artículo:

Hernández Fajardo, I. (2026). Movilidad eléctrica en Colombia: Potencial, desafíos y rol estratégico de EPM. *Revista EPM*, (26), 87-98.



Esbeltas, pero extraordinariamente resistentes: validación experimental de torres de transmisión sometidas a grandes cargas

Slender but highly resistant: experimental evaluation of transmission towers subjected to high load demands

**Jhon Bayron
Agudelo Rendón**

Área Diseño e Ingeniería Transmisión
y Distribución Energía, EPM

jhon.bayron.agudelo@epm.com.co

**Sebastián
Osorio Gaitán**

Área Diseño e Ingeniería Transmisión
y Distribución Energía, EPM

sebastian.osorio@epm.com.co

Resumen

Este artículo describe pruebas de carga a escala real en torres de transmisión, ejecutadas para validar su comportamiento teórico y asegurar la estabilidad estructural frente a las incertidumbres del diseño. Se seleccionaron prototipos representativos de suspensión y retención, evaluando siete hipótesis de carga que incluyen la rotura de conductores. Mediante actuadores hidráulicos e instrumentación precisa, se replicaron las fuerzas de diseño en laboratorio. El protocolo

IEC 60652 guió la carga incremental al 100 %, y en fases críticas hasta el 125 % o la falla, lo que permitió verificar los márgenes de seguridad reales frente al modelo analítico. Los resultados ratificaron la capacidad de carga y los criterios de diseño, permitiendo además identificar oportunidades de mejora. Esto proporciona la evidencia experimental necesaria para garantizar el desempeño seguro de las torres en servicio.

Palabras clave:

Torre arriostrada, Torre autosoportada, Árboles de carga, Hipótesis de carga, Celdas de carga, Prototipos, Instrumentación..

Keywords:

Guyed tower, Self-supporting tower, Load trees, Load hypotheses, Load cells, Prototypes, Instrumentation.

Introducción

Las líneas de transmisión de energía eléctrica constituyen uno de los pilares fundamentales de la infraestructura crítica del país. Su continuidad operativa garantiza la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico, lo cual constituye un habilitador directo del desarrollo económico y social. En este contexto, las torres de transmisión desempeñan un papel estructural determinante, pues cualquier falla localizada puede derivar en consecuencias sistémicas de gran escala, incluyendo fallas en cascada y pérdidas masivas de servicio.

A diferencia de otras estructuras convencionales, las torres de transmisión trabajan bajo condiciones de exposición permanente a acciones ambientales extremas como viento y variaciones térmicas. Dado que estas estructuras están construidas completamente en acero y permanecen expuestas durante toda su vida útil, las condiciones ambientales influyen de manera considerable en su desempeño mecánico y durabilidad. En los casos en que no se diseñen ni se protejan adecuadamente, las estructuras terminarán siendo afectadas por procesos como la corrosión, la fatiga, la erosión y la abrasión (entre otros) que finalmente llevan a la pérdida progresiva de capacidad resistente. Además, su diseño estructural se basa en modelos matemáticos complejos; no obstante, esta idealización no logra capturar completamente el comportamiento real de la estructura, ya que la evidencia experimental y la investigación técnica han demostrado que el comportamiento real de estas estructuras es significativamente más complejo debido a fenómenos no lineales como el pandeo local, la interacción entre modos de inestabilidad, el deslizamiento en conexiones Pernadas y los efectos de excentricidad en uniones.

Aunque los métodos de análisis por elementos finitos han evolucionado considerablemente en las últimas décadas, persisten incertidumbres asociadas a la modelación de conexiones, a la rigidez real del sistema y a la redistribución de esfuerzos bajo cargas extremas. Estas incertidumbres adquieren especial relevancia en estructuras repetitivas donde una pequeña desviación entre el modelo teórico y el comportamiento físico puede amplificarse al replicarse cientos o miles de veces a lo largo de una línea de transmisión.

En términos económicos, las torres de transmisión representan entre el 30% y el 40% del costo total de inversión de una línea. Por tanto, la validación experimental no solo cumple una función técnica de verificación estructural, sino que constituye una herramienta estratégica para la optimización del peso de la estructura metálica, la reducción de sobrecostos por sobredimensionamiento y la mejora de la competitividad de los proyectos. Las pruebas a escala real permiten verificar los procesos de optimización estructural orientados a disminuir el consumo de acero sin comprometer la seguridad, de modo que reducciones porcentuales mínimas en el peso de una torre tipo, al replicarse en cientos de apoyos, se traducen en ahorros económicos significativos para el proyecto.

En el marco de esta investigación se realizaron pruebas a escala real sobre dos tipologías estructurales: torres autosoportadas y torres arriostradas. Los ensayos fueron ejecutados en estaciones de prueba especializadas ubicadas en China e India, bajo protocolos normativos internacionales. Las torres autosoportadas evaluadas corresponden a estructuras que se implementarán en la Línea de Transmisión

Guarcama 110 kV, mientras que las torres arriostradas hacen parte del proyecto de reposición de la línea Chorodó – Caucheras 110 kV el cual ya finalizó su construcción. La validación experimental permitió contrastar

los resultados teóricos de diseño con el comportamiento físico observado, así como verificar los márgenes de seguridad reales frente a los estados límite considerados.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

El objetivo de las pruebas a escala real es la validación experimental del proceso de optimización estructural aplicado a torres de transmisión autosoportadas y arriostradas de 110 kV, con el propósito de verificar la reducción de peso estructural alcanzada, confirmar su desempeño mecánico frente a los estados límite de diseño, cuantificar los márgenes de seguridad reales y determinar su impacto técnico y económico en proyectos del Grupo EPM.

1.2. Objetivos específicos

- Verificar el comportamiento estructural real de las torres autosoportadas y arriostradas ensayadas, comparando las deflexiones, los

modos de falla y la distribución de esfuerzos con los valores previstos en los modelos matemáticos de diseño.

- Verificar experimentalmente el efecto de la reducción de peso logrado mediante los procesos de optimización estructural, evaluando su incidencia en el consumo de acero y en los costos asociados a la fabricación y a las cimentaciones.
- Determinar el aporte de las pruebas a escala real en la mitigación de riesgos estructurales y en la mejora de la confiabilidad del sistema eléctrico en los proyectos Línea Guarcama 110 kV y reposición Chorodó – Caucheras 110 kV.

2. Metodología

2.1. Definición del universo estructural y selección del prototipo ensayado

2.1.1. Tipologías estructurales del proyecto

La conceptualización de las torres se desarrolló a partir de las necesidades específicas de cada proyecto, estableciendo una configuración estructural esbelta (torres livianas), pero con

las capacidades resistentes necesarias para soportar las cargas de diseño previstas. Por lo tanto, las torres en suspensión y retención fueron concebidas bajo el criterio de alta resistencia y bajo peso.

El sistema estructural contempla una variación progresiva en el peso y, por ende,

en la capacidad resistente, de acuerdo con la magnitud de las cargas que cada tipología debe asumir, permitiendo incrementar la robustez cuando es necesario sin apartarse del principio fundamental de diseño. A continuación, se

presenta la tabla 1, en la que se relacionan las diferentes tipologías de torres construidas bajo la configuración arriostrada, indicando las variantes desarrolladas y los pesos de cada una de ellas de acuerdo con los planos de taller.

Tipo de torre	Configuración	Peso (T)
AA-R	Suspensión	1.75
AN-R	Suspensión	1.37
BA-R	Retención	1.87
BN-R	Retención	1.77
CA-R	Retención	2.14
CN-R	Retención	1.82
CR-R	Retención	1.20

Tabla 1. Tipología de torres arriostradas y pesos asociados.

Seguidamente, se presenta la tabla 2, que reúne las distintas tipologías de torres desarrolladas bajo la configuración autosoportada, detallando

las variantes implementadas y sus pesos asociados según los planos de taller.

Tipo de torre	Configuración	Peso (T)
Tipo A	Suspensión	3.89
Tipo B	Retención	5.06
Tipo C	Retención	6.49
Tipo D	Retención	7.47

Tabla 2. Tipología de torres autosoportadas y pesos asociados.

1.1.1. Criterio técnico de selección de torres ensayadas

La selección de las estructuras ensayadas se definió con base en su representatividad dentro del trazado y en el nivel de sollicitación estructural que deben asumir.

En condición de suspensión, se seleccionó la torre AN-R – Cuerpo 1, por ser la tipología con mayor recurrencia a lo largo de la línea Chorodó – Caucheras 110 kV. Adicionalmente, el ensayo se realizó bajo la configuración asociada a vanos comprendidos entre 300 m y 650 m, condición

que genera mayores demandas de carga sobre la estructura en suspensión y, por tanto, representa el escenario más exigente para su verificación.

En condición de retención, para las torres arriostradas se seleccionó la torre CN-R – Cuerpo 1, por ser la configuración más recurrente dentro del trazado de la línea Chorodó – Caucheras 110 kV. Para las torres autosoportadas se seleccionaron las torres Tipo B y Tipo C – Cuerpo 3, por corresponder a las configuraciones más recurrentes dentro del trazado de la línea de transmisión Guarcama 110 kV. Entre las distintas alternativas de retención, estas tipologías fueron elegidas por inducir mayores sollicitaciones, particularmente bajo cargas angulares que incrementan de manera significativa las acciones longitudinales y transversales sobre la estructura.

1.2. Marco normativo

Las pruebas de destrucción de las torres se realizaron de acuerdo con la normativa que se relaciona a continuación:

- International Electrotechnical Commission. (2002). IEC 60652: Loading tests on overhead line structures. IEC.
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). Ministerio de Minas y Energía.
- American Society of Civil Engineers. (2019). ASCE/SEI 74-19: Guidelines for electrical transmission line structural loading. ASCE.
- American Society of Civil Engineers. (2015). ASCE/SEI 10-15: Design of latticed steel transmission structures. ASCE.

1.3. Hipótesis de carga

Las hipótesis de carga implementadas en las pruebas fueron definidas conforme a los lineamientos establecidos en el RETIE y a las normas técnicas de diseño estructural aplicables a torres de líneas de transmisión. La formulación de dichas hipótesis consideró la función estructural de cada tipología — suspensión y retención— e incorporó las condiciones normales y anormales de operación que pueden presentarse en servicio, como se presenta en las tablas 3 y 4.

Torres en suspensión Hipótesis de carga	
1- Vto Max Transversal:	Condición normal viento máximo transversal (Y)
1I-Vto Max Transversal:	Condición normal viento máximo transversal (-Y)
2-Temp Min:	Condición normal viento máximo longitudinal (X)
2I-Temp Min:	Condición normal viento máximo longitudinal (-X)
3-Vto Max a 45°:	Condición normal viento máximo a 45°(XY)
3I-Vto Max a 45°:	Condición normal viento máximo a 45°(-XY)
4-Montaje:	Condición de montaje sin viento
5-Mantenimiento:	Condición de mantenimiento sin viento
6-Anormal 1:	Ruptura de 1 cable guarda
7-Anormal 2:	Ruptura de 1 cable fase

Tabla 3. Hipótesis de cargas para torres en condición de suspensión.

Torres en suspensión Hipótesis de carga	
1- Vto Max Transversal:	Condición normal viento máximo transversal (Y)
1I-Vto Max Transversal:	Condición normal viento máximo transversal (-Y)
2-Vto Temp Mínima:	Condición normal Temperatura mínima (X)
2I-Vto Temp Mínima:	Condición normal Temperatura mínima (-X)
3-Vto Max a 45°:	Condición normal viento máximo a 45°(XY)
3I-Vto Max a 45°:	Condición normal viento máximo a 45°(-XY)
4-Montaje:	Condición de montaje sin viento
5-Mantenimiento:	Condición de mantenimiento sin viento
6-Anormal 1:	Ruptura de 1 cable guarda Y 1 fase
7-Anormal 2:	Ruptura de 2 fases

Tabla 4. Hipótesis de cargas para torres en condición de retención.

2.4. Árboles de carga

2.4.1. Generación de combinaciones de carga

A partir del modelo estructural desarrollado para las diferentes tipologías de torres, se generaron las combinaciones de carga conforme a las hipótesis y en concordancia con los criterios de diseño estructural adoptados para torres de líneas de transmisión. Las combinaciones incluyeron solicitaciones longitudinales, transversales y verticales derivadas de:

- Carga por viento máximo
- Cargas anormales debido a condiciones de rotura de conductor
- Cargas de montaje y mantenimiento
- Cargas por temperatura mínima

Para cada tipo de torre se evaluaron múltiples árboles de carga, incorporando los factores de seguridad correspondientes, dado que el ensayo fue concebido para validar el comportamiento estructural bajo cargas de diseño, es decir, las cargas de las pruebas están mayoradas con factores de seguridad.

2.4.2. Representación de los árboles de carga seleccionados

Las imágenes que se presentan a continuación, en las figuras 1 a 4, reflejan los árboles de carga seleccionados para las torres de suspensión y retención tanto para las torres arriostradas como las autosoportadas que se probaron. En estos, se indican los puntos de aplicación de las cargas y la magnitud de las fuerzas aplicadas durante los ensayos.

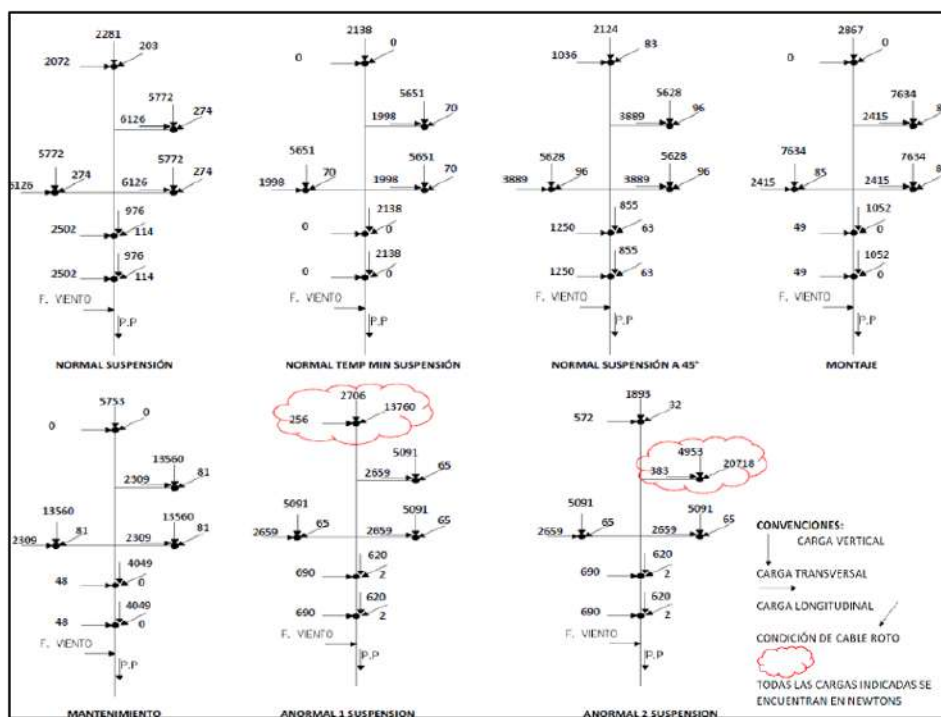


Figura 1. Árboles de carga mayorados – Torre arriostrada AN-R.

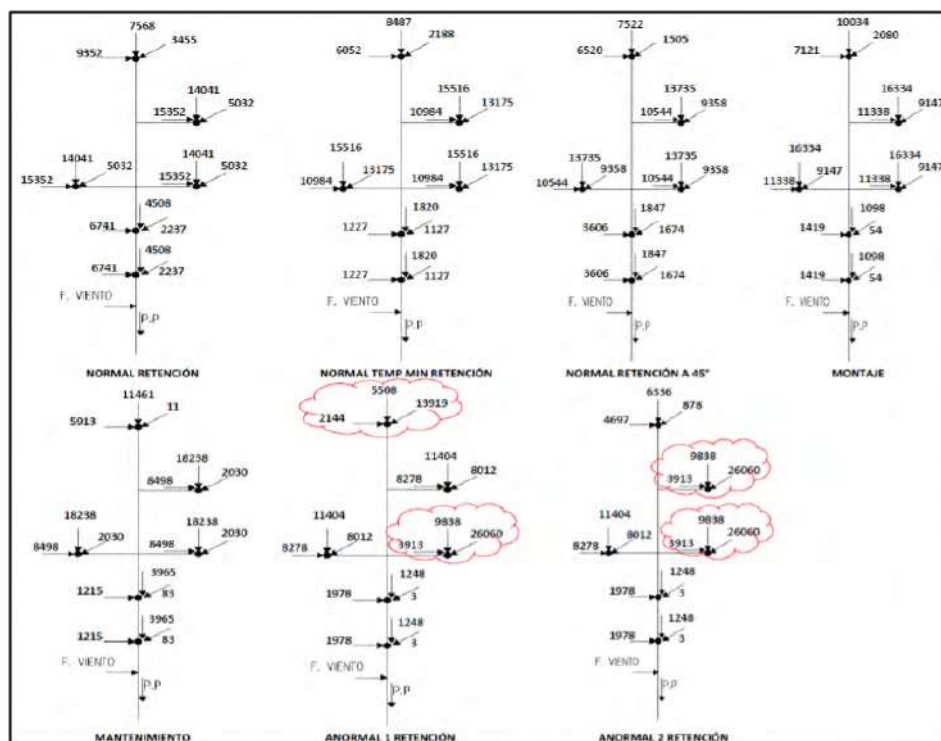


Figura 2. Árboles de carga mayorados – Torre arriostrada CN-R.

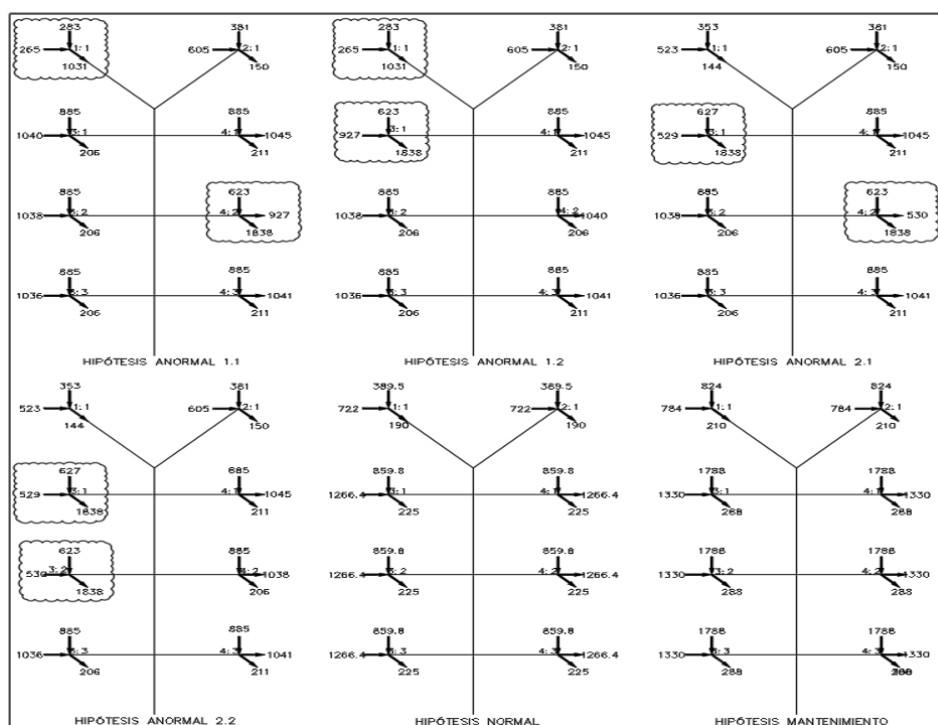


Figura 3. Árboles de carga mayorados – Torre autosoportada B.

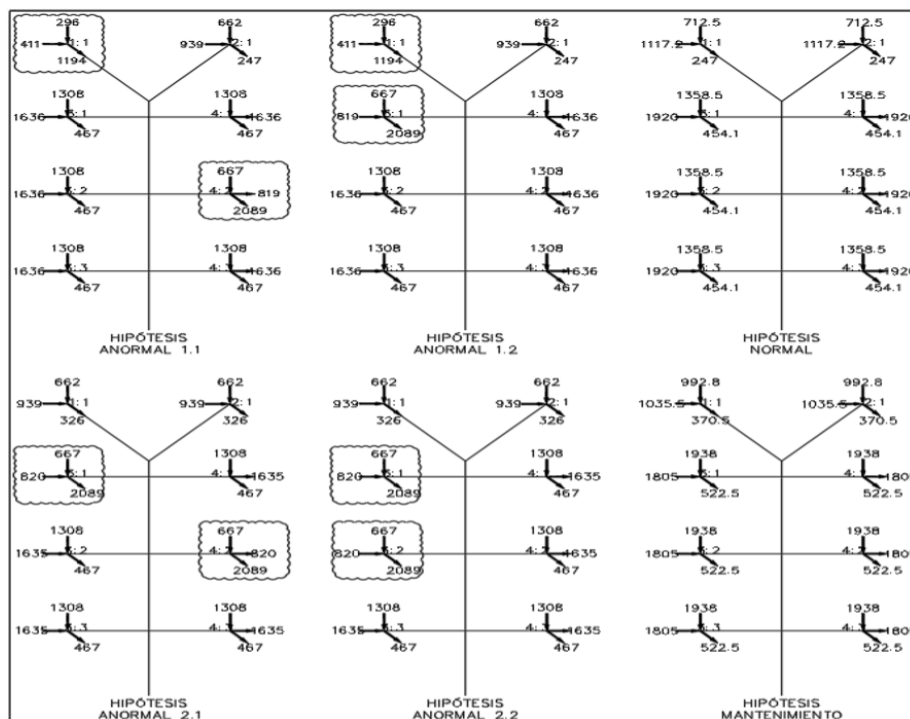


Figura 4. Árboles de carga mayorados – Torre autosoportada C.

2.5. Verificación geométrica y documental del prototipo

Previo al izaje y montaje completo de los prototipos en los patios de pruebas, se realizó una inspección técnica detallada con el fin de verificar la conformidad dimensional y constructiva de las estructuras respecto a los planos de taller previamente aprobados por EPM. La inspección incluyó la verificación del tipo y la sección de los perfiles correspondientes a montantes principales, diagonales, elementos de cierre, miembros que conforman los brazos, platinas y sistemas de conexión. Asimismo, se revisaron las dimensiones globales de la

estructura, incluyendo la altura total, las longitudes de brazos, la configuración espacial y los parámetros geométricos relevantes.

Como resultado del proceso de verificación, se constató que el prototipo fabricado corresponde íntegramente a la geometría y especificaciones establecidas en los planos de taller aprobados, sin que se evidenciaran desviaciones dimensionales ni modificaciones respecto al diseño validado. En la figura 5, se presentan registros fotográficos del proceso de inspección y verificación geométrica previo al montaje.



Figura 5. Inspección estructural y geométrico de las torres.

2.6. Configuración del patio de pruebas y sistema de aplicación de cargas

Las pruebas a escala real de las torres arriostradas fueron ejecutadas en las instalaciones del Structural Engineering Research Centre (SERC-CSIR), ubicado en Chennai, India, entidad adscrita al Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno de India. Para el caso de las torres autosoportadas, los

ensayos fueron ejecutados en las instalaciones del State Grid Electric Power Engineering Research Institute Co., ubicado en Pekín, China.

Los patios de pruebas corresponden a una infraestructura especializada para ensayos estructurales de torres de transmisión a escala real, diseñada para reproducir de manera controlada las condiciones de carga definidas en la etapa de modelación estructural.

El sistema experimental está conformado por:

- Sistema de cables de acero de alta resistencia conectados a los puntos de aplicación definidos en el árbol de carga.
- Actuadores hidráulicos para la aplicación controlada de fuerzas.
- Sistema de control y monitoreo de magnitudes de carga.

Las cargas longitudinales, transversales y verticales fueron aplicadas mediante cables

de acero dispuestos estratégicamente y accionados a través de actuadores hidráulicos, permitiendo la transferencia controlada de las fuerzas hacia los nodos estructurales de las torres. La configuración del montaje garantizó la correcta alineación geométrica del prototipo, evitando la introducción de excentricidades no previstas en el modelo estructural. En las figuras 6 y 7 se presentan vistas generales del patio de pruebas y del sistema de aplicación de cargas instalado en la torre ensayada.



Figura 6. Patio de pruebas ubicado en Chennai, India.



Figura 7. Patio de pruebas ubicado en Pekín, China.

2.7. Instrumentación y sistema de medición

La instrumentación fue diseñada de tal forma que la magnitud de las cargas no se controlara únicamente a partir de la presión ejercida por los actuadores hidráulicos, sino mediante la lectura directa de la fuerza efectivamente aplicada en cada brazo o nodo estructural. Una vez completado el izaje y armado integral del prototipo, se procedió a la instalación del sistema de aplicación e instrumentación conforme al árbol de carga seleccionado. Este sistema consistió en la instalación de celdas de carga calibradas dispuestas en línea dentro del sistema de tracción conformado por cables de acero, permitiendo una medición directa de las fuerzas transmitidas a la estructura.

Adicionalmente, se implementó un sistema de monitoreo geométrico mediante estación total, con el fin de registrar los desplazamientos globales de la estructura durante la aplicación incremental de carga. Para esto, se establecieron puntos de control en el castillete, brazos y zona del cuello de la torre, permitiendo medir en tiempo real las deformaciones estructurales de las torres una vez se incrementaban las solicitaciones.

2.8. Procedimiento de aplicación de carga

Una vez completada la configuración del sistema de aplicación de cargas e instrumentación, se iniciaron las pruebas, las cuales se enfocan en la aplicación de las cargas definidas de acuerdo con (7) hipótesis establecidas en la etapa de la modelación estructural. La última hipótesis evaluada correspondió a la condición denominada Anormal 2, que simula la rotura de conductores: rotura de una fase para la torre de suspensión y rotura de dos fases para la torre de retención. Esta condición fue seleccionada como escenario crítico y fue llevada hasta el estado de falla o destrucción controlada de los prototipos.

Se debe anotar que, para cada hipótesis, la carga fue aplicada de manera incremental en los niveles del 50 %, 75 %, 90 %, 95 % y 100 % respecto a la carga de diseño. En los niveles correspondientes al 50 %, 75 %, 90 % y 95 %, la carga se sostuvo durante un (1) minuto antes de avanzar al siguiente incremento; mientras que en el nivel del 100 %, correspondiente a la carga de diseño mayorada, la solicitud se mantuvo durante dos (2) minutos. Durante cada etapa se monitorearon continuamente las fuerzas aplicadas mediante celdas de carga y los desplazamientos globales mediante estación total, verificando el comportamiento estructural y la ausencia de fallas prematuras.

2.9. Criterios de aceptación y definición de falla

Conforme a lo establecido en la International Electrotechnical Commission (IEC, 2019) la evaluación de la capacidad última del prototipo contempla la verificación del comportamiento estructural hasta un nivel máximo equivalente al 125 % de la carga de diseño. Para las hipótesis normales de operación, la estructura debía resistir satisfactoriamente el 100 % de la carga de diseño mayorada durante el tiempo de sostenimiento especificado, sin evidenciar inestabilidad global, pandeo prematuro de elementos principales, falla de conexiones o fractura de miembros estructurales.

Desde el punto de vista de validación estructural, el rango aceptable de falla se establece entre el 100 % y el 125 % de la carga de diseño, bajo las siguientes consideraciones:

- **Falla antes del 100 %:** indica insuficiencia estructural respecto al diseño, evidenciando subdimensionamiento o inconsistencias entre el modelo analítico y el comportamiento real.
- **Falla entre el 100 % y el 125 %:** comportamiento esperado y consistente con el diseño estructural, validando los factores de seguridad adoptados.

- **Ausencia de falla al 125 %:** puede indicar un nivel de sobredimensionamiento estructural respecto a los parámetros de diseño, con implicaciones en optimización de peso y eficiencia material.

Este criterio permite verificar la correspondencia entre la capacidad real del prototipo y la resistencia prevista en el modelo estructural, asegurando coherencia entre análisis, diseño y desempeño experimental.

3. Resultados

3.1. Desempeño estructural bajo hipótesis de carga

Las torres AN-R (arriostrada en suspensión) y CN-R (arriostrada en retención), ensayadas en India para el proyecto Chorodó – Caucheras 110 kV, así como las torres autosoportadas Tipo B y Tipo C correspondientes a la Línea Guarcama 110 kV ensayadas en China, fueron sometidas a siete (7) hipótesis de carga correspondientes a condiciones normales, de temperatura mínima, montaje, mantenimiento y estados anormales definidos en el RETIE (Ministerio de Minas y Energía, 2013) y en concordancia con la IEC (2019). En todas las hipótesis evaluadas hasta el 100 % de la carga de diseño mayorada, las tipologías arriostradas y autosoportadas resistieron satisfactoriamente sin evidenciar fallas estructurales globales ni inestabilidad prematura de elementos principales.

Durante los incrementos intermedios (50 %, 75 %, 90 %, 95 %), el comportamiento observado fue esencialmente elástico, con deformaciones proporcionales al nivel de carga aplicado y sin pérdida de alineación significativa tanto en las torres ensayadas en India como en las probadas en China. En el nivel del 100 %, mantenido durante dos minutos conforme a la IEC (2019) no se presentaron fracturas, pandeos irreversibles ni fallas en conexiones críticas, validando la coherencia entre los modelos de diseño y la respuesta experimental en ambas campañas de prueba.

3.2. Ensayo destructivo – Torre AN-R

En la hipótesis crítica (Anormal 2 – rotura de fase), la torre AN-R fue llevada progresivamente más allá del 100 % de la carga de diseño. La falla se presentó al alcanzar aproximadamente el 120 % de la carga mayorada, luego de 32 segundos de sostenimiento en dicho nivel. El modo de falla identificado correspondió inicialmente a la rotura de conectores de uno de los vientos (arriostramientos), lo que generó redistribución abrupta de esfuerzos hacia la parte inferior de la estructura, afectando algunos perfiles metálicos en la zona conexión con los vientos. Este comportamiento confirma que el mecanismo resistente principal en esta tipología está gobernado por el sistema de retenidas y que la estructura posee un margen de seguridad superior al 20 % respecto a la carga de diseño, tal y como se presenta en la figura 8.

3.3. Ensayo destructivo – Torre CN-R

Para la torre CN-R, la falla se produjo mientras la carga se incrementaba del 120 % al 125 % de la carga de diseño en la misma hipótesis crítica (Anormal 2, rotura de dos fases). El colapso se originó en los montantes que convergen en la zona inferior del cuello de la torre, evidenciando un modo de falla por compresión y pandeo localizado en elementos principales. El hecho de que la falla ocurriera en un rango superior al 120 % confirma que la torre cumple

con los factores de seguridad adoptados en el diseño y que la capacidad última real supera ampliamente la carga de trabajo mayorada, ver figura 9.

3.4. Ensayo destructivo – Torre Tipo B

La torre autoportada Tipo B superó satisfactoriamente el 100 % de la carga de diseño en seis (6) hipótesis de carga evaluadas. Durante la prueba de la hipótesis No. 6, la estructura colapsó al alcanzar el 108 % del nivel de carga correspondiente. La falla se inició en la conexión mediante un mecanismo de bloque cortante evidenciado por la fractura combinada por corte y tracción en la platina de unión. El mecanismo observado indica que el estado límite último estuvo gobernado

por la capacidad resistente de la conexión y no por inestabilidad global de los miembros principales, según se aprecia en la figura 10.

3.5. Ensayo destructivo – Torre Tipo C

La torre autoportada Tipo C superó satisfactoriamente el 100 % de la carga de diseño en seis (6) hipótesis de carga evaluadas. Durante la prueba de la hipótesis No. 6, la estructura alcanzó y superó el 120 % del nivel de carga correspondiente sin presentar falla en dicho escalón de carga. No se registraron fracturas frágiles ni fallas súbitas en pernos o platinas durante los niveles evaluados, evidenciando un comportamiento estructural estable y coherente con la capacidad resistente prevista en el diseño.



Figura 8. Torre AN-R: Falla de retenidas y falla en un Montante en prueba destructiva.



Figura 9. Torre CN-R: Fallo de montantes en prueba destructiva.



Figura 10. Torre B: falla en la conexión mediante mecanismo de bloque cortante.

Conclusiones

- Los resultados experimentales obtenidos permiten establecer que las torres arriostradas y autosoportadas evaluadas presentan un comportamiento estructural consistente con los estados límite previstos en la etapa de diseño. Las capacidades resistentes observadas en campo confirman la coherencia entre la modelación estructural y la respuesta real bajo cargas mayoradas.
- En las torres arriostradas (AN-R y CN-R), la ocurrencia de falla en rangos superiores al 120 % de la carga de diseño evidencia márgenes de seguridad adecuados y confirma que el sistema resistente principal responde conforme a los factores adoptados en la ingeniería. Asimismo, el análisis de redundancia mediante modelación en PLS-TOWER demostró que la estructura mantiene estabilidad aun ante la pérdida accidental de hasta dos retenidas, lo cual incrementa la confiabilidad global del sistema.
- En las torres autosoportadas, la Torre Tipo B superó el 100 % de la carga de diseño en seis hipótesis y colapsó al 108 % en el caso crítico por un mecanismo de bloque cortante en la conexión, lo que evidencia que la capacidad última estuvo gobernada por el diseño de la conexión. Este resultado permitió identificar puntos concretos de mejora en el detalle de la unión, mediante ajustes en la configuración de la conexión, tales como incremento del área neta resistente, redistribución de pernos o modificación del espaciamiento y de las distancias a borde que, con un impacto mínimo en el peso total de la estructura, podrían incrementar de manera significativa la capacidad resistente global de la torre.
- Por su parte, la Torre Tipo C superó el 120 % sin presentar falla en dicho escalón, evidenciando un margen resistente superior al mínimo normativo. Este comportamiento indica que aún existen rangos de optimización estructural posibles, orientados a hacer la torre más costo efectiva, ya sea mediante una reducción controlada de material o una redistribución eficiente de secciones, manteniendo los niveles de seguridad exigidos por la normativa.
- Desde el punto de vista técnico, los resultados validan el proceso de optimización estructural implementado, demostrando que la reducción de peso no comprometió la seguridad ni la capacidad resistente de las estructuras. Desde el punto de vista económico, la disminución significativa de peso en torres arriostradas frente a configuraciones tradicionales confirma el potencial de ahorro en el suministro de la estructura metálica.
- En conjunto, las pruebas a escala real permitieron verificar la correspondencia entre diseño, modelación y desempeño experimental, consolidando la trazabilidad técnica exigida por la normativa y garantizando la confiabilidad estructural de las torres implementadas en los proyectos evaluados.

Referencias

- International Electrotechnical Commission. (2019). Loading tests on overhead line structures (IEC 60652). <https://i2.saiglobal.com/>
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE). <https://rebrand.ly/p1bwtgt>

Cómo citar este artículo:

Agudelo Rendón, J; Osorio Gaitán, S. (2026). Esbeltas, pero extraordinariamente resistentes: validación experimental de torres de transmisión sometidas a grandes cargas. **Revista EPM**, (26), 99-115.



Modelo predictivo para la gestión de vegetación en redes de distribución eléctrica

Predictive model for vegetation management in power distribution networks

**Rafael Mauricio
Luna Uribe**

Área Montajes - Redes
Inteligentes, EPM

rafael.luna@epm.com.co

**Luis Humberto
Berrio Valencia**

Subgerencia Soluciones
Integrales del Negocio (TI-TO) -
Redes Inteligentes, EPM

luis.berrio@epm.com.co

**Diana Lisette
Arango Cañas**

Área Programación y Seguimiento
del Mantenimiento Transmisión y
Distribución Energía, EPM

diana.arango.canas@epm.com.co

**Will Henry
Zapata Castrillón**

Área Programación y Seguimiento
del Mantenimiento Transmisión y
Distribución Energía, EPM

will.zapata@epm.com.co

Resumen

Las tecnologías intensivas en datos, como la analítica avanzada y la inteligencia artificial, tienen un rol relevante en el aseguramiento de la calidad, productividad y sostenibilidad en sectores como las utilities. Este estudio presenta una herramienta analítica flexible y escalable para planear y programar la gestión de vegetación en redes de distribución eléctrica. Su objetivo es mejorar la eficiencia operativa de las cuadrillas, optimizar recursos destinados a la poda y reducir riesgos de fallas como cortocircuitos, una de las principales

causas de interrupciones del servicio. La solución, que analiza simultáneamente todas las zonas con infraestructura eléctrica de EPM, fue diseñada bajo la metodología CRISP-DM y se apoya en una arquitectura de datos tipo Data Lakehouse, integrando información geoespacial y tasas de crecimiento de especies arbóreas. Como resultado, se generan alertas priorizadas que permiten estimar el momento óptimo de intervención. Además, facilita la programación por región o activo y se actualiza continuamente con datos operativos.

Palabras clave:

Análisis de datos, Gestión de la vegetación, Planeación de poda, Predicción, Datos geoespaciales, Data lakehouse, Redes de distribución.

Keywords:

Data analysis, Vegetation management, Pruning planning, Forecast, Geospatial data, Data Lakehouse, Power distribution networks.

Introducción

El crecimiento de la vegetación en proximidad a las redes de distribución eléctrica representa un desafío técnico y operativo significativo para las empresas del sector energético. La interacción entre la infraestructura eléctrica y la vegetación aumenta el riesgo de cortocircuitos, lo que puede causar interrupciones en el suministro eléctrico.

Estos incidentes pueden durar desde algunos minutos hasta varias horas, afectando la continuidad del servicio, en casos más críticos, pueden originar riesgos de seguridad que comprometen no solo la vida útil de los activos, sino también la integridad de las personas. En este contexto, la gestión eficiente de la vegetación, además de responder a requerimientos normativos en muchos países, implica el desarrollo de estrategias para optimizar el mantenimiento y reducir de costos operativos. Adicionalmente, esta solución está enmarcada en las iniciativas de sendas de productividad del negocio de Transmisión y Distribución (T&D) en EPM, orientadas a la optimización y rentabilidad de los negocios de la organización.

Las técnicas tradicionales de gestión de poda se basan en programas de mantenimiento preventivo con periodicidades fijas; sin embargo, presentan limitaciones en términos

de precisión y en la capacidad para evitar fallas en el sistema. La falta de integración de información sobre el crecimiento de especies, la ubicación exacta de los árboles en relación con la red y el análisis de datos históricos de poda pueden derivar en sobre costos o en una inadecuada priorización de recursos.

Para abordar estos desafíos, existen diversas alternativas, tales como las imágenes satelitales, las correrías e intervenciones manuales, o el desarrollo de un modelo predictivo de gestión de vegetación a partir de datos recolectados en campo y registrados en el archivo de productividad). Debido al costo de las imágenes satelitales y, con la finalidad de poder actualizar constantemente la información para la toma de decisiones, se optó por un enfoque de analítica de datos con información que se recolecta en cada una de las intervenciones sobre los individuos arbóreos.

El modelo desarrollado en este trabajo se fundamenta en un enfoque basado en datos, combinando la información recolectada durante las podas ejecutadas, las tasas de crecimiento por especie y un análisis espacial a partir de la ubicación de los árboles respecto a la red de distribución.

1. Anecedentes

A partir del diagnóstico de las principales causas de interrupciones en la red de distribución de EPM, se identificó que factores como la climatología, la vegetación, los fallos en los elementos de red y actividades programadas representan aproximadamente el 50 % de las interrupciones de suministro, de este total, el 14 % corresponde a eventos

asociados a la vegetación (Árbol o rama), tal como se muestra en la figura 1. Además, la tipología de red aérea del Grupo EPM (>90 %) genera mayor susceptibilidad a interrupciones por clima o vegetación. Sin embargo, del 10 al 50 % de las causas de interrupciones son aún desconocidas (Boston Consulting Group [BCG], 2021).

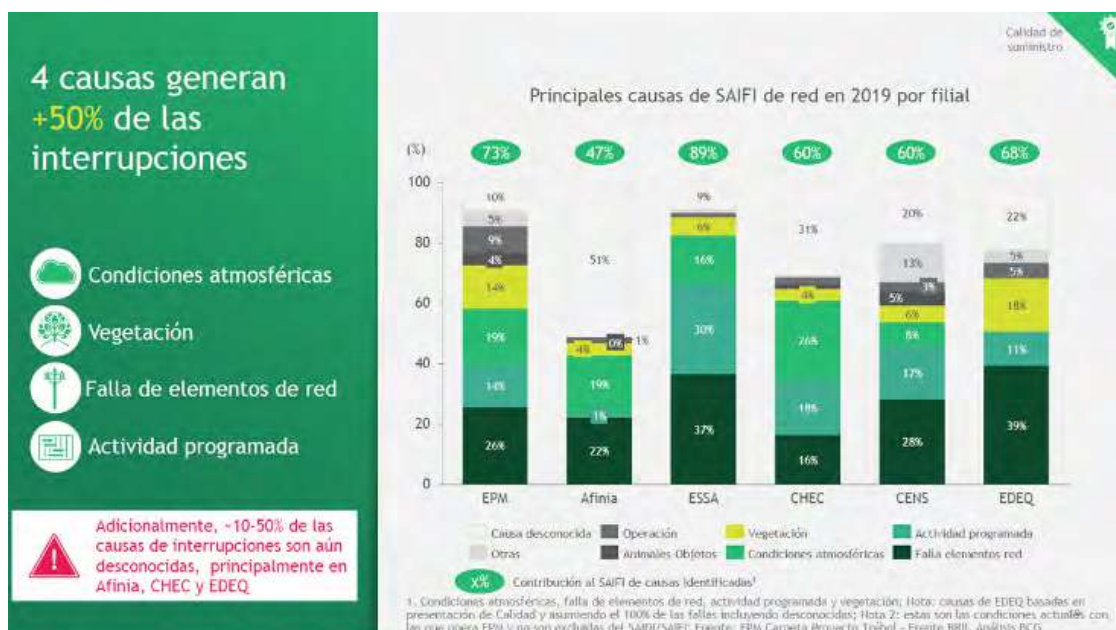


Figura 1. Causas principales que generan interrupciones. Tomado de: (BCG, 2021).

Por otra parte, la figura 2 describe los principales factores que contribuyen a la mayor duración

de las interrupciones identificadas por la organización.



Figura 2. Principales factores contribuyentes a la mayor duración de las interrupciones. Tomado de: (BCG, 2021).

Adicionalmente, una de las tácticas requeridas para mejorar la calidad del servicio se basa en *Predecir incidentes a corto y largo plazo relacionados con las variables exógenas que afectan la operación*, cuyos Indicadores Claves de Rendimiento (KPIs, por sus siglas en inglés), son *Reducción de duración y cantidad de fallas originadas por variables exógenas y Porcentaje del sistema sobre el cual se tiene cobertura para analizar la influencia de las variables exógenas en la operación* (Ernest & Young, 2022). Esta táctica requiere acciones desde el corto plazo y se extiende hasta el largo plazo. Además, aprovecha la información disponible en la organización, aunque requiere de un tratamiento y depuración adecuados para cerrar el ciclo del dato desde su medición o recolección, hasta la toma de decisiones que finalmente es aquello que agrega valor.

En la práctica, existen diversas normas y lineamientos que dependen de las geografías o estándares adoptados por *utilities* frente a los

despejes mínimos de líneas y poda lateral en redes de distribución. Algunas de ellas definen sus propios parámetros de seguridad. Por ejemplo, Pacific Gas & Electric Company, (s.f.) conservan 1,2 m de distancia segura en zonas de alto riesgo de incendio, aunque recomienda 3,6 m al momento de la poda para mantener la distancia durante todo el año. Por su parte, Jackson Energy Authority, (s.f.) indica valores cercanos a 3.05 a 3.6 metros, empleando la técnica de lateral *trimming*, que implica realizar poda hasta la rama lateral más cercana en la distancia de despeje establecida, y empleando a su vez el cálculo a partir de circunferencias alrededor de los activos de distribución.

La tasa de crecimiento de los árboles varía según la especie y requerirá diferentes ciclos de poda para mantener una distancia de seguridad. De hecho, este tipo de seguridad también se traslada al momento de actividades de poda, ya que los equipos y herramientas utilizados pueden inducir o conducir electricidad, lo que

puede provocar electrocuciones, descargas eléctricas o incendios. Por ejemplo, la *Electrical Safety Authority* (s.f.) define de una distancia de 1,0 m (3 pies) entre las ramas y las líneas eléctricas secundarias, y de 3,0 m (10 pies) entre las ramas y las líneas eléctricas primarias.

Sin embargo, es común encontrar diversa normatividad y autoridades¹ que establecen criterios sobre distancias de seguridad respecto a individuos arbóreos con relación a la infraestructura de red eléctrica. (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2023) y *Electronic Code of Federal Regulations* (eCFR), La ANSI A300 y estándares tipo NERC FAC-003-1 definen también mejores prácticas aplicables a redes eléctricas.

Por su parte, Electric Power Research Institute (2021) contiene un programa de Gestión Integrada de la Vegetación (GIV) para el sector eléctrico que busca asegurar un suministro de energía continuo y seguro. Para ello, se ha establecido una Distancia Mínima de Despeje de Vegetación (MVCD), definida para evitar contactos o arcos eléctricos entre la vegetación y los conductores. La aplicación de este criterio en corredores de transmisión y distribución permite clasificar áreas donde la vegetación resulta compatible o riesgosa para la red. En particular, la franja de servidumbre se organiza en zonas de manejo, diferenciando la zona de conductores (*wire zone*) y las zonas laterales contiguas (*border zones*), cada una con requerimientos específicos de intervención.

2. Objetivos

Para mejorar la planificación y ejecución del mantenimiento forestal en redes de distribución eléctrica, asegurando la continuidad del servicio y optimizando el uso de recursos, se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Implementar una solución capaz de procesar grandes volúmenes de información y generar resultados detallados, permitiendo la identificación de alertas tempranas de riesgo mediante el monitoreo del crecimiento de la vegetación árbol por árbol.
- Emplear los datos históricos de trabajos de poda para optimizar la planificación y gestión de la vegetación.
- Promover la transición hacia una gestión predictiva del mantenimiento, reduciendo fallas en la red eléctrica por impacto de la vegetación y asegurando la continuidad del servicio para los usuarios.
- Reducir la intervención manual en la planificación de poda mediante la integración de modelos matemáticos y herramientas de visualización geoespacial.

3. Metodología

El desarrollo de la herramienta de analítica se fundamenta en el marco de trabajo CRISP-DM el cual garantiza un enfoque estructurado para la extracción de conocimiento a partir de datos (Schröer et al., 2021). Esta metodología

permite un proceso iterativo que facilita la mejora continua del modelo y la alineación con los objetivos del negocio, asegurando que la solución propuesta sea efectiva, escalable y adaptable a distintos entornos (Ver figura. 3).

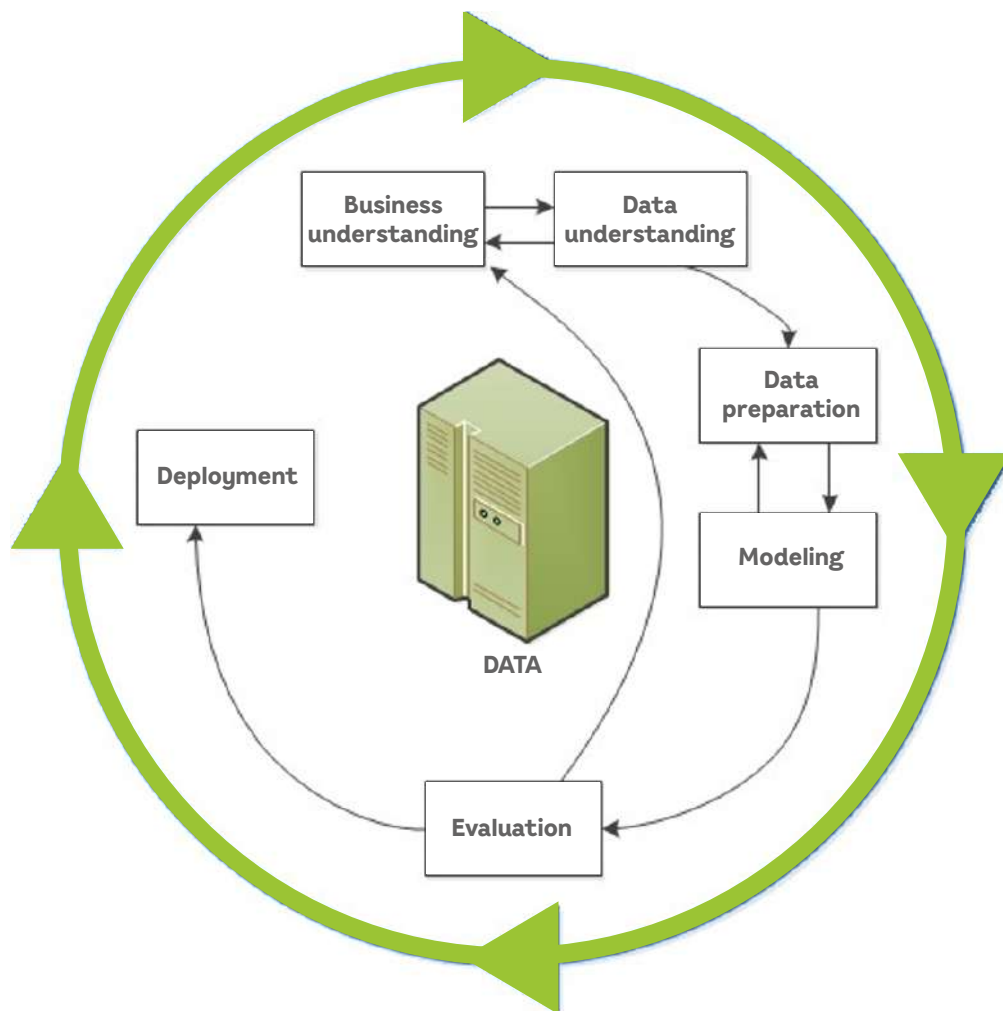


Figura 3. Metodología CRISP-DM. Tomado de: Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM (International Business Machines Corporation [IBM], 2021).

El primer paso en la metodología consiste en el entendimiento del negocio, donde se estableció la alineación con los objetivos estratégicos de la empresa. Esto incluyó enfoques como la optimización del mantenimiento forestal, la reducción de costos operativos y la minimización de interrupciones en la red eléctrica. En esta fase, se realizó un análisis detallado de la situación actual del mantenimiento de la vegetación en la red de distribución, identificando los desafíos operativos y técnicos que podían ser abordados mediante el uso de analítica de datos. A partir de este diagnóstico, se definió un plan de trabajo estructurado apalancado en el marco de metodologías ágiles, que permitió la articulación entre las diferentes áreas involucradas en el desarrollo del modelo.

Posteriormente, en la fase de entendimiento de los datos, se realizó una recopilación exhaustiva de las fuentes de información relevantes para alimentar la etapa de modelado de la solución propuesta. Se integraron datos históricos de ejecución de poda, registros de órdenes de trabajo, tasas de crecimiento específicas por especie y coordenadas geoespaciales tanto de la vegetación como de la red eléctrica de EPM. En esta etapa, se efectuó un análisis exploratorio para comprender la cantidad de datos disponibles, detectar patrones y evaluar la calidad de los datos. Se detectaron posibles inconsistencias, valores atípicos y datos vacíos que podrían afectar la precisión del modelo. Además, se definieron las transformaciones necesarias para optimizar la estructura de los datos y garantizar su viabilidad en la siguiente fase de la metodología.

A partir de este análisis, se llevó a cabo la preparación de los datos, un proceso clave que incluyó la limpieza, normalización e integración de múltiples fuentes de información. Se implementaron técnicas para tratar valores faltantes y erróneos, se estandarizó la estructura de datos y se transformaron los

conjuntos de datos en formatos adecuados para el modelado.

Adicionalmente, se realizó una homologación de nombres científicos de especies arbóreas para asegurar la coherencia en la estimación de tasas de crecimiento y la correcta asociación de los registros con la infraestructura eléctrica. Esta etapa incluyó la selección de atributos relevantes y la identificación de los datos más útiles para el modelado, asegurando una base sólida para el análisis predictivo.

En la fase de modelamiento, se seleccionaron las técnicas más adecuadas para determinar cuándo, dónde y cuántos árboles deben podarse. Como parte de esta fase se define el mecanismo de comprobación de los resultados de las predicciones entregadas por la herramienta.

Una vez validado el modelo, nos encontramos en la fase de análisis para definir la mejor estrategia de despliegue, asegurando que la solución pueda integrarse de manera efectiva en la operación de la empresa. Actualmente, se están evaluando las opciones más adecuadas para su implementación en entornos productivos, considerando los requisitos técnicos, operativos y estratégicos necesarios para su correcto funcionamiento.

Paralelamente, se están desarrollando mecanismos de monitoreo y mantenimiento continuo que permitirán garantizar la actualización y evolución del modelo. Además, se han diseñado reportes y visualizaciones en Power BI para facilitar la interpretación de los resultados y apoyar la toma de decisiones en la planificación del mantenimiento forestal.

La metodología CRISP-DM permitió estructurar el desarrollo del modelo de manera iterativa y flexible, asegurando que cada fase del proceso contribuyera al cumplimiento de los objetivos. Gracias a este enfoque, se logró transformar

la gestión de la poda de árboles en la red de distribución eléctrica, pasando de un esquema reactivo a uno predictivo y optimizado, que garantiza una asignación eficiente de los recursos, la mejora en la seguridad del sistema y una mayor continuidad en el servicio eléctrico.

Por otra parte, la solución debe permitir optimizar los recursos y mejorar los indicadores de calidad media e individual establecidos por la resolución CREG 015 de 2018, contribuyendo a la continuidad y calidad del servicio eléctrico.

4. Contexto General

Para garantizar la aplicabilidad y éxito de la solución, es necesario incorporar los siguientes criterios claves:

- Automatización del proceso de integración y procesamiento de datos provenientes de bases de datos internas y externas, reduciendo la carga operativa manual.
- Reducción de desviaciones en la estimación de árboles a podar, mediante la incorporación de datos adicionales como inspecciones técnicas y coordenadas precisas de la red eléctrica.
- Incremento en la precisión del momento de poda, mediante la homologación de nombres de especies y la validación de tasas de crecimiento.

- Optimización de la planificación de mantenimiento, asegurando que todas las etapas del proceso finalicen con éxito y dentro de los plazos establecidos.

La implementación de este modelo permite transformar un proceso tradicionalmente reactivo en uno predictivo y proactivo, garantizando una mejor asignación de recursos y una reducción de incidentes operativos relacionados con la vegetación.

5. Descripción de la solución

El objetivo de esta solución es proporcionar una herramienta integral que sirva de apoyo para la toma de decisiones en la planeación y gestión del mantenimiento forestal, en las redes de distribución eléctrica de EPM. Mediante el análisis predictivo, es capaz de determinar cuándo, dónde y cuántos árboles deben podarse, enfocando los recursos de manera eficiente. Esto garantiza que las intervenciones se ejecuten correctamente, con un enfoque basado en las condiciones y variables del

sistema, tales como tasas de crecimiento de la vegetación, ubicación de elementos críticos y la distancia de seguridad necesaria entre los árboles y las redes.

La solución también permite medir y validar la efectividad de las intervenciones, asegurando una mejora continua en los procesos de mantenimiento. Además, monitorea y optimiza la precisión de las predicciones, facilitando la evolución y el perfeccionamiento de la

herramienta. El enfoque basado en datos de esta herramienta permite una alta adaptación a las necesidades específicas de EPM,

garantizando una gestión eficiente y precisa del mantenimiento forestal y contribuyendo a la continuidad del servicio eléctrico.

6. Desarrollo

La figura 4 muestra los elementos clave de la herramienta analítica diseñada para la gestión y programación predictiva de la poda de árboles en el contexto de la red de distribución de energía eléctrica de EPM. Este

modelo tiene como fin optimizar los recursos de mantenimiento forestal, reduciendo interrupciones en el servicio eléctrico causadas por la vegetación cercana a las redes de distribución de energía.

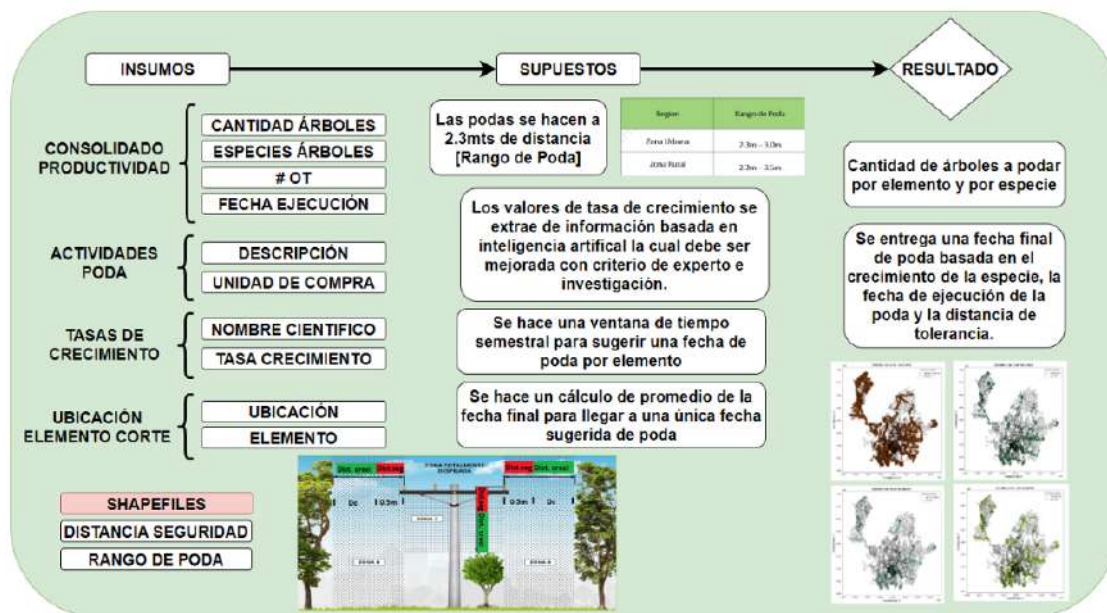


Figura 4. Componentes de la solución.

En este ejercicio de experimentación la arquitectura de solución implementada se compone de tres secciones principales: procesamiento y almacenamiento local, almacenamiento en la nube y procesamiento

en la nube, con una integración fluida entre ellas para la gestión eficiente de la información de poda de árboles. Estos componentes se muestran en la figura 5.

COMPONENTES DESARROLLO INICIATIVA

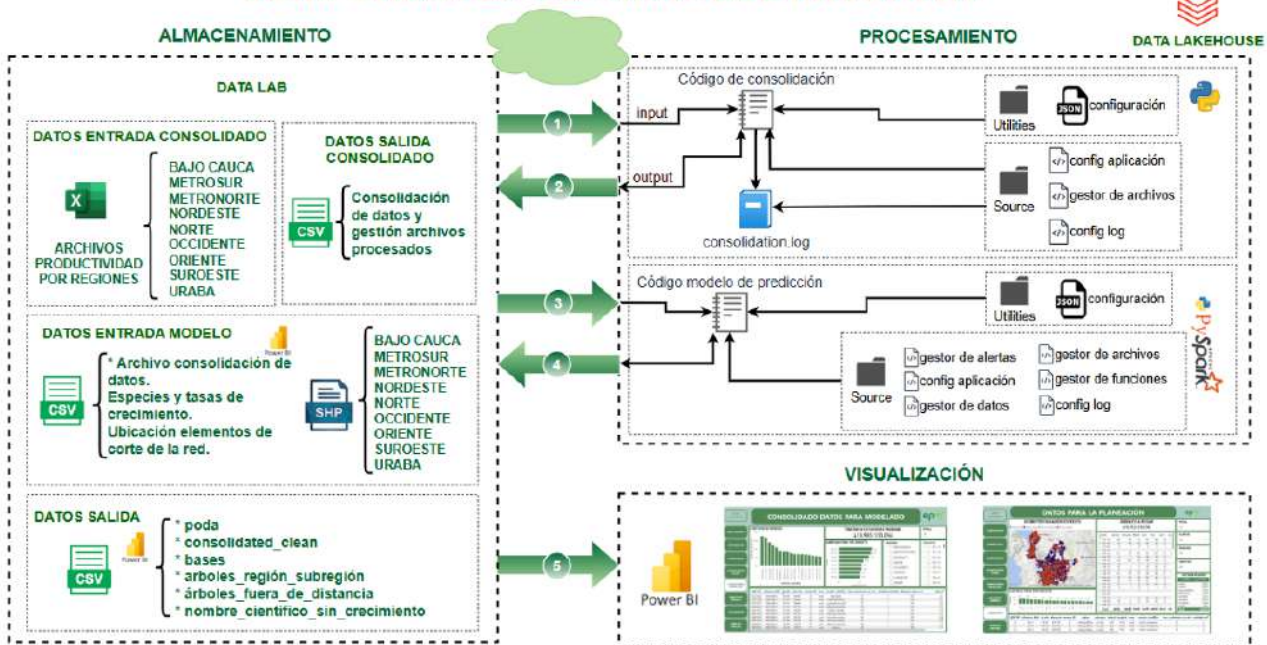


Figura 5. Arquitectura de solución.

La arquitectura de solución se basa en aplicaciones para experimentación de iniciativas de analítica de datos conformada por un Data Lakehouse para el procesamiento y almacenamiento en nube.

En una primera fase de procesamiento, se ejecuta el código de consolidación donde se procesan archivos de productividad en formato Excel (.xlsx) provenientes de diversas zonas geográficas como Bajo Cauca, MetroSur, MetroNorte, Nordeste, Norte, Occidente, Oriente, Suroeste, y Urabá. Este script genera dos archivos en formato CSV los cuales son:

- Archivo de consolidación de datos el cual consolida toda la información contenida en los archivos de productividad.
- Archivo gestión de datos que se encarga de llevar un inventario de archivos ya procesados para que al momento de actualizar con nueva información no se tengan que leer todos los archivos.

En el repositorio central de almacenamiento se gestionan los archivos de entrada, que incluyen datos consolidados de productividad, actividades de poda, ubicación de elementos de corte, tasas de crecimiento por especie, así como archivos geoespaciales (*shapefiles*) esenciales para relacionar los árboles podados con los conductores en la red de distribución.

En una segunda fase de procesamiento se ejecuta el código de modelo de predicción, donde se llevan a cabo tareas como la limpieza de datos, el cálculo de árboles fuera de distancia de seguridad, la homologación de nombres científicos, la generación de registros consolidados y se ejecuta el modelo de predicción de las especies a podar. Este procesamiento garantiza la consistencia de la información necesaria para la planificación del mantenimiento forestal.

Los resultados generados en esta fase de procesamiento incluyen: registros actualizados de poda, bases de datos consolidadas, información sobre árboles clasificados por región y subregión, árboles fuera de distancia de seguridad, y una lista de especies arbóreas sin tasas de crecimiento registradas.

Finalmente, en la fase de visualización, los datos procesados son cargados en Power BI, donde se generan *dashboards* interactivos para los responsables de la planeación y el mantenimiento forestal. Estos informes permiten visualizar de manera clara las zonas críticas, el rendimiento de las actividades de poda y las necesidades futuras de intervención, mejorando así la planificación y toma de decisiones estratégicas.

La figura 6 corresponde a la herramienta de visualización que muestra los resultados generados por la solución de gestión predictiva de poda, los cuales fueron desplegados en Power BI. Estos fueron organizados en diferentes gráficos que ofrecen información clave para la planificación eficiente del mantenimiento forestal. En el mapa interactivo se presenta la georreferenciación de las especies arbóreas, indicando la distribución de los árboles en diversas regiones operativas. Los puntos están clasificados según niveles de alerta: baja, media o máxima, lo que permite identificar las zonas donde la vegetación representa un mayor riesgo para la red eléctrica y, por lo tanto, requieren intervención prioritaria.

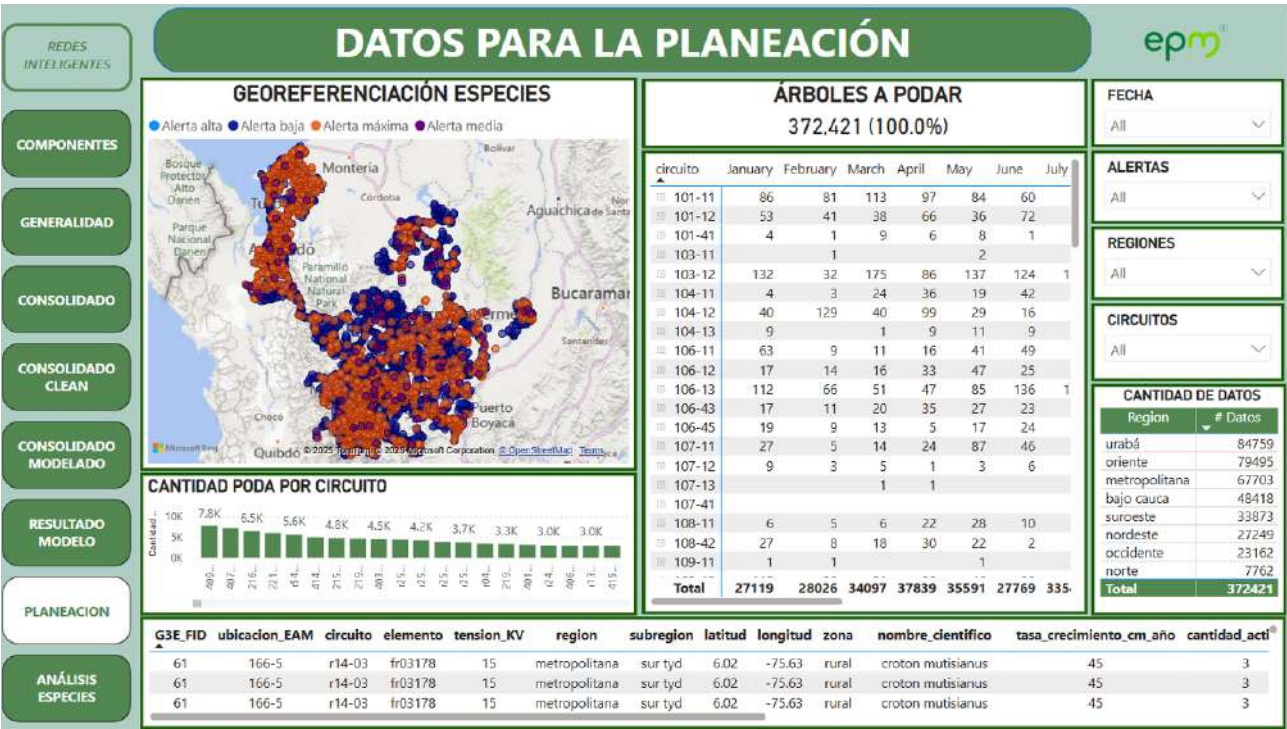


Figura 6. Visualización datos para planeación.

El gráfico de barras proporciona un resumen de la cantidad de árboles a podar por circuito eléctrico, lo que facilita la identificación de los circuitos con mayor necesidad de poda y permite planificar mejor la asignación de recursos. Por su parte, la tabla de programación mensual detalla el número de árboles a podar en cada circuito a lo largo del año, distribuyendo las actividades mes a mes. Este resultado es crucial para coordinar las acciones de mantenimiento de manera ordenada, evitando sobrecarga de trabajo en períodos específicos.

En la parte inferior de la visualización se encuentra una tabla que presenta información detallada por árbol. Los datos incluyen la asociación del árbol al elemento de la red eléctrica (ubicación elemento de corte), el circuito, la subregión, las coordenadas geográficas (latitud y longitud), el nombre científico de la especie arbórea, la tasa de crecimiento anual en centímetros y el número de acciones requeridas.

Adicionalmente, el panel lateral muestra la cantidad total de datos procesados, desglosada por región, lo que ofrece una visión consolidada de la carga de trabajo en cada área operativa. La visualización también incluye filtros interactivos, como fecha, nivel de alerta, región y circuito, que permiten a los usuarios personalizar la vista de acuerdo con sus necesidades específicas. Esto facilita el análisis enfocado en áreas prioritarias o períodos de tiempo determinados.

Esta herramienta de visualización también permite monitorear las actividades de poda ejecutadas, facilitando la labor de interventoría. Además, de identificar problemas de calidad en los datos, promoviendo el diálogo con los responsables de su recopilación y garantizando una mejora continua en la información utilizada por la herramienta.

7. Resultados

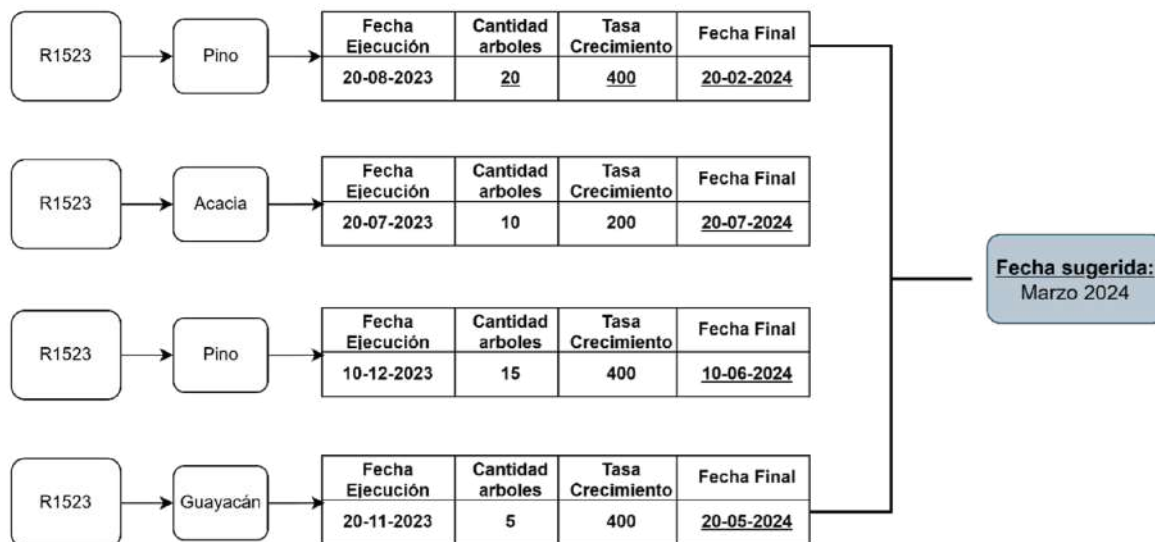
La implementación de esta herramienta contribuirá a la gestión de los recursos destinados al mantenimiento forestal, buscando mejoras en la calidad y continuidad del servicio eléctrico. Al automatizar y estructurar la predicción del crecimiento de la vegetación, se logrará una planificación más eficiente y preventiva, reduciendo los riesgos de interrupciones causadas por la proximidad de árboles a las redes de distribución.

A través de ecuaciones de crecimiento y el análisis de proximidad geoespacial, el modelo identifica los árboles que requieren intervención en cada período de planificación.

Además, el cálculo de fechas óptimas de poda basado en agregación ponderada de actividades evita duplicidad de esfuerzos y mejora la programación operativa de las cuadrillas de mantenimiento.

La figura 6. muestra un proceso simplificado para entregar los resultados del modelo de predicción de poda. Primero, se agrupan todas las ejecuciones realizadas aguas abajo de un mismo elemento de red. Este paso, llevado a cabo por el modelo, es clave para responder a las necesidades logísticas de la planificación de los trabajos de poda.

Predicción de poda



Semestre 1

Elemento	Especie	Cantidad	Fecha sugerida	Coordenadas
R1523	Pino	20	Marzo 2024	10, 20
R1523	Guayacán	5	Marzo 2024	60, 70

Semestre 2

Elemento	Especie	Cantidad	Fecha sugerida	Coordenadas
R1523	Pino	15	Julio 2024	70, 90
R1523	Acacia	10	Julio 2024	40, 30

Figura 7. Resultados del modelo predictivo.

Finalmente, el modelo genera las siguientes salidas clave:

- Cantidad de árboles a podar, agrupados por conductor eléctrico y especie.
- Fecha estimada de poda, basada en:
 - La tasa de crecimiento de la especie.
 - La fecha de la última poda.
 - La distancia de tolerancia establecida.
 - La agrupación de árboles por elemento de corte.
 - Las ventanas semestrales de la planeación de los trabajos de poda.
- Visualización geoespacial, mediante mapas en los que se muestran las zonas prioritarias para la intervención. La figura 8 presenta

un ejemplo de intervenciones proyectadas para la gestión de vegetación en el área metropolitana, donde se identifican distintos circuitos con especies arbóreas que requieren intervención prioritaria. A través de un mapa georreferenciado se visualizan los tramos con presencia de árboles clasificados bajo alerta máxima y alerta media, lo que permite focalizar las acciones en zonas de mayor riesgo para la red de distribución eléctrica. La herramienta muestra además la cantidad de árboles a podar por circuito y su distribución mensual, destacando el circuito r08-40 como el de mayor criticidad con la mayor cantidad de especies a intervenir.



Figura 8. Ejemplo de intervenciones proyectadas para la gestión de vegetación en el área metropolitana.

La herramienta mejorará la capacidad de identificar y priorizar intervenciones, lo que se traduce en menores tiempos de respuesta y una gestión más efectiva de las actividades de poda. Esto permitirá evaluar y validar constantemente la efectividad de las acciones realizadas, asegurando una mejora continua en los procesos.

La solución facilita una comprensión integral de los procesos de planificación y ejecución del mantenimiento forestal, consolidando

información de múltiples fuentes para respaldar decisiones basadas en datos. Con ello, se establecerán criterios claros que definirán la frecuencia, la ubicación y la cantidad de árboles a podar, lo que permitirá una asignación más precisa de los recursos operativos.

Finalmente, el conocimiento adquirido a través de la investigación exhaustiva sobre prácticas y datos de mantenimiento forestal proporcionará una base sólida para la sostenibilidad y evolución de la solución.

Conclusión

La implementación del Modelo Predictivo de Gestión de Vegetación para Redes de Distribución Eléctrica representa un avance significativo en la optimización del mantenimiento forestal dentro del sector eléctrico. A través de la integración de datos geoespaciales, modelado matemático y analítica avanzada, se ha logrado transformar un proceso tradicionalmente reactivo en una estrategia predictiva y proactiva. Este enfoque permite mejorar la eficiencia operativa de las intervenciones de poda, garantizando una planificación basada en datos y evitando costos innecesarios asociados a podas ineficientes o tardías.

Uno de los principales aportes de este modelo es la automatización de los datos del proceso de ejecución de poda, lo que reduce significativamente la carga operativa en la organización y minimiza errores derivados del manejo manual de información. Como resultado, la toma de decisiones en la gestión de poda se ve fortalecida al priorizar aquellas intervenciones que realmente impactan la confiabilidad del sistema eléctrico.

En términos de gestión de riesgos, este modelo introduce un sistema de alertas tempranas que clasifica los árboles según su nivel de criticidad en función de su proximidad a la red eléctrica y la velocidad de su crecimiento. Esta funcionalidad no solo optimiza la programación de las podas, sino que también permite anticipar y mitigar eventos que podrían generar interrupciones en el servicio eléctrico, asegurando la continuidad operativa del sistema.

Desde el punto de vista de la infraestructura tecnológica, el uso de herramientas de procesamiento distribuido en la nube como un Data Lakehouse permite el manejo eficiente de grandes volúmenes de datos, asegurando

escalabilidad y desempeño en la ejecución del modelo. Asimismo, la integración con Power BI proporciona una interfaz de visualización dinámica que permite a los responsables de la planificación interpretar la información de manera clara y ágil.

En cuanto a los beneficios estratégicos, esta herramienta contribuye directamente a la generación de un inventario forestal, que permitirá mejorar la trazabilidad de las podas y evaluar la efectividad de las intervenciones realizadas, lo cual busca reducir la necesidad de inspecciones en terreno apuntándole a la reducción de costos operativos, optimizando la asignación de recursos y minimizando gastos en visitas innecesarias. Además, se alinea con los estándares regulatorios establecidos, garantizando el cumplimiento de distancias de seguridad para la vegetación en la red de distribución.

Como trabajo futuro se plantea evaluar y optimizar la precisión de la tasa de crecimiento de las especies arbóreas, ajustándola a las regiones donde EPM opera el servicio de energía eléctrica.

En definitiva, la implementación del Modelo Predictivo de Gestión de Vegetación supone una solución innovadora, escalable y adaptable a distintos entornos eléctricos. Su capacidad de análisis y predicción basada en datos reales y su integración con herramientas tecnológicas avanzadas permiten optimizar la planificación y ejecución del mantenimiento forestal, garantizando la seguridad de la red eléctrica, la continuidad del servicio y la eficiencia en la gestión operativa. Con este modelo, se sientan las bases para una gestión forestal inteligente, que podrá evolucionar con la incorporación de nuevas tecnologías y el enriquecimiento continuo de los datos disponibles.

Notas al final

¹Para conocer más información, revisar los documentos Occupational Safety and Health Administration. (2023). Tree Care Operations Rulemaking. <https://rebrand.ly/di774vf>

Electronic Code of Federal Regulations. (2025). 29 CFR 1910.269 Electric power generation, transmission, and distribution. <https://rebrand.ly/rgt781a>

Referencias

- Boston Consulting Group. (2021). Diagnóstico y visión de despliegue de Redes Inteligentes en EPM.
- Electric Power Research Institute. (2021). IVM Zone Management Quick Guide. Energy Delivery and Customer Solutions. <https://www.epri.com/research/products/000000003002023193>
- Electrical Safety Authority. (s.f). Homeowner Landscaping & Tree Pruning. ESASAFE. Guidelines for Vegetation Management Around Powerlines. <https://esasafe.com/safety/powerline-safety/landscaping-and-tree-pruning/>
- Ernest & Young. (2022). Calidad del servicio: Táctica.
- International Business Machines Corporation. (17 de agosto de 2021). Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/saas?topic=dm-crisp-help-overview>
- Jackson Energy Authority. (s.f). Tree Pruning and Trimming. <https://www.jaxenergy.com/learning-center-articles/tree-pruning-trimming>.
- Pacific Gas and Electric Company. (s.f). Vegetation management and power line safety. <https://www.pge.com/en/outages-and-safety/safety/vegetation-management.html>
- Schröer, C., Kruse, F., & Gómez, J. (2021). Systematic literature review on applying CRISP-DM process model. *Procedia computer science*, 181, 526-534. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921002416?via%3Dihub>

Cómo citar este artículo:

Luna, R; Berrío, L; Arango, D; Zapata, W. (2026). Modelo predictivo para la gestión de vegetación en redes de distribución eléctrica. *Revista EPM*, (26), 116-132.



Taller Industrial 4.0: Evolución tecnológica, formación de talento y confiabilidad para la generación de energía

Industrial Workshop 4.0: Technological Evolution, Talent Development, and Reliability for Power Generation

**Juan Andrés
Giraldo Restrepo**

Área Ingeniería y Aseguramiento
Operación, Generación Energía, EPM

juan.andres.giraldo@epm.com.co

**Karen Ximena
Castrillón Pamplona**

Área Ingeniería y Aseguramiento
Operación Generación Energía, EPM

karen.ximena.castrillon@epm.com.co

Resumen

La transformación del Taller Industrial 4.0 se presenta como una estrategia para fortalecer la autonomía tecnológica, la confiabilidad operativa y la sostenibilidad de los activos de generación. Frente a la dependencia de proveedores externos y los riesgos asociados, el taller impulsa una modernización basada en manufactura avanzada, ingeniería inversa, proyección térmica y ensayos no destructivos. La evolución del taller hacia un modelo alineado con la Industria 4.0 integra capacidades como mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado), corte por electroerosión, identificación de materiales por rayos X,

escaneo 3D, soldadura robotizada y control de calidad mediante ensayos no destructivos y metrológicos. Casos técnicos evidencian la capacidad interna para intervenir partes críticas con trazabilidad y mejora continua. Los indicadores muestran un aumento en órdenes y horas ejecutadas, reflejando mayor confianza organizacional para garantizar el cumplimiento del PIM (Plan Integrado de Mantenimiento). También se destaca el aporte formativo del taller y su proyección como eje estratégico de resiliencia, competitividad y reducción en costos para EPM.

Palabras clave:

Confiabilidad operacional, Mantenimiento industrial, Generación de energía, Industria 4.0, Manufactura avanzada, Ingeniería inversa, Eficiencia, Sostenibilidad.

Keywords:

Operational Reliability, Industrial Maintenance, Power Generation, Industry 4.0, Advanced Manufacturing, Reverse Engineering, Efficiency, Sustainability.

Introducción

Cuando pensamos en la generación de energía, el suministro de agua o la distribución de gas, solemos asociar estos servicios con el resultado final que llega a los hogares y a la industria. Sin embargo, detrás de esa continuidad operativa existe una infraestructura compleja y altamente especializada, compuesta por activos críticos que demandan intervenciones técnicas rigurosas para garantizar su disponibilidad, confiabilidad y eficiencia a lo largo de su ciclo de vida.

El sostenimiento de estos activos no depende únicamente de la tecnología instalada en campo, sino también de la capacidad interna para diagnosticar, reparar, optimizar y, en muchos casos, rediseñar componentes estratégicos. Por esta razón, en EPM se fortalece el Taller Industrial 4.0 como un equipo especializado que respalda los negocios de servicios públicos domiciliarios

mediante la aplicación de conocimiento técnico, experiencia acumulada y tecnologías avanzadas, orientadas a la reparación y fabricación de componentes críticos.

Más que un soporte operativo, el taller se proyecta como un impulsor de autonomía tecnológica dentro de la organización, integrando procesos de manufactura avanzada, ingeniería inversa y mejora continua, bajo los principios de la Industria 4.0. La incorporación de capacidades como mecanizado CNC de gran formato, soldadura robotizada, aspersión térmica, tratamientos térmicos controlados y el escaneo 3D para modelamiento digital permite intervenir activos estratégicos con mayor precisión, trazabilidad y control técnico, lo que contribuye a la confiabilidad de los sistemas, particularmente cuando se trata de partes capitales cuyo desempeño impacta directamente la continuidad del negocio.

1. Flujo de trabajo del Taller Industrial

El Taller Industrial 4.0 tiene como misión reparar y fabricar piezas metalmecánicas y componentes esenciales para el funcionamiento de los equipos industriales de los distintos negocios de EPM, con un enfoque principal en las centrales de generación de energía.

Cuando una central o negocio identifica el daño de una pieza, lo reporta mediante el correo electrónico Taller.Industrial@epm.com.co o a través de una solicitud de servicio en el

software EAM (Enterprise Asset Management) Maximo. A partir de esta notificación, el Taller Industrial evalúa si cuenta con los equipos, herramientas y capacidades técnicas necesarias para resolver el requerimiento y, con base en ello, confirma o rechaza la ejecución del trabajo, como se muestra en la figura 1.

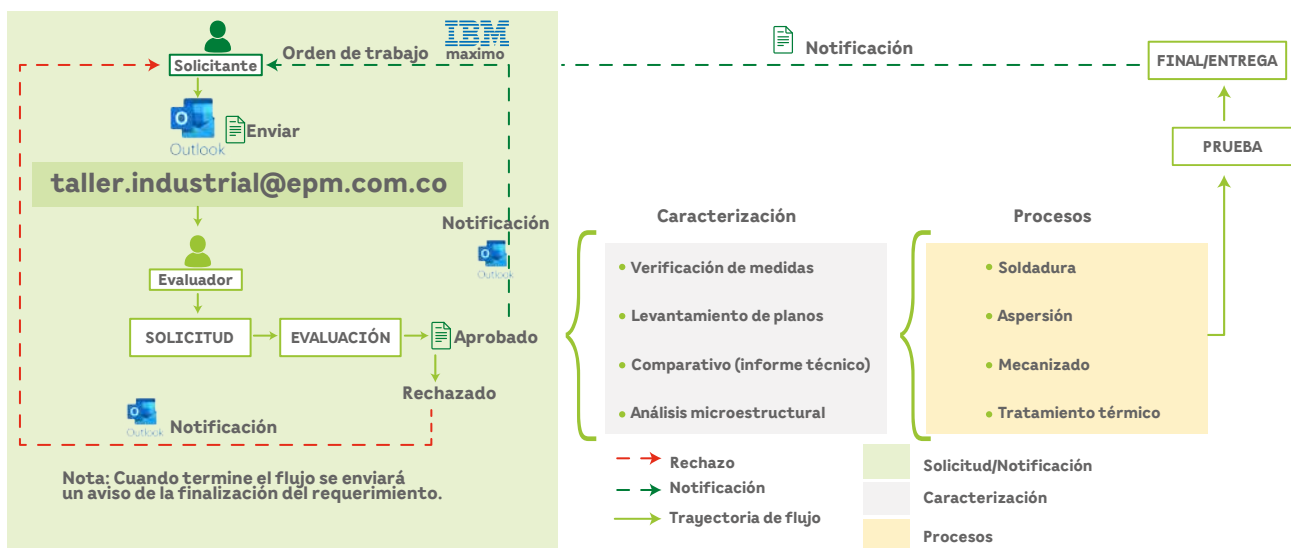


Figura 1. Flujo de trabajo del Taller Industrial 4.0.

2. Participación de los autores en el Taller Industrial

En este mismo marco, el Taller Industrial 4.0 se consolida como un espacio de aprendizaje aplicado y de fortalecimiento de capacidades técnicas. En este proceso participan los autores de este ensayo, Juan Andrés Giraldo, practicante de ingeniería mecánica, y Karen Ximena Castrillón, practicante de ingeniería industrial, quienes contribuyen a la integración y mejoramiento de los procesos del taller, aportando una visión complementaria desde sus respectivas disciplinas.

Juan Andrés apoya la coordinación de los mantenimientos de los equipos, el desarrollo de instructivos técnicos para la puesta en operación de nuevas máquinas, así como el diseño y la formulación de soluciones en

los procesos de manufactura y reparación. Además, participa en la integración de modelos de machine learning para el mantenimiento predictivo de las unidades de generación. Por su parte, Karen Ximena contribuye a la estandarización de procesos, al registro y análisis de tiempos y costos de producción, y al fortalecimiento de la gestión operativa, promoviendo mayor trazabilidad y control en las actividades del taller.

Esta articulación interdisciplinaria permite avanzar hacia una operación más estructurada, eficiente y alineada con la visión 4.0, integrando el rigor técnico con la optimización de procesos y la gestión productiva.

3. Modernización del Taller Industrial 4.0.

Durante varios años, el Taller Industrial logró resolver desafíos técnicos de alta complejidad gracias a la experiencia de su personal y su capacidad interna de adaptación. Sin embargo, el paso del tiempo, el deterioro natural de las máquinas y herramientas, la reducción paulatina del personal y la ausencia de una política integral de fortalecimiento tecnológico provocaron un debilitamiento progresivo de su capacidad operativa. De esta manera, se incrementó el envío de reparaciones de los distintos negocios a talleres externos, lo cual disminuyó la participación del taller dentro de la organización.

En este contexto, se evidenció una brecha cada vez mayor entre las capacidades instaladas y las exigencias técnicas actuales del negocio de generación. La dependencia de fabricantes y proveedores externos para la reparación de componentes críticos no solo generaba mayores costos y tiempos de respuesta prolongados, sino también limitaciones en la transferencia de conocimiento y en la trazabilidad técnica de los procesos. En un entorno en el que la confiabilidad y la disponibilidad de los activos son esenciales para la sostenibilidad del negocio, esta situación representa un riesgo estratégico.

Frente a ello, surgió la necesidad de un proceso de transformación orientado a recuperar y potenciar las capacidades internas del taller, alineándolas con los estándares tecnológicos contemporáneos. Más que una modernización física, el propósito es redefinir el rol del taller dentro de la Gerencia Generación Energía, consolidándolo como un centro especializado en la reparación de partes capitales, equipado con infraestructura adecuada, tecnología de alto desempeño y procesos fundamentados en la eficiencia, el control y la mejora continua.

Alrededor del año 2022, cuando pertenecía a la Dependencia de Transportes, se elaboró un caso de negocio con el fin de evidenciar las necesidades existentes y la baja participación del taller en las reparaciones de los negocios, especialmente en las centrales de generación. Este caso de negocio siguió evolucionando hasta 2026 y recibió una respuesta positiva de la junta directiva. Como parte del avance de dicha iniciativa, en enero del año 2026 comenzaron las obras civiles de mejoramiento de la infraestructura locativa del taller, con una inversión estimada de \$14.523 millones, según el caso de negocio formulado en 2022.

La incorporación de tecnología avanzada ha sido un elemento clave en la modernización del Taller Industrial. Las inversiones realizadas han permitido aumentar la confiabilidad de los procesos, ampliar la capacidad operativa y fortalecer el portafolio de servicios de reparación. La implementación de equipos tecnológicos innovadores facilita que las organizaciones se anticipen a las necesidades de los clientes, mejoren su relación con ellos y ofrezcan soluciones alineadas con sus expectativas, incrementando su satisfacción y lealtad. (Duarte et al., 2024).

Herramientas como el escáner 3D para modelamiento digital, la identificación de materiales mediante fluorescencia de rayos X *XRF*, el corte de alta precisión por electroerosión de hilo, la proyección térmica, el mecanizado CNC y la soldadura robotizada conforman un entorno tecnológico que posibilita un control técnico. Esta articulación de capacidades permite intervenir piezas desgastadas o fracturadas, no solo recuperando su geometría original, sino también optimizando su desempeño cuando las condiciones de servicio lo requieren.

4. Participación de practicantes y grupo de investigación Universidad Nacional De Colombia

Es importante resaltar que, además de Juan Andrés y Karen Ximena, el Taller Industrial cuenta con la participación de nueve aprendices adicionales. Aunque podría parecer un número elevado, esta presencia responde a una necesidad real, ya que, a pesar de las mejoras en infraestructura y de la inversión en equipos, el taller aún enfrenta déficit de mano de obra operativa y altamente calificada.

Derivado de esta misma situación, el taller ha encontrado un apoyo importante en la academia, a través de diferentes universidades,

principalmente de la Universidad Nacional de Colombia, con la que se mantiene un proyecto de investigación enfocado en crear protocolos para la reparación de partes capitales, actualmente en su cuarta fase. Esta articulación ha permitido fortalecer la transferencia de conocimiento y evitar sobrecargas de trabajo, asegurando que las reparaciones se realicen con buenas prácticas y de manera segura.

5. Casos prácticos

Los siguientes casos prácticos dan ejemplo de las aplicaciones y el alcance que tiene la capacidad técnica del taller:

5.1. Biela de la PTAR San Fernando

Ingresa al taller con una falla catastrófica asociada a fatiga mecánica y/o acumulación de esfuerzos (ver figura 2). Ante la magnitud del daño, el proceso inició con la digitalización completa del componente mediante escaneo 3D (ver figura 3), generando un modelo virtual que permitió analizar deformaciones, reconstruir superficies críticas y definir criterios de rediseño estructural.



Figura 2. Estado de ingreso biela.

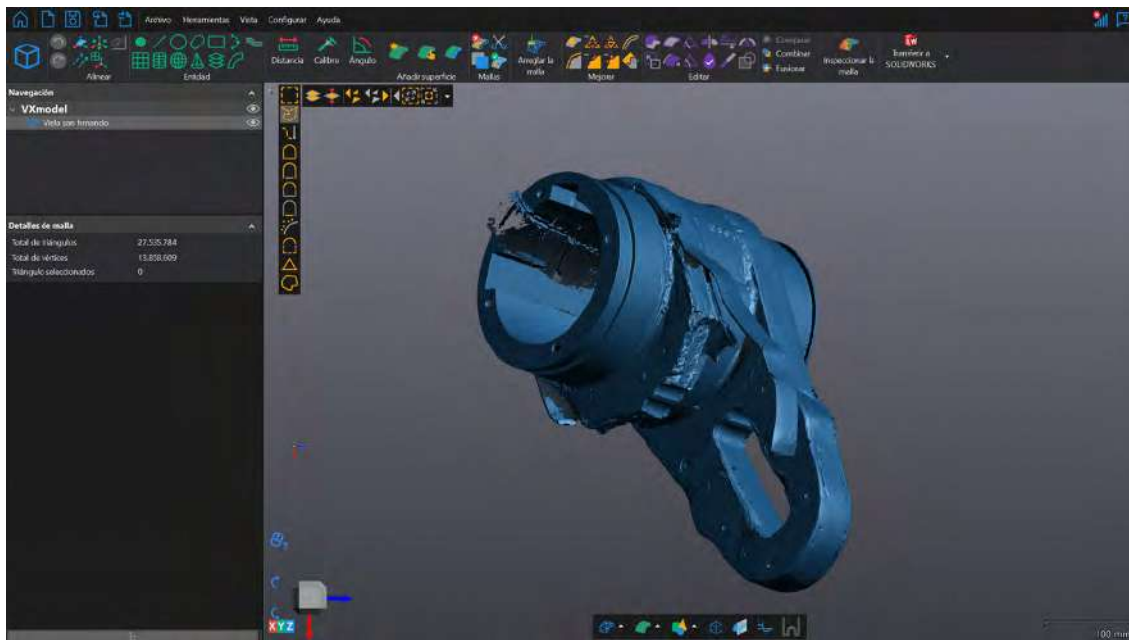


Figura 3. Escaneo 3D.

A partir del gemelo digital, se identificaron tolerancias, espesores y zonas de concentración de esfuerzos, sentando las bases para una reconstrucción técnica sustentada en datos.

El proceso continuó con la identificación del material original mediante análisis de fluorescencia de rayos X (figura 4), garantizando que la materia prima seleccionada para la reconstrucción cumpliera con las propiedades requeridas. Posteriormente, se procede a realizar su corte mediante el equipo electroerosión por hilo (figura 5), el cual permite optimizar el uso del material y evitar desperdicios. Esta etapa resulta fundamental en reparaciones de partes capitales, donde la compatibilidad metalúrgica impacta directamente la vida útil del componente.

La capacidad de caracterización interna reduce la incertidumbre técnica y fortalece la autonomía del taller frente a especificaciones no documentadas o piezas sin planos originales.



Figura 4. Identificación del material.¹



Figura 5. Equipo electroerosión por hilo.²

Posteriormente, el mecanizado en fresadora CNC (figura 6) permitió alcanzar las dimensiones finales y tolerancias requeridas del material cortado.



Figura 6. Equipo fresadora CNC.³

La reconstrucción estructural se realizó mediante soldadura controlada de los diferentes perfiles, integrando los segmentos hasta recuperar completamente la funcionalidad del componente (ver figura 7). Este proceso

combinó análisis digital, selección de material, manufactura de precisión y ensamblaje estructural, evidenciando una integración real de tecnologías bajo el enfoque 4.0.



Figura 7. Reconstrucción final biela.

Más allá del resultado físico, la reparación interna permitió documentar cada etapa del proceso, asegurando trazabilidad técnica, registro de parámetros y consolidación de conocimiento organizacional.

5.2. Cojinetes de empuje de la Central Hidroeléctrica La Tasajera.

En este caso, el proceso inició con el mecanizado para remover la capa de Babbitt deteriorada, según se muestra en la figura 8.

Posteriormente, mediante el equipo de Arc Spray (figura 9) se aplicó un nuevo recubrimiento de Babbitt, restableciendo las condiciones funcionales del cojinete.



Figura 8. Cojinete.

5.3. Otras Tecnologías

Además del equipo de Arc Spray, el taller cuenta con tecnologías de proyección térmica como APS (Atmospheric Plasma Spray) y HVOF (High Velocity Oxy-Fuel), que permiten aplicar recubrimientos sobre componentes sometidos a distintas formas de desgaste, según las condiciones de operación. Estas tecnologías son especialmente efectivas frente a fenómenos como cavitación, abrasión y degradación por esfuerzos térmicos, permitiendo prolongar la vida útil de las piezas intervenidas (Arboleda, 2014). Recubrimientos aplicados con materiales como el carburo de tungsteno, entre otros, mejoran significativamente la resistencia al desgaste y el desempeño funcional de los componentes mecánicos en sus respectivas aplicaciones (Sandoval et al., 2021).

Para garantizar la adecuada adherencia del recubrimiento, se realiza previamente la preparación superficial mediante un proceso de arenado sandblasting (figura 10), el cual genera la rugosidad necesaria para asegurar la adherencia y el comportamiento óptimo entre recubrimiento y sustrato. (Cubingecol, 2024).



Figura 9. Equipo ARC Spray.⁴



Figura 10. Proceso sandblasting o arenado.

Para verificar la calidad de los recubrimientos aplicados, el taller emplea equipos de ensayos no destructivos y de caracterización superficial. Una vez realizada la proyección térmica con la ayuda el brazo robot (ver figura 11), los recubrimientos se evalúan en términos de espesor y rugosidad mediante instrumentos de medición adecuados, asegurando el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas para cada aplicación. Adicionalmente, cuando la geometría y el espesor lo permiten, la integridad y adherencia del recubrimiento pueden evaluarse mediante

técnicas de ultrasonido (ver figura 12), lo que permite identificar posibles discontinuidades o zonas con falta de adherencia sin comprometer el componente.

Este encadenamiento de procesos, que integra el mecanizado previo, la preparación superficial, la aplicación de recubrimientos y la verificación mediante inspección técnica, evidencia una capacidad integral para la recuperación controlada de superficies críticas, garantizando trazabilidad y validación técnica dentro de la organización.



Figura 11. Equipo aspersión térmica.



Figura 12. Equipo ultrasonido.

Algunos de los equipos mencionados en los procesos hacen parte de la inversión destinada al equipamiento del taller. En la figura 13 se presentan sus respectivos costos de inversión. Sin embargo, algunos equipos, pertenecientes al grupo de Ingeniería y no directamente al Taller

Industrial, se utilizan en préstamo para mejorar la confiabilidad de los procesos. Es importante resaltar que el grupo de Ingeniería también hace parte de la misma dependencia, lo que facilita la disponibilidad y el uso compartido de estos recursos.

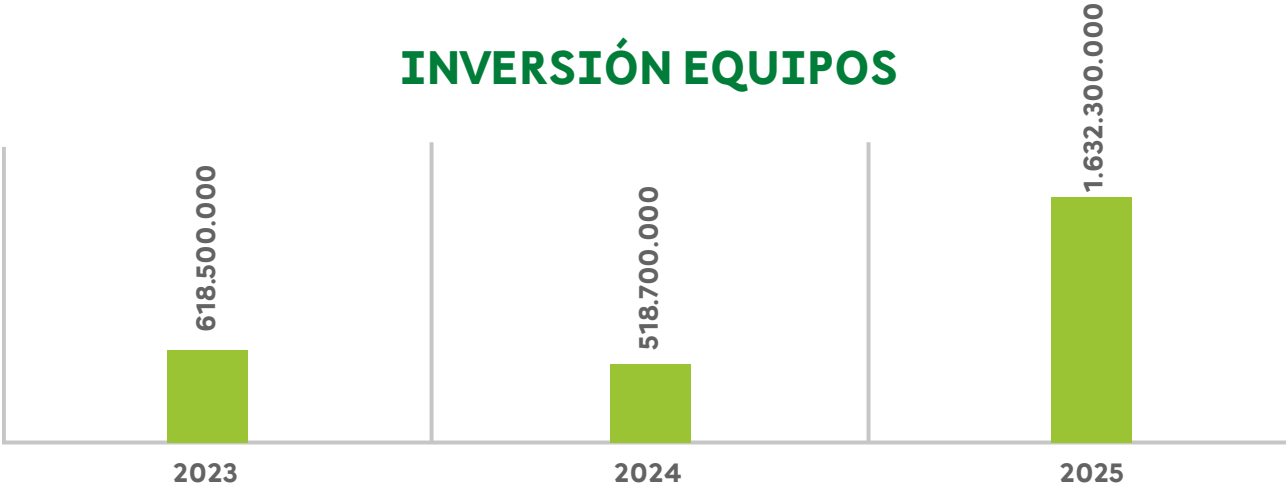


Figura 13. Gráfico de inversión de equipos en el Taller Industrial.

6. Comportamiento de las OT

Además de los casos técnicos previamente expuestos, el análisis de la cantidad de Órdenes de Trabajo (OT) registradas en los últimos periodos evidencia el crecimiento sostenido del Taller Industrial 4.0, tanto en capacidad técnica como en posicionamiento y reconocimiento dentro de la organización. Este incremento refleja una mayor confianza por parte de las áreas usuarias en la competencia interna para la intervención de componentes críticos.

Es importante recordar que cada reparación inicia con una solicitud de servicio registrada en el software EAM Máximo; una vez se confirma

que se tiene la capacidad para ejecutar la intervención, la solicitud continúa su flujo y se convierte en una Orden de Trabajo (OT), lo que formaliza y habilita el proceso de reparación.

El incremento en órdenes de trabajo (OT) es especialmente notable en el año 2025, donde se logró un aumento del 61 % en comparación con los años 2023 y 2024, según se muestra en la figura 14. Este incremento se refleja en el paso de 4 OT en 2023 a 40 OT en 2024 y 69 OT en 2025.

ÓRDENES DE TRABAJO

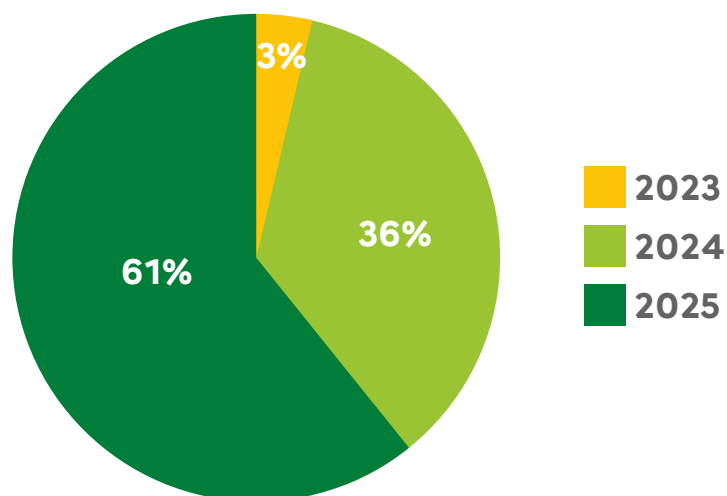


Figura 14. Gráfico del % de ordenes de trabajo.

Dicho comportamiento evidencia un fortalecimiento progresivo de la operación, así como una mayor demanda y ejecución de actividades registradas mediante OT. De manera directa, este incremento también ha generado un impacto significativo en la mano de obra empleada, ya que las horas registradas en las OT pasaron de aproximadamente 3.000 horas en 2024 a 9.000 horas en 2025.

Los tiempos de reparación representan un componente crítico y de alto impacto para la operación. El Taller Industrial posee una ventaja significativa frente a los contratistas externos, especialmente en lo relacionado con los tiempos y la agilidad de respuesta. Esto

se debe a que los procesos de contratación externa suelen ser extensos, tanto por los plazos requeridos como por la cantidad de documentos, requisitos y validaciones exigidas por el mercado y la normativa de EPM para la contratación. Estas condiciones hacen que los tiempos de respuesta sean considerablemente más largos.

En este contexto, el Taller Industrial contribuye a reducir estos tiempos de manera sustancial, lo que a su vez genera un impacto positivo en los diferentes negocios de EPM, al permitir intervenciones más rápidas, eficientes y confiables.

7. Participación en el PIM

Uno de los aspectos más sensibles en las centrales generadoras es el cumplimiento del Plan Integrado de Mantenimiento (PIM). En este plan se programan mantenimientos sobre los distintos componentes de las unidades de generación, los cuales deben ejecutarse dentro de periodos muy específicos. Sin embargo, en la práctica, cumplir con los tiempos previstos puede resultar complejo. Aunque la gestión de contratación externa se realiza de manera anticipada para atender las necesidades programadas, el mercado no siempre responde con la rapidez que requieren las centrales.

Un caso típico ocurre cuando, durante un mantenimiento ya en curso, se identifica una pieza no contemplada en la planificación inicial. Esto representa un riesgo operativo inmediato, ya que no es posible esperar los aproximadamente tres meses que puede tardar la confirmación y ejecución de un contrato externo.

En estas situaciones críticas, el Taller Industrial 4.0 se convierte en un aliado fundamental, gracias a su capacidad de respuesta rápida, que le permite: realizar reparaciones urgentes, atender contingencias no previstas en el PIM, evitar retrasos significativos en la puesta en servicio de los equipos, reducir la dependencia de proveedores externos y minimizar impactos operativos y financieros en las centrales.

Esta capacidad de respuesta inmediata permite al Taller Industrial contribuir de manera directa a la continuidad operacional, al

cumplimiento de los planes de mantenimiento y al fortalecimiento de la confiabilidad de los activos de generación.

No obstante, es importante aclarar que el objetivo no es que las centrales acudan al Taller Industrial únicamente en situaciones de emergencia o a última hora. Por el contrario, se busca que el taller sea el contacto directo y permanente para todas las reparaciones necesarias.

Lo ideal es que, desde el PIM y las reuniones de Parada de Planta, las centrales comuniquen con anticipación, definan cronogramas claros de intervención y programen las reparaciones dentro de ventanas de tiempo adecuadas, de modo que el Taller Industrial pueda planificar, ejecutar y entregar los trabajos con oportunidad, garantizando así la satisfacción de las necesidades de la Gerencia Generación Energía de manera efectiva y sostenible.



Conclusiones

Mirando hacia adelante, el Taller Industrial 4.0 representa para EPM un eje estratégico de resiliencia operativa y ventaja competitiva. Su maduración traerá consigo la capacidad de planear y ejecutar mantenimientos con mayor precisión, integrando ingeniería inversa, trazabilidad digital y manufactura avanzada para reducir tiempos de indisponibilidad y riesgos en partes capitales. En los próximos años, esto implica: fortalecer la confiabilidad de los activos estratégicos, reducir la dependencia de terceros en la intervención de partes capitales.

Este avance deberá ir acompañado de una gestión del talento que consolide perfiles técnicos híbridos en *mecánica, datos y automatización*, así como de una gobernanza

de datos que conecte el taller con el PIM, los sistemas EAM (Enterprise Asset Management) y la analítica predictiva, para soportar decisiones en tiempo real. En el ámbito financiero, la inteligencia en reparaciones críticas permitirá disminuir costos recurrentes, contener la exposición a mercados externos y mejorar la relación costo-beneficio de la operación.

Finalmente, la articulación entre el Taller, el área de ingeniería, áreas operativas y grupos de investigación, sumado a estándares de calidad, seguridad y sostenibilidad, consolidará un modelo de servicio técnico oportuno, confiable y escalable, preparado para los retos de la transición energética y la continuidad del negocio.



Notas al final

¹Equipo fluorescencia de rayos X adquirido en el año 2022 por el grupo de ingeniería, con un valor de compra de \$160 millones. Por su geometría compleja y propiedades que dificultaban el mecanizado convencional, los perfiles fueron cortados mediante electroerosión por hilo EDM (Electrical Discharge Machining), garantizando precisión dimensional sin inducir esfuerzos térmicos adicionales.

²Electroerosionadora adquirido en el año 2025, compra por un valor de \$210 millones.

³Fresadora CNC adquirida en el año 2023, compra por un valor de \$290 millones.

⁴Arc Spray adquirido en el año 2025, compra por un valor de \$190 millones.

Referencias

- Arboleda González, J. D. (2014). *Estudio de nuevas barreras térmicas cerámicas obtenidas mediante la técnica de proyección térmica por plasma atmosférico (APS)* [Trabajo de maestría, Universitat Politècnica de València]. RuiNet. Repositorio Institucional UPV. <https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/98fb158d-2bb9-4bc9-80fd-b1a038531b3a/content>
- Cubingecol. (2024, julio 31). Qué es el sandblasting. Descubre sus beneficios. Cubingecol. <https://cubingecol.com.co/que-es-el-sandblasting/>
- Duarte Villamayor, X. S., Miranda Mendoza, N. L., Martínez Pastoriza, J. R., y Kwan Chung, C. K. (2024). Importancia de la innovación desde una perspectiva empresarial. *Revista de Ciencias Empresariales, Tributarias, Comerciales y Administrativas*, 3(2), 54-61. <https://www.educaciontributaria.com.py/revista/index.php/rcetca/article/view/55/98>
- Sandoval García, J. R., Moreno Téllez, C. M., y Acuña Rodríguez, S. M. (2021). Resistencia al desgaste para recubrimientos de carburo de tungsteno depositados sobre sustratos de acero rápido por medio de rociado térmico. *Prospectiva*, 20(1). 1-9 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496282723005>

Cómo citar este artículo:

Giraldo Restrepo, J; Castrillón Pamplona, K. (2026). Taller Industrial 4.0: Evolución tecnológica, formación de talento y confiabilidad para la generación de energía. *Revista EPM*, (26), 133-147.



Modelo de base fenomenológica del proceso de regasificación de Gas Natural

Phenomenological model of the natural gas regasification process

**Luis Miguel
Olaya Orrego**

Área Operación y Calidad Gas,
Gerencia Gas, EPM

luis.olaya@contratista.epm.co

**Andrés
Gómez Ospina**

Área Operación y Calidad Gas,
Gerencia Gas, EPM

andres.gomez.ospina@epm.com.co

**Marco Tulio
Rodríguez Torres**

Área Operación y Calidad Gas,
Gerencia Gas, EPM

marco.rodriguez@epm.com.co

Resumen

En estaciones de regasificación de Gas Natural Licuado (GNL), la autonomía del tanque es determinante para programar despachos, mitigar el riesgo de desabastecimiento y controlar los costos logísticos. En la operación, aún es común estimar la autonomía mediante reglas volumétricas y consumos promedio; sin embargo, estas estimaciones pueden ajustarse mejor a la realidad a partir de modelos que tengan en cuenta el comportamiento dinámico de las variables del proceso. Este

artículo presenta un modelo de autonomía del tanque de almacenamiento basado en la fenomenología del proceso de regasificación. Con simulaciones sobre datos reales, el modelo reproduce el volumen del tanque con error promedio bajo (MAPE $\approx$ 0.64%), habilitando una estimación de autonomía más precisa y operativamente accionable para priorizar despachos regionales y mejorar la toma de decisiones.

Palabras clave:

Autonomía, Gas natural licuado, SCADA, Balance de materia, Planeación de despachos, Riesgo operativo, Transformación digital.

Keywords:

Autonomy, Liquefied Natural Gas, SCADA, Mass balance, Dispatch planning, Operational risk, Digital transformation.

Introducción

El gas natural licuado (GNL) como alternativa de suministro para zonas alejadas del sistema de distribución convencional, ha permitido que empresas de servicios como el Grupo EPM atiendan poblaciones que se encuentran por fuera del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el Departamento de Antioquia. De este modo, esas poblaciones se benefician del servicio mediante el transporte terrestre de módulos de almacenamiento que se trasladan desde la estación de licuefacción hasta el centro de consumo.

Para realizar la carga de uno de estos módulos, el gas natural proveniente del campo de producción o del gasoducto de transporte se somete primero a un proceso de licuefacción para reducir su temperatura. Posteriormente, el gas licuado es conducido a un sistema de almacenamiento criogénico, que posteriormente es transportado por vía terrestre hasta el centro de consumo. En este punto, el producto se descarga en un módulo fijo de la estación, que se encuentra conectado a la infraestructura operativa donde se ajustan las condiciones de temperatura y presión del gas antes de su inyección en la red de distribución secundaria para su entrega al cliente final.

Las características de consumo de las poblaciones, las condiciones ambientales, las distancias y otros factores, hacen que

las operaciones requieran predecir con alta precisión la autonomía del sistema de almacenamiento. De este modo, se garantiza que los operadores encargados de la logística tengan un panorama claro del sistema y optimicen los tiempos de despacho de los vehículos. El objetivo de dicha optimización es calcular el tiempo máximo de envío del vehículo con el módulo desde la estación de licuefacción hasta la estación de regasificación, sin afectar la continuidad del servicio en la población y minimizando las pérdidas asociadas a ese gas residual. De este modo se optimiza la operación y se cumple con uno de los estándares de calidad en la prestación del servicio de gas natural por redes, definidos por el organismo regulador en Colombia (Resolución CREG No. 18 de 2003). Por tal motivo, en este trabajo se deduce con todo detalle y se valida un modelo que permite predecir el comportamiento del volumen del sistema de almacenamiento, de acuerdo con los perfiles de consumo dados y las condiciones medioambientales del lugar.

Cuando la autonomía se estima con un alto error, se materializan dos fallas operativas típicas: (1) sobreestimación que retrasa la solicitud y aumenta el riesgo de desabastecimiento, y (2) subestimación que genera solicitudes prematuras, sobrecostos y menor eficiencia en la operación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Implementar un modelo de autonomía de GNL en una plataforma tecnológica que, a partir de variables físicas y señales de campo, entregue una estimación operativamente confiable para priorización de despachos regionales y mitigación de riesgo.

1.2 Objetivos específicos

- Establecer el modelo de base fenomenológica del proceso de regasificación.

- Definir el conjunto de variables y parámetros (constantes y configurables) necesarios para operar el cálculo en producción.
- Validar el comportamiento del modelo con datos reales, cuantificando precisión y utilidad operativa.
- Describir el impacto operacional en 20 estaciones con tecnología GNL activa, orientado a planeación y despacho.

2. Metodología

2.1 Enfoque y premisas

Para un tanque criogénico con GNL, el inventario energético disponible para consumo se expresa con mayor fidelidad en condiciones estándar, no únicamente como volumen líquido. Por ello, el enfoque consiste en: (1) representar el tanque como un sistema bifásico, (2) traducir el volumen geométrico medido por SCADA a volumen estándar equivalente, y (3) convertir dicho inventario a tiempo (autonomía) al dividirlo por el perfil de consumo horario.

En operación, el objetivo no es resolver un modelo termodinámico completo de equilibrio líquido-vapor, sino asegurar una consistencia física mínima y la trazabilidad del cálculo con las variables disponibles y una parametrización controlada.

2.2 Desarrollo y justificación del balance de masa bifásico (comentado)

A continuación, se presenta la justificación matemática (comentada) a partir de la documentación del modelo (ecuaciones numeradas). Se parte de la conservación de masa en el tanque y de la relación entre masa, densidad y volumen.

$$(1) \frac{dM_{\text{GNL}}}{dt} = -\dot{m}_1$$

Comentario: la variación de masa de GNL en el tanque es igual al flujo másico neto que sale del sistema (signo negativo por consumo).

$$(2) \dot{m}_1 = \dot{m}_2 v$$

Comentario: se iguala el flujo de la corriente interna (salida del líquido) con el flujo que alimenta la fase gaseosa; esto representa la continuidad de flujo entre etapas.

$$(3) \quad \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Comentario: se asume continuidad del flujo hacia la corriente gaseosa que finalmente es la que abastece el consumo.

$$(4) \quad \frac{dM_{GNL}}{dt} = -\dot{m}_3 \Rightarrow \frac{d(\rho_{GNL}V_{GNL})}{dt} = -\rho_{GN} v_{GN}$$

Comentario: se reescribe la masa como $\rho \cdot V$. En el tanque el inventario está en fase líquida; en la corriente de salida, el gas está en fase gaseosa, por eso aparecen ρ_{GNL} y ρ_{GN} .

$$(5) \quad \frac{dV_{GNL}}{dt} = -\frac{1}{\rho_{GNL}} \cdot \frac{P_{GN} M}{z_{GN} R T_{GN}} \cdot v_{GN}$$

Comentario: al considerar ρ_{GNL} aproximadamente constante, se despeja la dinámica del volumen de GNL en función del caudal de gas y la ecuación de estado (con Z).

$$(6) \quad v_{GN} = \frac{P_b T_{GN} z_{GN}}{P_{GN} + P_{atm}} \cdot \frac{1}{T_b z_b} \cdot v_b$$

Comentario: se normaliza el caudal de gas a condiciones base (P_b, T_b, z_b) para trabajar en unidades estándar comparables en operación.

$$(7) \quad V_{GNL} = \frac{V_T}{F_{exp}} \Leftrightarrow V_T = F_{exp} V_{GNL}$$

Comentario: se relaciona el volumen líquido con el volumen geométrico medido por SCADA mediante el factor de expansión F_{exp} (~600).

$$(8) \quad V_{std} = \frac{\rho_{GNL} V_{GNL}}{\rho_{std}} \cdot \frac{z_{op}}{z_b}$$

Comentario: al reemplazar (6) y (7) se obtiene una forma final donde el volumen geométrico evoluciona según consumo normalizado y parámetros físicos, habilitando simulación discreta con Δt . Finalmente, la autonomía operativa se calcula como:

$$\text{Autonomía} = \frac{V_{std}}{Q_h}$$

2.3 Variables operativas y parametrización

La implementación del modelo establece un conjunto de constantes parametrizables del sistema y variables configurables para cada estación o módulo de almacenamiento, garantizando coherencia entre la formulación matemática y su operación dentro del entorno de gestión. Esta configuración permite adaptar el cálculo de autonomía a las condiciones particulares de cada instalación, manteniendo al mismo tiempo una base metodológica homogénea. Asimismo, el modelo se integra al módulo visual bajo una lógica de experiencia de usuario consistente con otros procesos operativos similares, lo que facilita su adopción y uso por parte del equipo encargado de la gestión regional.

Parámetro	Valor	Unidad	Gestión en modelo
Presión base, Pb	1.01008	bar	Constante del sistema (parametrizable)
Temperatura base, Tb	15.56	°C	Constante del sistema (parametrizable)
Factor de compresibilidad base, Zb	0.998	–	Constante del sistema (parametrizable)
Delta de tiempo, Δt	0.041667	h	Paso de simulación (parametrizable)
Factor de ajuste	102.5	–	Calibración operativa (parametrizable)
Densidad GN gaseoso	0.825	kg/m ³	Constante del sistema (parametrizable)
Densidad GN líquido (GNL)	373	kg/m ³	Constante del sistema (parametrizable)

Tabla 1. Constantes del sistema para cálculo de autonomía GNL parametrizables desde Maestros. Recuperado de: RN-GAS-0460.

Variable/Parámetro	Unidad	Fuente / Configuración
Temperatura del gas en el módulo	°C	Configurable por estación/módulo
Factor de compresibilidad del gas del módulo	–	Configurable por estación/módulo
Presión atmosférica (por altura)	bar	Configurable por estación/módulo
Presión de regulación	bar	Configurable por estación/módulo
Volumen del perfil de consumo por hora, Q_h	m ³ /h	Configurable (perfil horario)

Tabla 2. Variables operativas y parámetros configurables por estación/ módulo (SCADA + configuración). Recuperado de: RN-GAS-0460.

2.4 Cálculo de autonomía operativa

Operativamente, el cálculo se expresa en dos pasos: (1) estimar el inventario estándar disponible y (2) convertirlo en tiempo con el consumo horario. En una forma aplicable:

Inventario estándar (aproximado):

$$V_{std} = \frac{\rho_{GNL} V_{GNL}}{\rho_{std}} \cdot \frac{Z_{op}}{Z_b}$$

$$\text{Autonomía (horas): } \text{Autonomía} = \frac{V_{std}}{Q_h}$$

Donde V_I se obtiene del Nivel_Tanque_GNL (SCADA) y Q_h proviene del perfil horario configurado. El uso de Δt permite simular la evolución del inventario y producir un horizonte de autonomía consistente con los cambios de consumo.

3. Resultados

3.1 Validación con simulación y datos reales

La validación del modelo se realizó utilizando datos históricos reales provenientes de una estación representativa del sistema regional con tecnología de almacenamiento de GNL. Se analizaron N registros consecutivos correspondientes al periodo seleccionado, en los cuales se comparó el volumen geométrico medido por el sistema SCADA, $V_{real,i}$, con el volumen estimado por el modelo, $V_{modelo,i}$.

Durante el intervalo evaluado, el volumen medido presentó variaciones dentro del rango operativo típico de la instalación, oscilando entre $6,08 \text{ m}^3$ y $8,32 \text{ m}^3$, lo que refleja condiciones reales de operación y el comportamiento dinámico del almacenamiento.

Para cada instante i , se definió el error como:

$$e_i = V_{modelo,i} - V_{real,i}$$

Las métricas de precisión utilizadas fueron:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |e_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2}$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{e_i}{V_{real,i}} \right|$$

Los resultados obtenidos fueron:

- $MAE = 0.0454 \text{ m}^3$
- $RMSE = 0.0599 \text{ m}^3$
- $MAPE = 0.64 \%$

Un MAPE inferior al 1% en el caso analizado indica que el modelo reproduce adecuadamente el comportamiento del volumen del tanque, lo cual constituye una condición necesaria para convertir dicho inventario en autonomía con menor nivel de incertidumbre.

A continuación, se presenta la comparación entre el modelo y los datos reales:

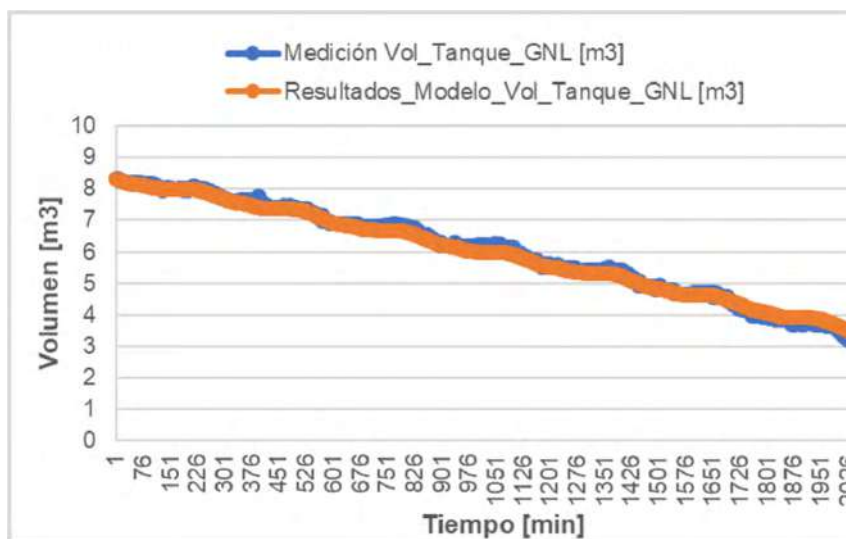


Figura 1. Simulación del modelo vs datos reales.

3.2 Discusión operativa: ¿por qué esta precisión importa?

En el contexto de la operación regional de abastecimiento con GNL, las variaciones aparentemente pequeñas en el volumen geométrico del tanque adquieren una dimensión operativa significativa cuando se traducen en un horizonte temporal de autonomía. Dado que el volumen almacenado constituye la base para estimar el inventario energético disponible, incluso diferencias del orden de centésimas o décimas de metro cúbico pueden representar varias horas —e incluso días— de autonomía adicional o déficit de autonomía, dependiendo del perfil de consumo de cada instalación.

Esta sensibilidad se explica porque la autonomía no es una variable volumétrica, sino temporal. Al convertirse el volumen líquido en volumen estándar equivalente y dividirse por el consumo horario promedio o proyectado, cualquier desviación en la estimación del inventario se amplifica proporcionalmente al régimen de demanda. En instalaciones con consumos elevados, una subestimación leve puede traducirse en una reducción sustancial del horizonte operativo; mientras que, en instalaciones de menor consumo, el impacto puede manifestarse en una extensión innecesaria del margen de seguridad aplicado en la planeación.

Cuando la autonomía se consolida como criterio principal para la priorización de despachos regionales, la precisión en su cálculo deja de ser un aspecto meramente estadístico y pasa a convertirse en un factor determinante de eficiencia logística. Una mejora en la exactitud del modelo permite reducir el margen de seguridad empírico tradicionalmente aplicado para compensar incertidumbre, lo cual tiene dos implicaciones operativas directas:

- Disminución de la probabilidad de despachos urgentes, generalmente asociados a sobreestimaciones de autonomía que conducen a decisiones tardías.
- Reducción de sobreabastecimientos preventivos, derivados de subestimaciones que inducen solicitudes anticipadas y generan inmovilización innecesaria de inventario.

En consecuencia, incrementar la precisión del modelo no solo mejora la confiabilidad del indicador, sino que también optimiza el uso de la capacidad logística, estabiliza la programación de rutas y fortalece la toma de decisiones sustentadas en datos físicos trazables y reproducibles. La autonomía deja de ser una estimación conservadora basada en reglas empíricas y se consolida como un parámetro cuantificado con respaldo matemático, alineado con una gestión predictiva del abastecimiento regional.

En el caso de estudio analizado, el modelo presentó un MAE de 0,0454 m³ y un MAPE de 0,64 %, calculados a partir de 1020 registros reales. Aunque estos valores pueden parecer pequeños desde una perspectiva estrictamente volumétrica, su traducción operativa resulta significativa al convertirse en horizonte temporal de autonomía, impactando directamente la priorización regional.

Un aspecto adicional que refuerza la confiabilidad del cálculo es la arquitectura de actualización periódica implementada en el sistema de gestión. El proceso ejecuta recálculos con frecuencia horaria, incorporando en cada iteración las señales SCADA más recientes, incluyendo niveles de almacenamiento, presiones en los módulos y consumo acumulado de gas.

Esta actualización periódica adquiere especial relevancia en escenarios anómalos, como fugas o escapes significativos de gas. En caso de presentarse una desviación súbita entre el comportamiento esperado del inventario y las variables medidas en campo —por ejemplo, una caída de presión no asociada al consumo registrado— el modelo recalcula la autonomía con base en el nuevo estado del sistema. Como consecuencia, el horizonte temporal estimado se ajusta en el siguiente ciclo de actualización, reflejando la reducción real del inventario disponible.

Desde el punto de vista matemático, la autonomía depende directamente del volumen estimado en cada instante:

$$\text{Autonomía}(t) = \frac{V_{std}(t)}{Q_h(t)}$$

Si ocurre una fuga que reduzca el volumen líquido almacenado o altere las condiciones operativas del sistema, el término $V_{std}(t)$ disminuirá en el siguiente ciclo de cálculo. Dado que el modelo se alimenta de mediciones actuales provenientes del sistema de supervisión y no depende exclusivamente de promedios históricos, el impacto de dicha desviación se incorpora de forma inmediata en la estimación de autonomía.

Esto implica que el error no se acumula indefinidamente. Por el contrario, el sistema

actúa como un mecanismo de corrección continua: con cada actualización horaria se recalcula el estado energético del tanque utilizando información operativa actualizada de nivel, presión y consumo. Este enfoque limita la propagación de desviaciones no previstas y reduce el riesgo de mantener estimaciones desalineadas frente a la condición física real del almacenamiento.

En escenarios de fuga significativa, la autonomía estimada se ajustará de forma consistente con la disminución efectiva del inventario disponible, lo que permite activar con mayor anticipación los mecanismos de priorización y programación de despacho. De esta manera, el modelo no solo cumple una función de planeación, sino que también se convierte en una herramienta de monitoreo dinámico del comportamiento del almacenamiento.

En términos operativos, la combinación entre un balance físico fundamentado y una actualización periódica basada en datos medidos introduce un componente de resiliencia en la gestión regional. Ante eventos como fugas o escapes, el impacto sobre la autonomía no queda diluido dentro del error estadístico promedio, sino que se refleja en el siguiente ciclo de cálculo, disminuyendo la probabilidad de decisiones basadas en información desactualizada y fortaleciendo la capacidad de respuesta ante contingencias.

4. Impacto en la operación regional

El impacto esperado de la implementación del modelo de autonomía basado en balance de masa bifásico e integración SCADA se concentra en tres dimensiones estructurales de la gestión operativa regional: (1) priorización objetiva de estaciones, (2) programación de despachos con menor incertidumbre y (3) trazabilidad técnica en los criterios de decisión.

En primer lugar, la priorización de estaciones deja de basarse únicamente en niveles volumétricos o reglas empíricas y pasa a estar sustentada en un indicador de autonomía físicamente consistente y comparable entre instalaciones. Al expresar el inventario en términos energéticos equivalentes y dividirlo por el consumo horario real, la autonomía se convierte en una variable temporal homogénea que permite ordenar estaciones bajo un mismo criterio matemático, independientemente de sus capacidades geométricas o patrones históricos de consumo. Esto fortalece la objetividad del proceso y reduce la dependencia de juicios subjetivos.

En segundo lugar, la programación de despachos se realiza con un horizonte de operación cuantificado y validado estadísticamente. La reducción de incertidumbre asociada al inventario —demostrada mediante métricas de validación inferiores al 1 % de error porcentual— permite disminuir el margen de seguridad empírico tradicionalmente aplicado para mitigar riesgos de desabastecimiento. Como consecuencia, la planeación logística se vuelve más eficiente, se optimiza el uso de flota y se minimiza la probabilidad de eventos reactivos, como despachos urgentes o reprogramaciones de último momento.

En tercer lugar, el modelo aporta trazabilidad al criterio de decisión. Cada estimación de autonomía puede ser reconstruida a partir de variables físicas explícitas (densidades,

factor de compresibilidad, volumen medido) y señales SCADA registradas. Esto significa que la decisión de despacho no se fundamenta en percepciones o aproximaciones, sino en una cadena de cálculo reproducible y auditable. La gobernanza de parámetros —como presión base, temperatura base y factores de compresibilidad— garantiza coherencia metodológica entre estaciones y estabilidad en el tiempo.

Para las estaciones incluidas dentro del alcance regional del sistema de abastecimiento, la estimación de autonomía basada en variables físicas gobernadas e integración con señales SCADA representa una transformación estructural en la gestión operativa. Al fundamentar el cálculo en un balance de masa consistente y en datos medidos en tiempo real, el indicador deja de ser una aproximación empírica asociada únicamente a niveles volumétricos y se consolida como una variable temporal energética comparable entre instalaciones.

Esta aproximación habilita transformaciones operativas concretas:

- Cuantificación del inventario en términos energéticos equivalentes.

El volumen líquido almacenado se convierte a volumen estándar equivalente mediante parámetros físicos explícitos (densidad, factores de compresibilidad y condiciones base), permitiendo estimar de forma rigurosa la cantidad efectiva de gas utilizable disponible. Esta conversión elimina la ambigüedad asociada a la interpretación directa de niveles geométricos y aporta coherencia dimensional al análisis operativo.

- **Anticipación del punto crítico de agotamiento operativo.**

Al expresarse la disponibilidad en términos de horizonte temporal, la autonomía permite proyectar el momento en que el inventario

alcanzará umbrales críticos bajo el régimen de consumo observado o proyectado. Esto transforma el proceso de decisión desde una supervisión reactiva hacia una planeación preventiva basada en evidencia cuantitativa.

- **Estandarización metodológica entre instalaciones.**

La aplicación de una base matemática común y parámetros gobernados garantiza homogeneidad en el cálculo entre estaciones, independientemente de sus diferencias geométricas, perfiles de consumo o configuración de almacenamiento. Esta estandarización mejora la comparabilidad regional y reduce variaciones metodológicas que puedan distorsionar la priorización logística.

- **Integración coherente con los sistemas de monitoreo y despacho.**

El indicador de autonomía se incorpora dentro del entorno de visualización y control bajo una lógica operativa consistente con otros procesos energéticos, lo que facilita su adopción y asegura continuidad en la experiencia de análisis por parte del equipo operativo. La integración directa con señales

SCADA permite que el valor mostrado refleje el estado físico actualizado del sistema.

- **Reducción estructural de decisiones reactivas.**

La gestión deja de centrarse en la revisión puntual de niveles volumétricos aislados y evoluciona hacia un enfoque basado en horizonte temporal de disponibilidad energética. Esto disminuye la probabilidad de despachos urgentes no planificados y reduce la necesidad de sobreabastecimientos preventivos derivados de incertidumbre en la estimación.

En conjunto, la implementación del modelo no constituye únicamente una mejora en el cálculo matemático del inventario, sino una evolución del paradigma operativo regional: del monitoreo estático de niveles hacia una gestión predictiva del abastecimiento sustentada en principios físicos, datos medidos y consistencia estadística. Esta transición fortalece la eficiencia logística, mejora la confiabilidad del suministro y aporta trazabilidad técnica al proceso de toma de decisiones, alineándolo con estándares avanzados de gestión energética.

5. Enfoque estratégico corporativo

Desde una perspectiva corporativa, el modelo de autonomía no debe interpretarse como un cálculo aislado de inventario, sino como un habilitador estructural para la gestión predictiva del abastecimiento regional. Su valor radica en transformar una variable operativa que tradicionalmente se estimaba mediante aproximaciones empíricas en un indicador cuantificado, físicamente consistente, trazable y comparable entre instalaciones. Esta transformación permite integrar el cálculo de autonomía dentro de esquemas avanzados de planeación y optimización logística.

Al estimar la autonomía sobre una base física validada —fundamentada en balance de masa, parámetros gobernados y señales operativas medidas en tiempo real— el sistema consolida una capa de información confiable que trasciende la simple visualización de niveles y se convierte en insumo estructural para la toma de decisiones estratégicas. La estandarización metodológica del indicador garantiza que todas las instalaciones sean evaluadas bajo el mismo marco técnico, eliminando heterogeneidades que puedan afectar la priorización regional.

Esta homogeneidad permite la evolución hacia modelos de optimización de despacho formulados bajo restricciones técnicas y económicas, tales como:

- Priorización multiestación considerando horizontes temporales comparables y niveles relativos de criticidad.
- Restricciones logísticas asociadas a la capacidad de transporte, disponibilidad de flota y secuenciación de rutas.
- Ventanas de tiempo operativas, accesibilidad y limitaciones contractuales.
- Costos asociados a distancia recorrida, utilización de recursos y eficiencia en la asignación de activos.
- Evaluación dinámica de criticidad según demanda proyectada y variabilidad operativa.

En este contexto, la autonomía deja de ser un indicador descriptivo para convertirse en una variable de entrada dentro de algoritmos de decisión capaces de evaluar múltiples escenarios bajo criterios simultáneos de eficiencia y mitigación de riesgo. Este enfoque permite transitar desde una planeación secuencial y predominantemente reactiva hacia un esquema optimizado, donde las decisiones se sustentan en análisis integrados de inventario energético, comportamiento de la demanda y restricciones logísticas.

Adicionalmente, la consistencia metodológica del modelo —basada en parámetros físicos explícitos y señales de supervisión operativa— fortalece la confiabilidad del sistema frente a procesos de auditoría interna y externa. Cada recomendación de despacho puede reconstruirse a partir de una cadena de cálculo reproducible y verificable, aportando transparencia, trazabilidad y robustez técnica al proceso decisional.

En términos corporativos, esta evolución representa un avance hacia la consolidación de un ecosistema digital integrado, en el cual la información operacional en tiempo real se articula con herramientas analíticas avanzadas para soportar decisiones de alto impacto. Así, el modelo de autonomía se posiciona como un componente fundamental en la construcción progresiva de una gestión predictiva del abastecimiento regional, alineada con principios de eficiencia operacional, optimización de recursos y reducción sistemática del riesgo de desabastecimiento.



Conclusiones

El modelo de autonomía de GNL, desarrollado a partir de un balance de masa bifásico e integrado con señales de supervisión operativa, constituye una mejora estructural en la forma de estimar y gestionar el inventario energético disponible en estaciones de almacenamiento y descompresión regionales. Al fundamentar el cálculo en principios físicos explícitos y parámetros gobernados, el modelo garantiza trazabilidad matemática, coherencia metodológica y reproducibilidad del indicador de autonomía, superando enfoques basados exclusivamente en niveles volumétricos o consumos históricos promedio.

La validación realizada sobre un conjunto de 1020 registros reales evidenció un comportamiento estable del modelo, con un MAE de 0,0454 m³, un RMSE de 0,0599 m³ y un MAPE promedio de aproximadamente 0,64 %. Estos resultados confirman que el volumen estimado reproduce con alta fidelidad el comportamiento observado por el sistema de supervisión, reduciendo significativamente la incertidumbre asociada a la conversión del inventario volumétrico en horizonte temporal de autonomía. La proximidad entre MAE y RMSE indica, además, ausencia de desviaciones extremas que puedan comprometer la estabilidad del modelo bajo condiciones operativas reales.

Desde el punto de vista operacional, esta mejora en la precisión se traduce en una priorización de despachos más objetiva y confiable. Al expresar el inventario en términos energéticos equivalentes y relacionarlo con el consumo horario real, la autonomía se consolida como un indicador temporal comparable entre instalaciones, permitiendo ordenar el riesgo de agotamiento bajo un criterio homogéneo y técnicamente gobernado. Esto reduce la necesidad de márgenes de seguridad

empíricos elevados y disminuye la probabilidad tanto de despachos urgentes como de sobreabastecimientos preventivos derivados de incertidumbre en la estimación.

En el conjunto de estaciones incluidas en el alcance regional, la implementación del modelo permite una transición desde la supervisión reactiva de niveles hacia una gestión basada en horizonte temporal de autonomía. Esta transformación fortalece la planeación logística, mejora la utilización de recursos disponibles y consolida la autonomía como variable estratégica para la toma de decisiones en el abastecimiento.

En términos corporativos, el modelo no solo optimiza el cálculo del inventario energético, sino que sienta las bases para futuros esquemas de optimización de despacho formulados bajo restricciones técnicas y económicas. Al proporcionar un indicador robusto, consistente y validado estadísticamente, el sistema avanza hacia una gestión predictiva del abastecimiento regional, alineada con principios de eficiencia operacional, mitigación sistemática del riesgo y consolidación de decisiones soportadas en datos físicos trazables y metodológicamente consistentes.

Referencias

- RN-GAS-0460. (2025). Mejora proceso despacho solicitudes Gas Fase 3 – App Web. Empresas Públicas de Medellín.
- Resolución CREG No. 18 de 2003 [Comisión de Regulación de Energía y Gas]. Por la cual se somete a consideración de los agentes, usuarios y terceros interesados las bases conceptuales sobre las cuales se establecerá la fórmula tarifaria de energía eléctrica aplicable a los usuarios regulados del Archipiélago

Cómo citar este artículo:

Olaya Orrego, L; Gómez Ospina, A; Rodríguez Torres M. (2026). Modelo de base fenomenológica del proceso de regasificación de Gas Natural . *Revista EPM*, (26), 148-161.

Convocatoria para publicar en la Revista EPM

El Comité Editorial de la Revista EPM invita a la postulación de artículos, para las próximas ediciones, en temas relacionados con las líneas temáticas del Grupo EPM y otros contenidos enmarcados en la filosofía de la Revista, orientada a la divulgación y apropiación social del conocimiento.

La estructura de los artículos debe tener en cuenta los lineamientos que se presentan en la Guía para Autores Revista EPM.pdf.

Recepción de artículos y contacto Revista EPM

dep01980568@epm.com.co
gestiondeinformacion@fundacionepm.org.co



estamos ahí.