

## Optimización de ingresos del operador de red EDEQ SA ESP garantizando la mejora continua del indicador SAIDI considerando un algoritmo evolutivo

Andres Fernando Rios Giraldo  
[andres.rios@edeq.com.co](mailto:andres.rios@edeq.com.co)  
Carrera 13 No. 14-17 Armenia (Q)

Jhonatan Esteban Tabares Arias  
[jhonatan.tabares@edeq.com.co](mailto:jhonatan.tabares@edeq.com.co)  
Carrera 13 No. 14-17 Armenia (Q)

### Resumen del trabajo

La Resolución CREG 015 de 2018 exige a los Operadores de Red (OR) mejorar anualmente los indicadores SAIDI y SAIFI en un 8 %, desafiando la gestión de ingresos, calidad del servicio y las inversiones. Este artículo presenta un modelo matemático, que optimiza las inversiones, maximizando los ingresos y cumpliendo con las metas de calidad considerando criterios de salud, criticidad de activos y taxonomía nivel 6.

Este artículo presenta un modelo matemático basado en la técnica de Búsqueda Local Iterada (ILS), diseñado para optimizar las inversiones en redes de distribución eléctrica. Aplicado en EDEQ durante 2019-2024, el modelo permitió incrementar los ingresos en un 11 %, mejorar el indicador SAIDI en un 10 % y el EBITDA en un 15 %. Estas mejoras validan la capacidad del modelo para equilibrar la sostenibilidad financiera y operativa, cumpliendo con las exigencias regulatorias y garantizando una distribución estratégica de las inversiones.

### Introducción y revisión bibliográfica

El suministro de energía eléctrica enfrenta desafíos crecientes debido a las demandas regulatorias y operativas en un contexto donde la sostenibilidad y la calidad del servicio son prioritarias. En Colombia, la Resolución CREG 015 de 2018 establece un marco que exige mejoras continuas en los indicadores SAIDI (Duración Promedio de Interrupciones) y SAIFI (Frecuencia Promedio de Interrupciones), promoviendo inversiones estratégicas para garantizar la confiabilidad del sistema y la sostenibilidad financiera de los

Operadores de Red [1]. Este marco se enmarca en una tendencia global hacia la modernización de los sistemas eléctricos mediante la adopción de tecnologías avanzadas y la implementación de estrategias de optimización [2].

La transición hacia la Industria 4.0 ha transformado significativamente la gestión de activos eléctricos. Tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de big data y los algoritmos de optimización han permitido avances cruciales en la toma de decisiones estratégicas, la priorización de inversiones y la mejora del rendimiento de las redes eléctricas [3]. A nivel global, el uso de herramientas avanzadas ha demostrado ser esencial para abordar problemas complejos en sistemas eléctricos, desde la reducción de pérdidas técnicas hasta la expansión óptima de redes con generación distribuida [4].

La planificación óptima de inversiones ha sido un tema recurrente en la literatura técnica. Toksari wn [5] propuso un modelo híbrido de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) y Búsqueda Local Iterada (ILS), logrando una estimación precisa del consumo eléctrico doméstico y mejorando la eficiencia de las decisiones de inversión. Por su parte, Sbalzarini en [6] destaca la importancia de los enfoques multiobjetivo en la optimización de redes, subrayando su capacidad para equilibrar costos, confiabilidad y sostenibilidad.

En el contexto colombiano, Ramírez y Cano [7] analizaron los desafíos asociados con la calidad del suministro eléctrico, enfatizando la necesidad de integrar tecnologías avanzadas con metodologías robustas de planificación. Andrade

en [8] identifico oportunidades de mejora en la percepción de los usuarios del servicio eléctrico, proponiendo la implementación de redes inteligentes y soluciones tecnológicas que reduzcan interrupciones y mejoren la confiabilidad.

Adicionalmente, Biard y Nour [3] subrayan el papel central de la Industria 4.0 en la optimización de la gestión de activos, destacando cómo el análisis de big data y la simulación avanzada pueden maximizar el rendimiento y minimizar los riesgos operativos. La integración de estas tecnologías permite el desarrollo de redes eléctricas más resilientes, contribuyendo a la sostenibilidad del sistema eléctrico global y local [4].

Este artículo propone un modelo matemático de optimización basado en ILS, diseñado para maximizar los ingresos de los Operadores de Red y minimizar los indicadores de calidad (SAIDI y SAIFI) durante un horizonte de 10 años. El modelo integra herramientas avanzadas de simulación, algoritmos evolutivos y metodologías de gestión de activos como la criticidad, la salud y la taxonomía nivel 6, respondiendo a la pregunta clave: ¿dónde, cuándo y cuánto invertir para garantizar la sostenibilidad financiera y operativa?

### Metodología propuesta

El modelo desarrollado tiene como objetivo principal maximizar el Valor Presente Neto (VPN), definido como la diferencia entre los ingresos y los egresos del Operador de Red (OR) durante un horizonte de planeación de 10 años, considerando las inversiones necesarias por cada zona para mejorar la calidad del servicio eléctrico y garantizar la sostenibilidad financiera del operador. Utiliza la técnica de optimización Búsqueda Local Iterada (ILS) y está sujeto a un conjunto de restricciones económicas, regulatorias y operativas.

Una zona está compuesta por los activos lineales que se encuentran entre dos elementos de corte y maniobra como se muestra en la Figura 1.

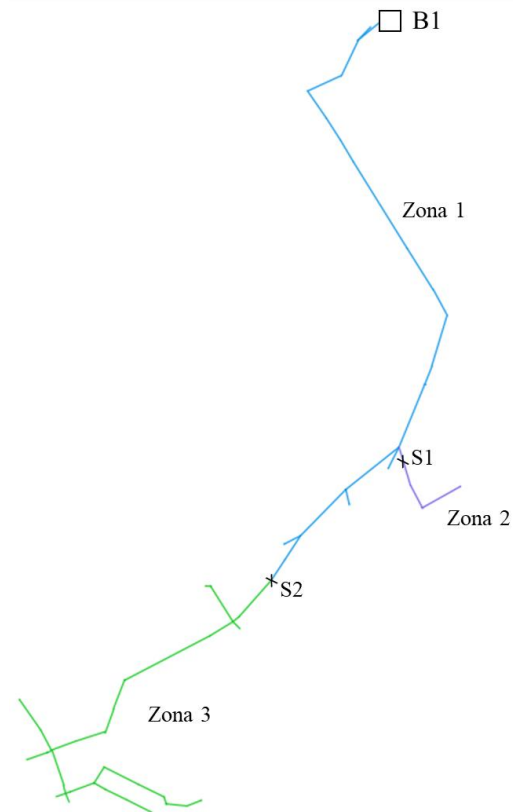


Figura 1. Representación de una zona del SDL

Para el desarrollo de la metodología general, se seleccionan “zonas críticas” en EDEQ correspondientes a aquellas que a lo largo de los años de desarrollo de los consolidados han sido críticas por indicadores de calidad y que tienen un salud pobre y muy pobre considerando la metodología de criticidad y salud de activos lineales con taxonomía nivel 6.

### Función Objetivo

La función objetivo se define como:

$$\max \sum_{t=1}^T \frac{ING_t - EGR_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Donde:

$ING_t$ : Ingresos totales en el año ttt, incluyendo ingresos por la Base Reguladora de Activos (BRA).

$EGR_t$ : Egresos totales en el año ttt, que incluyen costos operativos, de mantenimiento y compensaciones.

$T$ : Horizonte de planeación (10 años).

$r$ : Tasa de retorno del operador.

### Restricciones

- *Restricción de presupuesto mínimo*

$$ING_{t,z} - EGR_{t,z} - INV_{t,z} \geq 0 \quad \forall z, t \quad (2)$$

- *Restricción de ingresos totales*

$$ING_t = Y * \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^{Nz} E_{z,t} * \left(1 - \frac{SAIDI_{z,t}}{SAIDI_t}\right)^t * C_{u_t} * (1 + \alpha_{ing,i}^0)^t + X * \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^{Nz} E_{z,t} * \left(1 - \frac{SAIDIE_{z,t}}{SAIDI_t}\right)^t * C_{u_t} * (1 + \alpha_{ing,i}^1)^t + Ing_{BRA_t} \quad (3)$$

La restricción está compuesta por la adición de 3 términos. El primero, corresponde a los ingresos percibidos por la venta de energía antes de realizar inversiones en la zona, el segundo a los ingresos percibidos en la zona después de realizar inversión y el tercero los ingresos por la base reguladora de activos.

- *Restricciones sobre base reguladora de activos*

$$Ing_{BRA_t} = \sum_{z=1}^{Nz} BRA_{t,z} * WACC_t + RC_z$$

$$BRA_{t,z} = BRA_{t-1,z} + \frac{Inv_z}{InvMax_z} * InvMaxCREG_z - \frac{Inv_z}{InvMax_z} * BRA_{t-1,z} - RC_z \quad (5)$$

Donde:

$BRA_{t,z}$ : Base regulatoria de activos de la zona z en el periodo t.

$RC_z$ : Recuperación de capital de la zona z.

$Inv_z$ : Variable de Inversión en la zona z.

$InvMax_z$ : Inversión máxima en la zona z costos EDEQ.

$InvMaxCREG_z$ : Inversión máxima en la zona z costos CREG.

El ingreso por BRA, se calculó de acuerdo con el nivel de inversión que propone el modelo. Se pasan a precios CREG, en proporción a la inversión realizada, igualmente como BRAFO se saca la fracción equivalente a la que se invirtió.

- *Restricciones asociados a indicadores de calidad*

$$SAIDIE_{z,t} = SAIDI_{z,t} * \left(1 - \frac{Inv_z}{InvMax_z} * 0,7\right) \quad (6)$$

$$SAIDI_{z,t} = SAIDI_{t-1,z} * (1 + m_z) \quad (7)$$

$$SAIDI_t \leq 0,92 * SAIDI_{t-1} \quad (8)$$

Donde:

$m_z$ : Pendiente positiva del crecimiento del indicador SAIDI en la zona z, basado en históricos.

El SAIDI esperado depende del SAIDI antes de realizar la inversión de acuerdo al nivel (4)

que se eligió invertir, el indicador tiene una pendiente positiva  $m_z$  que fue establecida particularmente para cada zona de acuerdo a históricos, además, debe cumplir la restricción regulatoria de disminución del 8% anual, esta última restricción es blanda.

- Restricción de egresos

$$EGR_t = Y * \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^{Nz} (CO_{z,t} + CM_{z,t} + CA_{z,t} + CC_{z,t}) * (1 + \alpha_{egr,i}^0)^t + X * \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^{Nz} (CO_{z,t} + CM_{z,t} + CA_{z,t} + CC_{z,t}) * \frac{SAIDIE_{z,t}}{SAIDI_{z,t}} * (1 + \alpha_{egr,i}^1)^t \quad (9)$$

Donde:

$(1 + \alpha_{egr,i}^0)^t$ : Incremento de los egresos antes de realizar inversión.

$(1 + \alpha_{egr,i}^1)^t$ : Incremento de los egresos después de realizar inversión

$CO_{z,t}$ : Costo Operación en la zona z en el periodo t.

$CA_{z,t}$ : Costo Administración en la zona z en el periodo t.

$CM_{z,t}$ : Costo Mantenimiento en la zona z en el periodo t.

$CC_{z,t}$ : Costo Compensación en la zona z en el periodo t.

X: Variable binaria que estable si se realiza inversión en el año t.

Y: Variable binaria que es equivalente a (1-X).

La restricción está compuesta por la adición de 2 términos. El primero, corresponde a los ingresos por AOM y compensaciones antes de realizar inversiones en la zona, el segundo a los egresos percibidos en la zona después de realizar las inversiones que están afectados por la disminución del SAIDI gracias a éstas.

**Metodología de solución**

El modelo descrito anteriormente, se soluciona utilizando la técnica ILS, mediante una codificación matricial que contiene el año a invertir en la primer fila para cada zona y la segunda fila está compuesta por el nivel de inversión tal como se muestra en la Figura 2.

Z1	Z2	Z3	...	Zm-3	Zm-2	Zm
1	2	3	...	0	9	T
0,1	0,03	0,5	...	0	0,02	0,01

Figura 2. Representación de una zona del SDL

Las restricciones son modeladas como estrictas a excepción de las mostradas en las ecuaciones (2) y la (8), que se pueden romper, pero ocasionan una disminución en la función objetivo. Se utilizan estrategias de vecindario para intensificar, y de diversificación impactando la mejor incumbente con aleatorios.

El algoritmo realiza un proceso iterativo buscando dar cumplimiento la solución mas optima que permita maximizar el ingreso y cumplir con las metas definidas en calidad del servicio para un horizonte de 10 años, indicando cuanto, cuando y donde se debe invertir teniendo en cuenta una taxonomía nivel 6 del SDL de EDEQ.

**Resultados Del Estudio**

El modelo fue implementado en la EDEQ considerando tres escenarios de inversión. Los

resultados más destacados se muestran en las Figuras 3 a 15.

Caso 1 (sin restricción limite en las inversiones)

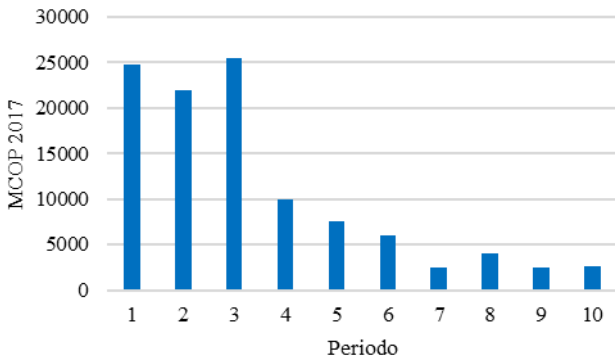


Figura 3. Presupuesto de inversión

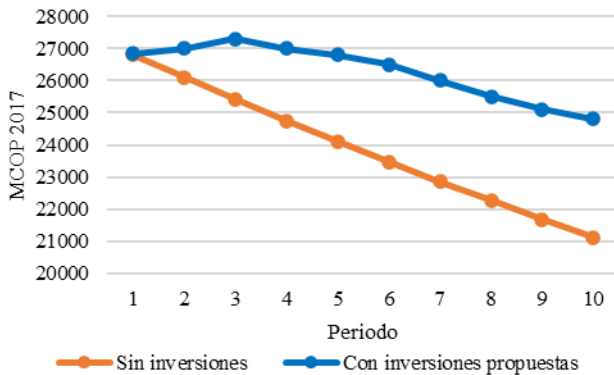


Figura 4. Ingresos por inversiones

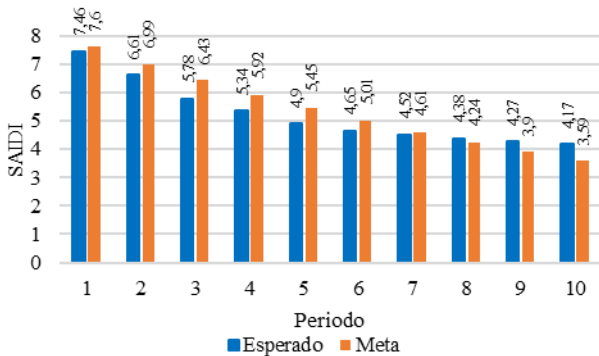


Figura 5. Evolución SAIDI

- Evaluación Resultados

- Inversiones grandes al inicio del periodo.
- Mejora de indicadores superior al 8%
- Ingresos disminuyendo en el mediano plazo.
- Realiza inversiones sin tener en cuenta la metodología de salud de activos.

Caso 2 (con restricción limite en las inversiones 15000 millones) Reposición NT2

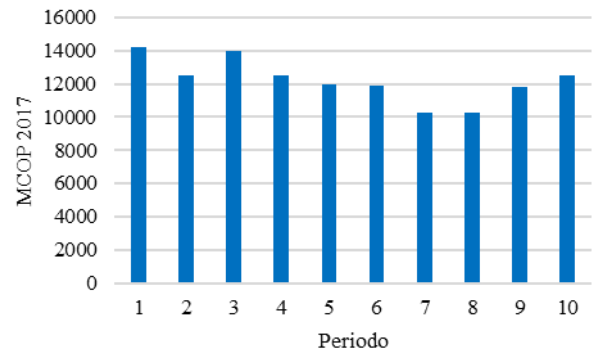


Figura 6. Presupuesto de inversión

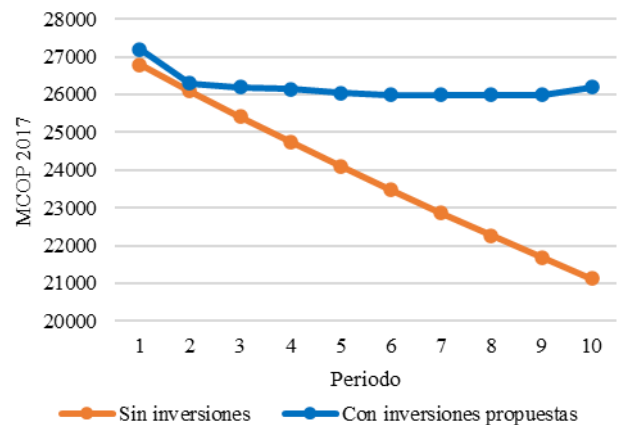


Figura 7. Ingresos por inversiones

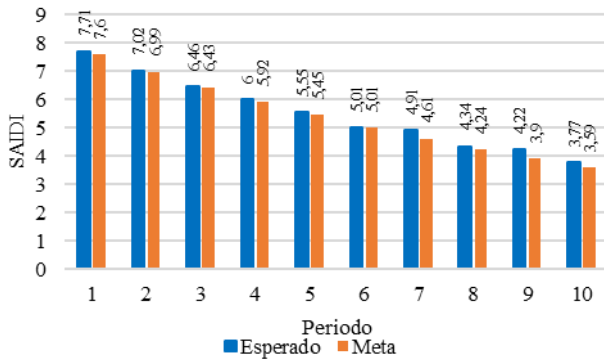


Figura 8. Evolución SAIDI

- Evaluación Resultados

- Inversiones acotadas, mejora la distribución para el periodo.
- Mejora de indicadores cercanos al 8%.
- Ingresos disminuyen y luego se estabilizan por debajo del valor inicial.
- Realiza inversiones sin tener en cuenta la metodología de salud de activos.

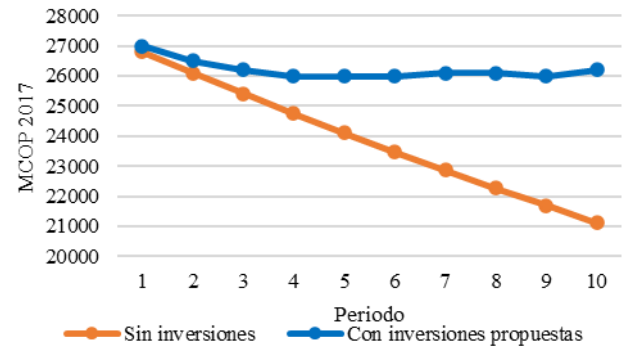


Figura 10. Ingresos por inversiones

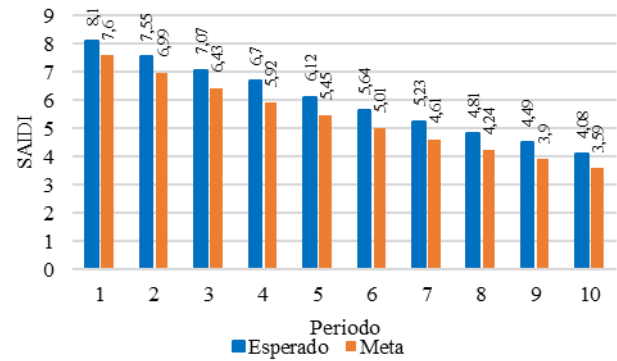


Figura 11. Evolución SAIDI

Caso 3 (con restricción limite en las inversiones y zonas tipo CRIN) Reposición NT2

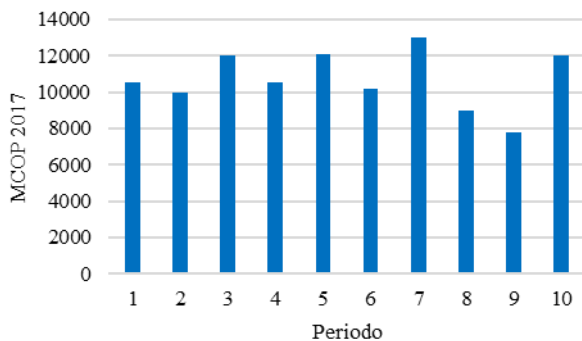


Figura 9. Presupuesto de inversión

- Evaluación Resultados

- Inversiones con distribución más uniforme.
- Mejora de indicadores cercanos al 8%.
- Se mantienen los ingresos por activos.
- Realiza inversiones teniendo en cuenta la metodología de salud de activos.

## Resultados de la aplicación de los resultados

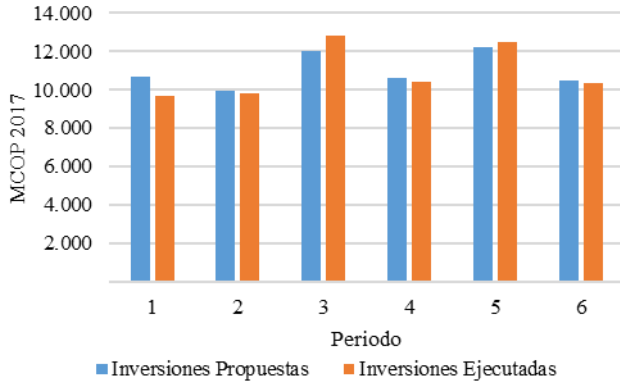


Figura 12. Presupuesto de inversión

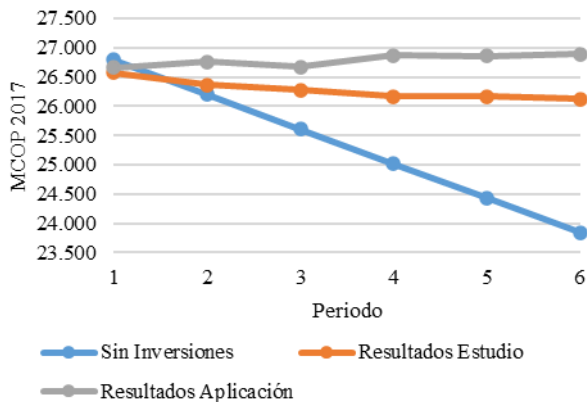


Figura 13. Ingresos por inversiones

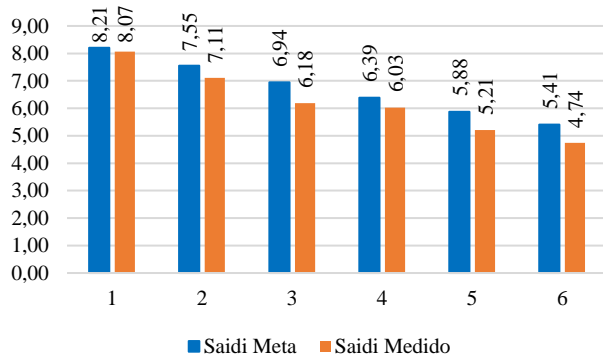


Figura 14. Evolución SAIDI

- Otros beneficios de la aplicación de los resultados

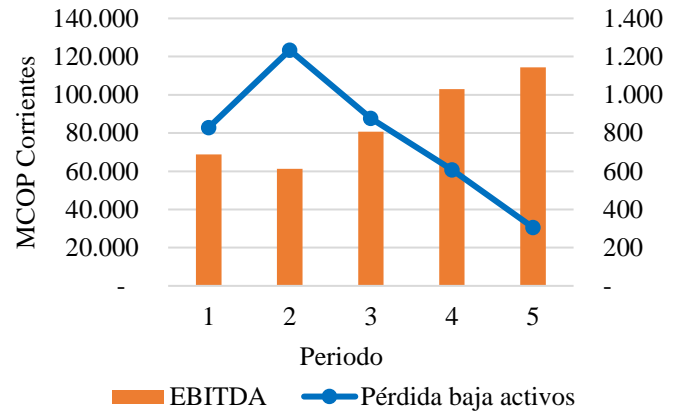


Figura 15. Evolución EBITDA – Pérdida en baja de activos

## Conclusiones

- Este estudio valida la relación directa entre las inversiones en redes de distribución y las mejoras en los indicadores de calidad, así como en el nivel de ingresos de los operadores. El modelo desarrollado, basado en la técnica ILS, demuestra ser una herramienta efectiva para la planificación estratégica de inversiones en un horizonte de 10 años.
- Las inversiones deben priorizar activos con salud pobre o muy pobre, evitando destruir valor en la base regulatoria. Asimismo, la integración de estrategias de mantenimiento complementarias es esencial para garantizar el cumplimiento de las metas regulatorias.
- La implementación del modelo en EDEQ permitió incrementar significativamente los ingresos y mejorar el EBITDA, destacando la importancia de enfoques basados en criticidad y salud de activos.

- Se sugiere explorar la integración de tecnologías avanzadas, como inteligencia artificial y big data, para mejorar la precisión de las decisiones de inversión y adaptarse a cambios en la regulación.

### **Bibliografía**

- [1]. Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). (2018). *Resolución CREG 015*.
  - [2]. Shi, L., & Zhang, H. (2016). Optimal distribution network expansion planning incorporating distributed generation. APPEEC 2016.
  - [3]. Biard, G., & Nour, G. A. (2021). Industry 4.0 Contribution to Asset Management in the Electrical Industry. *Sustainability*, 13(10369).
  - [4]. Rodríguez-Salazar, J. E., & Mercado Caruso, N. (2021). Soluciones para la mejora de la calidad del servicio eléctrico en Barranquilla. *BILO: Revista Científica*, 3(1), 25-37.
  - [5]. Toksari, M. D. (2016). A hybrid algorithm of ACO and ILS for estimating electricity domestic consumption: Case of Turkey.
  - [6]. Sbalzarini, I. F., et al. (2000). Multiobjective optimization using evolutionary algorithms. *Center for Turbulence Research Proceedings*.
  - [7]. Ramírez, S., & Cano, E. (2006). *Calidad del servicio de energía eléctrica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
  - [8]. Andrade, J. M., Ramírez, E., & Montaña, J. (2020). Calidad del servicio público domiciliario del suministro de energía eléctrica. *Revista Venezolana de Gerencia*, 25(4), 317-332.
-



## Hoja Hoja de Vida.

## e. Colombia

Andres Fernando Ríos Giraldo, (Armenia-1979)  
Ingeniero electricista (2001), Magister en Investigación de Operaciones y Estadística de la Universidad Tecnológica de Pereira, Magister en Administración Universidad Pontificia Bolivariana, Especialista en Administración Financiera y Especialista en Gerencia de Proyectos, jefe de área de gestión operativa, de la empresa de energía del Quindío (EDEQ), desde el año 2017.

Jhonatan Esteban Tabares Arias, (Pereira-1990)  
Ingeniero electricista (2016), Magister en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, profesional 1 del área de gestión operativa, encargado de la planeación de la infraestructura del SDL de la empresa de energía del Quindío (EDEQ), desde el año 2017.

1. Jhonatan Esteban Tabares Arias
2. Teléfono
  - a. -Residencia
  - b. - Oficina
  - c. 3163970536
3. Dirección del autor(es)
  - a. Calle 13 # 14-41
  - b. Cra 13 # 14-17
  - c. jhonatan.tabares@edeq.com.co
  - d. Armenia, Quindío
  - e. Colombia

1. Andres Fernando Ríos Giraldo
  2. Teléfono
    - a. -Residencia
    - b. - Oficina
    - c. 3206773843
  3. Dirección del autor(es)
    - a. Conjunto Cedro negro casa 12
    - b. Cra 13 # 14-17
    - c. andres.rios@edeq.com.co
    - d. Armenia, Quindío
-