

**Modelo de optimización para maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores
según CREG 015 de 2018**

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Industrial

Presentado por
Hugo Alexander Orozco Correo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD
Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería - ECBTI
Armenia
2022

**Modelo de optimización para maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores
según CREG 015 de 2018**

Presentado por

Hugo Alexander Orozco Correo

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Industrial

Director

Gabriel Jaime Rivera

Mag. Ingeniería Administrativa

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería - ECBTI

Armenia

2022

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Agradecimientos

A Dios y mi familia por brindar apoyo incondicional, por permitirme tener buena experiencia, motivación y lucha constante en la carrera.

A la empresa de Energía del Quindío en cabeza del gerente Jorge Iván Grisales, a mi jefe directo Felipe Murillo Arango y compañeros de trabajo por abrir la puerta de su empresa, por permitir compartir y explotar mi conocimiento y experiencia que he ido logrando a lo largo de estos 13 años, gracias por la disposición y apoyo continuo a la ejecución del proyecto.

A la Universidad quienes se esmeraron y dieron siempre lo mejor para dar una educación de calidad para todas las áreas (presencial y virtual) quienes día a día motivaron y ofrecieron todas las herramientas para lograr culminar mi carrera.

Al docente Gabriel Jaime Rivera quien me brindo desde el primero momento su conocimiento, apoyo y tiempo para el desarrollo de las actividades y dar cumplimiento con la fase final del proyecto de grado.

Y a mi futura esposa Erika Viviana Ovalle Montes que en compañía de mi hermosa hija Luciana Orozco Ovalle, estuvieron presentes en este proceso y fueron los cimientos para no flaquear en los momentos difíciles.

Resumen

En la Empresa de Energía del Quindío se desea maximizar los beneficios a partir de la remuneración que puede obtener un operador de red, para dar cumplimiento a los objetivos se requiere conocer todos los datos del operador de red.

La resolución CREG 015 de 2018 define que anualmente cada operador de red recibe ingresos por concepto de las inversiones realizadas sobre su infraestructura eléctrica (gas, 2018), la finalidad de este proyecto consiste en elaborar un modelo de optimización que permita maximizar los beneficios a partir de la remuneración que puede obtener un operador de red al realizar estratégicamente la reposición de los macro medidores; donde será indispensable tener acceso a datos como la vida útil, edad y características eléctricas de los macro medidores, remuneración de las unidades constructivas y costos de intervención. Para cumplir con el alcance se consultarán las bases del operador de red para llevarlos a un modelo matemático que permita determinar cuáles son las unidades constructivas que se deben intervenir para obtener un beneficio máximo.

Palabras clave: Energía, Regulación, Optimización, remuneración.

Abstract

In the Empresa de Energy del Quindío we want to maximize the benefits from the remuneration that a network operator can obtain, in order to fulfill the objectives it is necessary to know all the data of the network operator.

CREG resolution 015 of 2018 defines that annually each network operator receives income from the investments made on its electrical infrastructure (gas, 2018), the purpose of this project is to develop an optimization model that allows maximizing benefits from of the remuneration that a network operator can obtain by strategically carrying out the replacement of the macro meters; where it will be essential to have access to data such as the useful life, age and electrical characteristics of the macro meters, remuneration of the construction units and intervention costs. To comply with the scope, the bases of the network operator will be consulted to take them to a mathematical model that allows determining which are the construction units that must be intervened to obtain a maximum benefit.

Keywords: Energy, Regulation, Optimization, remuneration.

Lista de tablas

Tabla 1. Cantidad de material macro medidor monofásico.....	19
Tabla 2. Cantidad de material macro medidor trifásico.....	20
Tabla 3. Vida útil para las categorías de activos por nivel de tensión.....	24
Tabla 4. Valores reconocidos al operador de red.....	25
Tabla 5. Variación IPP de año 2018 a 2022.....	27
Tabla 6. Macro medidores monofásicos por capacidad.....	31
Tabla 7. Macro medidores trifásicos por capacidad.....	32
Tabla 8. Materiales y mano de obra Macro medidor monofásico.....	33
Tabla 9. Materiales y mano de obra Macro medidor trifásico.....	34
Tabla 10. Límite presupuesto material y mano de obra.....	46
Tabla 11. Límite de intervenciones.....	47

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de conexión macro medidor monofásico.....	18
Figura 2. Diagrama de conexión macro medidor trifásico.....	20
Figura 3. Ilustración grafica de un macro medidor.....	21
Figura 4. Base de datos.....	36
Figura 5. Diagrama de flujo modelo.....	43
Figura 6. Capacidad operativa VS beneficio.....	45
Figura 7. Flujo financiero.....	48

Tabla de Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	10
Problema de Investigación.....	12
Planteamiento del Problema.....	12
Justificación.....	14
Objetivos.....	15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
Marco Teórico.....	16
Sistemas de Distribución.....	16
Tipos de Macro medidores.....	18
Monofásico trifilar.....	18
Trifásico tetrafililar.....	19
Remuneración de Activos.....	21
Programación Lineal.....	28
Función objetivo.....	28
Las variables de decisión.....	28
Las restricciones.....	29
Metodología.....	30
Diseño del modelo de optimización.....	35
Resultados.....	44
Conclusiones.....	50
Recomendaciones.....	52
Referencias bibliográficas.....	53

Introducción

La energía está conectada por 4 fases; la generación, transmisión, distribución y comercialización final, lo cual permite integrar el sistema interconectado nacional (SIN), para el desarrollo económico y social del país (Tomás González Estrada, 2015) .Por lo anterior permite potenciar, proteger y lograr un aprovechamiento de los recursos y capacidades del territorio, transformando las oportunidades para lograr un desarrollo sostenible, logrado el bienestar social.

La energía eléctrica es fundamental para el desarrollo, crecimiento y calidad de vida, este proyecto de grado busca desarrollar un modelo matemático en la empresa de Energía del Quindío que ayude a maximizar los beneficios de inversión en los macro medidores.

En el año 2018 la comisión de regulación de energía y gas define la metodología para la comercialización de transmisión de energía, es por ello que a través del modelo matemático se optimizara el recurso buscando un balance de los costos de inversión y la remuneración, como la utilización de alternativas para la disminución de costos.

Iniciamos con todos los requerimientos legales aplicables y la información que suministra la empresa de Energía del Quindío, teniendo en cuenta materiales, mano de obra, métodos, procedimientos de trabajo, mediciones, conocimiento y habilidad del recurso humano.

Así mismo se identifica que los operadores de red del país se ven sometidos al cumplimiento de las resoluciones inmersas dentro del marco regulatorio, la cual tiene como finalidad que el servicio de energía eléctrica se preste al mayor número posible de personas, generando un menor costo para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas prestadoras del servicio.

La resolución CREG 015 de 2018 define que anualmente cada operador de red recibe ingresos por concepto de las inversiones realizadas sobre su infraestructura, siendo así, se pretende desarrollar un modelo de optimización para maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores.

Podemos definir que la implementación del modelo de optimización en el sistema de distribución EDEQ, pretende maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores según CREG 015 de 2018, esta resolución define que anualmente cada operador de red recibe ingresos por concepto de las inversiones realizadas sobre su infraestructura eléctrica.

Otra finalidad del proyecto consiste en elaborar un modelo de optimización que permita maximizar los beneficios a partir de la remuneración que puede obtener un operador de red al realizar estratégicamente la reposición de los macro medidores; donde será indispensable tener acceso a datos como la vida útil, edad y características eléctricas de los macro medidores, remuneración de las unidades constructivas y costos de intervención.

Para cumplir con el alcance se consultarán las bases del operador de red para llevarlos a un modelo matemático que permita determinar cuáles son las unidades constructivas que se deben intervenir para obtener un beneficio máximo.

Problema de Investigación

Planteamiento del Problema

El sistema de distribución eléctrica de la empresa de energía del Quindío EDEQ, cuenta con 8.254 macro medidores, de los cuales el 58% de ellos son de conexión trifásica y el 42% restante de conexión monofásica, adicionalmente 3.247 están ubicados en el casco urbano del departamento del Quindío y 5.007 en la zona rural de los diferentes municipios.

Estos macro medidores están ubicados de forma estratégica para cumplir con las necesidades técnicas del sistema de distribución local, cuyo objetivo es brindar balances de energía confiables y de esta forma contribuir con el control de las pérdidas no técnicas, este sistema de distribución cuenta con índice de confiabilidad de la macro medición del 95% y su gestión radica en el mantenimiento e inversión de estas unidades constructivas.

A inicios de 2005 se inicia la instalación de los macro medidores dentro del sistema de distribución EDEQ, con el fin de comenzar a tener balances confiables de energía la cual permite gestionar las pérdidas no técnicas; desde entonces estos elementos han tenido un desgaste debido a su operación o por situaciones extremas como condiciones ambientales o por intervenciones ajenas al operador de red. Por lo tanto, se debe implementar estrategias que ayuden al mantenimiento y control de la vida útil de los elementos mencionados.

Teniendo en cuenta que anualmente el operador de red recibe ingresos por concepto de las inversiones de las expansiones y reposiciones de macro medidores, surge la necesidad de priorizar dichas actividades para garantizar ingresos óptimos.

Formulación del Problema

¿Por qué es importante para la empresa de Energía del Quindío EDEQ un modelo de optimización matemático?

Justificación

Después de realizar la instalación de los macro medidores en el sistema de distribución local, se empieza a contar con balances de energía confiables los cuales permiten establecer procedimientos que hacen más fácil la gestión de las pérdidas no técnicas, el operador de red se interesó por establecer el buen funcionamiento de los elementos con el objetivo de cumplir con el indicador de pérdidas de energía y sostenerlo en el % estipulado para tener el reconocimiento de los entes regulatorios.

Adicionalmente en el 2018 la resolución CREG 015, establece los ingresos al operador de red por la reposición de los macro medidores, teniendo en cuenta la vida útil remanente y el reconocimiento de las unidades constructivas, el OR además de obtener beneficios por mantener el indicador, aumenta sus ingresos, por cada una de las intervenciones que realiza sobre los macro medidores.

Es importante conocer la vida útil remanente de cada uno de los macro medidores para definir su intervención cronológicamente al igual que los tipos de los materiales y cantidad; identificado su tipo de conexión (Monofásica o Trifásica), con el fin de establecer el tiempo de ejecución y mano de obra. Por lo anterior, se evalúan todas las variables y se establece la necesidad de elaborar un modelo matemático, el cual permite seleccionar estratégicamente la intervención de las unidades constructivas, sacando el mayor provecho sobre los ingresos que se pueden obtener según los entes regulatorios vigentes.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un modelo de optimización que permita priorizar la inversión de macro medidores teniendo en cuenta la remuneración y beneficio por unidad constructiva establecida en la resolución CREG 015.

Objetivos Específicos

Conocer la cantidad de macro medidores a intervenir cronológicamente teniendo en cuenta la vida útil remanente.

Calcular el tipo y cantidad de materiales que se requiere para cumplir con el plan de inversión anual, la mano de obra y los tiempos estipulados

Definir los parámetros a tener en cuenta en la función objetivo y sus restricciones.

Diseñar un modelo matemático que permita optimizar el plan de inversión de macro medidores.

Escribir documento final con los resultados obtenidos.

Marco Teórico

Sistemas de Distribución

La distribución de la energía eléctrica a los consumidores, se realiza por medio del sistema de distribución los cuales bajan el voltaje a niveles seguros. El proceso de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica es instantáneo, ya que la energía eléctrica en forma de corriente alterna no se puede almacenar.

Lo que significa que, al encender la iluminación de la casa, la energía requerida es generada en alguna central, transmitida a través del sistema de transmisión hasta la ciudad donde uno vive y finalmente suministrada al hogar por el sistema de distribución.

El sistema de distribución de energía eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico cuya función es el suministro de energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales (medidor o contador del cliente), compuesto por redes de media tensión, redes de baja tensión, diversa tipología de estructuras, transformadores de distribución y macro medidores; estos últimos son utilizados para calcular balances de energía. (E.S.P, 2015)

La macro medición tiene como puntos de instalación los bornes terminales secundarios de los transformadores de distribución. En general, la macro medición debe realizarse de forma semidirecta, es decir, por medio de transformadores de corriente.

Los transformadores de corriente (TC o CT por sus siglas en inglés) son transformadores utilizados para aumentar o disminuir una corriente alterna (AC). Produce una corriente en el devanado secundario proporcional a la corriente del primario. Los transformadores son un elemento clave en el desarrollo de la industria eléctrica. Gracias a ellos se pudo realizar, de una manera práctica y económica, el transporte de energía eléctrica a grandes distancias. Un transformador de corriente es una máquina estática de corriente alterna que permite variar alguna función de la corriente como el voltaje o la intensidad, manteniendo la frecuencia y la potencia, en el caso de un transformador ideal.

La instalación de estos elementos se realiza con el fin de medir el total de la energía suministrada desde un transformador de distribución de la res aérea o subterránea de distribución de baja tensión.

El valor de la energía registrado por el medidor integrador deberá ser aproximadamente igual a la suma del valor de energía registrado por el medidor de cada usuario y/o cargas especiales en la red, conectado a dicho transformador o circuito; las diferencias son debidas a las pérdidas no técnicas de energía en los conductores y conexiones de la red.

Tipos de Macro medidores

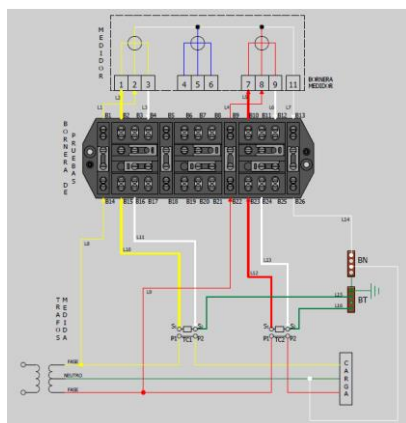
En el sistema de distribución eléctrico existen tipos de macro medidores, los cuales están directamente relacionados, con el tipo de transformadores de distribución, en estos se emplea la medición semidirecta, tipo de conexión en el cual las señales de tensión que recibe el medidor son las mismas que recibe la carga y las señales de corriente que recibe el medidor provienen de los respectivos devanados secundarios de los transformadores de corriente utilizados para transformar las corrientes que recibe la carga, entre ellos se encuentra los macro medidores para transformadores monofásicos y trifásicos.

Monofásico trifilar

Corresponde a una distribución eléctrica en la cual la acometida está conformada por dos conductores correspondientes a las fases y un conductor correspondiente al neutro, provenientes de un transformador de potencia monofásico, y su conexión se muestra en la figura 1.

Figura 1.

Diagrama de conexión macro medidor monofásico



Fuente: (EPM, 2017)

Para realizar la conexión de una medida semidirecta tipo monofásica trifilar se requieren los materiales mencionados en la tabla 1.

Tabla 1.

Cantidad de material macro medidor monofásico

Conexión monofásico trifilar		
ITE	Descripción	CANTIDAD
M		
1	Transformadores de corriente	2
2	Cable de control (5hilos)	10
3	Medidor de energía monofásica (De 5 a 10 amperios)	1
4	Caja hermética polifásica	1

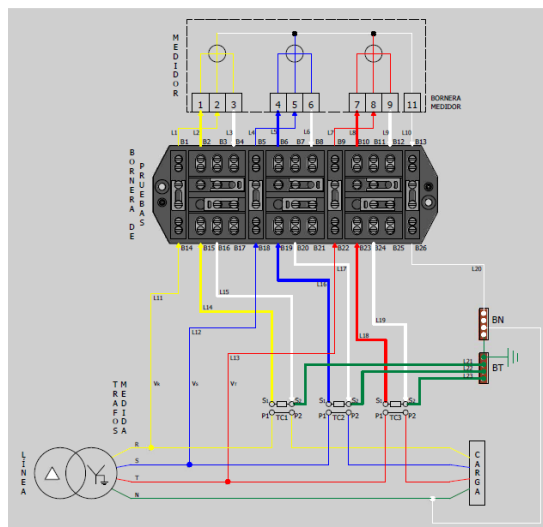
Fuente: (EPM, 2017)

Trifásico tetrafilar

Corresponde a una instalación eléctrica en la cual la acometida está conformada por tres conductores correspondientes a las fases y un conductor correspondiente al neutro, provenientes de un transformador de potencia trifásico, y su conexión se muestra en la figura 2.

Figura 2.

Diagrama de conexión macro medidor trifásico



Fuente: (EPM, 2017)

Para realizar la conexión de una medida semidirecta tipo monofásica trifilar se requieren los materiales mencionados en la tabla 2.

Tabla 2.

Cantidad de material macro medidor trifásico

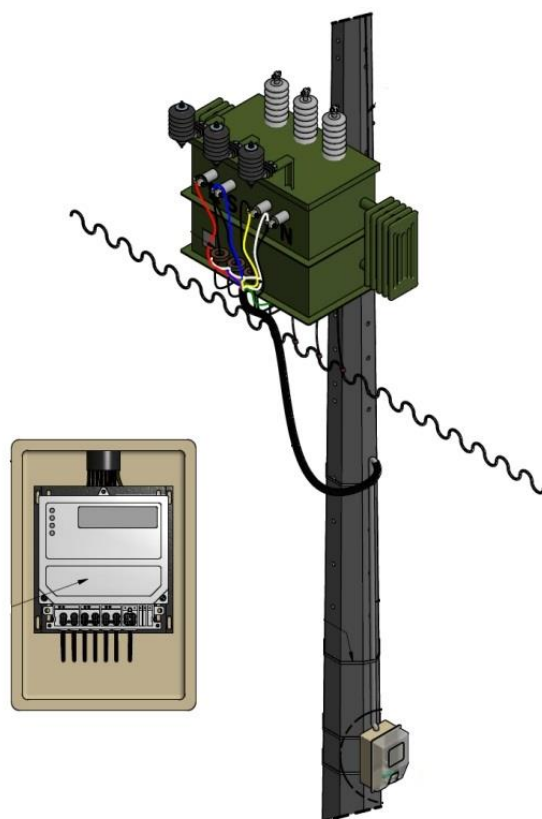
Conexión trifásica tetrafilar		
ITE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
M		
1	Transformadores de corriente	3
2	Cable de control (7 hilos)	10
3	Medidor de energía trifásica (De 5 a 10 amperios)	1
4	Caja hermética polifásica	1

Fuente: (EPM, 2017)

En la figura 3, se realiza una ilustración grafica de un macro medidor.

Figura 3.

Ilustración grafica de un macro medidor.



Fuente: (EPM, 2017)

Remuneración de Activos

En la resolución CREG 015 de 2018 se adopta la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional, la cual

aplica a los agentes que prestan el servicio de distribución de energía eléctrica y a los usuarios que utilizan el servicio.

El término inversión basados en la resolución CREG 015 se refiere al acto de postergar el beneficio inmediato del bien invertido sobre un beneficio más o menos probable.

Los OR deben presentar el plan de inversión para el periodo tarifado considerando los siguientes tipos de proyectos:

Tipo I: Los proyectos de inversión son motivados en la atención de demanda que ocasiona el remplazo de activos existentes para obtener una mayor capacidad del sistema.

Tipo II: Proyectos de inversión motivados en la atención de demanda que ocasionan la instalación de nuevos activos sin reemplazo de activos de existentes.

Tipo III: Proyectos de inversión no motivados en la atención de demanda que reemplaza activos existentes sin obtener una mayor capacidad del sistema.

Tipo I: Proyectos de inversión no motivados en la atención de demanda que ocasionan la instalación de nuevos activos.

El OR debe asignar cada uno de los proyectos de inversión a los tipos señalados anteriormente.

En el costo total del plan se puede incluir las siguientes inversiones; medidores de usuarios finales regulados que no cuenten con medidor a la fecha de presentación del plan y su costo no sea trasladado al usuario, medidores en el arranque de todas las líneas, equipos de medida en los puntos de entrada de cada nivel de tensión, macro medidores instalados en transformadores de distribución y sistemas de medición centralizada, incluyendo software y comunicaciones.

La definición de la base inicial de los activos; todas las UC de los niveles de tensión 2, 3, y 4, los transformadores y redes de nivel de tensión 1 se clasifican en la categoría de activos. Los macro medidores se clasifican como equipos de control y comunicaciones.

En la tabla 3, se refleja la vida útil de los activos, reconocida para las diferentes categorías (en años).

Tabla 3.

Vida útil para las categorías de activos por nivel de tensión

Categoría de activos	Descripción de categoría de activos	VU_{1,l}	VU_{2,l}	VU_{3,l}	VU_{4,l}
1	Transformadores de potencia	-	-	35	35
2	Compensaciones	-	35	35	35
3	Bahías y celdas	-	35	35	35
4	Equipos de control y comunicaciones	-	10	10	10
5	Equipos de subestación	-	35	35	35
6	Otros activos subestación	-	45	45	45
7	Líneas aéreas	-	45	45	45
8	Líneas subterráneas	-	45	45	45
9	Equipos de línea	-	35	35	-
10	Centro de control	-	10	10	10
11	Transformadores de distribución	25	-	-	-
12	Redes de distribución	35	-	-	-

Fuente: (EPM, 2017)

Adicionalmente dentro de la resolución CREG 015 de 2018 se establece los valores a reconocer al operador de red y estos varían con el IPP (Índice de precios al productor), como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4.*Valores reconocidos al operador de red*

UC	Descripción	Valor instalado- [\$ dic 2017]
N2EQ1	Barraje de derivación subterráneo - N2	3.199.000
N2EQ2	Caja de maniobra - N2	21.684.000
N2EQ3	Control de bancos de capacitores	44.429.000
N2EQ4	Banco de condensadores montaje en poste 150 kVAr	10.061.000
N2EQ5	Banco de condensadores montaje en poste 300 kVAr	19.187.000
N2EQ6	Banco de condensadores montaje en poste 450 kVAr	28.312.000
N2EQ7	Banco de condensadores montaje en poste 600 kVA	37.437.000
N2EQ8	Banco de condensadores montaje en poste 900 kVAr	55.688.000
N2EQ9	Cortacircuitos monopolar - N2	484.000
N2EQ10	Equipo de medida - N2	1.023.000
N2EQ11	Indicador falla - N2	1.124.000
N2EQ12	Juego cortacircuitos - N2	1.200.000
N2EQ13	Juego cuchillas de operación sin carga - N2	1.003.000
N2EQ14	Pararrayos - N2	482.000
N2EQ15	Juego pararrayos - N2	962.000
N2EQ16	Juego de seccionadores tripolar bajo carga - N2	27.881.000
N2EQ18	Regulador de voltaje trifásicos de distribución - N2	197.054.000
N2EQ19	Regulador de voltaje monofásico hasta 50 kVA - N2	31.678.000
N2EQ20	Regulador de voltaje monofásico hasta 150 kVA - N2	39.037.000
N2EQ21	Regulador de voltaje monofásico hasta 276 kVA - N2	48.929.000
N2EQ22	Regulador de voltaje monofásico hasta 500 kVA - N2	78.916.000
N2EQ23	Regulador de voltaje monofásico hasta 1000 kVA - N2	122.089.000

UC	Descripción	Valor instalado- [\$ dic 2017]
N2EQ24	Seccionador monopolar - N2	655.000
N2EQ25	Seccionador trifásico vacío - N2	1.060.000
N2EQ26	Seccionalizador con control inteligente, 400 A - N2	24.698.000
N2EQ27	Seccionalizador eléctrico en SF6, 400 A -N2	20.843.000
N2EQ28	Seccionalizador motorizado - N2	24.174.000
N2EQ29	Seccionalizador manual (bajo carga), 400 A - N2	20.319.000
N2EQ30	Interruptor en aire bajo carga - N2	10.329.000
N2EQ31	Transición aérea - subterránea - N2	1.260.000
N2EQ34	Unidad de calidad de potencia (PQ) CREG 024 de 2005	23.943.000
N2EQ35	Reconectador - N2	45.399.000
N2EQ36	Interruptor de transferencia en SF6 - N2	68.018.000
N2EQ37	Transformador de puesta a tierra	140.528.000
N2EQ38	Transformador de tensión - N2	5.571.000
N2EQ39	Transformador de tensión (pedestal) - N2	7.121.000
N2EQ40	Transformador de corriente - N2	3.570.000

Fuente: (gas, 2018)

Dados a que estos valores son los establecidos para el año 2017, se debe realizar ajuste a los valores establecidos para el año 2022, como se ilustra en la tabla 5.

Tabla 5.*Variación IPP de año 2018 a 2022*

Año	IPP	Variación mensual	Variación acumulada año	Variación anual
2018	100,70	0,70%	0,70%	2,67%
2019	100,61	-0,09%	0,61%	4,61%
2020	102,45	1,83%	2,45%	2,50%
2021	102,10	-0,34%	2,10%	11,37%
2022	101,42	-0,67%	1,42%	11,05%

Fuente: (gas, 2018)

Teniendo en cuenta los valores del IPP para el año 2022, el ítem Equipo de medida - N2 pasa de \$ 1.023.000 a \$1.352.406.

Con base a lo anterior la empresa de Energía del Quindío busca optimizar las inversiones a realizar sobre el sistema de distribución para obtener mayores beneficios, aplicando el modelo matemático se podrá conocer estratégicamente como intervenir cada uno de los macro medidores.

Para establecer el modelo matemático se requiere:

Conocer la edad remanente (vida útil).

Características técnicas de los macro medidores.

Materiales y mano de obra (capacidad operativa).

Establecer los parámetros a tener en cuenta en la función objetivo y restricciones.

Programación Lineal.

La programación lineal es un método mediante el cual se optimiza, ya sea maximizando o minimizando, una función objetivo, donde las variables están elevadas a la potencia 1. Esto, tomando en cuenta distintas restricciones dadas.

Función objetivo

La función objetivo tiene una estrecha relación con la pregunta general que se desea responder. Si en un modelo resultasen distintas preguntas, la función objetivo se relacionaría con la pregunta del nivel superior, es decir, la pregunta fundamental. Así por ejemplo, si en una situación se desean minimizar los costos, es muy probable que la pregunta de mayor nivel sea la que se relacione con aumentar la utilidad en lugar de un interrogante que busque hallar la manera de disminuir los costos.

Las variables de decisión

Similar a la relación que existe entre objetivos específicos y objetivo general, se comportan las variables de decisión respecto a la función objetivo, puesto que estas se identifican partiendo de una serie de preguntas derivadas de la pregunta fundamental.

Las variables de decisión, son en teoría, factores controlables del sistema que se está modelando, y como tal, estas pueden tomar diversos valores posibles, de los cuales se precisa conocer su valor óptimo, que contribuya con la consecución del objetivo de la función general del problema.

Las restricciones

Cuando hablamos de las restricciones en un problema de programación lineal, nos referimos a todo aquello que limita la libertad de los valores que pueden tomar las variables de decisión.

La programación binaria es un método perteneciente a la programación lineal, por lo que su base es un algoritmo matemático que tiene como finalidad resolver un problema indeterminado formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando así una función objetivo también lineal que generalmente se refiere a costo o a tiempo.

La programación binaria se utiliza en problemas de asignación o de toma de decisiones enfocadas a hacer o no una tarea, entre sus campos de aplicación más comunes se encuentra el despacho de envíos, el diseño de redes, la elección de un sitio, el diseño de redes, la ubicación del personal y la programación de actividades, que es la aplicación objeto de estudio en este artículo.

Metodología

Con el fin de lograr una adecuada maximización de los beneficios de la inversión en macro medidores se diseña un modelo de optimización que permita seleccionar los macro medidores a intervenir, de tal forma que cada una de las actividades a realizar genere los mayores beneficios en relación con las inversiones realizadas por el operador de red.

En el correcto funcionamiento de este modelo de optimización se debe garantizar el cumplimiento de las siguientes restricciones operativas y financieras:

Tipo de conexión de los macro medidores.

Clasificación de los macro medidores por su potencia aparente (kVA).

Mano de obra y materiales a utilizar en cada una de las intervenciones

Remuneración regulatoria.

Para determinar cuáles son los macro medidores a intervenir es necesario identificar el mundo de los macro medidores instalados en el sistema de distribución local, donde se observó gran diversificación en sus características técnicas como tipo de conexión y potencia aparente

(kVA), información que es fundamental para construir la base de datos que se utilizara en el modelo de optimización.

Para identificar el tipo de conexión de los macro medidores fue necesario conocer la cantidad de fases en media tensión que alimenta cada uno de los 8254 macro medidores instalados en el sistema eléctrico, donde se observó que contamos con 3498 macro medidores de conexión monofásica trifilar y 4756 macro medidores de conexión trifásica tetráfilas.

Adicionalmente se clasificaron los macro medidores teniendo en cuenta su potencia aparente (kVA), información que es única por cada macro medidores y se encuentra en su placa de características técnicas, de este análisis se observa que el mundo de macro medidores cuenta con las siguientes características como se ilustra en la tabla 6 y tabla 7.

Tabla 6.

Macro medidores monofásicos por capacidad

Macro medidores Monofásicos	
Capacidad en (kVA)	Cantidad (Uni)
5	559
10	389
15	943
20	1
25	770
30	3
37,5	373
50	264
75	190
100	5
1375	1
Total	3498

Fuente: *Autoría propia*

Tabla 7.*Macro medidores trifásicos por capacidad*

Macro medidores Trifásicos	
Capacidad en (kVA)	Cantidad (Uni)
5	20
10	8
15	701
20	63
25	21
30	1020
37,5	12
45	569
50	45
55	1
75	946
100	24
112,5	615
125	1
150	360
160	1
180	2
200	2
225	152
250	11
300	73
315	1
337,5	2
345	2
375	6
400	30
412,5	2
450	8
500	15
575	2
600	1
630	10
750	2
800	9

907,5	2
1000	6
1200	1
1250	2
1260	2
1300	2
1335	3
3000	1
Total	4756

Fuente: *Autoría propia*

Con los datos obtenidos anteriormente se definen las cantidades de mano de obra y materiales a utilizar en cada uno de los macro medidores, se puede identificar que tanto la mano de obra como los materiales varían según características de los macro medidores como tipo de conexión y potencia aparente (kVA), con este análisis se determina que la cantidad de mano de obra y de materiales a utilizar en cada intervención es la que se relaciona en la tabla 8 y tabla 9.

Tabla 8.

Materiales y mano de obra Macro medidor Monofásico

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Transformadores de corriente	UND	2
Cable Multi conductor 5X14 AWG	MTRS	10
Caja Hermética Polifásica	UND	1
Medidor 3H 2F 1(10) Amp	UND	1
Retiro Macro medidor Monofásico	UND	1
Instalación Macro medidor Monofásico	UND	1

Fuente: *Autoría propia*

Tabla 9.*Materiales y mano de obra Macro medidor Trifásico*

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD
Transformadores de corriente	UND	3
Cable Multi conductor 5X14 AWG	MTRS	10
Caja Hermética Polifásica	UND	1
Medidor 4H 3F 1(10) Amp	UND	1
Retiro Macro medidor Trifásico	UND	1
Instalación Macro medidor Trifásico	UND	1

Fuente: *Autoría propia*

Posteriormente se identifica la vida útil remanente en cada uno de los macro medidores, donde es necesario conocer el valor en pesos remanente por cada macro medidor, se evidencia que 1849 los 8254 macro medidores instalados en el sistema eléctrico cuentan con una vida útil remanente igual a cero, partiendo de esta información, la resolución CREG 015 de 2018 establece que anualmente cada operador de red recibe ingresos por concepto de las inversiones realizadas sobre su infraestructura eléctrica, adicionalmente define los valores a reconocer al operador de red y estos varían con el IPP (Índice de precios al productor), para el año 2022 cada intervención tendrá un valor de \$1.352.406.

Finalmente, después de conocer la características técnicas y financieras del mundo de los macro medidores instalados, se identifica que los macro medidores a intervenir corresponden a los 1849 que cuentan con una vida útil remanente igual a cero, para lo que es necesario la implementación del modelo de optimización con el fin maximizar los beneficios establecidos en la resolución CREG 015 de 2018.

Diseño del modelo de optimización

Para maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores según CREG 015 de 2018, se construye un modelo matemático que permita seleccionar estratégicamente los macro medidores a intervenir, con el fin de obtener el mayor beneficio regulatorio, dentro del modelo se tendrán varias etapas, como la identificación del tamaño de la base de datos, costo de materiales y mano de obra basado en las características técnicas de cada uno de ellos macro medidores, restricciones operativas y financieras, y por ultimo construcción de la función objetivo.

Este modelo matemático se realizará en el software Matlab versión R2017b.

Con respecto a la identificación de la base de datos, se le carga al programa una base de datos que contiene las características técnicas requeridas de cada uno de los 8254 macro medidores instalados en el sistema eléctrico, esta base de datos contiene, el tipo de conexión, la potencia aparente y la vida útil remanente en pesos por cada unidad constructiva, información que fue recopilada de los sistemas de información del operador de red, como se muestra en la figura 4.

Figura 4.*Base de datos*

```

Base_datos.m x Modelo.m x +
1 %% Base de datos con la información de los macromedidores
2
3 Base_general=[1 25 0 0
4 3 75 104 874526
5 3 112.5 0 0
6 3 75 90 523019
7 3 112.5 0 0
8 1 75 35 44818
9 3 112.5 104 874526
10 1 15 11 12003
11 3 112.5 0 0
12 3 15 71 397509
13 1 15 0 0
14 3 75 0 0
15 3 75 104 803956
16 3 15 90 251198
17 1 37.5 13 2978
18 3 225 179 508812
19 3 75 117 1700127
20 3 45 179 735556
21 3 112.5 71 610396
22 3 45 47 113937
23 1 25 47 81315
24 1 10 35 171378
25 3 37.5 90 468033

```

Fuente: *Autoría propia*

De igual forma se carga información correspondiente a la capacidad de los transformadores de corriente, costos de mano de obra y costo de materiales, los cuales serán de gran ayuda para definir el costo de cada intervención.

Después de identificar la base de datos, se realiza la construcción de la ecuación que permitirá hallar el costo por cada intervención a realizar, esta ecuación nos dará el costo específico de cada intervención, el cual estará definido por el valor de los materiales y mano de obra a utilizar, los cuales varían especialmente por las características técnicas de cada uno de los macro medidores instalados en el sistema de distribución local, en pocas palabras el costo por

cada intervención está definido por el valor de los materiales y mano de obra, tanto para los macro medidores monofásicos como para los macro medidores trifásicos.

El costo de materiales se calcula multiplicando la cantidad de los elementos a utilizar en cada intervención por el valor comercial de cada uno de ellos, de igual forma el costo de la mano de obra se realiza multiplicando cada acción por el valor establecido como se muestra en las tablas 8 y 9, teniendo en cuenta esta información el costo de cada intervención se calcula con la siguiente ecuación (1):

$$Cost_{Int}: \sum_{i=1}^n [MAT_i + MO_i] x_i \quad (1)$$

Donde:

MAT_i : Corresponde al costo de los materiales.

MO_i : Corresponde al costo de la mano de obra.

x_i : Cantidad de macro medidores.

Adicionalmente se define como una constante el valor que recibe cada operador de red como beneficio correspondiente a cada intervención realizada, para el año 2022 este valor corresponde a \$1.352.406.

Después de calcular el costo específico por cada intervención y el valor que recibe el operador de red en cada actividad realizada, se establecen las restricciones tanto operativas como financieras las cuáles serán las encargadas de definir los límites en este modelo de optimización.

Inicialmente se define la capacidad operativa la cual corresponde al número de intervenciones a realizar en un tiempo determinado, este valor esta correlacionado con la cantidad de cuadrillas disponibles para ejecutar esta labor y su rendimiento diario, este valor se puede cambiar ya que operativamente se pueden presentar imprevistos que produzcan cambios en las metas establecidas, dentro del modelo se definió como 720, este valor corresponde a la multiplicación de 3 actividades diarias, por 22 días hábiles , durante los 12 meses del año, cantidad de intervenciones a realizar con dos grupos de trabajo, lo anterior se puede expresar matemáticamente a partir de la ecuación (2).

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq Cap_Opt \quad (2)$$

Donde:

Cap_Opt : Corresponde a la capacidad operativa.

x_i: Cantidad de macro medidores.

Posteriormente se define el presupuesto en materiales, el cual hace referencia a la cantidad de dinero disponible para comprar los elementos que se requieren en cada una de las intervenciones los cuales varían teniendo en cuenta las características técnicas de los macro medidores, esta restricción se define con la siguiente ecuación (3):

$$\sum_{i=1}^n MAT_i x_i \leq Presupuesto_MAT \quad (3)$$

Donde:

MAT_i : Corresponde al costo de los materiales.

x_i : Cantidad de macro medidores.

Presupuesto MAT: Valor en millones.

De igual forma se establece un presupuesto para la mano de obra, es cual hace relación a la cantidad de dinero destinado para estas actividades, y también varía en relación a las características técnicas de los macro medidores y se expresa matemáticamente con la ecuación (4).

$$\sum_{i=1}^n MO_i x_i \leq \text{Presupuesto_MO} \quad (4)$$

Donde:

MO_i : Corresponde al costo de la mano de obra.

x_i : Cantidad de macro medidores.

Presupuesto_M: Valor en millones.

Como ultima restricción y la más importante, se establece que el programa solo puede realizar intervenciones sobre macro medidores con vida útil remanente igual a cero, donde es necesario comparar este valor en cada uno de los 8254 macro medidores, con el fin de sacar el mayor provecho a los beneficios regulatorios y se expresa con la siguiente ecuación (5).

$$\sum_{i=1}^n Rem_i x_i \leq \emptyset \quad (5)$$

Donde:

Rem_i : Vida útil remanente de cada macro medidor.

x_i : Cantidad de macro medidores.

\emptyset : Valor de la vida remanente en pesos

Después de tener definidos las restricciones se procede a construir la función objetivo, la cual se expresa matemáticamente como se muestra en la siguiente ecuación (6).

$$\sum_{i=1}^n [Rec_i x_i - Cost_{Inti} x_i - Rem_i x_i + Rem_i] \quad (6)$$

Donde:

Rec_i : Reconocimiento regulatorio.

$Cost_{Inti}$: Costo por intervención.

Rem_i : Vida útil remanente

x_i : Cantidad de macro medidores.

Finalmente se integran todas las etapas anteriormente descritas y se compila el programa, donde se obtendrá como resultado la variable X la cual se interpretará de la siguiente forma:

Cero (0), este valor se asigna a los macro medidores que no se pueden intervenir.

Uno (1), este valor se le asigna a los macro medidores que se pueden intervenir.

El valor obtenido en X, corresponde a la cantidad de macro medidores que se pueden intervenir cumpliendo con las restricciones operativas y financieras establecidas inicialmente, teniendo como objetivo principal maximizar los beneficios establecidos en la resolución CREG 015 de 2018.

Después de haber obtenido el modelo matemático y codificación necesaria, se aplica el algoritmo que se ilustra en la Figura 6, el cual consta de los siguientes pasos:

Ingreso base de datos: Se debe ingresar la información de los 8254 macro medidores instalados en el sistema eléctrico teniendo en cuenta la estructura de la figura 4.

Adecuación de la información: De acuerdo a la información ingresada en el punto anterior, Se genera una matriz con las características técnicas de los macro medidores y los vectores correspondientes a la mano de obra.

Cálculo de costo por cada inversión: Teniendo en cuenta la información anterior se realiza el cálculo relacionado al costo de la mano de obra y los materiales utilizado en cada una de las intervenciones, haciendo uso de la ecuación (1).

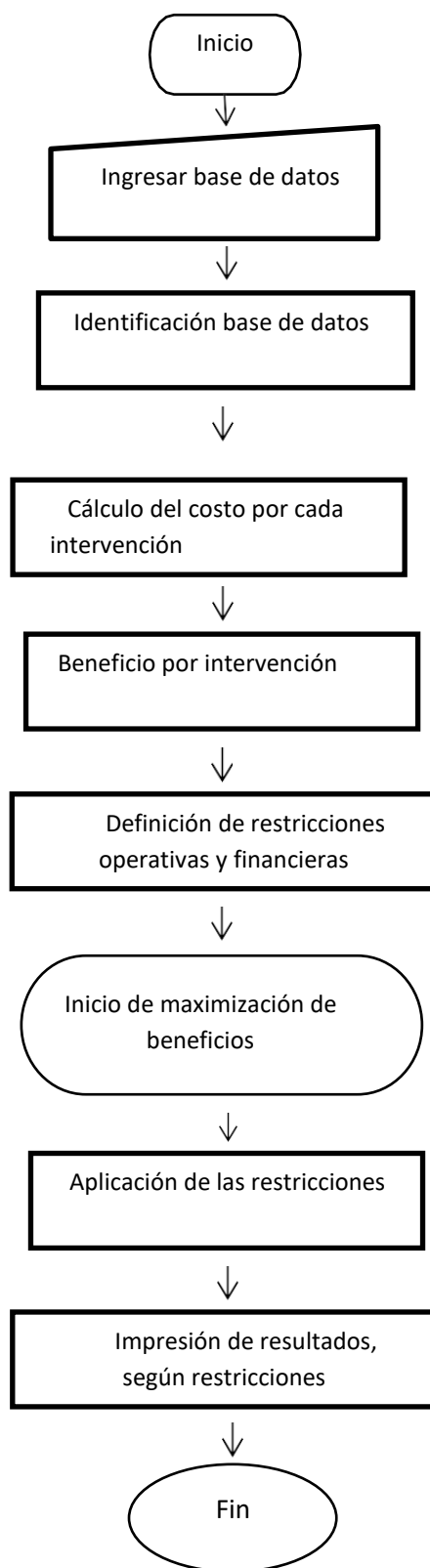
Beneficio por cada inversión: Se da a conocer el reconocimiento regulatorio por cada intervención establecido en la resolución CREG 015 de 2018.

Definición de restricciones operativas y financieras: Se definan los límites del modelo de optimización basado en criterios como la capacidad operativa, presupuesto de materiales y mano de obra, y vida útil remanente de cada macro medidor.

Inicio maximización de los beneficios: En este punto se integran todas las etapas anteriormente descritas.

Aplicación de las restricciones: Se aplican las restricciones definidas dentro del modelo matemático tanto financiero como operativo, empleando las ecuaciones (2) a (5).

Impresión de resultados de la configuración final: Al aplicar de forma secuencial todas las etapas anteriormente descritas, se obtiene la estrategia de intervención de macro medidores más óptimos.

Figura 5.*Diagrama de flujo del modelo***Fuente:** *Autoría propia*

Resultados

Para evaluar la efectividad del algoritmo desarrollado, se aplica el modelo de optimización para maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores sobre el sistema de distribución local EDEQ, el cual tiene las siguientes características técnicas y financieras:

Cuenta con 8254 macro medidores instalados.

Según su tipo de conexión, 4756 macro medidores son de conexión trifásica y 3498 de conexión monofásica.

1849 macro medidores cuentan con vida útil remanente igual a cero.

Sus macro medidores están clasificados por su capacidad y tipo de conexión.

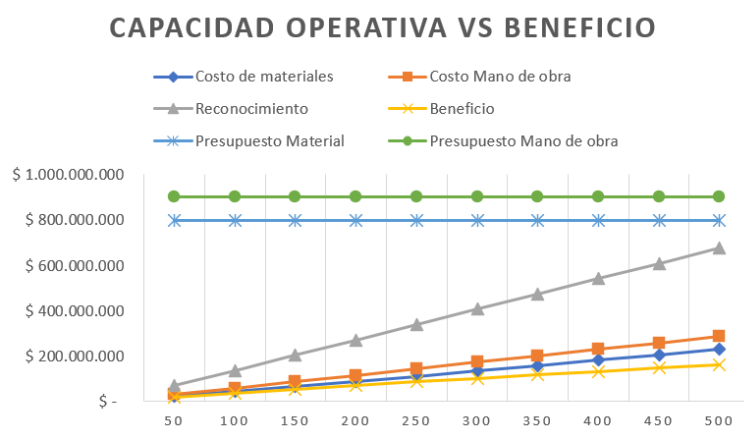
Para analizar adecuadamente los resultados generados por el modelo de optimización, se realiza variaciones en cada una de las restricciones programadas, con el fin analizar estos resultados y poder identificar cual es la combinación que genera mayores beneficios al operador de red.

En la figura 6, se ilustra la variación en la capacidad operativa, entre 50 y 500 intervenciones teniendo un presupuesto fijo en materiales y mano de obra, donde se observa que tanto el costo del material como el costo de mano de obra se incrementan proporcionalmente con

relación a las intervenciones realizadas, adicionalmente se evidencio que el operador de red obtiene un mayor beneficio cuando se realiza una mayor cantidad de intervenciones.

Figura 6.

Capacidad operativa vs beneficio



Fuente: Autoría propia

En la tabla 10, se observa que para las variaciones entre 500, 1000, 1500 y 2000 intervenciones el modelo matemático solo permite realizar 1418 para los rangos de 1500 y 2000 intervenciones, ya que se llega al límite del presupuesto establecido en materiales y mano de obra correspondiente a 800 y 900 millones respectivamente, en los datos obtenidos se evidencia la misma dinámica anterior, a mayor número de intervenciones el beneficio es más alto.

Tabla 10.*Límite Presupuesto material y mano de obra*

Intervenciones Programadas	500	1000	1500	2000
Intervenciones Modelo	500	1000	1418	1418
	\$	\$	\$	\$
Costo de materiales	228.552.728	503.728.891	754.951.787	754.951.787
	\$	\$	\$	\$
Costo Mano de obra	286.120.000	614.305.968	899.896.944	899.896.944
	\$	\$	\$	\$
Reconocimiento	676.203.000	1.352.406.000	1.917.711.708	1.917.711.708
	\$	\$	\$	\$
Beneficio	161.530.272	234.371.141	262.862.977	262.862.977
	\$	\$	\$	\$
Presupuesto Material	800.000.000	800.000.000	800.000.000	800.000.000
	\$	\$	\$	\$
Presupuesto Mano de obra	900.000.000	900.000.000	900.000.000	900.000.000

Fuente: *Autoría propia*

Después de realizar el análisis anterior se ajusta tanto al presupuesto para los materiales como el presupuesto para la mano de obra, los cuales se definen de la siguiente manera, 2000 millones para materiales y 2100 millones para mano de obra, en la tabla 11 se observar el comportamiento de los resultados entregados por el modelo de optimización.

Tabla 11.*Límite de intervenciones*

Intervenciones Programadas	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Intervenciones Modelo	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	1821
Costo de material	\$ 88.16	\$ 181.0	\$ 276.0	\$ 385.34	\$ 503.72	\$ 623.42	\$ 744.09	\$ 864.75	\$ 986.62	\$ 1.000.2
	9.400	8	8	7.335	8.891	6.283	1.883	7.483	3.434	63.963
	\$	\$	\$							
Costo Mano de obra	114.4	228.8	343.3	\$ 477.65	\$ 614.30	\$ 750.95	\$ 887.59	\$ 1.024.2	\$ 1.160.8	\$ 1.175.2
	48.00	96.00	44.00	9.568	5.968	2.368	8.768	45.168	91.568	39.440
	\$	\$	\$							
Reconocimiento	270.4	540.9	811.4	\$ 1.081.9	\$ 1.352.4	\$ 1.622.8	\$ 1.893.3	\$ 2.163.8	\$ 2.434.3	\$ 2.462.7
	81.20	62.40	43.60	24.800	06.000	87.200	68.400	49.600	30.800	31.326
	\$	\$	\$							
Beneficio	67.86	94.37	01.69	218.91	234.37	248.50	261.67	274.84	286.81	287.22
	3.800	2	2	7.897	1.141	8.549	7.749	6.949	5.798	7.923

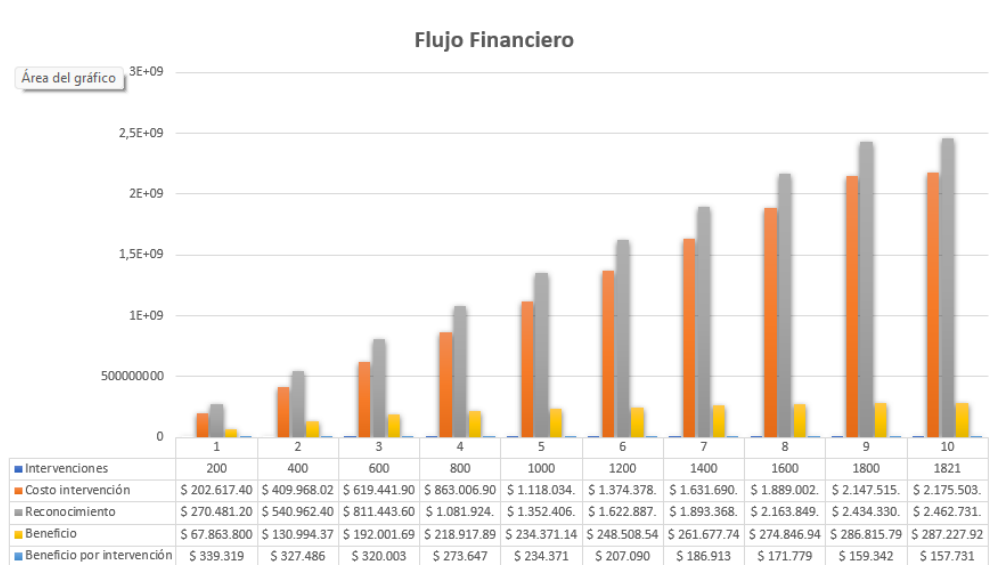
Fuente: *Autoría propia*

Donde se identificó que el máximo de intervenciones que permirte realizar el modelo son 1821, y en este caso los limites no están establecidos por el presupuesto definido para los materiales y mano de obra, si no, del valor reconocido por cada intervención, lo que significa que realizar una intervención mas no es rentable ya que su costo supera el valor reconocido regulatorio al operador de red.

En la siguiente figura 7, se ilustra el flujo financiero de las intervenciones realizadas, donde se muestra el costo de las intervenciones, el reconocimiento regulatorio y el beneficio obtenido por el operador de red.

Figura 7.

Flujo Financiero



Fuente: *Autoría propia*

En esta figura se sigue observando que a mayor número de intervenciones el beneficio total es mayor, adicionalmente de evidencia que el beneficio individual a partir de la intervención 300 decrece.

Finalmente, implementar esta estrategia de intervención traerá al operador de red beneficios financieros aparte de maximizar los beneficios de la inversión en macro medidores, tales como:

Balances de energía confiables.

Aumento en el índice de la confiabilidad.

Contribución en la reducción de pérdidas de energía.

Conclusiones

Las intervenciones realizadas que brindan mayores beneficios al operador de red son la ejecutadas sobre macro medidores cuyo tipo de conexión es monofásica, ya que la cantidad de transformadores de corriente a utilizar es menor y por ende el valor de mano de obra y materiales es inferior.

La maximización de beneficios es mayor cuando el número de intervenciones aumenta si se realiza un análisis de forma general, en el momento de realizar un análisis individual por cada intervención realiza se observa que el beneficio decrece a partir de la intervención número 300.

El modelo matemático permite realizar 1821 intervenciones, no permite realizar una cantidad mayor ya que a partir de esta intervención el costo por cada actividad es mayor que el valor reconocido al operador de red.

Al Aumentar tanto el presupuesto de materiales como el presupuesto de mano de obra, no se logra un mayor beneficio para el operador de red, ya que el modelo matemático solo permite realizar intervenciones sobre los 1849 macro medidores con vida útil remanente igual a cero.

Individualmente, la restricción de vida útil remanente igual a cero es la más importante dentro del modelo, ya que esta define la cantidad de macro medidores sobre los que se pueden

realizar las intervenciones y permite aprovechar al máximo la vida útil remanente mayor a cero de los demás macro medidores.

Recomendaciones

El modelo matemático desarrollado permite maximizar los beneficios de inversión en macro medidores, optimizando estrategias de intervención, sin embargo, selecciona aleatoriamente los macro medidores a intervenir, a este modelo se le puede agregar una etapa que permita realizar esta selección teniendo en cuenta la ruta de lectura de los macro medidores con el fin de garantizar rutas optimas ejecución.

En la actualidad existen transformadores con vida útil igual a cero, en el momento que esta condición no exista, se le puede programar una restricción que permita realizar intervenciones con una vida útil remanente determinada basados en el plan de inversiones del operador de red.

Referencias bibliográficas

E.S.P, C. S. (05 de 03 de 2015). *Likinormas*. Obtenido de

https://likinormas.micodensa.com/Norma/acometidas_medidores/generalidades_ae/generalidades_7_1_actualizacion_generalidades

EPM, G. (07 de 06 de 2017). *Instalacion de macromedición*. Obtenido de

https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Energia/RA4-100/RA4_100_INSTALACION_DE_MACROMEDICION_V1.pdf?ver=2019-05-27-155202-280

gas, M. d. (29 de 01 de 2018). *Distribución de energía eléctrica metodología de remuneración 2018 - 2022*. Obtenido de

[http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/\\$FILE/D-010-18%20DISTRIBUCI%C3%93N%20DE%20ENERG%C3%8DA%20EL%C3%89CTRICA.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/65f1aaf1d57726a90525822900064dac/$FILE/D-010-18%20DISTRIBUCI%C3%93N%20DE%20ENERG%C3%8DA%20EL%C3%89CTRICA.pdf)

RUIZ, J. (s.f.). *INTRODUCCION A LA PROGRMACION LINEAL*.

Tomás González Estrada, J. A. (2015). *UMPE*. Obtenido de

https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf