

**Identificación y evaluación de alternativas para un sistema prototipo de restauración automática del servicio de energía eléctrica en un circuito del área metropolitana de Bucaramanga del sistema de distribución local de la Electrificadora de Santander S.A.**

**E.S.P**

**Jorge Iván Moreno Mojica**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Electricista**

**Director:**

**César Antonio Duarte Gualdrón**

**Ph.D. en ingeniería eléctrica e informática**

**Codirector:**

**Gilber Gabriel Pacheco Llaine**

**Ingeniero Electricista**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas**

**Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones**

**Bucaramanga**

**2019**

### **Agradecimientos**

A Dios por darme la vida y la oportunidad de llegar a ser profesional

A mis padres por darme su incondicionalidad soporte, amor, sabiduría y por el esfuerzo que durante toda mi vida han llevado a cabo por sacarnos adelante tanto a mí como a mis hermanos, enseñándome que el amor de padres prima sobre cualquier situación y que siempre debo afrontar cualquier circunstancia con la frente en alto

A mis hermanos, por sus consejos y cariño, por todo el apoyo brindado y por ser mi ejemplo a seguir.

A mis tíos por su apoyo

A mis amigos por sus consejos y por todo el aprendizaje vivido durante la carrera

***Jorge Ivan Moreno Mojica***

## Contenido

|                                                                                                 | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Introducción .....                                                                              | 12   |
| 1. Sistemas de distribución.....                                                                | 16   |
| 1.1 Funcionamiento de los equipos de protección, corte y maniobra .....                         | 18   |
| 1.2 Especificaciones técnicas de los equipos .....                                              | 19   |
| 2. Metodología para la ubicación de equipos de protección, corte y maniobra .....               | 20   |
| 2.1 Identificación topológica del sistema en tramos de red .....                                | 21   |
| 2.1.1 Tramos de red del caso de estudio. ....                                                   | 22   |
| 2.2 Modelado de la tasa de fallas y tiempos de reparación en el sistema de distribución .....   | 24   |
| 2.2.1 Tasa de fallas y tiempos de reparación. ....                                              | 26   |
| 2.2.2 Modelado de la tasa de fallas y tiempos de reparación en el caso de estudio. ....         | 26   |
| 2.3 Estimación del índice de confiabilidad SAIDI .....                                          | 28   |
| 2.3.1 Componentes de la formulación binaria del saidi en función de la ubicación de equipos. .. | 28   |
| 2.3.2 Formulación binaria del SAIDI. ....                                                       | 33   |
| 2.4 Optimización de la formulación binaria del SAIDI .....                                      | 33   |
| 2.4.1 Restricciones para el problema de optimización. ....                                      | 34   |
| 3. Resultados de la metodología en el caso de estudio.....                                      | 35   |

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Impacto en el SAIDI para cada escenario de optimización .....                   | 36 |
| 4. Validación y evaluación de alternativas.....                                     | 38 |
| 4.1 Evaluación de alternativas de inversión según la relación beneficio-costos..... | 39 |
| 4.2 Relación beneficio - costo para el caso de estudio .....                        | 40 |
| 5. Análisis y discusión de resultados .....                                         | 43 |
| 6. Conclusiones .....                                                               | 45 |
| 7. Recomendaciones .....                                                            | 46 |
| Referencias Bibliográficas .....                                                    | 47 |
| Apéndices .....                                                                     | 49 |
| Apéndice A. Ficha técnica de reconector de NIVEL 2 .....                            | 49 |
| Apéndice B. Información de entrada para la formulación binaria.....                 | 58 |
| Apéndice C. Restricciones para la optimización de la formulación binaria .....      | 59 |
| Apéndice D. Resultados de la formulación binaria .....                              | 61 |

### Lista de Figuras

|                                                                                                                               | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Diseño típico de protección de un sistema de distribución. ....                                              | 17          |
| <i>Figura 2.</i> Metodología para la ubicación de equipos de protección, corte y maniobra en un sistema de distribución ..... | 21          |
| <i>Figura 3.</i> Ejemplo de topología de 12 tramos. ....                                                                      | 22          |
| <i>Figura 4.</i> Diagrama topológico del caso de estudio .....                                                                | 23          |
| <i>Figura 5.</i> Índice SAIDI para cada escenario de optimización .....                                                       | 38          |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                         | <b>Pág.</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1. <i>Datos de las fallas del caso de estudio</i> .....                                           | 27          |
| Tabla 2. <i>Información de tasas y duración de fallas de los tramos en el circuito de estudio</i> ..... | 27          |
| Tabla 3. <i>Ubicación de los equipos para 10 escenarios de análisis en el caso de estudio</i> .....     | 36          |
| Tabla 4. <i>Valores del índice SAIDI para cada uno de los escenarios</i> .....                          | 36          |
| Tabla 5. <i>Inversión para los escenarios de optimización</i> .....                                     | 41          |
| Tabla 6. <i>Precios de unidades constructivas</i> .....                                                 | 42          |
| Tabla 7. <i>Relación beneficio-costos para los escenarios de optimización</i> .....                     | 42          |

**Lista de Apéndices**

|                                                                                | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Apéndice A. Ficha técnica de reconector de NIVEL 2 .....                       | 49          |
| Apéndice B. Información de entrada para la formulación binaria.....            | 58          |
| Apéndice C. Restricciones para la optimización de la formulación binaria ..... | 59          |
| Apéndice D. Resultados de la formulación binaria .....                         | 61          |

## Resumen

**Título:** Identificación y Evaluación de Alternativas para un Sistema Prototipo de Restauración Automática del Servicio de Energía Eléctrica en un Circuito del Área Metropolitana de Bucaramanga del Sistema de Distribución Local de la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.\*

**Autor:** Jorge Ivan Moreno Mojica\*\*

**Palabras Clave:** Frecuencia Media de Interrupciones (SAIFI), Tiempo Total Promedio de Interrupciones (SAIDI), Operador de Red (OR), Restablecimiento de Energía Eléctrica

### Descripción:

El estudio y análisis de las estrategias de restauración de las redes de distribución de energía eléctrica cuando se presentan fallas es necesario para cumplir con los requisitos que los agentes reguladores del servicio les imponen a los operadores de red (**OR**), los cuales consisten en límites para la medición anual de la frecuencia media de interrupciones (**SAIFI**) y el tiempo total promedio de interrupciones (**SAIDI**), con el fin de prestar un servicio confiable a los usuarios. Esto ha llevado a que las redes de distribución evolucionen tecnológicamente para disminuir la duración y el número de clientes afectados por una falla, por ende, los equipos de protección, corte y maniobra juegan un papel importante para aislar y restablecer el suministro a los clientes que no están directamente afectados.

En este trabajo de grado se aplica una metodología para identificar y evaluar alternativas para la restauración automática del suministro de energía eléctrica en un circuito del área metropolitana de la ciudad de Bucaramanga, la cual utiliza un algoritmo de optimización del indicador SAIDI para establecer ubicaciones de equipos de control, protección y maniobra, a partir de las cuales, utilizando la herramienta de simulación PowerFactory de DlgSILENT, se evalúa la disminución del índice de confiabilidad SAIDI para cada alternativa de ubicación. Esto con el fin de evaluar si dicho índice cumple con los límites establecidos en la resolución CREG 015-2018. Asimismo, se presenta un análisis beneficio-costos, y finalmente se establecen los requerimientos de tecnología para la implementación y funcionamiento de la estrategia de restauración en el circuito bajo estudio.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: César Antonio Duarte Gualdrón Ph.D. en ingeniería eléctrica e informática Codirector: Gilber Gabriel Pacheco Llain Ingeniero Electricista

## Abstract

**Title:** Identification and Evaluation of Alternatives for a Prototype System of Automatic Restoration of the Electric Power Service in a Circuit of the Metropolitan Area of Bucaramanga of the Local Distribution System of the Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.\*

**Author:** Jorge Ivan Moreno Mojica\*\*

**Keywords:** The average frequency of interruptions (SAIFI), The average total time of interruptions (SAIDI), network operators (NO), Automatic restoration of the electric power

### Descripción:

The study and analysis of strategies for restoring electrical power distribution networks when failures occur, is necessary to comply with the requirements that the regulators of the service impose on network operators (NO), which consist of limits for the annual measurement of the average frequency of interruptions (SAIFI) and the average total time of interruptions (SAIDI), in order to provide a reliable service to users. This has led to distribution networks evolving technologically to reduce the duration and number of customers affected by a failure, thus, protection, cutting and manoeuvring equipment play an important role in isolating and restoring supply to customers who are not directly affected.

In this thesis a methodology is applied to identify and evaluate alternatives for the automatic restoration of the electric power supply in a circuit of the metropolitan area of the city of Bucaramanga, which uses an optimization algorithm of the SAIDI indicator to establish locations of control, protection and maneuvering equipment from which, using DigSilent's PowerFactory simulation tool, the decrease in the SAIDI reliability index for each location alternative is evaluated. This is done in order to evaluate whether this index complies with the limits established in resolution CREG 015 - 2018. In addition, a cost-benefit analysis is presented, and finally the technology requirements for the implementation and operation of the restoration strategy in the circuit under study are established.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: César Antonio Duarte Gualdrón Ph.D. en ingeniería eléctrica e informática Codirector: Gilber Gabriel Pacheco Llain Ingeniero Electricista

## Introducción

La cantidad de energía eléctrica no suministrada (*EENS*) por el *OR* a los clientes permite evaluar la calidad del servicio, y a su vez, da el estimado de la variación de ingresos del *OR*; dicha variación se presenta debido a la suspensión del suministro de energía eléctrica a los usuarios, la cual puede ser, una suspensión temporal (entre tres segundos y tres minutos) o una suspensión sostenida (mayor a tres minutos). Adicionalmente, en caso de una violación de los límites de *EENS* por un *OR*, de acuerdo con la resolución CREG 015 2018; se establece la penalización al *OR*, el cual tiene la obligación a compensar económicamente a los usuarios afectados.

Es por esta razón que los *OR* utilizan índices de confiabilidad con el fin de cuantificar el estado de su sistema. Los índices más utilizados son la frecuencia media de interrupciones por año (*SAIFI*) y el tiempo total promedio de interrupciones por cliente (*SAIDI*). Con el objetivo de reducir la duración de tales interrupciones y en consecuencia mejorar los índices de confiabilidad en el sistema, la ubicación de equipos de protección, corte y maniobra cobra importancia, considerando las funciones que cada uno de estos equipos ofrece, las cuales permiten la comunicación entre ellos, logrando así maniobras con menores tiempos de despeje de fallas (Ríos Giraldo, 2016).

Por otro lado, la inadecuada ubicación de los equipos de protección, corte y maniobra se puede ver reflejada en sobrecostos de instalación, ya que los beneficios en los índices de confiabilidad pueden ser muy bajos. Con el transcurso de los años, los estudios realizados para identificar la ubicación óptima de los equipos en la red han utilizado diversas estrategias de programación. En julio de 1996, Roy Billinton y Satish Jonnavithula, (Billinton & Jonnavithula, 1996), presentan

una alternativa que da solución a la ubicación de equipos de seccionamiento, considerando los costos de interrupción, mantenimiento y de inversión, y formulando un problema de optimización no lineal.

F. Soudi y K. Tomsovic en junio de 1998, (Soudi & Tomsovic, 1998), presentan una programación binaria para identificar la ubicación de ciertos equipos de protección en un circuito de distribución. El algoritmo propuesto utiliza un método heurístico de ingeniería para minimizar el tiempo de cálculo.

En el siguiente año, Celli Member y Pilo Member, (G. & F., 1999), presentan unos algoritmos y procedimientos de cálculo para determinar el número y la ubicación óptima de los dispositivos de conmutación en sistemas radiales y mallados. Este procedimiento se basa en el principio de optimización “*Bellmann*” que, combinado con las técnicas de “*Yield*”, permite encontrar la solución óptima en unos pocos milisegundos para problemas de tamaño real.

Luis Gustavo Wesz, en mayo del 2002, (Wesz da Silva, 2002), presenta una formulación matemática para dar solución a la localización de dispositivos de protección, la cual garantiza una ubicación estratégica y eficiente de estos, con el fin de mejorar los índices de confiabilidad de la red. Dicha formulación consiste en programación no lineal de tipo binaria, considerando una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones.

En junio del 2010, Luis Gustavo silva y Rodrigo Pereira, (W. da Silva, F. Pereira, & Sanches Mantovani, 2010), presentan un modelo de programación binaria no lineal para el problema de asignación y/o reubicación de seccionadores y dispositivos de protección en alimentadores radiales aéreos de distribución, incluyendo restricciones técnicas y económicas.

El año siguiente, Carolina Toro Giraldo, Ricardo Hincapié Isaza, y Ramón Gallego, (Toro Giraldo , Hincapié Isaza, & Gallego R., 2011), presentan una metodología que ayuda a dar solución

a la ubicación óptima de equipos de protección (fusibles y reconectadores), enfocado a mejorar el índice de confiabilidad SAIFI. Esta formulación consta de un modelo de programación no lineal, donde contiene una función objetivo no lineal y un conjunto de restricciones lineales, que tienen en cuenta criterios técnicos y económicos.

En el año 2013, Adonis Emmanuel Tio e Iván Cruz, (Tio & Cruz, 2013), presentan una formulación binaria del Índice de Duración de Interrupción Promedio del Sistema (SAIDI) explícitamente expresado como una función de la ubicación de reconectadores, fusibles, fusibles con esquema guarda fusible, interruptores y líneas de suplencia para sistemas de distribución con operación radial.

En este trabajo de grado se utiliza una metodología que permite identificar las alternativas de ubicación de equipos de protección, corte y maniobra para un circuito de ESSA, por medio de una formulación binaria no lineal del índice SAIDI, la cual contiene explícitamente la ubicación de reconectadores, fusibles, fusibles con esquema guarda fusibles, interruptores y suplencias o líneas de enlace con otros circuitos. Esta formulación binaria del SAIDI corresponde a la propuesta por (Tio & Cruz, 2013), quienes validan los modelos propuestos por (Billinton & R.N, 1984), y verifican los resultados de la evaluación de confiabilidad.

Para el desarrollo de este trabajo de grado se plantearon los siguientes objetivos:

#### Objetivo General

Determinar una metodología para la identificación y evaluación de alternativas de restauración automática del servicio de energía eléctrica para un circuito del SDL en el Área Metropolitana de Bucaramanga de la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P., utilizando el software PowerFactory de DlgSILENT y teniendo en cuenta lo establecido en la resolución CREG015/2018.

### Objetivos Específicos

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Determinar una metodología para identificar alternativas de ubicación de dispositivos de control, protección y maniobra que permitan la restauración automática del servicio en un circuito del Sistema de Distribución Local de la Electrificadora de Santander, utilizando el programa informático PowerFactory de DIgSILENT.
- Establecer los requerimientos tecnológicos y de comunicación necesarios para implementar una alternativa de restauración automática del servicio de energía eléctrica en el circuito seleccionado del sistema de distribución local de la Electrificadora de Santander.
- Estimar los costos y beneficios de las alternativas de restauración automática del servicio de energía eléctrica con base en la metodología de remuneración propuesta en la resolución CREG 015-2018.

El desarrollo de estos objetivos se presenta en este documento que comprende 6 capítulos. El Capítulo 1 contiene los requerimientos mínimos que los equipos de restauración del servicio deben cumplir para hacer parte de los activos de ESSA. La metodología para la identificación de alternativas de ubicación de dispositivos de control, protección y maniobra se encuentra en el Capítulo 2, y los resultados de aplicación de tal metodología se presentan en el Capítulo 3. El Capítulo 4 evalúa la relación beneficio-costos de las ubicaciones identificadas. Los Capítulos 5 y 6, corresponden al análisis de los resultados y conclusiones, respectivamente.

## 1. Sistemas de distribución

En la Figura 1 se presenta un sistema de distribución radial, el cual se compone de alimentador principal (*Feeder*) y circuitos laterales. Los equipos de protección pueden ser ubicados a lo largo del sistema y dependiendo de las necesidades, existen dos categorías de equipos, los cuales son: equipos que tienen la capacidad de interrumpir la corriente de falla: reconectadores y fusibles (*recloser, fuse*); y equipos de seccionamiento o seccionalizadores (*NC switch*) que se utilizan para la reconfiguración del sistema ya sea para la redistribución de carga o el aislamiento de fallas.

El alimentador principal está protegido por un interruptor de potencia (con relés de sobre corriente y reenganche con capacidad de interrumpir corrientes de falla), y normalmente cuenta con un seccionamiento central (ubicado en un punto intermedio del alimentador), el cual puede ser manual, telecontrolado o automático, asimismo, este puede ser un interruptor o un reconectador. El alimentador principal puede contener más de un equipo con funciones de protección, teniendo en cuenta las restricciones de coordinación entre ellos. Los circuitos laterales (ramales) están conectados al alimentador principal por medio de seccionalizadores, reconectadores o fusibles. Esto depende del escenario y la necesidad. Por último, las líneas de enlace o suplencias (*tie-line*) contienen seccionalizadores o interruptores, que operan de forma manual o telecontrolada, con el fin de conectar en situaciones de emergencia el circuito con alimentadores adyacentes.

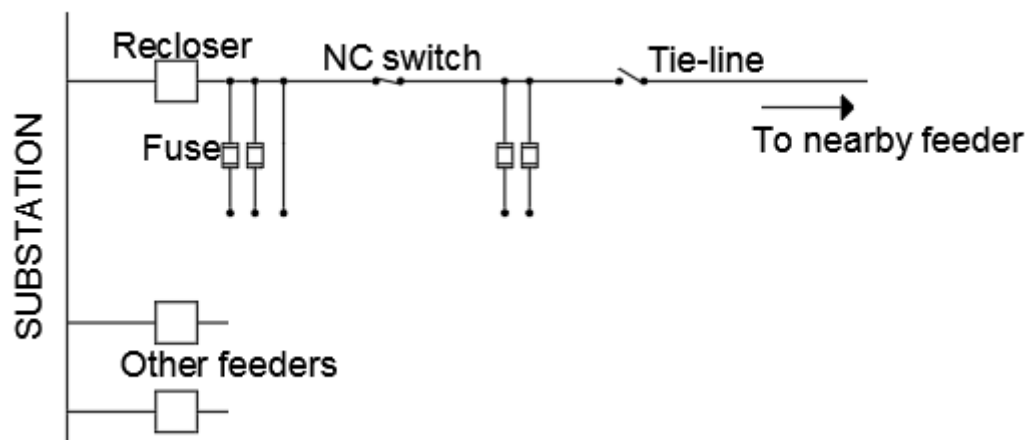


Figura 1. Diseño típico de protección de un sistema de distribución. Adaptado de: (Ramírez Castaño, 2014)

Las funciones principales de los equipos de protección en un sistema de distribución son:

- **Minimizar en número de fallas permanentes y de interrupciones del servicio:**

El despeje rápido de fallas transitorias evita que el sistema presente daños en sus equipos que puedan ocasionar fallas permanentes. Esto ocasiona que usuarios involucrados en la maniobra presenten una falla transitoria si la acción realizada es exitosa. Los equipos involucrados son restauradores o un interruptor de potencia (Ramírez Castaño, 2003).

- **Minimizar el tiempo de localización de fallas:**

La utilización de equipos de seccionalización, como fusibles, ayuda a la localización de las fallas que se presentan en un sistema, usualmente estos equipos cuentan con un indicador visual de su estado de operación (abierto, cerrado), la disminución del tiempo de localización de la falla dependerá de estos, los equipos de protección contra sobre corriente deben ser coordinados con el fin de que operen los dispositivos más cercanos a falla permanente (Ramírez Castaño, 2003).

### 1.1 Funcionamiento de los equipos de protección, corte y maniobra

A continuación, se describe el funcionamiento de cada uno de los equipos que hacen parte de la formulación binaria del SAIDI.

- **Fusible:** actúa bajo falla transitoria o permanente, protegiendo equipos, instalación y personas de cortocircuitos, sobre corrientes o anormalidades del sistema. La operación del estado abierto - cerrado es de forma manual. (Cervantes Vega, 2000).
- **Reconectador:** El restaurador (o reconectador) es un equipo que en condición de sobre corriente interrumpe el paso de esta, transcurrido un tiempo determinado vuelve a su estado de cierre, permitiendo la energización de todo el sistema nuevamente. Si la falla continúa estando presente, los reconectadores repiten la secuencia de apertura – cierre con un máximo de 4 repeticiones. Llegado el caso de cumplir con este límite queda en posición abierto definitivamente (Lockout), (Cervantes Vega, 2000).
- **Interruptor:** Los interruptores como seccionalizadores operan en caso de fallas permanentes y en coordinación con un reconectador aguas arriba. Cuando ocurre una falla permanente inmediatamente después de un seccionalizador, este espera la respuesta de un reconectador aguas arriba. El reconectador realiza un conjunto de operaciones de reenganche rápido. Como la falla es permanente, la falla no se borra, por lo que el reconectador realiza el siguiente conjunto de operaciones demoradas. El seccionalizador abre automáticamente la línea durante estas operaciones evitando el bloqueo del reconectador. En el caso de los interruptores manuales, los interruptores no abren automáticamente la línea durante estas operaciones de reenganche retardado y, por lo tanto, el reconectador se bloquea (Tio & Cruz, 2013).

- **Fusibles con esquema guarda-fusible:** Los reconectores poseen al menos dos curvas de operación, una rápida y una lenta, esto es muy ventajoso para coordinarlos con otras protecciones, si se requiere discriminar entre fallas temporales y permanentes. El esquema guarda fusibles consiste en la coordinación que se tiene entre un reconector y un fusible, donde el reconector debe operar antes que el fusible, de tal forma que la curva de operación mínima del fusible este por encima de alguna curva de operación del reconector.
- **Suplencia (líneas de conexión con otros circuitos):** La línea de conexión con otros circuitos es utilizada en caso de una falla permanente. Esta acción se lleva a cabo con la coordinación de un reconector e interruptor, los cuales reconfiguran el sistema de tal forma que la falla es aislada y los clientes desde el equipo de corte aguas abajo de la falla hasta la suplencia son energizados, teniendo así clientes que presentan fallas permanentes (clientes aislados, los cuales son los principales afectados) y temporales (clientes aguas abajo del equipo que aísla la falla).

## 1.2 Especificaciones técnicas de los equipos

Los OR establecen las especificaciones que deben de tener sus activos, con el fin de poder tener facilidades para realizar mantenimientos, comprar repuestos, actualizar la tecnología, y permitir la comunicación (para equipos como reconectores, seccionalizadores, entre otros). La ESSA cuenta con una ficha técnica de evaluación para la compra de equipos donde contiene las especificaciones mínimas.

Dicha ficha para los equipos como seccionalizadores o reconectadores, para un nivel de tensión 2, se encuentra en el anexo A de este trabajo.

## **2. Metodología para la ubicación de equipos de protección, corte y maniobra**

En la Figura 2 se presenta la metodología que permite determinar la ubicación óptima de equipos de protección, corte y maniobra en un sistema de distribución, esto se logra mediante la formulación propuesta por (Tio & Cruz, 2013), la cual permite expresar el índice de confiabilidad SAIDI en términos de la ubicación de equipos tales como: reconectadores, seccionalizadores, fusibles, fusibles con esquema guarda fusible y suplencias con otros circuitos. La ubicación de los equipos en el sistema se obtiene utilizando un algoritmo de programación no lineal entera para la minimización de la ecuación propuesta por dicha formulación.

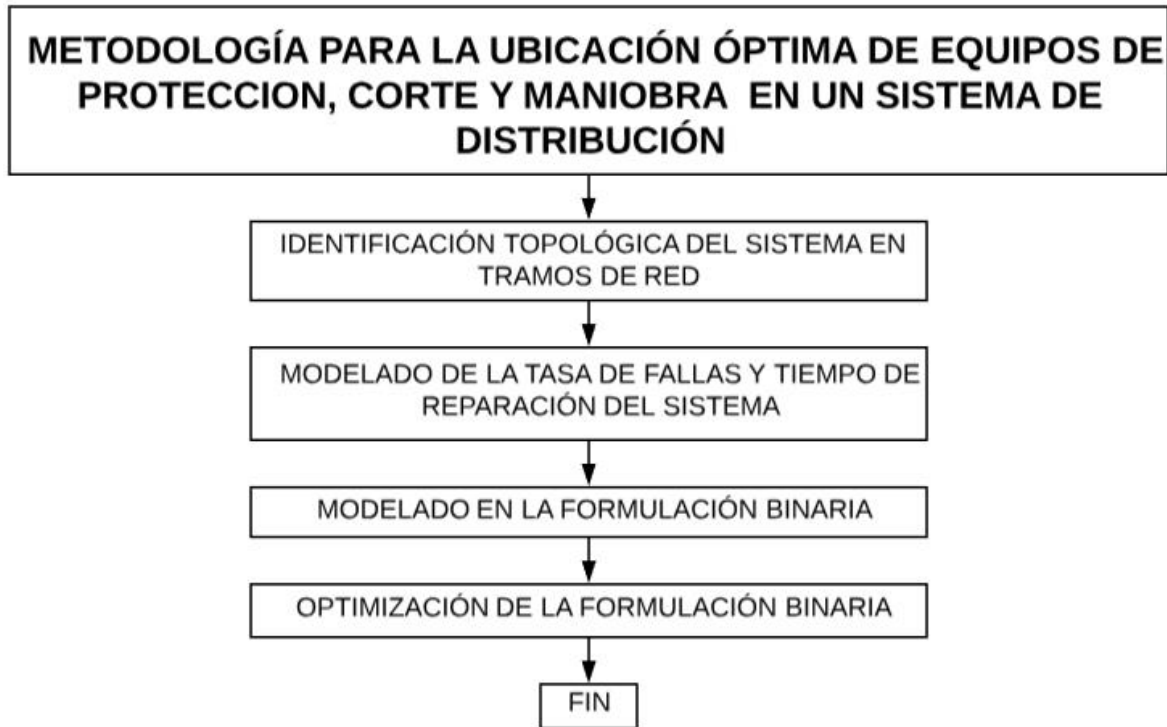


Figura 2. Metodología para la ubicación de equipos de protección, corte y maniobra en un sistema de distribución

A continuación, se presenta cada uno de los pasos de la metodología y su aplicación en este trabajo.

## 2.1 Identificación topológica del sistema en tramos de red

Para realizar una evaluación de confiabilidad en el sistema de distribución, es fundamental modelar la red a través de una descripción topológica de tramos de alimentador, donde cada uno de estos puede ser una posible ubicación de equipos. Esto ocasiona que los clientes que estén ubicados en un mismo tramo estén sujetos a las mismas estrategias de restauración frente a una falla. En la figura 3 se presenta una topología a manera de ejemplo, donde se cuenta con un sistema de 12

tramos, esto quiere decir que se tienen 12 posibles ubicaciones de equipos, los tramos 7, 8, 9, 10, 11 y 12 corresponden a los posibles puntos de suplencia con otros circuitos.

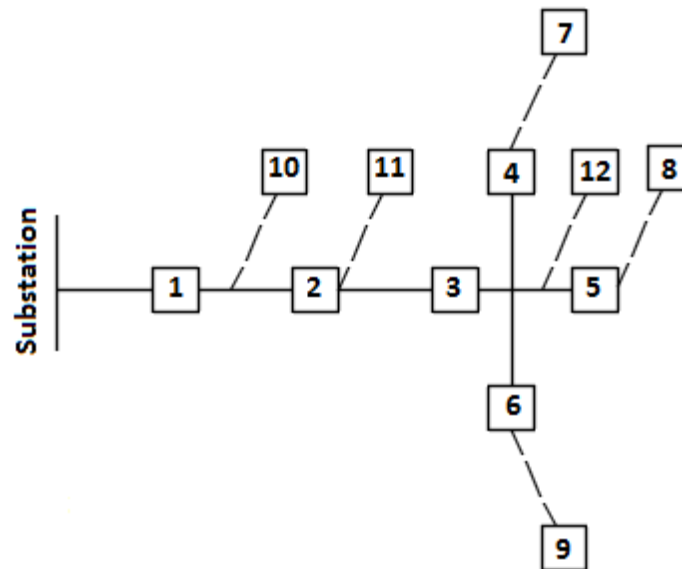


Figura 3. Ejemplo de topología de 12 tramos. Adaptado de: (Tio & Cruz, 2013)

**2.1.1 Tramos de red del caso de estudio.** El caso de estudio corresponde al circuito Cuatro Palenque de la ESSA. Las consideraciones que se tienen en cuenta para este estudio corresponden a la inclusión de equipos de protección y/o maniobra. Los equipos fusibles y fusibles con esquema guarda fusibles no son considerados, ya que el circuito cuenta actualmente con estos. En la figura 4 se presenta el diagrama topológico del circuito de estudio.

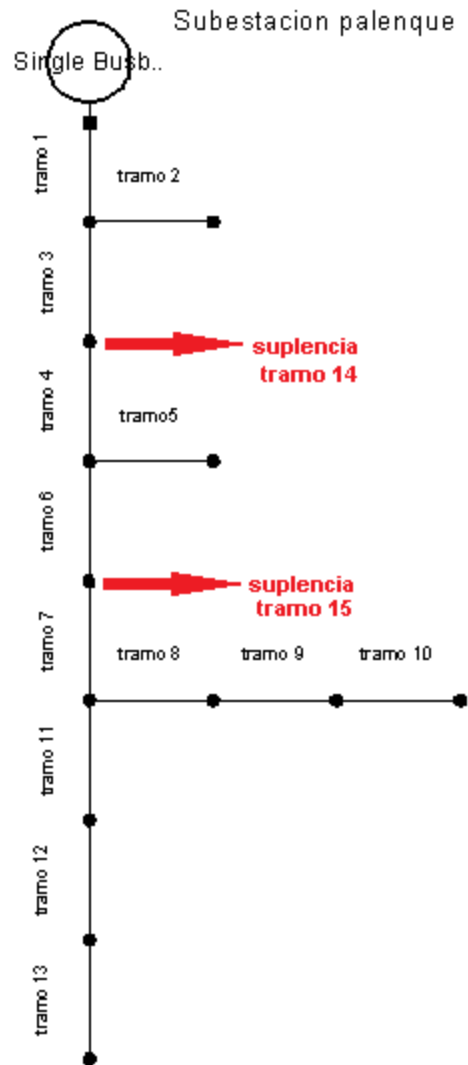


Figura 4. Diagrama topológico del caso de estudio

La cantidad de tramos puede variar dependiendo de los usuarios que se quieren incluir en cada uno de estos, ya que frente a una falla se busca tener un número pequeño de clientes afectados, esto a su vez, implícitamente ayuda a disminuir el índice de confiabilidad SAIFI ya que este se expresa como:

$$SAIFI = \frac{\sum \text{número de usuarios afectados por interrupción}}{\text{número de usuarios del sistema}} \quad (1)$$

En este caso de estudio se busca concentrar la mínima cantidad posible de usuarios, debido a que estos no se encuentran ubicados uniformemente a lo largo del sistema, teniendo así, distinto número de usuarios por tramo. Adicional a esto, se consideraron aspectos de instalación del equipo, como lo es, el no requerir trabajos adicionales como el cambio del apoyo para instalar el dispositivo.

Los equipos existentes en este sistema se encuentran en los tramos 2, 5, 10 y 13, en donde se tiene una posible ubicación de equipos, la cual se encuentra estratégicamente aguas arriba de estos, con el fin de garantizar que no se tenga un problema de coordinación de protecciones al ubicar los nuevos equipos. En el análisis del SAIDI, en el modelo real del sistema, se tendrán en cuenta todos los equipos (existentes y nuevos).

## **2.2 Modelado de la tasa de fallas y tiempos de reparación en el sistema de distribución**

Las fallas presentes en un sistema de distribución se clasifican según su origen en temporales o permanentes. Las fallas temporales son aquellas que tienen un tiempo corto de permanencia en el sistema, el cual depende de los equipos involucrados en el despeje de esta. Los flameos en los aisladores que son producidos por las descargas atmosféricas son un ejemplo de falla temporal o transitoria, como también lo son el contacto de ramas de árbol con las líneas. Una falla temporal que no sea despejada rápidamente puede convertirse en permanente.

Las fallas permanentes son aquellas que persisten así se cuente con una alta rapidez de desenergización del circuito o despeje de falla. Por ejemplo, si dos conductores o más de un sistema de distribución aéreo se juntan, debido a la ruptura del poste, crucetas o conductores, la falla será permanente (Ramírez Castaño, 2003).

Es por esto, que, si a lo largo de un circuito de distribución no se contemplan equipos de protección de sobre corriente, las fallas que se puedan presentar en cualquier punto de este causarían una interrupción de energía eléctrica a todos los usuarios atendidos en el sistema, lo cual, a su vez, trae como consecuencia la disminución del nivel confiabilidad.

En este trabajo se analizan las variaciones del índice de confiabilidad SAIDI con respecto a la ubicación de equipos de protección a lo largo de un circuito de distribución, partiendo de la caracterización de un modelo de fallas en un determinado periodo de tiempo. Buscando observar y evaluar cómo se hubiera comportado el sistema en un mismo escenario de fallas contando con diferentes configuraciones de equipos.

Los modelos se basan en los datos de los eventos de fallas, tales como: el número de fallas, el tiempo de ocurrencia y tiempo requerido para cada reparación. La fiabilidad de estos modelos depende directamente de la cantidad de datos, es por esto por lo que en la construcción de los modelos probabilísticos se presentan los siguientes problemas:

- No se presentaron fallas o no se lleva un registro detallado de estas.
- No todos los equipos que conforman el sistema cuentan con una tasa de falla durante su periodo de vida útil. En algunos casos basta con aumentar el tiempo de observación de la operación de este y así poder tener un registro más amplio de las fallas. Es frecuente en equipos que en su funcionamiento no necesitan de partes móviles tales como pararrayos, transformadores de medida, condensadores, entre otros (Zapata, 2005)

El método utilizado en este trabajo para construir el modelo consistió en el agrupamiento de información de los componentes, esto es debido a que los registros de fallas de cada uno de los componentes que conforman el sistema de estudio no cuentan con la información desde la entrada en operación, esto tiene como consecuencia no obtener tasas de fallas en algunos componentes.

La agrupación fue realizada por tramos de líneas de distribución de 13,2 kV, ya que, la formulación binaria contempla que el modelo debe ser de las fallas presentes solo en las líneas (o tramos de red).

**2.2.1 Tasa de fallas y tiempos de reparación.** Para el cálculo de la tasa de fallas se debe contar con los eventos ocurridos durante la ventana de estudio y se define como:

$$\lambda = \text{tasa de fallas} = \frac{\text{cantidad de fallas}}{\text{longitud de las líneas expuestas a falla} \times \text{tiempo de estudio}} \quad (2)$$

Donde la longitud se da en kilómetros y el tiempo de estudio en años. Adicional a esto, el tiempo de interrupción de un tramo frente a una falla está dado por:

$$r = \text{tiempo de reparación} = \frac{\text{duración total de las fallas}}{\text{número total de fallas}} \quad (3)$$

Donde la duración total de las fallas se da en horas, este tiempo de reparación consiste en el tiempo promedio para cada uno de los elementos agrupados.

**2.2.2 Modelado de la tasa de fallas y tiempos de reparación en el caso de estudio.** El circuito seleccionado tiene un registro de eventos correspondiente a los años 2015, 2016 y 2017. En este se evidencian las causas de los eventos y los equipos que actuaron en cada uno de estos, teniendo así, un total de 81 fallas permanentes y 151 fallas temporales. Adicional a esto se cuenta con la distancia total en kilómetros del circuito. Los datos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.

*Datos de las fallas del caso de estudio*

| No. de fallas permanentes | No. de fallas temporales | Longitud Tota [km] | Tasa de Fallas Permanente<br>$[\frac{fallas}{km \times año}]$ | Tasa de Fallas Temporal<br>$[\frac{fallas}{km \times año}]$ | Duración total de falla [hora] | Tiempo promedio Reparación [hora] |
|---------------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 81                        | 151                      | 12,7836            | 2,1121                                                        | 3,9373                                                      | 142,4922                       | 1,7592                            |

La formulación utilizada en esta metodología requiere de los datos de tasa de fallas y duración de las fallas por cada tramo, estos se obtienen multiplicando la tasa de fallas permanente y temporal total dada en fallas sobre kilómetro-año por la longitud del tramo, los valores se muestran en la Tabla 2. Los tramos 14 y 15 no deben presentar tasa de falla permanente ni tasa de falla temporal, ya que estos puntos deben tener alta confiabilidad.

Tabla 2.

*Información de tasas y duración de fallas de los tramos en el circuito de estudio*

| Tramo | Tasa de Fallas Permanentes<br>$[\frac{fallas}{km \times año}]$ | Tasa de Fallas Temporales<br>$[\frac{fallas}{año}]$ | Duración de la falla [hora] |
|-------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| 1     | 0,748135447                                                    | 1,394672254                                         | 1,759162963                 |
| 2     | 2,212195066                                                    | 4,12396858                                          | 1,759162963                 |
| 3     | 0,838969513                                                    | 1,564004895                                         | 1,759162963                 |
| 4     | 1,897962464                                                    | 3,53817694                                          | 1,759162963                 |
| 5     | 0,998929725                                                    | 1,862202327                                         | 1,759162963                 |
| 6     | 0,915853315                                                    | 1,707331489                                         | 1,759162963                 |
| 7     | 1,458553436                                                    | 2,719031714                                         | 1,759162963                 |
| 8     | 0,619186852                                                    | 1,154286601                                         | 1,759162963                 |
| 9     | 0,29114972                                                     | 0,542760589                                         | 1,759162963                 |

| Tramo | Tasa de Fallas                                  | Tasa de Fallas                       | Duración<br>de la falla<br>[hora] |
|-------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
|       | Permanentes<br>$[\frac{fallas}{km \times año}]$ | Temporales<br>$[\frac{fallas}{año}]$ |                                   |
| 10    | 0,423560008                                     | 0,789599521                          | 1,759162963                       |
| 11    | 2,060349452                                     | 3,84089836                           | 1,759162963                       |
| 12    | 1,689770878                                     | 3,150066699                          | 1,759162963                       |
| 13    | 12,84538412                                     | 23,94633337                          | 1,759162963                       |
| 14    | 0                                               | 0                                    | 0                                 |
| 15    | 0                                               | 0                                    | 0                                 |

### 2.3 Estimación del índice de confiabilidad SAIDI

El índice de confiabilidad SAIDI está definido como la suma de las duraciones de las interrupciones en un periodo de tiempo dado sobre el número total de clientes, este también puede expresarse en función de la ubicación de equipos de protección como lo presenta adonis Emmanuel en el 2013 (Tio & Cruz, 2013), empleando una formulación Binaria del SAIDI en función de la ubicación de cinco tipos de equipos, los cuales son: reconectadores, fusibles, fusibles con esquema guarda fusible, seccionalizadores y suplencias del circuito con otros circuitos aledaños.

**2.3.1 Componentes de la formulación binaria del saidi en función de la ubicación de equipos.** Las variables de decisión binarias correspondientes a los equipos se definen como:

- $X_{i\ 1}$  = toma un valor de 0 si el reconectador ubicado en el tramo i es deseado, de lo contrario toma un valor de 1.
- $X_{i\ 2}$  = toma un valor de 0 si el fusible ubicado en el tramo i es deseado, de lo contrario toma un valor de 1.

- $X_{i\ 3}$  = toma un valor de 0 si el seccionalizador ubicado en el tramo  $i$  es deseado, de lo contrario toma un valor de 1.
- $X_{i\ 4}$  = toma un valor de 0 si el fusible con esquema guarda fusibles ubicado en el tramo  $i$  es deseado, de lo contrario toma un valor de 1.
- $X_{i\ 5}$  = corresponde a los puntos donde se encuentran las suplencias, y toma un valor de 0 si la suplencia ubicada en el tramo  $i$  es deseada, de lo contrario toma un valor de 1.

Las variables de entrada para esta formulación son:

- $L$ : Es el conjunto de todos los tramos del circuito
- $\lambda_i$ : Es la tasa de fallas permanente del tramo  $i$  en fallas por año
- $\gamma_i$ : Es la tasa de falla temporal del tramo  $i$  en fallas por año
- $r_i$ : Corresponde a la tasa de reparación del tramo  $i$  en horas
- $r_{sw}$ : Es el tiempo de actuación del sistema
- $r_{TL}$ : Es el tiempo de actuación de las suplencias
- $N_t$ : Es el número total de consumidores
- $N'_i$ : Es el número total de consumidores aguas abajo del tramo  $i$  (incluyendo el tramo  $i$ )
- $E_{(i)}$ : Es el conjunto de tramos aguas abajo del tramo  $i$  (excluyendo las suplencias)
- $F_{(i)}$ : Es el conjunto de tramos en la trayectoria desde la subestación hasta el tramo  $i$  (incluyendo el tramo más cercano a la subestación y excluyendo el tramo  $i$ )
- $G_{(j,i)}$ : Es el conjunto de tramos en la trayectoria desde el tramo  $j$  hasta el tramo  $i$ , estando  $j$  aguas arriba de  $i$  (excluyendo  $j$  e incluyendo  $i$ )
- $G'_{(j,i)}$ : Es el conjunto de tramos en la trayectoria desde  $j$  hasta  $i$ , estando  $j$  aguas arriba de  $i$  (excluyendo  $j$  e  $i$ )
- $H_{(i)}$ : Es el conjunto de suplencias aguas debajo de  $i$

- $h_{(j,i)}$ : Es el primer tramo en la trayectoria desde j hasta i (excluyendo j e incluyendo i).

A manera de ejemplo, en el anexo B se presentan algunos conjuntos de tramos que son parte de este trabajo, basados en la figura 4, los tramos 14 y 15 corresponden a los puntos de suplencia con otros circuitos. Es de resaltar que, el tiempo de actuación del sistema (tiempo para llevar acabo el aislamiento de los tramos con falla) y el tiempo de actuación de la suplencia (tiempo de cierre del equipo de maniobra, este debe ser mayo al tiempo del aislamiento de las fallas), dependerán de ciertos aspectos técnicos, los cuales son establecidos en este caso por la ESSA. la CREG estipula en la resolución 015 del 2018, que las fallas menores a tres minutos serán excluidas para el cálculo de los índices de confibilidad, basado en esto, los tiempos en este trabajo son menores a dicho límite de tiempo

Esta formulación se divide en cuatro grupos de posibles escenarios a los cuales un sistema puede dar solución ante una falla permanente.

- **Grupo 1. A1 – A4**

Este grupo modela un aislamiento de fallas sencillo basado en reconectadores y fusibles, donde la expresión A1 denota todos los consumidores aguas abajo de la falla en el tramo i que experimentan una duración de falla sostenida de  $r_i$ , A2 denota la cantidad de clientes que se encuentran entre el tramo de falla i y el reconectador o fusible más cercano aguas arriba, A3-A4 denotan la cantidad de consumidores que se pueden ver afectados por una falla temporal al tener un fusible aguas arriba de la falla (Tio & Cruz, 2013):

$$A_1 = \sum_{i \in L} \lambda_i N'_i r_i \quad (4)$$

$$A_2 = \sum_{i \in L} \lambda_i r_i \sum_{j \in f(i)} (N'_j - N'_{h(j,i)}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k4} \quad (5)$$

$$A_3 = \sum_{i \in L} r_i N'_i \gamma_i (1 - x_{i2}) \quad (6)$$

$$A_4 = \sum_{i \in L} \lambda_i r_i \sum_{j \in f(i)} N'_j (1 - x_{j2}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} \quad (7)$$

• **Grupo 2. A5 – A8**

Este grupo modela un escenario de restauración aguas abajo, en el cual se restablece el servicio de energía eléctrica a los consumidores que no están directamente afectados por una falla. Esto es posible si el equipo aguas arriba del tramo con falla es un reconectador, y a su vez, se cuenta con un reconectador o seccionalizador aguas abajo con puntos de suplencia, de tal manera que se pueda aislar el tramo fallado (Tio & Cruz, 2013):

$$A_5 = - \sum_{i \in L} \lambda_i (1 - x_{i1}) (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in E(i)} (1 - x_{j1}) N'_j (1 - \prod_{k \in H(j)} x_{k5}) \prod_{k \in G'(i,j)} x_{k1} x_{k3} \quad (8)$$

$$A_6 = - \sum_{i \in L} \lambda_i (1 - x_{i1}) (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in E(i)} (1 - x_{j3}) N'_j (1 - \prod_{k \in H(j)} x_{k5}) \prod_{k \in G'(i,j)} x_{k1} x_{k3} \quad (9)$$

$$A_7 = - \sum_{i \in L} \lambda_i (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in F(i)} (1 - x_{j1}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k3} x_{k4} \sum_{m \in E(j)} (1 - x_{m1}) N'_m (1 - \prod_{n \in H(m)} x_{n5}) \prod_{o \in G'(j,m)} x_{o1} x_{o3} \quad (10)$$

$$A_8 = - \sum_{i \in L} \lambda_i (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in F(i)} (1 - x_{j1}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k3} x_{k4} \sum_{m \in E(j)} (1 - x_{m3}) N'_m (1 - \prod_{n \in H(m)} x_{n5}) \prod_{o \in G'(j,m)} x_{o1} x_{o3} \quad (11)$$

- **Grupo 3. A9 – A10**

Este grupo modela un escenario de restauración aguas arriba de la falla, es posible si se cuenta con un seccionalizador y reconectador aguas arriba de la falla (donde el reconectador está aguas arriba del seccionalizador), haciendo que los consumidores que están ubicados en la trayectoria de estos dos equipos no tengan un corte del suministro permanente (Tio & Cruz, 2013):

$$A_9 = - \sum_{i \in L} \lambda_i (1 - x_{i3}) (r_i - r_{sw}) \sum_{j \in F(i)} (N'_j - N'_{h(j,i)}) \prod_{k \in G'(j,i)} x_{k1} \quad (12)$$

$$A_{10} = - \sum_{i \in L} \lambda_i (r_i - r_{sw}) \sum_{j \in F(i)} (1 - x_{j3}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k3} x_{k4} \sum_{m \in F(i)} (N'_m - N'_{h(m,j)}) \prod_{n \in G'(m,j)} x_{n1} \quad (13)$$

- **Grupo 4. A11 – A14**

Este grupo modela un escenario de restauración aguas abajo, en el cual se restablece el servicio de energía eléctrica a los consumidores que no están directamente afectados por una falla. Esto es posible si el equipo aguas arriba del tramo con falla es un seccionalizador, y a su vez, se cuenta con un reconectador o seccionalizador aguas abajo con puntos de suplencia, de tal manera que se pueda aislar el tramo fallado (Tio & Cruz, 2013):

$$A_{11} = - \sum_{i \in L} \lambda_i (1 - x_{i3}) (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in E(i)} (1 - x_{j1}) N'_j (1 - \prod_{k \in H(j)} x_{k5}) \prod_{k \in G'(i,j)} x_{k1} x_{k3} \quad (14)$$

$$A_{12} = - \sum_{i \in L} \lambda_i (1 - x_{i3}) (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in E(i)} (1 - x_{j3}) N'_j (1 - \prod_{k \in H(j)} x_{k5}) \prod_{k \in G'(i,j)} x_{k1} x_{k3} \quad (15)$$

$$A_{13} = - \sum_{i \in L} \lambda_i (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in F(i)} (1 - x_{j3}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k3} x_{k4} \sum_{m \in E(j)} (1 - x_{m1}) N'_m (1 - x_{n5}) \prod_{o \in G'(j,m)} x_{o1} x_{o3} \quad (16)$$

$$A_{14} = - \sum_{i \in L} \lambda_i (r_i - r_{TL}) \sum_{j \in F(i)} (1 - x_{j3}) \prod_{k \in G(j,i)} x_{k1} x_{k2} x_{k3} x_{k4} \sum_{m \in E(j)} (1 - x_{m3}) N'_m (1 - x_{n5}) \prod_{o \in G'(j,m)} x_{o1} x_{o3} \quad (17)$$

**2.3.2 Formulación binaria del SAIDI.** La formulación binaria del SAIDI en función de la ubicación de equipos corresponde a la sumatoria de los casos que componen los grupos expuestos anteriormente, dividido en el número total de clientes,  $N_t$ .

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^{14} A_i}{N_t} \quad (18)$$

De esta manera se tiene la ecuación del SAIDI para un circuito en particular, donde se puede lograr un análisis de los beneficios de cada una de las ubicaciones seleccionadas para la toma de decisiones.

Esta formulación fue programada en Matlab 2018 licenciado por la universidad industrial de Santander.

## 2.4 Optimización de la formulación binaria del SAIDI

La optimización de la ecuación (18) para el SAIDI garantiza su valor mínimo posible dependiendo de variables de entrada y de las restricciones, las cuales definen la coordinación de protecciones

entre los equipos, cantidad de equipos, entre otras. Por ende, son planteadas según el escenario de estudio debido a que los intereses para cada uno de estos no son los mismos.

**2.4.1 Restricciones para el problema de optimización.** Una de las restricciones para tener en cuenta corresponde a la coordinación de equipos de protección y maniobra. Estas restricciones son las más importantes debido a que la toma de decisiones depende de la ubicación óptima de los equipos, las cuales deben aprovechar al máximo las características de cada uno de estos. Por otro lado, se pueden incluir restricciones de tipo económico, donde se tienen en cuenta aspectos de instalación y operación. Las restricciones consideradas en este trabajo corresponden a las siguientes:

- Para la localización de los equipos en un circuito es necesario tener presente que sólo puede haber uno por cada tramo
- Al ser una formulación binaria, las variables de decisión toman valores de cero o de uno
- En la subestación del sistema debe existir un relé, siendo el tramo 1 el más cercano a la subestación.
- En el alimentador principal solo se utilizan reconectadores.
- La presencia de reconectadores en serie a lo largo de un alimentador debe garantizar el buen funcionamiento de estos, con el fin de aprovechar al máximo sus características de diseño.
- Con el fin de tener una buena coordinación de equipos de protección en el sistema, no se tiene aguas arriba de un reconector fusibles (especialmente en los ramales).
- Debido a la operación, no se instalan reconectadores aguas abajo de fusibles.

- Adicionalmente, la cantidad de equipos a utilizar corresponde a la restricción principal para todos los casos, debido al costo de compra e instalación de cada uno de estos.

En el anexo C se presentan las restricciones utilizadas en el caso de estudio las cuales se encuentran formuladas como ecuaciones.

La respectiva optimización binaria de la ecuación (18) para el SAIDI se llevó acabo en Matlab 2018 licenciado por la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

### **3. Resultados de la metodología en el caso de estudio**

La ecuación (18) del índice de confiabilidad SAIDI para el caso de estudio se encuentra en el anexo D. Para la optimización se plantean 10 escenarios, donde cada uno de estos posee un número determinado de equipos, a su vez, dependen de la cantidad maxima de equipos a instalar (4 reconectadores y 5 seccionalizadores), adicional a esto, se analiza cómo se comporta el sistema al ingresar seccionalizadores, dejando fijo un número de reconectadores. La cantidad de escenarios en este estudio fue recomendada por los funcionarios de ESSA, ver Tabla 3, donde:

- NR= Número de reconectadores
- NS= Número de seccionalizadores
- NI= Número de Suplencias
- PR= Posición de reconectadores (resultado del proceso de optimización)
- PS= Posición de seccionalizadores (resultado del proceso de optimización)
- PI= Posición de Suplencias (resultado del proceso de optimización)

Tabla 3.

*Ubicación de los equipos para 10 escenarios de análisis en el caso de estudio*

| Escenario | NR | NS | NI | PR      | PS           | PI    |
|-----------|----|----|----|---------|--------------|-------|
| 1         | 1  | 1  | 2  | 4       | 0            | 15-14 |
| 2         | 1  | 2  | 2  | 4       | 11-13        | 15-14 |
| 3         | 1  | 3  | 2  | 4-6     | 8-11-13      | 15-14 |
| 4         | 2  | 1  | 2  | 4-6     | 13           | 15-14 |
| 5         | 2  | 2  | 2  | 4-6     | 11-13        | 15-14 |
| 6         | 2  | 3  | 2  | 4-6     | 8-11-13      | 15-14 |
| 7         | 3  | 2  | 2  | 3-4-6   | 11-13        | 15-14 |
| 8         | 3  | 3  | 2  | 3-4-6   | 8-11-13      | 15-14 |
| 9         | 3  | 4  | 2  | 3-4-6   | 8-10-11-13   | 15-14 |
| 10        | 4  | 5  | 2  | 3-4-6-7 | 2-8-10-11-13 | 15-14 |

### 3.1 Impacto en el SAIDI para cada escenario de optimización

Cada uno de los escenarios de optimización se evaluó en el modelo completo del sistema en estudio, el cual se encuentra implementado en PowerFactory de DIgSILENT, realizando un análisis de confiabilidad con tal programa de simulación. El aporte que tiene cada una de las ubicaciones de equipos para cada escenario con respecto al índice de confiabilidad SAIDI se presenta a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4.

*Valores del índice SAIDI para cada uno de los escenarios*

| Escenario | SAIDI<br>[horas/año] | Disminución del SAIDI |
|-----------|----------------------|-----------------------|
| 1         | 3,496                | 25,16%                |
| 2         | 3,39                 | 27,47%                |

| <b>Escenario</b> | <b>SAIDI<br/>[horas/año]</b> | <b>Disminución del SAIDI</b> |
|------------------|------------------------------|------------------------------|
| 3                | 3,04                         | 34,94%                       |
| 4                | 2,976                        | 36,29%                       |
| 5                | 2,607                        | 44,19%                       |
| 6                | 2,293                        | 44,70%                       |
| 7                | 2,583                        | 50,91%                       |
| 8                | 2,269                        | 51,42%                       |
| 9                | 2,263                        | 51,55%                       |
| 10               | 2,189                        | 53,14%                       |

El porcentaje de disminución de dicho índice se ha calculado con respecto a su valor base o inicial, el cual corresponde a 4,671 horas/año. En la Figura 5 se tiene la gráfica del SAIDI vs la cantidad de equipos, se puede observar que el índice SAIDI decrece, llegando a un punto donde un incremento en la cantidad de equipos no contribuye significativamente en la disminución de este índice.

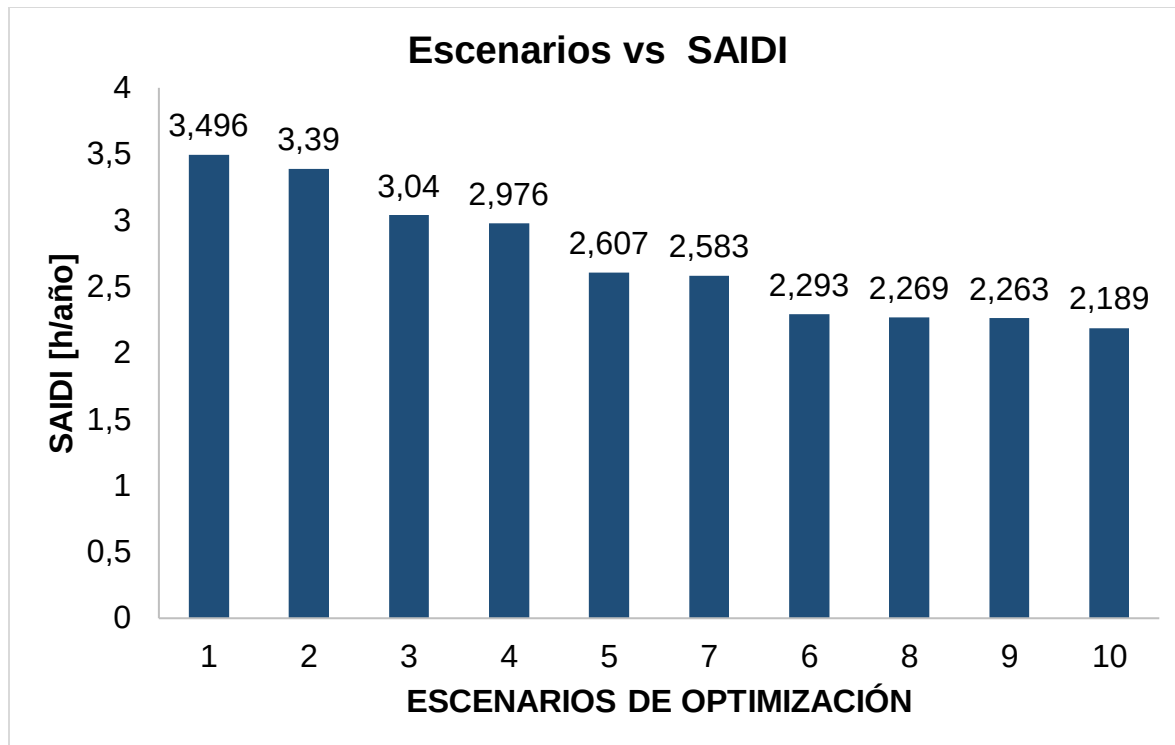


Figura 5. Índice SAIDI para cada escenario de optimización

#### 4. Validación y evaluación de alternativas

El análisis beneficio-costos es una herramienta que permite realizar la toma de decisiones en un proyecto, considerando los ingresos y costos previstos a lo largo de la vida útil como lo son: el costo inicial del proyecto y la remuneración e incentivos expuestos en la resolución CREG 015 del 2017.

El cálculo de la relación beneficio-costos corresponde a:

$$BENEFICIO - COSTO = \frac{VPB}{VPC} \quad (19)$$

Donde VPB es el valor presente de los beneficios y VPC es el valor presente de los costos, y estos a su vez se calculan como:

$$VPB = \sum_{t=0}^T \frac{B_t}{(1 + i_{op})^t} \quad (20)$$

$$VPC = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1 + i_{op})^t} \quad (21)$$

Siendo:

$t = 0, 1, 2, 3, \dots T$ .

$T$  = último período de tiempo.

$B_t$  = beneficios (brutos) en el periodo  $t$

$C_t$  = costos (brutos) en el periodo  $t$

$i_{op}$  = tasa de interés de oportunidad, es la tasa que refleja el costo de oportunidad de los dineros del inversionista.

#### 4.1 Evaluación de alternativas de inversión según la relación beneficio-costos

El criterio para la toma de decisiones es el siguiente:

- Si la relación beneficio-costos es mayor a uno, la inversión es viable, ya que los beneficios que esta puede generar suplen el costo de la inversión, en otras palabras, se obtienen ganancias con la inversión.
- Si la relación beneficio-costos es menor a uno, quiere decir que los beneficios que se pueden obtener no suplen la inversión realizada, teniendo como consecuencia pérdidas.

- Si la relación beneficio-costos es igual a uno, es indiferente la decisión de aceptar o rechazar la inversión, debido a que los beneficios obtenidos son iguales a los costos de inversión, lo cual quiere decir que no existirán ganancias en la realización del proyecto (Mokate, 2004).

#### 4.2 Relación beneficio - costo para el caso de estudio

Los costos y beneficios considerados para evaluar cada uno de los escenarios propuestos se presentan a continuación:

- **COSTOS DE INVERSIÓN:**

La cotización de los equipos realizada por el proveedor de la ESSA corresponde a:

- RECONNECTADOR: \$29'660,631 + IVA
- SECCIONALIZADOR ELECTRÓNICO: \$4'288,284 + IVA

Para la evaluación de la relación beneficio-costos, se debe incluir el costo de la mano de obra para su instalación y el costo del equipo de comunicación. Para esto, la ESSA estipula:

- MANO DE OBRA: 2% (valor del equipo + IVA)
- COMUNICACIONES: \$5'000,000

En la Tabla 5 se presenta el costo de implementación para cada uno de los escenarios de optimización.

Tabla 5.

*Inversión para los escenarios de optimización*

| Escenario | Precio total   |
|-----------|----------------|
| 1         | \$ 40.592.757  |
| 2         | \$ 60.884.639  |
| 3         | \$ 71.030.580  |
| 4         | \$ 91.331.455  |
| 5         | \$ 101.477.396 |
| 6         | \$ 142.070.153 |
| 7         | \$ 111.623.337 |
| 8         | \$ 152.216.094 |
| 9         | \$ 162.362.035 |
| 10        | \$ 213.100.733 |

- **BENEFICIOS:**

Los beneficios están compuestos por:

- **EL PRECIO DE REMUNERACIÓN.** Este incluye: el valor del equipo, el cual es estipulado por resolución, el costo de montaje de este, la ingeniería requerida, la interventoria, la administración de ejecución, inspección y otros gastos financieros. La remuneración de dicha resolución establece que el OR tendrá un ingreso anual equivalente al valor de la unidad constructiva adquirida por este, dividida entre la vida útil del equipo.

La resolución CREG 015 del 2018 presenta los precios de remuneración para las unidades constructivas (Tabla 19. UC de equipos de nivel de tensión 2. Resolución creg 015-2018), en la Tabla 6 se presentan los precios para los equipos utilizados en este trabajo.

Tabla 6.

*Precios de unidades constructivas*

| Unidad constructiva                | Valor unitario |
|------------------------------------|----------------|
| Reconectador nivel de tensión 2    | \$45'399.863   |
| Seccionalizador nivel de tensión 2 | \$24'698.141   |

- **INCENTIVO (PARA EL OR) POR INVERSIÓN:** Se establece como:

$$incentivo\ i = valor\ de\ unidad\ constructiva \times \left(1 - \frac{año\ i - 1}{vida\ útil}\right) \\ \times wacc\ nivel\ 2\ (22)$$

En donde: la vida útil es de 45 años, y el wacc nivel 2 es de 11,8%.

La evaluación de la relación beneficio-costos para cada uno de los escenarios planteados en la optimización se presenta en la Tabla 7, la ESSA utiliza una tasa de oportunidad, para evaluar sus proyectos, igual a 9,79%.

Tabla 7.

*Relación beneficio-costos para los escenarios de optimización*

| Escenarios | Relación beneficio-<br>costo |
|------------|------------------------------|
| 1          | 1,297                        |
| 2          | 1,805                        |
| 3          | 1,9505                       |
| 4          | 1,4662                       |
| 5          | 1,602                        |
| 6          | 1,5146                       |
| 7          | 1,7127                       |
| 8          | 1,6018                       |
| 9          | 1,6780                       |

| Escenarios | Relación beneficio-<br>costo |
|------------|------------------------------|
| 10         | 1,6599                       |

## 5. Análisis y discusión de resultados

La toma de decisiones se lleva a cabo con los resultados obtenidos en la Sección 3.1, los cuales corresponden a los valores de SAIDI en el modelo completo del sistema, para cada una de las ubicaciones obtenidas con la metodología descrita en el Capítulo 2. Es así como se estudia el comportamiento del sistema al agregar dispositivos de protección, corte y maniobra.

La resolución CREG 015 del 2018 establece una disminución anual del 8% para los índices de confiabilidad SAIDI y SAIFI, con el fin de lograr unas metas de largo plazo de 2 horas/año y 9 interrupciones/año, respectivamente. Es por esta razón que la toma de decisiones entre los escenarios planteados debe cumplir con la reducción correspondiente a los 5 años del periodo tarifario.

El valor límite del índice SAIDI que debe cumplir cada uno de los escenarios se obtiene como:

$$valor\ límite = SAIDI_{base}(0.92)^n \quad (23)$$

Siendo el SAIDI base 4,671 horas/año y n el número de años (5 años), se calcula que índice SAIDI límite es de 3,078 horas/año. Los escenarios 1 y 2 planteados en la optimización no cumplen con dicho límite, y por esta razón son descartados. Cabe resaltar que, para los escenarios de estudio, se presenta una saturación de la disminución del índice al aumentar el número de equipos de protección, corte y maniobra como se aprecia en la Figura 5 para los escenarios 6, 8, 9 y 10. La

diferencia en los valores del índice SAIDI para los escenarios mencionados es de centésimas de hora/año, teniendo así impactos similares sobre el índice SAIDI con diversos valores de inversión.

Las decisiones también dependen del inversionista que evalúa el proyecto. Si es evaluado por el usuario, dependerá del aumento del costo por kilovatio-hora que esté dispuesto a pagar, cabe destacar que son los usuarios del sistema los que pagan vía tarifa cada uno de los activos adquiridos por el OR. Por otro lado, el OR puede escoger cualquier escenario que cumpla con sus metas previstas independientemente del costo que este genere a los usuarios.

La relación beneficio-costos de cada uno de los escenarios de optimización (Tabla 7) es favorable según los criterios presentados en la Sección 4.1. La variación que se presenta es debida al valor de remuneración de los seccionadores, ya que este es el doble de la inversión necesaria, haciendo que en los escenarios donde el número de reconectores sea el mismo y se presente un mayor número de seccionadores, la relación beneficio-costos aumente, como se aprecia en la Tabla 7 para los casos 4, 5 y 7.

El escenario recomendado de ubicación de equipos para el restablecimiento automático corresponde al número 3 (1 reconector y 3 seccionadores), logrando una reducción del 34,94% del índice de confiabilidad SAIDI, lo cual cumple con el límite de reducción establecido por la CREG. Con esta implementación, la cual es la más económica de los escenarios estudiados, se busca que los usuarios del sistema perciban la menor alza en su tarifa.

## 6. Conclusiones

- La metodología aplicada permitió encontrar diferentes soluciones para el problema de ubicación de equipos para un restablecimiento automático en un circuito del área metropolitana de Bucaramanga perteneciente a la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.
- La formulación permite ubicar cierta cantidad deseada de equipos de protección, corte y maniobra, utilizando un algoritmo de optimización con el fin de garantizar un valor límite del índice SAIDI.
- La adquisición de los equipos depende de las características constructivas estipuladas por el OR con el fin de tener una misma tecnología, permitiendo la compatibilidad para coordinación, maniobras y telecomunicación entre equipos.
- El análisis de la relación costo-beneficio para los escenarios propuestos en la optimización son favorables, cabe destacar que donde se emplean los seccionalizadores se obtiene un mayor beneficio, esto es porque el precio de la unidad constructiva es mayor (aproximadamente el doble) del valor de compra del equipo.

## 7. Recomendaciones

- Para garantizar una buena ubicación de equipos, se debe contar con el modelo aproximado de tasa de fallas del sistema, ya que, es de esta manera que la optimización de la formulación busca identificar principalmente los tramos de red más afectados.
- El modelo topológico del sistema, el cual es fundamental para la metodología, debe contar con datos esenciales por tramo como tasa de fallas, longitud y número de usuarios. Esto hace que la aplicación de la metodología requiera un tiempo de cómputo considerable, si el número de tramos es significativamente alto y si se asume que en cada uno de estos es posible ubicar un equipo de protección, corte o maniobra.

### Referencias Bibliográficas

- Arriagada Mass, A. G. (1994). *Evaluacion de confiabilidad en sistemas electricos de distribucion*. Santiago De Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile.
- Billinton, R., & Jonnavithula, S. (1996). Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(3), 1646-1651.
- Billinton, R., & R.N, A. (1984). *Reliability Evaluation of Power Systems*. New York: Plenum Press.
- Cervantes Vega, J. R. (2000). *Proteccion en sistemas electricos*. San Nicolas De Los Garza, Nuevo Mexico: Universidad Autonoma De Nuevo Leon.
- G., C. M., & F., P. M. (1999). Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 1167-1172.
- Mokate, K. M. (2004). *Evaluacion financiera de proyectos de inversión*. Bogotá: Alfaomega Colombiana.
- Ramirez Castaño, S. (2003). *Protección de Sistemas Eléctricos*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia Manizales.
- Ramírez Castaño, S. (2014). *Análisis De Datos De Falla*. MANIZALES: Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos Giraldo, M. A. (2016). *Localización óptima de reconectores normalmente abiertos para transferencia de carga*. Pereira, colombia.
- Soudi, F., & Tomsovic, K. (1998). Optimized Distribution Protection Using Binary Programming. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(1), 218-224.

Superintendencia delegada para energía y gas. (2017). *Informe ejecutivo diagnóstico de la calidad del servicio de energía eléctrica en Colombia*. Bogotá.

Tio, A. E., & Cruz, I. (2013). A Binary Formulation of SAIDI for the Predictive Reliability Assessment of Radial Distribution Systems with Tie-lines. *IEEE PES Asia-Pacific*, 1-6.

Toro Giraldo, C., Hincapié Isaza, R., & Gallego R., R. (2011 de 2011). "Ubicación óptima de elementos de protección en sistemas de distribución de energía eléctrica". *Scientia et Technica Año XVI*, 13-18.

W. da Silva, L. G., F. Pereira, R. A., & Sanches Mantovani, J. R. (2010). Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição. *Controle & Automação*, 294-307.

Wesz da Silva, L. G. (2002). *Alocação otimizada de dispositivos de proteção em sistema de distribuição de energia elétrica*. Ilha Solteira.

Zapata, C. J. (2005). Estimación de tasas de fallas de componentes en casos de ausencia de datos o cantidades limitadas de datos. *Redalyc.ORG*, 13-18.

## Apéndices

## Apéndice A. Ficha técnica de reconectador de NIVEL 2

| Ficha técnica de reconectador de NIVEL 2                                                                                       |        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| REQUISITOS GENERALES                                                                                                           |        |           |
| Especificación                                                                                                                 | Cumple | No cumple |
| Nombre del fabricante                                                                                                          |        |           |
| Modelo o referencia                                                                                                            |        |           |
| Debe cumplir las normas de fabricación y ensayos, IEEE C37.60 o NTC5426 o IEC62271-11                                          |        |           |
| Estar diseñado para un Voltaje nominal de 13.2 kV                                                                              |        |           |
| Nivel básico de aislamiento al impulso (BIL) mínimo fase - fase, fase - tierra y entre polos (abierto) de 110 kV               |        |           |
| La corriente de interrupción simétrica al voltaje máximo de diseño y cualquier valor de corriente de disparo es mínimo 12.5 kA |        |           |
| Corriente nominal continua mínima de 630 A                                                                                     |        |           |
| Frecuencia nominal 60 Hz                                                                                                       |        |           |
| Medio de interrupción es vacío                                                                                                 |        |           |
| Medio de aislamiento es resina                                                                                                 |        |           |
| tipo de operación monopolar                                                                                                    |        |           |

| Especificación                                                                                                                                        | Cumple | No cumple |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| El número de operaciones mecánicas y eléctricas sin mantenimiento es mínimo 10000                                                                     |        |           |
| Número de operaciones programables rápidas - retardadas (0-4)                                                                                         |        |           |
| Número de operaciones programables hasta el bloqueo (0-4)                                                                                             |        |           |
| Indicador de estado de apertura y cierre del reconectador en el panel de control y en la potencia                                                     |        |           |
| Permite la visualización del número de operaciones                                                                                                    |        |           |
| Tiempo de apertura total menor a 100 ms                                                                                                               |        |           |
| Tiempo de recierre programable                                                                                                                        |        |           |
| Tiempo de reposición programable y tiempo de arqueado (ms)                                                                                            |        |           |
| <b>CONTROL</b>                                                                                                                                        |        |           |
| Tiene mínimo 3 sensores de corriente tipo y relación apropiado a los valores nominales del reconectador                                               |        |           |
| tiene mínimo 6 sensores de tensión (3 del lado de fuente y 3 en lado de carga), de tipo y relación apropiado a los valores nominales del reconectador |        |           |
| <b>CONTROL</b>                                                                                                                                        |        |           |
| Nombre del fabricante                                                                                                                                 |        |           |
| Modelo o referencia                                                                                                                                   |        |           |
| Debe soportar una temperatura $\geq 65^{\circ}\text{C}$ y la humedad relativa máxima será 95 (%)                                                      |        |           |

| Especificación                                                                                                                                                                                                                      | Cumple | No cumple |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| Incluye mando u operación local: manual (pértiga), disparo, bloqueo                                                                                                                                                                 |        |           |
| Incluye mando u operación desde el panel de control: cierre - disparo - recierres - protecciones - falla a tierra - control (local - remoto)                                                                                        |        |           |
| Incluye mando u operación remoto: cierre - disparo - bloqueo recierres - protecciones - falla a tierra                                                                                                                              |        |           |
| Incluye DPS para protección del control, instalado desde fábrica                                                                                                                                                                    |        |           |
| Cuenta con espacio en el gabinete de control para alojar radio o modem de comunicación (suministrado por el Grupo EPM), además de una salida de alimentación de 12 V DC para la conexión, con su respectiva protección reemplazable |        |           |
| Incluye indicador de estado de baterías y de la fuente de alimentación                                                                                                                                                              |        |           |
| Incluye cable de alimentación y cable de control (interfaz entre control y potencia) de mínimo 6 m de longitud, con sus respectivos pasacables                                                                                      |        |           |
| El control incluye etiquetas de marcación en idioma español                                                                                                                                                                         |        |           |
| El gabinete de control está fabricado con un grado de protección al ingreso de sólidos y líquidos IP55, función trabajo línea viva (Hot Line Tag) y salida de alimentación auxiliar 115 VCA.                                        |        |           |

| Especificación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Cumple | No cumple |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| <b>PROTECCIONES</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |        |           |
| <p>Ajuste independiente y programable de las diferentes curvas de operación instantánea, rápida y lenta, en cada uno de los siguientes parámetros, según aplique: corriente de arranque, dial y tipo de curva</p> <p>La corriente de arranque de la curva rápida podrá parametrizarse como un factor de la corriente de arranque de la curva lenta</p> <p>Permite implementar un esquema "Salvar Fusible" a partir de la selección de mínimo dos curvas de protección diferentes, con ajustes independientes de disparo (I arranque, dial, tipo), para cada uno de los disparos programados</p> <p>Incluye curvas de disparo de fase con ajustes de tiempo-corriente, según IEC60255-151, IEEE C37.112 y preferencias de usuario</p> <p>Incluye curvas de disparo de tierra con ajustes de tiempo-corriente, según IEC60255-151, IEEE C37.112 y preferencias de usuario</p> <p>Valores seleccionables de mínima corriente de disparo (pickup current), de fase programable (5 - 200% <math>I_n</math>), de tierra programable (2.5 - 120% <math>I_n</math>)</p> <p>Debe permitir la coordinación de protecciones con otros equipos o dispositivos de protección</p> |        |           |

| Especificación                                                                                                                                                                | Cumple | No cumple |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| Incluye protección para evitar disparos no deseados por corriente inrush y corriente de arranque en frío, con modificadores de tiempo – corriente acorde al tipo de corriente |        |           |
| Incluye protección de bajo y sobre voltaje                                                                                                                                    |        |           |
| Incluye protección de baja y sobre frecuencia                                                                                                                                 |        |           |
| Incluye selección de al menos 3 grupos de protección, por software y panel de control, e indicación visual en el panel del grupo seleccionado                                 |        |           |
| Incluye función de protección direccional (Tiene la función de inhabilitar el cierre del equipo si el mismo detecta presencia de tensión en sus bornes del lado de carga)     |        |           |
| Incluye función de Loop Automation                                                                                                                                            |        |           |
| Permite el bloqueo manual desde la potencia, anulando el cierre del equipo de forma remota o desde el control                                                                 |        |           |
| Tiene un mínimo de 4 entradas y 4 salidas físicas configurables por el usuario                                                                                                |        |           |

#### MEDIDA

Permite almacenamiento de variables seleccionables por el usuario, en la memoria del equipo. Como mínimo las siguientes: corriente, voltaje de carga, voltaje de fuente, factor de potencia, potencia activa, reactiva, aparente y perfiles de carga

Incluye registro de eventos e históricos

Capacidad de registro de eventos de falla mínimo 500

| Especificación                                                                                                                                                                     | Cumple | No cumple |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| Capacidad de registro de eventos de sistema mínimo 1000                                                                                                                            |        |           |
| Capacidad de registro históricos mínimo 2000                                                                                                                                       |        |           |
| Incluye oscilografía de eventos, con registro de algunos ciclos antes, durante y después del evento.                                                                               |        |           |
| <b>SOFTWARE</b>                                                                                                                                                                    |        |           |
| Permite simulación por software de las variables eléctricas (voltaje y corriente), para pruebas y verificación de ajustes cargados al equipo                                       |        |           |
| Permite cambio de firmware por medio del software de gestión propio del equipo                                                                                                     |        |           |
| Permite configuración de conexión, estableciendo lado fuente, lado carga y fase por polo                                                                                           |        |           |
| Permite ver estado en tiempo real a través del software de gestión                                                                                                                 |        |           |
| Permite configuración de contraseña por nivel de seguridad                                                                                                                         |        |           |
| Tiene interfaz gráfica y amigable al usuario                                                                                                                                       |        |           |
| Se suministran 40 o más licencias de software                                                                                                                                      |        |           |
| Permite la configuración personalizada por el usuario de las entradas y salidas mediante operadores lógicos programables que permitan relacionar variables y parámetros del equipo |        |           |
| Permite configuración de secuencia de polos                                                                                                                                        |        |           |

| Especificación                                                                                                                                                                                                          | Cumple | No cumple |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| Permite copia de ajustes entre grupos de protección                                                                                                                                                                     |        |           |
| Permite realizar copia de la configuración del mapeo entre equipos, permite sincronización de fecha y hora desde software de gestión                                                                                    |        |           |
| Permite visualización gráfica en el software de gestión, de las curvas de protección programadas en el equipo                                                                                                           |        |           |
| El software debe permitir la descarga de información automáticamente y de manera remota en función de una selección de parámetros, horarios y equipos para mantener la información centralizada, completa y actualizada |        |           |
| <b>COMUNICACIONES</b>                                                                                                                                                                                                   |        |           |
| Las variables para monitorear remotamente son como mínimo: estado (abierto - cerrado) estado de bloqueo, variables censadas y de control                                                                                |        |           |
| Maneja protocolos de comunicación DNP3.0 LAN e IEC60870-5-104 nativos del equipo, sin elementos o conversores adicionales                                                                                               |        |           |
| Permite configuración de la banda muerta de las medidas, Independiente por tipo de variable (corriente, voltaje, etc.) y en unidades que correspondan al tipo                                                           |        |           |
| Incluye protección externa reemplazable contra sobre tensiones para el puerto de datos                                                                                                                                  |        |           |

| Especificación                                                                                                          | Cumple | No cumple |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| Ethernet, diferente a la incluida en el diseño de la tarjeta de comunicaciones                                          |        |           |
| Incluye puerto Ethernet 10/100 Base T y puerto serial RS232 nativos del equipo, sin elementos o conversores adicionales |        |           |
| <b>ALIMENTACIÓN</b>                                                                                                     |        |           |
| Incluye UPS con baterías, cargador de baterías y baterías comerciales de reemplazo                                      |        |           |
| Indicar la autonomía del sistema de alimentación (UPS) en horas y operaciones                                           |        |           |
| El sistema de alimentación (UPS) cuenta con un indicador de estado de operación                                         |        |           |
| Incluye transformador de alimentación (0.5 kVA 13200 V/120 V) convencional aceite mineral en los ítems requeridos       |        |           |
| <b>ENSAYOS, SOPORTE, ACCESORIOS Y GENERALIDADES</b>                                                                     |        |           |
| Incluye reporte de pruebas tipo según IEEE C37.60                                                                       |        |           |
| Incluye reporte de ensayos de rutina según IEEE C37.60, en medio digital, para cada uno de los equipos                  |        |           |
| Incluye suministro de protectores de vida silvestre, para los bujes de lado de fuente y carga del reconectador          |        |           |
| La potencia del reconectador Incluye suministro de soportes para la instalación de DPS de media tensión, fijados a esta |        |           |
| Incluye barrajes y conectores para los terminales del reconectador y sensores de                                        |        |           |

| Especificación                                                                                                                                                                                                      | Cumple | No cumple |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------|
| corriente, y soportes o estructura para montaje en poste                                                                                                                                                            |        |           |
| Tiene marcación según IEEE C37.60 - NTC5426 - IEC62271-111, en idioma español                                                                                                                                       |        |           |
| El control cuenta con los siguientes datos característicos como mínimo: número de serie y características eléctricas de operación                                                                                   |        |           |
| Incluye manuales digitales de operación y manejo actualizados, correspondientes a la versión del equipo y software de gestión a suministrar                                                                         |        |           |
| Incluye capacitación para la instalación, programación, comunicación y operación, de los equipos en forma detallada en las instalaciones del Grupo EPM y con personal técnico calificado, con un mínimo de 24 horas |        |           |
| Peso total del reconectador y el control                                                                                                                                                                            |        |           |
| Dimensiones (largo, ancho y alto)                                                                                                                                                                                   |        |           |

**Apéndice B. Información de entrada para la formulación binaria**

A manera de ejemplo se presentan algunos conjuntos de tramos que hacen parte de la información de entrada para la formulación binaria:

- Conjunto E para los tramos 1 y 15:

$$E(1) = \{ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 \}$$

$$E(15) = \{ 0 \}$$

- Conjunto F para los tramos 4 y 14

$$F(4) = \{ 1, 3 \}$$

$$F(14) = \{ 1, 3 \}$$

- Conjunto G

$$G(1,5) = \{ 3, 4, 5 \}$$

$$G(1,15) = \{ 3, 4, 6, 15 \}$$

- Conjunto G'

$$G'(1,5) = \{ 3, 4 \}$$

$$G'(1,15) = \{ 3, 4, 6 \}$$

- Conjunto H para el tramo 3

$$H(3) = \{ 14, 15 \}$$

- Conjunto h

$$h(1,7) = 3$$

$$h(2, 15) = 0$$

### Apéndice C. Restricciones para la optimización de la formulación binaria

A continuación se dan a conocer las restricciones utilizadas, las cuales corresponden a la optimización del caso de estudio, donde la nomenclatura por facilidad de programación se modificó como sigue:

$$x_{ni}$$

Donde n corresponde al tipo de equipo (1= reconectador, 2= fusibles, etc.) y i corresponde al tramo.

| Restricciones                                                                                    |        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----|
| $x_{11}+x_{12}+x_{13}+x_{14}+x_{15}+x_{16}+x_{17}+x_{18}+x_{19}+x_{110}+x_{111}+x_{112}+x_{113}$ | $\geq$ | 12 |
| $x_{21}+x_{22}+x_{23}+x_{24}+x_{25}+x_{26}+x_{27}+x_{28}+x_{29}+x_{210}+x_{211}+x_{212}+x_{213}$ | $=$    | 13 |
| $x_{31}+x_{32}+x_{33}+x_{34}+x_{35}+x_{36}+x_{37}+x_{38}+x_{39}+x_{310}+x_{311}+x_{312}+x_{313}$ | $\geq$ | 13 |
| $x_{41}+x_{42}+x_{43}+x_{44}+x_{45}+x_{46}+x_{47}+x_{48}+x_{49}+x_{410}+x_{411}+x_{412}+x_{413}$ | $=$    | 13 |
| $x_{514}+x_{515}$                                                                                | $\geq$ | 2  |
| $x_{11}+x_{21}+x_{31}+x_{41}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{12}+x_{22}+x_{32}+x_{42}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{13}+x_{23}+x_{33}+x_{43}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{14}+x_{24}+x_{34}+x_{44}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{15}+x_{25}+x_{35}+x_{45}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{16}+x_{26}+x_{36}+x_{46}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{17}+x_{27}+x_{37}+x_{47}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{18}+x_{28}+x_{38}+x_{48}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{19}+x_{29}+x_{39}+x_{49}$                                                                    | $\geq$ | 3  |
| $x_{110}+x_{210}+x_{310}+x_{410}$                                                                | $\geq$ | 3  |

| Restricciones                                                 |        |   |
|---------------------------------------------------------------|--------|---|
| $x_{111}+x_{211}+x_{311}+x_{411}$                             | $\geq$ | 3 |
| $x_{112}+x_{212}+x_{312}+x_{412}$                             | $\geq$ | 3 |
| $x_{113}+x_{213}+x_{313}+x_{413}$                             | $\geq$ | 3 |
| $x_{28}+x_{39}+x_{310}$                                       | $\geq$ | 2 |
| $x_{29}+x_{310}$                                              | $\geq$ | 1 |
| $x_{211}+x_{312}+x_{313}$                                     | $\geq$ | 2 |
| $x_{412}+x_{313}$                                             | $\geq$ | 1 |
| $x_{48}+x_{39}+x_{310}$                                       | $\geq$ | 2 |
| $x_{49}+x_{310}$                                              | $\geq$ | 1 |
| $x_{411}+x_{312}+x_{313}$                                     | $\geq$ | 2 |
| $x_{412}+x_{313}$                                             | $\geq$ | 1 |
| $x_{18}+x_{19}+x_{110}+x_{111}+x_{112}+x_{113}+x_{12}+x_{15}$ | $=$    | 8 |
| $x_{31}+x_{33}+x_{34}+x_{36}+x_{37}$                          | $=$    | 5 |

### Apéndice D. Resultados de la formulación binaria

A continuación se presentan las expresiones de la formulación binaria para el caso de estudio, donde se utilizaron las siguientes simplificaciones:

- En las ecuaciones 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, se utilizó la expresión:

$$x_{n\_i} = 1 - x_{n\ i} \quad (32)$$

Donde  $x_{n\_i}$  corresponde al valor negado de la variable  $x_{n\ i}$

- En el resultado de la formulación se eliminaron los términos que tuvieran la siguiente operación:

$$x_{n\_i} \times x_{n\ i} = 0 \quad (33)$$

Esto es debido a que son variables binarias y cuando la variable es 1 su valor negado será 0

| Grupo |    | Expresiones             |
|-------|----|-------------------------|
| 1     | 1  | 68957.96642             |
|       | 2  | 15173.39373*x12*x22*x42 |
|       | 3  | 813.21213*x13*x23*x43   |
|       | 4  | 5929.06330*x15*x25*x45  |
|       | 5  | 845.84599*x16*x26*x46   |
|       | 6  | 59.01416*x17*x27*x47    |
|       | 7  | 2186.0*x18*x28*x48      |
|       | 8  | 244.3*x19*x29*x49       |
|       | 9  | 242.9*x110*x210*x410    |
|       | 10 | 4889.0*x111*x211*x411   |
|       | 11 | 1914.0*x112*x212*x412   |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 12    | $17022.0 \times x_{113} \times x_{213} \times x_{413}$                                                                                                                                                                                      |
| 13    | $1840.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{43} \times x_{44}$                                                                                                                                                |
| 14    | $1347.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{46} \times x_{47}$                                                                                                                                                |
| 15    | $25.05 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{47} \times x_{48}$                                                                                                                                                 |
| 16    | $1028.0 \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{48} \times x_{49}$                                                                                                                                                |
| 17    | $83.36 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{411}$                                                                                                                                              |
| 18    | $355.4 \times x_{19} \times x_{29} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{410}$                                                                                                                                              |
| 19    | $4010.0 \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{411} \times x_{412}$                                                                                                                                          |
| 20    | $14555.0 \times x_{112} \times x_{113} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{412} \times x_{413}$                                                                                                                                         |
| 21    | $968.3 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{15} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{45}$                                                                                                       |
| 22    | $887.7 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46}$                                                                                                       |
| 23    | $571.9 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48}$                                                                                                       |
| 24    | $11.78 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49}$                                                                                                       |
| 25    | $1903.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{411}$                                                                                                   |
| 26    | $1495.0 \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{410}$                                                                                                   |
| 27    | $68.37 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{411} \times x_{412}$                                                                                                 |
| 28    | $30488.0 \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413}$                                                                                            |
| 29    | $1414.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47}$                                                            |
| 30    | $268.9 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49}$                                                             |
| 31    | $17.14 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{410}$                                                          |
| 32    | $1561.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{411} \times x_{412}$                                                      |
| 33    | $519.7 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413}$                                                    |
| 34    | $600.2 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48}$                   |
| 35    | $1997.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{411}$ |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 36    | $391.2 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{410}$                                                                                             |
| 37    | $11866.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413}$                                                                                     |
| 38    | $282.2 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49}$                                                      |
| 39    | $1638.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{411} \times x_{412}$                                               |
| 40    | $410.6 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{410}$         |
| 41    | $12455.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413}$ |
| 42    | 128551.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 43    | - 3990.1 $\times x_{22}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 44    | - 10724.7 $\times x_{23}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 45    | - 24262.0 $\times x_{24}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 46    | - 1716.58 $\times x_{25}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 47    | - 10130.7 $\times x_{26}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 48    | - 16023.8 $\times x_{27}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 49    | - 2727.07 $\times x_{28}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 50    | - 826.861 $\times x_{29}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 51    | - 750.078 $\times x_{210}$                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 52    | - 13520.3 $\times x_{211}$                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 53    | - 7519.79 $\times x_{212}$                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 54    | - 25443.8 $\times x_{213}$                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 55    | - 10915.4 $\times x_{21}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 56    | $32276.3 \times x_{12} \times x_{22} \times x_{2\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 57    | $12240.7 \times x_{13} \times x_{23} \times x_{2\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 58    | $24262.0 \times x_{14} \times x_{24} \times x_{2\_3}$                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 59    | $12769.5 \times x_{15} \times x_{25} \times x_{2\_4}$                                                                                                                                                                                                                                                                    |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                 |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 60    | $11707.5 \times x_{16} \times x_{26} \times x_{2\_4}$                                                                                       |
| 61    | $16133.8 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{2\_6}$                                                                                       |
| 62    | $6802.44 \times x_{18} \times x_{28} \times x_{2\_7}$                                                                                       |
| 63    | $1282.3 \times x_{19} \times x_{29} \times x_{2\_8}$                                                                                        |
| 64    | $1202.9 \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_9}$                                                                                      |
| 65    | $22635.2 \times x_{111} \times x_{211} \times x_{2\_7}$                                                                                     |
| 66    | $11088.5 \times x_{112} \times x_{212} \times x_{2\_11}$                                                                                    |
| 67    | $57164.3 \times x_{113} \times x_{213} \times x_{2\_12}$                                                                                    |
| 68    | $27691.6 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{2\_1}$                                                           |
| 69    | $11707.5 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{2\_3}$                                                           |
| 70    | $18645.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{2\_4}$                                                           |
| 71    | $6849.14 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{2\_6}$                                                           |
| 72    | $3198.59 \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{2\_7}$                                                           |
| 73    | $22790.6 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{2\_6}$                                                         |
| 74    | $1865.47 \times x_{19} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_8}$                                                         |
| 75    | $18564.0 \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{2\_7}$                                                       |
| 76    | $84293.1 \times x_{112} \times x_{113} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_11}$                                                      |
| 77    | $14574.6 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{15} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{2\_1}$                               |
| 78    | $13362.5 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{2\_1}$                               |
| 79    | $18645.0 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{2\_3}$                               |
| 80    | $7915.19 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{2\_4}$                               |
| 81    | $3220.55 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{2\_6}$                               |
| 82    | $26337.9 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{2\_4}$                             |
| 83    | $4653.26 \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_7}$                             |
| 84    | $18691.4 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{2\_6}$                           |
| 85    | $141120.0 \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_7}$                        |
| 86    | $21280.5 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{2\_1}$   |
| 87    | $7915.19 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{2\_3}$   |
| 88    | $3721.83 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{2\_4}$   |
| 89    | $26337.9 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{2\_3}$ |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|       | 90 $4685.21 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_6}$                                                                                               |
|       | 91 $21600.7 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{2\_4}$                                                                                             |
|       | 92 $142089.0 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_6}$                                                                                          |
|       | 93 $9034.04 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{2\_1}$                                                                     |
|       | 94 $3721.83 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{2\_3}$                                                                     |
|       | 95 $30060.9 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{2\_1}$                                                                   |
|       | 96 $5414.46 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_4}$                                                                   |
|       | 97 $21600.7 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{2\_3}$                                                                 |
|       | 98 $164205.0 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_4}$                                                              |
|       | 99 $4247.92 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{2\_1}$                                         |
|       | 100 $5414.46 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_3}$                                      |
|       | 101 $24654.0 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{2\_1}$                                    |
|       | 102 $164205.0 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_3}$                                 |
|       | 103 $6179.81 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{2\_1}$          |
|       | 104 $187416.36176 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{2\_1}$ |
| 2     | 105 $5616.73356 \times x_{515} \times x_{1\_3} \times x_{1\_4}$                                                                                                                                                                              |
|       | 106 $- 5616.7335 \times x_{1\_3} \times x_{1\_4}$                                                                                                                                                                                            |
|       | 107 $- 10995.1148 \times x_{1\_4} \times x_{1\_6}$                                                                                                                                                                                           |
|       | 108 $- 5008.6176 \times x_{1\_1} \times x_{1\_3}$                                                                                                                                                                                            |
|       | 109 $10995.1148 \times x_{515} \times x_{1\_4} \times x_{1\_6}$                                                                                                                                                                              |
|       | 110 $- 5008.6176 \times x_{13} \times x_{33} \times x_{1\_1} \times x_{1\_4}$                                                                                                                                                                |
|       | 111 $- 4860.2468 \times x_{14} \times x_{34} \times x_{1\_3} \times x_{1\_6}$                                                                                                                                                                |
|       | 112 $5008.6176 \times x_{1\_1} \times x_{1\_3}$                                                                                                                                                                                              |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                          |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 113   | $5008.6176 \cdot x_{13} \cdot x_{33} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_4}$                                                                    |
| 114   | $4860.2468 \cdot x_{14} \cdot x_{34} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{1\_6}$                                                                    |
| 115   | $- 4334.0346 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$                                                      |
| 116   | $4334.0346 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$                                          |
| 117   | $5616.7335 \cdot x_{515} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{3\_4}$                                                                                              |
| 118   | $- 5616.7335 \cdot x_{1\_3} \cdot x_{3\_4}$                                                                                                          |
| 119   | $- 10995.1148 \cdot x_{1\_4} \cdot x_{3\_6}$                                                                                                         |
| 120   | $- 5008.6176 \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_3}$                                                                                                          |
| 121   | $10995.1148 \cdot x_{515} \cdot x_{1\_4} \cdot x_{3\_6}$                                                                                             |
| 122   | $- 5008.6176 \cdot x_{13} \cdot x_{33} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_4}$                                                                                |
| 123   | $- 4860.246878147125244140625 \cdot x_{14} \cdot x_{34} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{3\_6}$                                                               |
| 124   | $5008.6176 \cdot x_{514} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_3}$                                                                                |
| 125   | $5008.6176 \cdot x_{13} \cdot x_{33} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_4}$                                                                    |
| 126   | $4860.2468 \cdot x_{14} \cdot x_{34} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{3\_6}$                                                                    |
| 127   | $- 4334.03468 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_6}$                                                     |
| 128   | $4334.0346 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{3\_6}$                                          |
| 129   | $5616.7335 \cdot x_{13} \cdot x_{23} \cdot x_{33} \cdot x_{43} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_4}$                                          |
| 130   | $- 5616.7335 \cdot x_{13} \cdot x_{23} \cdot x_{33} \cdot x_{43} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_4}$                                                      |
| 131   | $- 10995.1148 \cdot x_{14} \cdot x_{24} \cdot x_{34} \cdot x_{44} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{1\_6}$                                                     |
| 132   | $- 5786.9147 \cdot x_{15} \cdot x_{25} \cdot x_{35} \cdot x_{45} \cdot x_{1\_4} \cdot x_{1\_6}$                                                      |
| 133   | $- 14810.2047 \cdot x_{12} \cdot x_{22} \cdot x_{32} \cdot x_{42} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_3}$                                                     |
| 134   | $10995.1148 \cdot x_{14} \cdot x_{24} \cdot x_{34} \cdot x_{44} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_3} \cdot x_{1\_6}$                                         |
| 135   | $5786.9147 \cdot x_{15} \cdot x_{25} \cdot x_{35} \cdot x_{45} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_4} \cdot x_{1\_6}$                                          |
| 136   | $- 14810.2047 \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{22} \cdot x_{32} \cdot x_{33} \cdot x_{42} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_4}$                           |
| 137   | $- 4860.2468 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{23} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{43} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$                            |
| 138   | $14810.2047 \cdot x_{12} \cdot x_{22} \cdot x_{32} \cdot x_{42} \cdot x_{514} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_3}$                           |
| 139   | $14810.2047 \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{22} \cdot x_{32} \cdot x_{33} \cdot x_{42} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_4}$               |
| 140   | $4860.2468 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{23} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{43} \cdot x_{515} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$                |
| 141   | $- 12815.5004 \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{22} \cdot x_{32} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{42} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$ |
| 142   | $- 10995.1148 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{23} \cdot x_{24} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{43} \cdot x_{44} \cdot x_{1\_1} \cdot x_{1\_6}$ |

| Grupo | Expresiones                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 3     | 143 - 5786.9147*x14*x15*x24*x25*x34*x35*x44*x45*x1_3*x1_6                   |
|       | 144 12815.50*x12*x13*x14*x22*x32*x33*x34*x42*x515*x1_1*x1_6                 |
|       | 145 10995.11*x13*x14*x23*x24*x33*x34*x43*x44*x515*x1_1*x1_6                 |
|       | 146 5786.914*x14*x15*x24*x25*x34*x35*x44*x45*x515*x1_3*x1_6                 |
|       | 147 -5786.91*x13*x14*x15*x23*x24*x25*x33*x34*x35*x43*x44*x45*x1_1*x1_6      |
|       | 148 5786.914*x13*x14*x15*x23*x24*x25*x33*x34*x35*x43*x44*x45*x515*x1_1*x1_6 |
|       | 149 - 14885.8821*x3_2                                                       |
|       | 150 - 797.80306*x3_3                                                        |
|       | 151 - 5816.7170*x3_5                                                        |
|       | 152 - 829.8185*x3_6                                                         |
|       | 153 - 57.8959*x3_7                                                          |
|       | 154 - 2144.7023*x3_8                                                        |
|       | 155 - 239.6804*x3_9                                                         |
|       | 156 - 238.3035*x3_10                                                        |
|       | 157 - 4796.7905*x3_11                                                       |
|       | 158 - 1878.0692*x3_12                                                       |
|       | 159 - 16693.2152*x3_13                                                      |
|       | 160 - 1804.8334*x13*x3_4                                                    |
|       | 161 - 1321.5377*x16*x3_7                                                    |
|       | 162 - 24.578*x17*x3_8                                                       |
|       | 163 - 1008.4669*x18*x3_9                                                    |
|       | 164 - 81.7836*x17*x3_11                                                     |
|       | 165 - 348.683*x19*x3_10                                                     |
|       | 166 - 3934.0302*x111*x3_12                                                  |
|       | 167 - 14276.8002*x112*x3_13                                                 |
|       | 168 - 949.9143*x13*x14*x3_5                                                 |
|       | 169 - 870.9143*x13*x14*x3_6                                                 |
|       | 170 - 561.0207*x16*x17*x3_8                                                 |

| Grupo | Expresiones                                  |
|-------|----------------------------------------------|
| 171   | - 11.5569*x17*x18*x3_9                       |
| 172   | - 1866.8013*x16*x17*x3_11                    |
| 173   | - 1467.10176*x18*x19*x3_10                   |
| 174   | - 67.0739*x17*x111*x3_12                     |
| 175   | - 29905.9061*x111*x112*x3_13                 |
| 176   | - 1386.9853*x13*x14*x16*x3_7                 |
| 177   | - 263.799*x16*x17*x18*x3_9                   |
| 178   | - 16.8128*x17*x18*x19*x3_10                  |
| 179   | - 1531.034*x16*x17*x111*x3_12                |
| 180   | - 509.885*x17*x111*x112*x3_13                |
| 181   | - 588.8046*x13*x14*x16*x17*x3_8              |
| 182   | - 1959.2524*x13*x14*x16*x17*x3_11            |
| 183   | - 383.7710*x16*x17*x18*x19*x3_10             |
| 184   | - 11638.6958*x16*x17*x111*x112*x3_13         |
| 185   | - 276.8636*x13*x14*x16*x17*x18*x3_9          |
| 186   | - 1606.8574*x13*x14*x16*x17*x111*x3_12       |
| 187   | - 402.7768*x13*x14*x16*x17*x18*x19*x3_10     |
| 188   | - 12215.0884*x13*x14*x16*x17*x111*x112*x3_13 |
| 189   | - 1804.8334*x14*x24*x34*x44*x3_3             |
| 190   | - 1321.5377*x17*x27*x37*x47*x3_6             |
| 191   | - 24.578*x18*x28*x38*x48*x3_7                |
| 192   | - 1008.4669*x19*x29*x39*x49*x3_8             |
| 193   | - 348.6833*x110*x210*x310*x410*x3_9          |
| 194   | - 81.7836*x111*x211*x311*x411*x3_7           |
| 195   | - 3934.0302*x112*x212*x312*x412*x3_11        |
| 196   | - 14276.8002*x113*x213*x313*x413*x3_12       |
| 197   | - 949.9143*x13*x15*x25*x35*x45*x3_4          |
| 198   | - 870.9143*x13*x16*x26*x36*x46*x3_4          |
| 199   | - 561.02078*x16*x18*x28*x38*x48*x3_7         |
| 200   | - 11.5569*x17*x19*x29*x39*x49*x3_8           |

| Grupo | Expresiones                                               |
|-------|-----------------------------------------------------------|
| 201   | - 1866.80136*x16*x111*x211*x311*x411*x3_7                 |
| 202   | - 1467.1017*x18*x110*x210*x310*x410*x3_9                  |
| 203   | - 67.0739*x17*x112*x212*x312*x412*x3_11                   |
| 204   | - 29905.9061*x111*x113*x213*x313*x413*x3_12               |
| 205   | - 1386.9853*x13*x14*x17*x27*x37*x47*x3_6                  |
| 206   | - 263.7992*x16*x17*x19*x29*x39*x49*x3_8                   |
| 207   | - 16.8128*x17*x18*x110*x210*x310*x410*x3_9                |
| 208   | - 1531.0347*x16*x17*x112*x212*x312*x412*x3_11             |
| 209   | - 509.8857*x17*x111*x113*x213*x313*x413*x3_12             |
| 210   | - 588.8046*x13*x14*x16*x18*x28*x38*x48*x3_7               |
| 211   | - 1959.2524*x13*x14*x16*x111*x211*x311*x411*x3_7          |
| 212   | - 383.7710*x16*x17*x18*x110*x210*x310*x410*x3_9           |
| 213   | - 11638.6958*x16*x17*x111*x113*x213*x313*x413*x3_12       |
| 214   | - 276.8636*x13*x14*x16*x17*x19*x29*x39*x49*x3_8           |
| 215   | - 949.9143*x14*x15*x24*x25*x34*x35*x44*x45*x3_3           |
| 216   | - 870.91434*x14*x16*x24*x26*x34*x36*x44*x46*x3_3          |
| 217   | - 561.0207*x17*x18*x27*x28*x37*x38*x47*x48*x3_6           |
| 218   | - 11.556*x18*x19*x28*x29*x38*x39*x48*x49*x3_7             |
| 219   | - 1866.8013*x17*x27*x37*x47*x111*x211*x311*x411*x3_6      |
| 220   | - 1467.1017*x19*x29*x39*x49*x110*x210*x310*x410*x3_8      |
| 221   | - 1606.8574*x13*x14*x16*x17*x112*x212*x312*x412*x3_11     |
| 222   | - 67.07390*x111*x112*x211*x212*x311*x312*x411*x412*x3_7   |
| 223   | - 29905.90*x112*x113*x212*x213*x312*x313*x412*x413*x3_11  |
| 224   | - 1386.9853*x13*x16*x17*x26*x27*x36*x37*x46*x47*x3_4      |
| 225   | - 263.7992*x16*x18*x19*x28*x29*x38*x39*x48*x49*x3_7       |
| 226   | - 402.776*x13*x14*x16*x17*x18*x110*x210*x310*x410*x3_9    |
| 227   | - 16.8128*x17*x19*x29*x39*x49*x110*x210*x310*x410*x3_8    |
| 228   | - 12215.08*x13*x14*x16*x17*x111*x113*x213*x313*x413*x3_12 |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 229   | -<br>$1531.034 \times x_{16} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{3\_7}$                                      |
| 230   | -<br>$509.8857 \times x_{17} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{412} \times x_{413} \times x_{3\_11}$                                     |
| 231   | - $588.8046 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{3\_6}$                                   |
| 232   | -<br>$1959.2524 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{17} \times x_{27} \times x_{37} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{311} \times x_{411} \times x_{3\_6}$                           |
| 233   | -<br>$383.771 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{19} \times x_{29} \times x_{39} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_{3\_8}$                             |
| 234   | -<br>$11638.6958 \times x_{16} \times x_{17} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{412} \times x_{413} \times x_{3\_11}$                     |
| 235   | -<br>$276.8636 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{3\_7}$                  |
| 236   | -<br>$1606.8574 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{3\_7}$         |
| 237   | -<br>$1386.985 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{3\_3}$    |
| 238   | -<br>$263.7992 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{3\_6}$    |
| 239   | -<br>$402.776 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{19} \times x_{29} \times x_{39} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_{3\_8}$ |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 240   | -<br>$16.8128254 \times 18 \times 19 \times 28 \times 29 \times 38 \times 39 \times 48 \times 49 \times 110 \times 210 \times 310 \times 410 \times 3_7$                        |
| 241   | -<br>$1531.034 \times 17 \times 27 \times 37 \times 47 \times 111 \times 112 \times 211 \times 212 \times 311 \times 312 \times 411 \times 412 \times 3_6$                      |
| 242   | -<br>$12215.0884 \times 13 \times 14 \times 16 \times 17 \times 112 \times 113 \times 212 \times 213 \times 312 \times 313 \times 412 \times 413 \times 3_{11}$                 |
| 243   | -<br>$509.8857 \times 111 \times 112 \times 113 \times 211 \times 212 \times 213 \times 311 \times 312 \times 313 \times 411 \times 412 \times 413 \times 3_7$                  |
| 244   | -<br>$588.8046 \times 13 \times 16 \times 17 \times 18 \times 26 \times 27 \times 28 \times 36 \times 37 \times 38 \times 46 \times 47 \times 48 \times 3_4$                    |
| 245   | -<br>$1959.2524 \times 13 \times 16 \times 17 \times 26 \times 27 \times 36 \times 37 \times 46 \times 47 \times 111 \times 211 \times 311 \times 411 \times 3_4$               |
| 246   | -<br>$383.771 \times 16 \times 18 \times 19 \times 28 \times 29 \times 38 \times 39 \times 48 \times 49 \times 110 \times 210 \times 310 \times 410 \times 3_7$                 |
| 247   | -<br>$11638.6958 \times 16 \times 111 \times 112 \times 113 \times 211 \times 212 \times 213 \times 311 \times 312 \times 313 \times 411 \times 412 \times 413 \times 3_7$      |
| 248   | -<br>$276.8636 \times 13 \times 14 \times 17 \times 18 \times 19 \times 27 \times 28 \times 29 \times 37 \times 38 \times 39 \times 47 \times 48 \times 49 \times 3_6$          |
| 249   | -<br>$1606.8574 \times 13 \times 14 \times 17 \times 27 \times 37 \times 47 \times 111 \times 112 \times 211 \times 212 \times 311 \times 312 \times 411 \times 412 \times 3_6$ |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 250   | -<br>$402.7768 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_3 \times x_7$                                                    |
| 251   | -<br>$12215.0884 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{16} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413} \times x_3 \times x_7$                                          |
| 252   | -<br>$588.8046 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_3 \times x_3$                                          |
| 253   | -<br>$1959.2524 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{211} \times x_{311} \times x_{411} \times x_3 \times x_3$                                     |
| 254   | -<br>$383.771 \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_3 \times x_6$                                       |
| 255   | -<br>$11638.6958 \times x_{17} \times x_{27} \times x_{37} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413} \times x_3 \times x_6$                            |
| 256   | -<br>$276.8636 \times x_{13} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_3 \times x_4$                            |
| 257   | -<br>$1606.85 \times x_{13} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{411} \times x_{412} \times x_3 \times x_4$                     |
| 258   | -<br>$402.776 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_3 \times x_6$           |
| 259   | -<br>$12215.088 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{17} \times x_{27} \times x_{37} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413} \times x_3 \times x_6$ |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4     | 260 -<br>$276.863 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{3\_3}$                                                                               |
|       | 261 -<br>$1606.857 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{3\_3}$                                                                      |
|       | 262 -<br>$402.7768 \times x_{13} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_{3\_4}$                                                            |
|       | 263 -<br>$12215.0884 \times x_{13} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413} \times x_{3\_4}$                                                  |
|       | 264 -<br>$402.776818752288818359375 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{18} \times x_{19} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{28} \times x_{29} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{38} \times x_{39} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{48} \times x_{49} \times x_{110} \times x_{210} \times x_{310} \times x_{410} \times x_{3\_3}$ |
|       | 265 -<br>$12215.088 \times x_{14} \times x_{16} \times x_{17} \times x_{24} \times x_{26} \times x_{27} \times x_{34} \times x_{36} \times x_{37} \times x_{44} \times x_{46} \times x_{47} \times x_{111} \times x_{112} \times x_{113} \times x_{211} \times x_{212} \times x_{213} \times x_{311} \times x_{312} \times x_{313} \times x_{411} \times x_{412} \times x_{413} \times x_{3\_3}$         |
|       | 266 5616.7335 $\times x_{515} \times x_{1\_4} \times x_{3\_3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|       | 267 - 5616.7335 $\times x_{1\_4} \times x_{3\_3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|       | 268 - 10995.11483 $\times x_{1\_6} \times x_{3\_4}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|       | 269 - 5008.6176 $\times x_{1\_3} \times x_{3\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|       | 270 10995.1148 $\times x_{515} \times x_{1\_6} \times x_{3\_4}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|       | 271 - 5008.6176 $\times x_{13} \times x_{33} \times x_{1\_4} \times x_{3\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | 272 - 4860.2468 $\times x_{14} \times x_{34} \times x_{1\_6} \times x_{3\_3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | 273 5008.6176 $\times x_{514} \times x_{515} \times x_{1\_3} \times x_{3\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|       | 274 5008.6176 $\times x_{13} \times x_{33} \times x_{515} \times x_{1\_4} \times x_{3\_1}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|       | 275 4860.2468 $\times x_{14} \times x_{34} \times x_{515} \times x_{1\_6} \times x_{3\_3}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

| Grupo | Expresiones                                            |
|-------|--------------------------------------------------------|
| 276   | - 4334.03468*x13*x14*x33*x34*x1_6*x3_1                 |
| 277   | 4334.03468*x13*x14*x33*x34*x515*x1_6*x3_1              |
| 278   | 5616.7335*x515*x3_3*x3_4                               |
| 279   | - 5616.7335*x3_3*x3_4                                  |
| 280   | - 10995.1148*x3_4*x3_6                                 |
| 281   | - 5008.6176*x3_1*x3_3                                  |
| 282   | 10995.1148*x515*x3_4*x3_6                              |
| 283   | - 5008.6176*x13*x33*x3_1*x3_4                          |
| 284   | - 4860.24687*x14*x34*x3_3*x3_6                         |
| 285   | 5008.6176*x514*x515*x3_1*x3_3                          |
| 286   | 5008.6176*x13*x33*x515*x3_1*x3_4                       |
| 287   | 4860.2468*x14*x34*x515*x3_3*x3_6                       |
| 288   | - 4334.0346*x13*x14*x33*x34*x3_1*x3_6                  |
| 289   | 4334.0346*x13*x14*x33*x34*x515*x3_1*x3_6               |
| 290   | 5616.7335*x13*x23*x33*x43*x515*x1_4*x3_1               |
| 291   | - 5616.7335*x13*x23*x33*x43*x1_4*x3_1                  |
| 292   | - 10995.1148*x14*x24*x34*x44*x1_6*x3_3                 |
| 293   | - 5786.9147*x15*x25*x35*x45*x1_6*x3_4                  |
| 294   | - 14810.2047*x12*x22*x32*x42*x1_3*x3_1                 |
| 295   | 10995.1148*x14*x24*x34*x44*x515*x1_6*x3_3              |
| 296   | 5786.9147*x15*x25*x35*x45*x515*x1_6*x3_4               |
| 297   | - 14810.2047*x12*x13*x22*x32*x33*x42*x1_4*x3_1         |
| 298   | - 4860.2468*x13*x14*x23*x33*x34*x43*x1_6*x3_1          |
| 299   | 14810.2047*x12*x22*x32*x42*x514*x515*x1_3*x3_1         |
| 300   | 14810.2047*x12*x13*x22*x32*x33*x42*x515*x1_4*x3_1      |
| 301   | 4860.2468*x13*x14*x23*x33*x34*x43*x515*x1_6*x3_1       |
| 302   | - 12815.5004*x12*x13*x14*x22*x32*x33*x34*x42*x1_6*x3_1 |
| 303   | - 10995.1148*x13*x14*x23*x24*x33*x34*x43*x44*x1_6*x3_1 |
| 304   | - 5786.9147*x14*x15*x24*x25*x34*x35*x44*x45*x1_6*x3_3  |
| 305   | 12815.5*x12*x13*x14*x22*x32*x33*x34*x42*x515*x1_6*x3_1 |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                        |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 306   | $10995.11 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{515} \times x_{1\_6} \times x_{3\_1}$                                                          |
| 307   | $5786.914 \times x_{14} \times x_{15} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{515} \times x_{1\_6} \times x_{3\_3}$                                                          |
| 308   | -<br>$5786.9147 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{15} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{1\_6} \times x_{3\_1}$           |
| 309   | $5786.9147 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{15} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{515} \times x_{1\_6} \times x_{3\_1}$ |
| 310   | $5616.7335 \times x_{13} \times x_{23} \times x_{33} \times x_{43} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_4}$                                                                                                                 |
| 311   | - $5616.7335 \times x_{13} \times x_{23} \times x_{33} \times x_{43} \times x_{3\_1} \times x_{3\_4}$                                                                                                                              |
| 312   | - $10995.1148 \times x_{14} \times x_{24} \times x_{34} \times x_{44} \times x_{3\_3} \times x_{3\_6}$                                                                                                                             |
| 313   | - $5786.9147 \times x_{15} \times x_{25} \times x_{35} \times x_{45} \times x_{3\_4} \times x_{3\_6}$                                                                                                                              |
| 314   | - $14810.2047 \times x_{12} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{42} \times x_{3\_1} \times x_{3\_3}$                                                                                                                             |
| 315   | $10995.1148 \times x_{14} \times x_{24} \times x_{34} \times x_{44} \times x_{515} \times x_{3\_3} \times x_{3\_6}$                                                                                                                |
| 316   | $5786.9147 \times x_{15} \times x_{25} \times x_{35} \times x_{45} \times x_{515} \times x_{3\_4} \times x_{3\_6}$                                                                                                                 |
| 317   | - $14810.2047 \times x_{12} \times x_{13} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{33} \times x_{42} \times x_{3\_1} \times x_{3\_4}$                                                                                                 |
| 318   | - $4860.2468 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{43} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                                                                  |
| 319   | $14810.2047 \times x_{12} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{42} \times x_{514} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_3}$                                                                                                 |
| 320   | $14810.2047 \times x_{12} \times x_{13} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{33} \times x_{42} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_4}$                                                                                    |
| 321   | $4860.2468 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{43} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                                                     |
| 322   | - $12815.5004 \times x_{12} \times x_{13} \times x_{14} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{42} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                                     |
| 323   | - $10995.1148 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                                     |
| 324   | - $5786.9147 \times x_{14} \times x_{15} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{3\_3} \times x_{3\_6}$                                                                      |
| 325   | $12815.5004 \times x_{12} \times x_{13} \times x_{14} \times x_{22} \times x_{32} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{42} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                        |
| 326   | $10995.1148 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{515} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$                                                        |
| 327   | $5786.9147 \times x_{14} \times x_{15} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{515} \times x_{3\_3} \times x_{3\_6}$                                                         |
| 328   | -<br>$5786.9147 \times x_{13} \times x_{14} \times x_{15} \times x_{23} \times x_{24} \times x_{25} \times x_{33} \times x_{34} \times x_{35} \times x_{43} \times x_{44} \times x_{45} \times x_{3\_1} \times x_{3\_6}$           |

| Grupo | Expresiones                                                                                                                                                                                                                              |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 329   | $5786.9147 \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{15} \cdot x_{23} \cdot x_{24} \cdot x_{25} \cdot x_{33} \cdot x_{34} \cdot x_{35} \cdot x_{43} \cdot x_{44} \cdot x_{45} \cdot x_{51} \cdot x_{52} \cdot x_{53} \cdot x_{54} \cdot x_{55}$ |