



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA MEDIANTE FORMULACIÓN DE PROBLEMA DE
OPTIMIZACIÓN**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

FRANCISCO JAVIER PÉREZ SAN MARTÍN

PROFESOR GUÍA:
PABLO MEDINA COFRÉ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO MORENO VIEYRA
PATRICIO MENDOZA ARAYA

SANTIAGO DE CHILE
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: FRANCISCO JAVIER PÉREZ SAN MARTÍN
FECHA: 2021
PROFESOR GUÍA: PABLO MEDINA COFRÉ

COORDINACIÓN DE PROTECCIONES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA MEDIANTE FORMULACIÓN DE PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Las protecciones eléctricas se encargan de despejar las fallas que puedan llegar a ocurrir, siendo una pieza clave del sistema eléctrico. Dentro de las protecciones más empleadas se encuentran las de sobrecorriente por ser bastante económicas. No obstante, lograr una operación coordinada de este tipo de protecciones es complicado cuando el sistema reúne ciertas características. Por ello, se suelen emplear modelos simplificados para encontrar un ajuste que asegure una operación coordinada de estas protecciones.

El objetivo de este trabajo es coordinar el ajuste de protecciones eléctricas de sobrecorriente mediante la formulación de un problema de optimización entero mixto no-lineal. Se busca con ello minimizar los tiempos de operación de las protecciones de manera coordinada, es decir, selectiva y sensitivamente. Para esto, se propone un problema de optimización que incluya todas las características de las protecciones de sobrecorriente, y se desarrolla un programa capaz de resolverlo. Dicho programa se construye en base a un sistema ilustrativo radial para posteriormente ser probado en el sistema benchmark IEEE 9 Busbars. Una vez obtenida la solución, esta es validada en el software ETAP. Finalmente, se vuelve a coordinar este sistema, pero esta vez considerando dos topologías en el problema de optimización.

El programa es desarrollado en Python y se desglosa en tres partes. La primera parte, es el modelo del relé que consiste en un código orientado a objetos que reúne todo lo necesario para simular lo que ocurre entre que se produce una falla y la señal de apertura del relé. La segunda parte, es una rutina que establece el problema de optimización y lo resuelve mediante el software GEKKO. La última parte, es una rutina que establece las restricciones de coordinación en base a los datos de las corrientes de cortocircuito extraídos del software ETAP.

Del trabajo realizado se extraen varias conclusiones. Primero, debido a que el sistema es enmallado, las protecciones direccionales son fundamentales para poder conseguir una operación coordinada de los relés. Por esto, se incorporan protecciones direccionales en este trabajo junto con las de sobrecorriente. Segundo, por la necesidad de redondear ciertos ajustes resultantes de la coordinación, dado el modelo del relé en ETAP, es necesario incluir ciertas variables como discretas. Al hacer esto, el problema de optimización se vuelve muy complejo de resolver, ante lo cual como solución se emplea una co-optimización. Por último, se concluye que, para asegurar la operación coordinada de los relés para múltiples topologías, es necesario incluir las restricciones de cada topología al problema de optimización, aunque esto lo vuelva más complicado de resolver.

*“If you’re not scared, you’re not taking a chance.
And if you’re not taking a chance, then what the hell are you doing?”
— Ted Mosby*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia. Por apoyarme en mi educación desde muy temprano, y ofrecerme todas las herramientas necesarias para llegar a lo que soy hoy en día. Fueron ellos quienes me incentivaron a dar pasos cada vez más grandes, partiendo desde el jardín a pocas cuerdas de mi casa, para terminar donde estoy ahora. En especial agradecer a mi madre, quien me incentivó a esforzarme para conseguir mis metas desde muy temprano en mi vida.

Le doy muchas gracias a mi profesor guía, Pablo Medina. Agradezco su constante preocupación por el estado de mi trabajo, lo que se refleja en reuniones bastante frecuentes como en consejos fundamentales para poder seguir adelante ante los problemas que surgieron. Pero principalmente le agradezco haber confiado en mí este trabajo sumamente desafiante, más aún en los tiempos en que fue desarrollado este trabajo.

Agradecer también a mis compañeros de Universidad, el equipo de dólares por megawatt. A pesar de ser personas bastante diferentes, jamás pensé que un grupo así sería capaz de lograr tanto. Desde aprobar SEP, realizar trabajos en tiempo récord, ir a tocar puertas para encontrar práctica, armarnos oficinas improvisadas, fueron muchas anécdotas de mucho ingenio que surgieron de este pequeño grupo. Sin lugar a dudas hicieron de mi estancia en la Universidad más amena, y espero volver a encontrarme con alguno de ustedes en algún otro proyecto fuera de la Universidad. Por eso muchas gracias a Joseph Gutiérrez, Ignacio Ponce y Matías Villela.

Por último, agradecer a mi pareja, Carla Garrido. Por ayudarme a crecer como persona durante estos años universitarios y por su apoyo incondicional durante toda la carrera. Por más pequeño que haya sido un logro, ella siempre estuvo ahí para felicitar-me y celebrarlo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Protecciones eléctricas	4
2.1.1. Características de las protecciones	4
2.1.2. Protección de sobrecorriente	5
2.1.3. Coordinación de protecciones	6
2.2. Optimización	8
2.2.1. Definición de un problema de optimización	8
2.2.2. Tipos de problemas de optimización	8
2.2.3. Optimización robusta	10
2.2.4. Problemas de optimización en ingeniería eléctrica	11
2.3. Coordinación de protecciones como problema de optimización	11
2.3.1. Una mirada histórica	11
2.3.2. Coordinación robusta para microrred	14
2.3.3. Coordinación de relés duales para microrred	15
2.3.4. Formulación incorporando naturaleza discreta de I_p	16
2.3.5. Coordinación con enfoque entero mixto no-lineal	17
2.4. Esquemas de descomposición	18
2.4.1. Descomposición por topología	18
2.4.2. Descomposición por localización de falla	19
2.4.3. Descomposición por topología-localización de falla	19
2.5. Consideraciones generales	20
2.6. Herramientas de resolución	21
3. Metodología	24
3.1. Problema ilustrativo	24
3.2. Modelo del relé	25
3.3. Problema ilustrativo	25
3.4. Traspaso de datos	28
3.5. Problema Benchmark	29
3.6. Problema Benchmark con múltiples escenarios	30

4. Resultados	32
4.1. Desarrollo problema ilustrativo	32
4.2. Modelo del relé	34
4.2.1. Secuencia de eventos	34
4.2.2. Modelo del relé	35
4.3. Problema ilustrativo	40
4.3.1. Prueba del modelo	41
4.4. Traspaso de datos	42
4.4.1. Estudios eléctricos	42
4.4.2. Restricciones del problema	43
4.5. Problema Benchmark	47
4.5.1. Límites y punto inicial	47
4.5.2. Direccionalidad	49
4.5.3. Corriente de pick up y TDS discretas	51
4.5.4. Co-optimización	52
4.5.5. Resultado final	55
4.6. Problema Benchmark con múltiples escenarios	57
5. Conclusiones y trabajo futuro	61
5.1. Trabajo futuro	62
Bibliografía	63

Índice de Tablas

2.1.	Valores para curvas de relé de sobrecorriente	6
4.1.	Corrientes de cortocircuito para las fallas propuestas	33
4.2.	Corrientes en amperes secundarios	33
4.3.	Ajustes para las protecciones del sistema ilustrativo	34
4.4.	Tiempos de actuación para las fallas estudiadas del sistema ilustrativo . .	34
4.5.	Ajustes para las protecciones del problema ilustrativo obtenidos por problema de optimización	42
4.6.	Tiempos de actuación para las fallas del problema ilustrativo obtenidos por problema de optimización	42
4.7.	Límites y punto inicial para las protecciones ANSI51	48
4.8.	Límites y punto inicial para las protecciones ANSI50	49

Índice de Ilustraciones

2.1.	Tipos de curvas para relés de sobrecorriente [4]	5
2.2.	Visualización de la coordinación de protecciones según: localización de la falla (a) y según corriente de cortocircuito (b) [6]	7
2.3.	Descomposición por topología	19
2.4.	Descomposición por localización de falla	19
2.5.	Descomposición por topología-localización de falla	19
2.6.	Descomposición por relés	20
3.1.	Problema ilustrativo	24
3.2.	Sistema Benchmark	29
3.3.	Diagrama metodología	31
4.1.	Secuencia homopolar	32
4.2.	Secuencia directa	32
4.3.	Secuencia inversa	33
4.4.	Secuencia de eventos una vez producida una falla [2]	35
4.5.	Comparación entre emplear función sigmoide vs emplear función if	36
4.6.	Dataframe intermediario	43
4.7.	Restricciones de falla en barra	44
4.8.	Restricciones de falla en línea	45
4.9.	Restricciones del otro extremo de la línea	46
4.10.	Restricciones para el último respaldo	46
4.11.	Requerimientos contradictorios en sistema enmallado	50
4.12.	Ejemplo de co-optimización [25]	52
4.13.	Co-optimización	55
4.14.	Resultados secuencia de apertura falla en barra 4	57
4.15.	Secuencia de apertura falla en barra 8 para segunda topología con optimización considerando solo topología base	59
4.16.	Secuencia de apertura falla en barra 8 para segunda topología con optimización considerando ambas topologías	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son sumamente complejos, es decir, involucran varias áreas de la ingeniería eléctrica. En [1] se define un SEP como un “conjunto de instalaciones que permiten generar, transportar y distribuir la energía eléctrica en condiciones adecuadas de tensión, frecuencia y disponibilidad”. Y dada la importancia de la energía eléctrica es fundamental que todas estas áreas funcionen de manera correcta para poder tener un sistema confiable.

Una de estas áreas es el estudio de protecciones eléctricas, la cual se encarga de darle seguridad al sistema ajustando la operación de estos dispositivos. Debido a que no existen sistemas eléctricos de potencia con nula probabilidad de contingencias, las protecciones son las encargadas de aislar las fallas del resto del sistema lo más rápido posible. Hay varios atributos que se esperan de un sistema de protecciones, además de la rapidez. Por ejemplo, que las protecciones como conjunto operen de forma sensible, selectiva, coordinada y confiable.

Dentro de los diferentes tipos de protecciones eléctricas se encuentran las de distancia o diferenciales, pero las protecciones de sobrecorriente destacan por ser de las más económicas. En muchos casos, la coordinación de estas protecciones considera un modelo simplificado. Esto conlleva a que su operación no necesariamente sea en el mínimo tiempo de operación, sino que en un subóptimo. Para lograr encontrar un mejor ajuste que asegure la mejor operación que estos equipos pueden proveer, es necesario incluir en el modelo sus características no lineales y de entero mixtas.

En este trabajo se realiza la formulación de un problema de optimización que incorpora estas características de los relés de sobrecorriente. Además, se desarrolla un algoritmo y código capaz de resolver el problema de optimización para un sistema eléctrico específico. Para esta investigación, se resuelve la coordinación de protecciones para un sistema benchmark considerando primero un punto de operación y luego múltiples puntos de operación.

1.2. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es coordinar el ajuste de protecciones eléctricas de sobrecorriente mediante la formulación de un problema de optimización entero mixto no-lineal. Se busca con ello minimizar los tiempos de operación de las protecciones de manera coordinada, es decir, selectiva y sensitivamente.

Objetivos específicos

- Formular el problema de coordinación de protecciones como problema de optimización entero mixto no-lineal.
- Desarrollar un algoritmo y escribir un código que resuelvan el problema de optimización.
- Obtener el ajuste de las protecciones resolviendo el problema de optimización computacionalmente para el sistema benchmark IEEE 9 Busbars considerando un punto de operación del sistema.
- Validar la coordinación de protecciones para el sistema benchmark IEEE 9 Busbars en el software ETAP considerando un punto de operación del sistema.
- Obtener el ajuste de las protecciones resolviendo el problema de optimización computacionalmente para el sistema benchmark IEEE 9 Busbar considerando múltiples puntos de operación del sistema.
- Validar la coordinación de protecciones para el sistema benchmark IEEE 9 Busbars en el software ETAP considerando múltiples puntos de operación del sistema.

1.3. Alcances

Para cumplir los objetivos propuestos el trabajo contempla el estudio de problemas similares donde se haya abordado la coordinación de protecciones como problema de optimización. En específico, se enfatiza en la formulación del problema (función objetivo y restricciones) y metodología empleada para resolver el problema. También se requiere familiarizarse con programas computacionales que permitan la resolución del problema.

Asimismo, se necesita lograr un mayor conocimiento de optimización para comprender de forma plena las formulaciones de problemas similares. Junto con esto, es necesario revisar las metodologías empleadas para la resolución de este tipo de problemas de optimización con el fin de identificar sus ventajas y desventajas. Sin embargo, está fuera del alcance de este trabajo probar con nuevos métodos que no sean los que comúnmente se emplean para coordinar protecciones como problema de optimización.

Además, es necesario familiarizarse con dos softwares para lograr cumplir los objetivos planteados. Primero, se requiere familiarizarse con algún programa que permita resolver computacionalmente el problema de optimización, en este caso se empleará Gekko. Segundo, es necesario familiarizarse con ETAP para así lograr validar la coordinación de protecciones propuesta en este trabajo.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Protecciones eléctricas

En todo sistema eléctrico de potencia existe un sistema de protecciones eléctricas encargado de despejar las fallas en caso de que exista alguna contingencia que ponga en peligro al sistema eléctrico. Lograr esto de manera correcta requiere un trabajo minucioso, en el cual todos los dispositivos de protección deben trabajar en conjunto. En esta sección, se explican los aspectos esenciales respecto a las protecciones eléctricas en general para comprender este trabajo, con hincapié en las protecciones de sobrecorriente.

2.1.1. Características de las protecciones

Existen varios términos específicos al hablar de protecciones eléctricas, los cuales se refieren a una determinada característica de la protección en sí. Los términos más relevantes a tener en cuenta para esta memoria en relación a las protecciones eléctricas son: sensibilidad, selectividad, coordinación, zonas de protección, relés primarios y de respaldo.

Se habla de sensibilidad como la habilidad del sistema eléctrico de identificar una condición anormal, que excede cierto valor límite en relación con la operación normal del sistema. Se espera que las protecciones eléctricas sean lo suficientemente sensibles para detectar toda condición anormal, pero no tan sensibles como para operar durante condiciones normales de la red [2, p. 9], [3, p. 6].

Por su parte, la selectividad se refiere al diseño estratégico donde las protecciones más cercanas a una falla operarán para remover los componentes afectados para despejarla. Esto implica ajustar los dispositivos de protecciones para obtener la selectividad deseada que logre interrumpir exclusivamente los componentes fallados. Para ello también se definen zonas de protección, que son regiones del sistema donde, ante una falla, su sensibilidad respecto a dicha falla será mayor.

Por último, un relé de protección primario es aquel que para una zona de protección determinada le corresponde operar ante condiciones anormales que ocurran dentro de la zona. Mientras que, los relés de respaldo, son relés que se encuentran fuera de la zona de protección de otro relé primario, pero en una zona adyacente. Estos son ajustados

para operar ante fallas en la zona de protección del relé primario independientemente de la operación del relé primario. De esta forma, se habla de coordinación cuando los dispositivos de protecciones, tanto primarios como de respaldo, han sido ajustados tal que se ha logrado una operación selectiva [2, p. 9].

2.1.2. Protección de sobrecorriente

Dentro de las protecciones eléctricas existen varios tipos de protecciones, uno de estos es el relé de sobrecorriente, cual opera cuando la corriente a través de él supera un valor predeterminado [2, p. 56]. Los relés de sobrecorriente son simples y baratos, a costa de ser difíciles de implementar y requerir ajustes en cuanto hay cambios significativos en la topología de la red. Estos dispositivos son empleados a lo largo del sistema eléctrico, en algunos casos como sistema de protección principal y en otros como respaldo. Así, destacan principalmente en sistemas de distribución [3, p. 259].

Ahora bien, existen dos tipos de relés de sobrecorriente. El primero es el relé de sobrecorriente, el cual opera de manera instantánea (sin retardo intencional) tras detectar una anomalía en la operación. El segundo, es el relé de sobrecorriente temporizado. Este último relé cuenta con distintas curvas donde el tiempo de operación varía inversamente respecto a la corriente que mide el relé. Las formas de estas curvas se pueden observar en la figura 2.1 [2, p. 56].

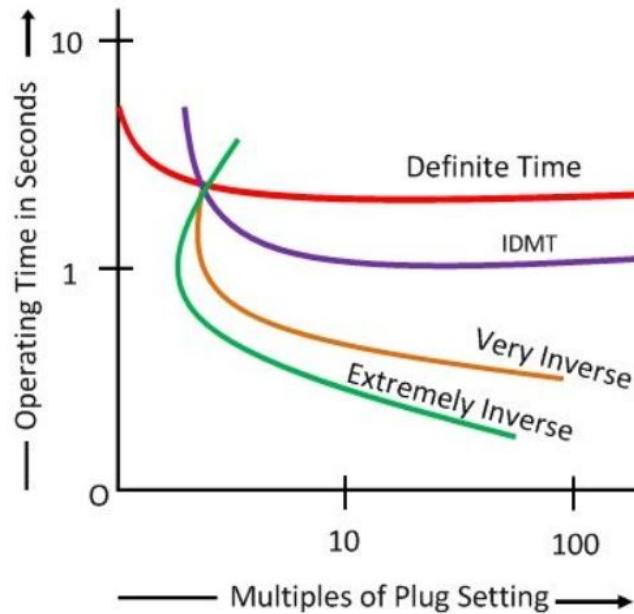


Figura 2.1: Tipos de curvas para relés de sobrecorriente [4]

La curva para un relé de sobrecorriente temporizado se representa mediante la ecuación 2.1. Donde TDS proviene del inglés *Time Dial Setting*, I_f es la corriente de falla, I_{PickUp} es la corriente desde la cual el relé comienza a operar y los valores de K y α se ajustan para lograr las distintas curvas. En la tabla 2.1 se muestran los valores K y α según la norma IEC 60255 para distintas curvas.

$$t_{op} = TDS * \frac{K}{\left(\frac{I_f}{I_{Pickup}}\right)^\alpha - 1} \quad (2.1)$$

Tabla 2.1: Valores para curvas de relé de sobrecorriente

Tipo de curva	K	α
Standar Inverse	0,14	0.02
Very Inverse	13,5	1
Extremely Inverse	80	2
Long Time Inverse	120	1

La característica de tiempo inverso de los relés de sobrecorriente lo hacen ideales para sistemas de distribución. Esto se debe a que en los sistemas de distribución la corriente de falla depende principalmente de la localización de la falla y prácticamente no se ve afectada por cambios en generación o en el sistema de transmisión de alta tensión [3, p. 259]. Otro elemento importante a destacar es la posibilidad de incorporar protecciones de sobrecorriente direccionales, los cuales solo actúan en base a la corriente que circula en una dirección específica a través del relé.

Por otro lado, si bien son los coeficientes expuestos anteriormente los que determinan la forma de la curva, existen otros dos ajustes adicionales que también afectan a la curva del relé de sobrecorriente. Estos son la corriente de *Pick up* (I_{Pickup}), y el TDS. Con el ajuste de I_{Pickup} se espera que un relé sea lo suficientemente sensible para detectar cualquier falla que pueda ocurrir, pero no tanto como para operar con carga máxima esperada. Por último, el ajuste de TDS espera lograr selectividad del relé respecto a los otros relés que se encuentren cercanos [3, pp. 259 262].

2.1.3. Coordinación de protecciones

El objetivo de un estudio de coordinación de protecciones es determinar las características y ajustes de las protecciones que minimicen el daño a los equipos e interrumpan los cortocircuitos lo más rápido posible ante una falla [5]. También, se busca que tras una contingencia o condición de sobrecarga solo una mínima parte del sistema se vea interrumpida. Además de esto, es necesario destacar que en los sistemas eléctricos existentes hay constantes cambios de topología y de condiciones de operación. Por esta razón, un nuevo estudio de coordinación de protecciones debe llevarse a cabo cuando estos cambios producen variaciones en las corrientes de cortocircuito, ya sea por una nueva topología de la red o carga en el sistema.

Para lograr la coordinación de protecciones, se definen protecciones primarias y de respaldo. Las primarias se ajustan de manera que operen rápido y una porción menor del sistema sea removida ante una falla. Por otro lado, las de respaldo solo deben entrar en operación en caso de que las protecciones primarias fallen en despejar la falla. Por ello, se ajustan para operar con cierto retardo respecto al tiempo de operación de la protección primaria. Así, la protección primaria tiene un margen de tiempo para operar antes que la protección de respaldo lo haga. Es importante que la protección primaria opere antes que la protección de respaldo. Puesto que, en la mayoría de los casos, que la protección de respaldo opere, conlleva a que una mayor parte del sistema se desconecte en comparación a la que desconectaría la protección primaria.

No obstante, en la práctica existe un *trade-off* entre protección (rapidez) y selectividad a la hora de coordinar protecciones. Esto quiere decir que, si la coordinación es más rápida, será a costa de selectividad, y si es más selectiva, las protecciones actuarán más lento. Ante esto, la rapidez suele posicionarse por sobre la selectividad.

Una vez realizada la coordinación de protecciones, y así obtenidos los ajustes de los relés que componen el sistema de protecciones, es importante corroborar que efectivamente exista coordinación entre estos. Para ello, una de las formas más comunes es visualizar de manera gráfica como operarían las protecciones ante una determinada falla. Así, en la figura 2.2 se puede observar cómo comprobar gráficamente que los tiempos de intervalo de coordinación (CTI, del inglés *Coordination Interval Time*) se hayan cumplido. De esta forma, es posible observar los tiempos de operación de los relés según la localización de la falla o según la corriente de cortocircuito.

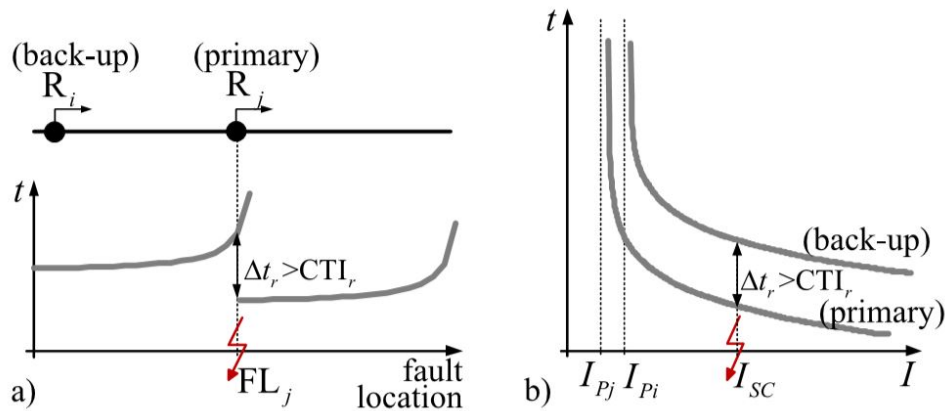


Figura 2.2: Visualización de la coordinación de protecciones según: localización de la falla (a) y según corriente de cortocircuito (b) [6]

En el caso chileno, la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) determina que el CTI debe ser de 15 ciclos (300 milisegundos)[7, p. 91].

2.2. Optimización

En esta sección se exponen los conceptos de optimización necesarios para la comprensión de esta memoria. Se detalla qué es un problema de optimización, los tipos de problemas de optimización que existen y se mencionarán algunos métodos existentes para resolverlos. También se dan ejemplos en donde se usan problemas de optimización dentro de la ingeniería eléctrica.

2.2.1. Definición de un problema de optimización

En [8, p. 1] se define que un problema de optimización tiene la siguiente forma:

$$\begin{array}{ll} \min & f_0(x) \\ \text{s.a.} & f_i(x) \leq b_i \quad i = 1, \dots, m. \end{array}$$

Donde en el problema de optimización, $x = (x_1, \dots, x_n)$ es la variable de optimización del problema, la función $f_0 : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es la función objetivo del problema, las funciones $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, m$, son las funciones de restricción del problema y las constantes b_1, \dots, b_m son los límites de las restricciones. Un vector x^* será óptimo o solución del problema si posee el menor valor objetivo entre todos los vectores que satisfacen las restricciones, es decir, para cualquier z tal que $f_1(z) \leq b_1, \dots, f_m(z) \leq b_m$ se tiene que $f_0(z) \geq f_0(x^*)$.

2.2.2. Tipos de problemas de optimización

Según la naturaleza de las funciones y variables del problema de optimización, se puede clasificar un problema de optimización como lineal, no-lineal, entero mixto lineal y entero mixto no-lineal. A continuación, se habla brevemente de cada uno de los tipos de problemas de optimización.

Lineal

Un problema de optimización será lineal o LP (del inglés *Linear Programming*) si su función objetivo y restricciones son lineales. Para este tipo de problemas existen una variedad de métodos para resolverlos como simplex y otros expuestos en [8]. Se recalca también que estos métodos no presentan dificultades en su resolución, ya que cualquier computador es capaz de resolver un problema de cientos de variables y miles de restricciones en segundos [8, p. 6]. Por ello, se puede decir que esta es una de las formulaciones más amigables que existe a la hora de resolver un problema de optimización. A modo de ejemplo, a continuación, se muestra un problema de optimización lineal [9, p. 2]:

$$\begin{array}{ll} \min & 2x_1 - x_2 + 4x_3 \\ \text{s.t.} & x_1 + x_2 + x_4 \leq 2 \\ & 3x_2 - x_3 = 5 \\ & x_3 + x_4 \geq 3 \\ & x_1 \geq 0 \\ & x_3 \leq 0 \end{array}$$

No-lineal

Un problema de optimización será no-lineal o NLP (del inglés *Non-Linear Programming*) si la función objetivo o al menos una de las restricciones es no-lineal. En general, es deseable evitar trabajar con problemas de optimización no lineales debido a que no existen métodos que logren resolver cualquier NLP. Los métodos que existen suelen tener alguna forma de abordar el problema, la cual trae consigo algún compromiso de antemano [8, p. 9]. No obstante, en [8] se pueden encontrar varios métodos para resolver problemas de NLP, por ejemplo, el método del gradiente.

Otro punto relevante es que al haber no-linealidad en el problema, puede darse que existan soluciones locales para el problema de optimización. Es decir, puede existir una solución al problema de optimización tal que lo sea para los puntos dentro de una vecindad. Sin embargo, este punto puede no ser la solución general del problema.

Debido a esto, varios algoritmos emplean una técnica de optimización local, la cual requiere de un punto inicial que supone estar cercano a la solución global del problema. Estos algoritmos son útiles en problemas NLP donde se tiene o se puede obtener un valor inicial con facilidad. Estos algoritmos suelen converger más rápido que otros que buscan la solución global al problema sin valor inicial [8, pp. 9-10].

Para ejemplificar, a continuación, se muestra un problema de optimización no lineal [10, p. 109]:

$$\begin{array}{ll} \min & x_1^2 + x_2^2 + 2x_3^2 + x_4^2 - 5x_1 - 5x_2 - 21x_3 + 7x_4 \\ \text{s.t.} & -x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 - x_4^2 - x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + 8 \geq 0 \\ & -x_1^2 - 2x_2^2 - x_3^2 - 2x_4^2 + x_1 + x_4 + 10 \geq 0 \\ & -2x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 - 2x_1 + x_2 + x_4 + 5 \geq 0 \end{array}$$

Entero mixto lineal

Un problema de optimización será entero mixto lineal o MILP (del inglés *Mixed Integer Linear Programming*) cuando el problema es de tipo lineal, pero además, posee restricciones enteras para alguna de sus variables [11, p. 236]. Evidentemente, esto agrega un nivel de dificultad diferente al problema, ya que, como se detalla en [10] por las características del problema, el algoritmo debe tanto resolver como verificar la optimalidad de la solución. En [11], se presentan métodos que permiten resolver este tipo de problemas como *Lenstra's algorithm*, *cutting planes* y *Bender's decomposition*. Dicho esto, a continuación, se muestra un ejemplo de un problema de optimización entero mixto lineal [9, p. 482]:

$$\begin{array}{ll} \min & x_1 - 2x_2 \\ \text{s.t.} & -4x_1 + 6x_2 \leq 9 \\ & x_1 + x_2 \leq 4 \\ & x_1, x_2 \geq 0 \\ & x_1, x_2 \text{ integer} \end{array}$$

Entero mixto no-lineal

Un problema de optimización será entero mixto no-lineal o MINLP (del inglés *Mixed Integer Non-Linear Programming*) cuando su función objetivo o alguna de sus restricciones son de tipo no-lineal y además, hay restricciones enteras para alguna de sus variables. Este tipo de problema de optimización es el más difícil de resolver de todos los mencionados anteriormente pues recoge las dificultades que representa la no-linealidad y el carácter entero. En [10] se presentan varios métodos para resolver MINLP donde destaca el método *branch-and-bound* y métodos que reformulan el problema a uno de tipo MILP. Para ejemplificar, a continuación, se muestra un problema de optimización entero mixto no lineal [10, p. 110]:

$$\begin{array}{ll} \min & \frac{1}{6,931} - \frac{x_3x_2}{x_1x_4} \\ \text{s.t.} & x_i \leq 60, \quad \forall i = 1, 2, 3, 4 \\ & x_i \geq 12, \quad \forall i = 1, 2, 3, 4 \\ & x_i \text{ integer}, \quad \forall i = 1, 2, 3, 4 \end{array}$$

2.2.3. Optimización robusta

Hay casos donde existe incertidumbre o variaciones dentro de los parámetros del problema de optimización. Para estos casos se espera que las restricciones del problema de optimización se cumplan para todos los escenarios posibles, lo que nos lleva a la optimización robusta [8, p. 157].

Hay varias formas de incorporar optimización robusta a nuestro problema dependiendo de cómo es la variación o incertidumbre de nuestros parámetros [8, cap. 6.4]. Así, hay dos distinciones importantes dentro de la optimización robusta.

La primera, es la optimización robusta estocástica. Donde sabemos que nuestro parámetro con incertidumbre tiene un comportamiento aleatorio con un valor promedio. Una forma simple de abordar este problema, es cuando el parámetro con incertidumbre puede tomar solo un número finito de valores con una probabilidad asociada a cada uno. Esto conlleva a minimizar una suma ponderada de cada caso por su respectiva probabilidad de ocurrencia.

La segunda es la optimización robusta de peor escenario. Aquí se busca resolver la peor situación que se puede presentar al problema. Volviendo al ejemplo anterior cuando se tiene un número finito de valores que puede tomar nuestro parámetro con incertidumbre, el problema se presenta de la siguiente forma:

$$\min_{i=1, \dots, k} [\max \|A_i x - b\|]$$

Lo cual, como se muestra en [8, p. 321] es equivalente a:

$$\begin{array}{ll} \text{minimize} & t \\ \text{subject to} & \|A_i x - b\| \leq t, \quad i = 1, \dots, k \end{array}$$

No obstante, se quiere recalcar que existen varias formas de abordar una optimización robusta. Para saber de qué forma conviene abordar el problema es necesario comprender la naturaleza de los parámetros que presentan variaciones o incertidumbre.

2.2.4. Problemas de optimización en ingeniería eléctrica

Por último, se enuncian a continuación un par de ejemplos donde en la ingeniería eléctrica se aplican problemas de optimización.

El primer ejemplo, es el caso de *Unit Commitment*. Este problema busca pre-optimizar el despacho económico de las centrales generadoras dada la naturaleza que algunas centrales poseen como el tiempo que tardan en encenderse o apagarse y el coste asociado a esto. En [12] se hace una revisión bibliográfica de los métodos que se han desarrollado para resolver el problema, el cual suele ser tratado como NLP o MILP.

Otro caso que vale la pena mencionar es el de coordinación hidrotérmica. Este problema busca la mejor forma de despachar las centrales hidroeléctricas con tal de minimizar el costo de operación. Dependiendo del horizonte temporal, este problema se plantea de diferentes maneras. En el corto plazo, se modela como un MINLP [13].

2.3. Coordinación de protecciones como problema de optimización

La coordinación de protecciones eléctricas como problema de optimización comienza alrededor del año 1988 donde se destaca la publicación de [14]. En dicha publicación se plantea que, hasta esa fecha, los algoritmos empleados para coordinar protecciones se basaban en probar distintos casos para distintas fallas en varias configuraciones. Por esta razón esos algoritmos carecían de ser soluciones óptimas en el sentido estricto de la palabra siendo solo las mejores soluciones probadas.

En esta sección se describen distintas formulaciones de problemas de optimización que se han planteado con el fin de coordinar protecciones de sobrecorriente. Solo se consideran formulaciones cuyo enfoque sean similares a las de la presente memoria, evitando así estudios donde el enfoque es probar un nuevo método para resolver el problema de optimización, por ejemplo.

2.3.1. Una mirada histórica

Como se mencionó anteriormente, una de las primeras formulaciones de un problema de optimización con el fin de coordinar protecciones eléctricas fue la presentada en 1988 mediante la publicación de [14]. Dicho trabajo comienza con una forma general de un problema de coordinación de protecciones mostrada en (2.2). Donde z representa¹ algún índice de desempeño, s la configuración del dispositivo de protección, S el conjunto

¹ Se mantiene la notación original de los autores cada vez que una formulación de problema de optimización sea citada.

de ajustes que permite el dispositivo y p los parámetros concernientes a la falla o perturbación que afecta al sistema.

$$\min_{s \in S} [z(s, p)] \quad (2.2)$$

Dado que el problema posee una gran dimensionalidad, en especial al alto número de perturbaciones que se pueden considerar, se propone solucionar el problema con un enfoque minimax como es expuesto en (2.3).

$$\min_{s \in S} [\max_{p \in P} z(s, p)] \quad (2.3)$$

Donde se espera que el subproblema $\max z(s, p)$ cuente con varias soluciones locales del tipo $p_k^* \in P^*$, $k=1, \dots, np$. Donde $P^* = \{p_1^*, \dots, p_{np}^*\}$ representa el conjunto de peores escenarios o los más relevantes a considerar para coordinar protecciones. Obtener dicho conjunto es un problema aparte al de coordinar protecciones y se suele considerar resuelto de antemano.

Cada una de las perturbaciones existentes en P^* define su propio problema de optimización y restricciones. Con ello (2.3) puede formularse como un problema de optimización multiobjetivo como en (2.4). Donde S_k , $k=1, \dots, np$, representa las configuraciones factibles para las perturbaciones más relevantes.

$$\begin{aligned} \min \quad & [z(s, p_1^*), \dots, z(s, p_{np}^*)] \\ \text{s.t.} \quad & s \in S_1, \dots, s \in S_{np} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Asumiendo un objetivo por perturbación, el problema se transforma en un problema de optimización no lineal de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & [z_1(s, T), \dots, z_{np}(s, T)] \\ \text{s.t.} \quad & h(T) \leq 0 \quad (\text{Criterio de Coordinación}), \\ & s_{min} \leq s \leq s_{max}, \quad (\text{Límites de configuración del relé}), \\ & T_{min} \leq T \leq T_{max}, \quad (\text{Límites de tiempo de operación}), \\ & T = f(s), \quad (\text{Característica del relé}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Siendo (2.5) la formulación de un problema de optimización general independiente del tipo de protección.

Llevando la formulación general a una de protecciones de sobrecorriente, lo primero a considerar es la curva característica de estos relés. La cual es en función de TDS, Ip (corriente de *pick up*) e I (corriente que mide el relé).

$$T = f(TDS, Ip, I) = K_1 * \frac{TDS}{(\frac{I}{Ip})^{K_2} - K_3} \quad (2.6)$$

A partir de la curva, se debe considerar que la esencia del ajuste de protecciones de sobrecorriente es obtener los valores de TDS e Ip, lo que equivale a que $s=[TDS, Ip]$. Respecto a z_k , es una función que refleja el objetivo a alcanzar, por ejemplo, minimizar el estrés al que son sometidos los equipos. Una forma de medir esto es con el calor disipado

por el equipo, el cual es proporcional al cuadrado de la corriente por el tiempo. De esta forma, se puede minimizar el estrés de los equipos de la red es haciendo de z_k una suma ponderada de los tiempos de los relés como se muestra en (2.7). Donde T_{ijk} es el tiempo de operación del relé i , en la zona j para una falla en la zona k . Esta sumatoria es ponderada por los pesos ω_{ijk} según la probabilidad de la falla, no obstante, el ajuste de protecciones no se ve afectado por los pesos ω_{ijk} con lo que suele omitirse de la función objetivo del problema.

$$z_k(TDS, Ip, T) = \sum_i \sum_j \omega_{ijk} T_{ijk} \quad (2.7)$$

Las restricciones para los relés de sobrecorriente a partir de (2.5) se resumen en tres tipos:

1. Criterio de coordinación: Sea T_{nmk} el tiempo de operación del relé de respaldo para el relé R_{ij} para una falla en k y ΔT_{mj} el tiempo de intervalo de coordinación para zonas m y j , la restricción de coordinación queda:

$$T_{nmk} \geq T_{ijk} + \Delta T_{mj} \quad (2.8)$$

2. Límites de configuración del relé y de tiempos de operación: Los valores para TDS, I_p y T de un relé i en zona j se encuentran acotados por un mínimo y máximo valor:

$$\begin{aligned} TDS_{ijmin} &\leq TDS_{ij} \leq TDS_{ijmax} \\ Ip_{ijmin} &\leq Ip_{ij} \leq Ip_{ijmax} \\ T_{ijmin} &\leq T_{ij} \leq T_{ijmax} \end{aligned} \quad (2.9)$$

3. Característica del relé: Como se mencionó anteriormente, la característica de un relé R_{ij} dependerá de su TDS, I_p y de la corriente I_{ijk} , que representa la corriente vista por el relé R_{ij} para una falla en k .

$$T_{ijk} = f(TDS_{ij}, Ip_{ij}, I_{ijk}) \quad (2.10)$$

No obstante, es sumamente relevante destacar que es posible llevar la formulación (2.5) a una forma reducida, donde depende exclusivamente de TDS e I_p . Con ello se elimina la restricción (2.10) relacionada a la característica del relé.

Sumado a todo lo anterior, se debe mencionar la existencia de restricciones para la configuración transitoria que ocurre cuando solo uno de los relés de la zona que debe ser despejada ha actuado. Si bien esta restricción puede ser omitida, de todas formas se plantea en la formulación expuesta. En caso de considerarse, la coordinación durante el transitorio se asegura mediante la siguiente restricción:

$$T'_{nmk} \geq T'_{ijk} + C'$$

Finalmente, los autores proponen un algoritmo para resolver el problema propuesto por ellos, el cual consiste en los siguientes pasos:

1. Elegir un conjunto inicial de ajustes para los valores Ip^* .
2. Encontrar TDS^* como solución de $\min_{TDS} z(TDS, Ip^*)$ con las restricciones relevantes y la forma lineal de TDS.
3. Encontrar Ip^* como solución de $\min_{Ip} z(TDS^*, Ip)$ con las restricciones relevantes.
4. Repetir pasos 2. y 3. para los nuevos valores de los ajustes hasta que se logre convergencia.

Es relevante resaltar que el algoritmo expuesto consiste en obtener un punto inicial y tras ello realizar un paso lineal y otro no-lineal, lo cual se repite hasta alcanzar la convergencia.

2.3.2. Coordinación robusta para microrred

En el trabajo presentado en [15] se propone una formulación de un problema de optimización robusta para coordinar protecciones de sobrecorriente y de mínima tensión para una microrred. Se definen los relés de sobrecorriente como protección principal y los de mínima tensión de respaldo.

La optimización robusta es necesaria debido a que la microrred no posee estudios de ocurrencia de falla. Solo se cuenta con algunos reportes de falla, sobre todo en aquellas que culminaron en la desconexión completa de la microrred. Por ello, los datos estadísticos concernientes a las fallas de cortocircuito son inciertos.

Un criterio de optimización robusta busca minimizar la función objetivo para el peor escenario. Así, sea $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $b \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ y $x \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, con el conjunto $A = \{A_1, \dots, A_k\}$ los peores escenarios posibles, el problema se define de la siguiente manera:

$$\min [\max_{i=1, \dots, k} \|A_i x - b\|] \quad (2.11)$$

Lo cual puede ser expresado como se vio en la sección 2.2.3:

$$\begin{aligned} \min \quad & t \\ \text{s.t.} \quad & \|A_i x - b\| \leq t, \quad i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (2.12)$$

La curva de un relé de sobrecorriente expresada en (2.1) puede ser reescrita de forma lineal si se asume Ip como conocida. De esta manera, sea T_{ij} el tiempo de operación del relé de sobrecorriente i para la falla en k y $K_{ik} = \frac{c1}{(\frac{I_{ik}}{I_{Pi}})^{c2} + c3}$ se obtiene:

$$T_{ij} = K_{ik} TDS_i \quad (2.13)$$

De manera análoga para un relé de mínima tensión j , es posible linealizar su curva:

$$T_{jk} = \frac{D_j}{1 - \left(\frac{V_{jk}}{V_{pj}}\right)} = L_{jk}D_j \quad (2.14)$$

Dado que los ajustes de los relés primarios y los relés de respaldo son independientes, es preciso que para formular el problema de optimización ambos tiempos de operación se incluyan por separado, puesto que se busca minimizar tanto el tiempo de operación primaria como el de respaldo. De esta manera la formulación del problema de optimización para M relés de sobrecorriente y N relés de mínimo voltaje se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \min_{TDS_i, D_j} \quad & t \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^M (K_{ik}TDS_i) + \sum_{j=1}^N (L_{jk}D_j) \leq t, \quad \forall k, \\ & T_{ik}^{min} \leq T_{ik} \leq T_{ik}^{max}, \\ & T_{jk}^{min} \leq T_{jk} \leq T_{jk}^{max}, \\ & T_{mk} \geq T_{ik} + T_{im}, \\ & T_{jk} \geq T_{ik} + T_{ij} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Se puede notar que esta formulación solo incluye los límites en tiempo de operación, ya que es redundante incluir los del TDS debido a que tiene una relación lineal con T. Asimismo, I_p ya fue fija y su restricción se excluye del problema. Finalmente, se debe asegurar que exista una coordinación tanto para relés de sobrecorriente como de mínimo voltaje, lo que se logra con las últimas dos restricciones.

2.3.3. Coordinación de relés duales para microrred

Similar a lo presentado en [15], la formulación propuesta en [16] corresponde a coordinar relés de sobrecorriente de doble configuración para una microrred.

Este tipo de relé de sobrecorriente presenta la particularidad que posee dos pares de variables a configurar [TDS, I_p], una para cada dirección. En este caso, para un relé i y una falla en j , la dirección definida para adelante define el tiempo de operación t_{fw_ij} y para atrás el tiempo de operación t_{rv_ij} donde fw viene del inglés *forward* y rv de *reverse*. Para este problema se considera que los relés principales son las curvas que ven para adelante de todos los relés duales y los de respaldo son las curvas que ven para atrás.

Además, se opta por no linealizar la curva (2.1) y formular un problema de optimización no lineal. Con ello se obtiene la siguiente formulación:

$$\begin{aligned} \min \quad & T = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (t_{fw_cij}^p + \sum_{k=1}^K t_{rv_cij}^{bk}) \\ \text{s.t.} \quad & t_{rv_cij}^{bk} - t_{fw_cij}^p \geq CTI, \\ & I_{pi_min} \leq I_{pfi}, \quad I_{prvi} \leq I_{pi_max}, \\ & TDS_{i_min} \leq TDS_{fwi}, \quad TDS_{rvi} \leq TDS_{i_max} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Se puede observar que para esta formulación se vuelve a dar que la configuración primaria y de respaldo están separadas como en la formulación lineal presentada en 2.3.2, por lo que se incluyen aparte a la hora de sumar el tiempo de operación. Ahora bien, la triple sumatoria representa la suma de los relés primarios N , la suma de los relés de respaldo M y que la microrred puede considerar varias topologías representada por C . Particularmente se consideraron solo dos, una donde la microrred se encuentra conectada a la red y otra donde opera en forma aislada.

Respecto a las restricciones, nuevamente tenemos la de coordinación y los límites de configuración del relé donde cabe destacar que las primarias solo están acotadas por debajo y las de respaldo por arriba según los ajustes permitidos por el relé.

Los autores agregan también el algoritmo empleado para resolver el problema, el cual cuenta con una subrutina de dos partes. La primera subrutina determina las corrientes de falla para los relés primarios y de respaldo. La segunda subrutina resuelve el problema de optimización. Se enfatiza que para la segunda subrutina existen varios métodos para resolver el problema de optimización propuesto. Agregan que en su caso, el punto inicial del problema es variado en un amplio rango para evitar caer en mínimos locales.

2.3.4. Formulación incorporando naturaleza discreta de I_p

Hasta ahora, las formulaciones presentadas no han incorporado la naturaleza discreta que presenta la configuración de un relé, los cuales cuentan con valores discretos para I_p y TDS. La justificación que se da para omitir la característica discreta de estas variables es que los pasos que hay entre los distintos valores que se pueden escoger no son muy grandes. Por lo que es una simplificación recurrente optimizar asumiendo ambas variables como continuas y luego redondear su valor al más cercano que permite el relé.

No obstante, en [17] se propone incorporar la naturaleza discreta de I_p como parte de las restricciones del problema, manteniendo TDS como variable continua y partiendo de una formulación estándar similar a la presentada en [14] como la que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \sum W_i T_{ik} \\
\text{s.t.} \quad & T_{nk} - T_{ik} \geq \Delta T, \\
& TDS_{i_{min}} \leq TDS_i \leq TDS_{i_{max}}, \\
& Ip_{i_{min}} \leq Ip_i \leq Ip_{i_{max}}, \\
& T_{i_{min}} \leq T_i \leq T_{i_{max}}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Para incorporar la naturaleza discreta de I_p , se propone reescribir la variable I_p como la suma ponderada de todos los valores que dicha variable puede adquirir de la siguiente forma:

$$Ip_i = \sum_m y_{mi} Ip_{am}, \quad \forall i \text{ con } i=1, \dots, n \tag{2.18}$$

Así, basta con fijar $y_{mi} = 1$ si la configuración Ip_m es escogida e igual a 0 si no. Por último, fijando que la suma de todas las variables y_{mi} debe ser igual a 1, se logra que solo se fije uno de los posibles valores para Ip , lo que equivale a:

$$\sum_m y_{mi} = 1, \quad \forall i \text{ con } i=1, \dots, n \quad (2.19)$$

Incorporando las restricciones (2.18) y (2.19) al problema (2.17) se obtiene una formulación entera mixta no-lineal para coordinar protecciones de sobrecorriente.

2.3.5. Coordinación con enfoque entero mixto no-lineal

Otra opción de formulación es la entera mixta lineal. Dicha formulación busca linealizar la curva característica del relé con tal de evitar métodos de resolución no lineales. En [18] proponen una formulación MILP en base a una técnica de linealización la cual es una simplificación del teorema presentado en [19], el cual se presenta como: “Given a quadratic term yw , in which y is a binary variable and w is a continuous one such that $0 \leq w \leq \bar{w}$, with \bar{w} a constant, yw can be linearized as $yw = q$, where the following inequalities are satisfied:

$$\begin{aligned} w + (y - 1)\bar{w} &\leq q \leq w \\ 0 &\leq q \leq y\bar{w} \end{aligned}$$

Mediante el teorema expuesto se produce un *trade-off* donde se reduce la no-linealidad del problema, pero se incrementa el número de variables y restricciones.

Con ello, partiendo con una formulación clásica del problema de coordinación de protecciones de sobrecorriente como las que se han visto anteriormente, es posible adaptar el problema tal que se puede linealizar mediante el teorema expuesto. En esta formulación se agrega la distinción entre el relé del extremo de la línea cercano a la falla como F1 y lejano como F2:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n t_i \\ \text{s.t.} \quad & t_b^{F1} - t_p^{F1} \geq CTI, \\ & t_b^{F2} - t_p^{F2} \geq CTI, \\ & TDS_i^{min} \leq TDS_i \leq TDS_i^{max}, \\ & \max(I_{load_i}^{max}, I_{set_i}^{min}) \leq I_{set_i} \leq \min(I_{fault_i}^{min}, I_{set_i}^{max}) \end{aligned} \quad (2.20)$$

Ahora bien, la curva característica del relé se puede expresar como la ponderación entre TDS y una función de I_{set_i} (corriente de pick up):

$$\begin{aligned} t_i &= f(I_{set_i})TDS_i \\ f(I_{set_i}) &= \left[\frac{K}{\frac{I_{fault_i}^\theta}{I_{set_i}} - 1} + \beta \right] \end{aligned}$$

Al igual que lo presentado en [17], se propone reescribir Ip como una suma ponderada de los valores que se pueden escoger por una variable binaria de tal forma que $x_{ij}=1$ si

se escoge el j^{vo} valor y $x_{i_j}=0$ si no se escoge. Imponiendo también que la suma de estas variables binarias debe ser 1. Con ello:

$$I_{set_i} = \bar{I}_{i_1}x_{i_1} + \dots + \bar{I}_{i_m}x_{i_m}$$

$$x_{i_1} + \dots + x_{i_m} = 1$$

De esta manera, es posible reescribir $f(I_{set_i})$ y con ello también la ecuación característica del relé de sobrecorriente:

$$f(I_{set_i}) = \alpha_{i_1}x_{i_1} + \dots + \alpha_{i_m}x_{i_m}$$

$$t_i = \alpha_{i_1}x_{i_1}TDS_i + \dots + \alpha_{i_m}x_{i_m}TDS_i$$

Así, considerando \bar{T} como el límite superior de TDS_i , es posible linealizar los términos $x_{i_k}TDS_i$ de la forma que se expone en [18], es decir, agregando la variable $\bar{x}_{i_k} = x_{i_k}TDS_i$ y las siguientes restricciones a nuestra formulación de problema de optimización:

$$TDS_i + (x_{i_k} - 1)\bar{T} \leq \bar{x}_{i_k} \leq TDS_i$$

$$0 \leq \bar{x}_{i_k} \leq x_{i_k}\bar{T}$$
(2.21)

2.4. Esquemas de descomposición

En [14], además de mostrar una de las primeras formulaciones de un problema de coordinación de protecciones como problema de optimización y sugerir un algoritmo para su resolución, se proponen varios esquemas de descomposición cuando la red eléctrica a proteger considera múltiples topologías. Esto quiere decir que, por ejemplo, la red puede contemplar un escenario donde alguna línea se encuentre fuera de servicio de manera regular. Así, los autores proponen varios esquemas de descomposición del problema que se muestran en esta sección.

2.4.1. Descomposición por topología

Un primer acercamiento a cómo desglosar el problema general es por topologías. Aquí, el problema se divide en un subproblema por cada topología relevante. Así, cada subproblema cuenta con un par de ajustes para cada relé y posteriormente estos se unen con el hecho de que los ajustes deben ser los mismos para todas las topologías. En este caso, cada subproblema de optimización considera las perturbaciones más relevantes a la que puede ser sometida la topología.

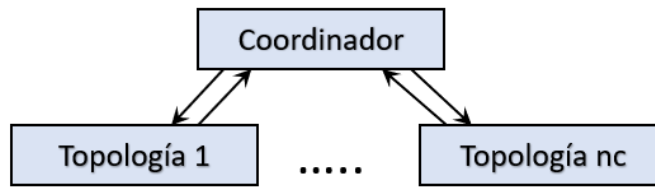


Figura 2.3: Descomposición por topología

2.4.2. Descomposición por localización de falla

Análogo al anterior, este esquema considera dividir el problema en subproblemas considerando las localizaciones de falla más relevantes para el problema. Por cada subproblema, en este caso, se considerarán las topologías más relevantes.

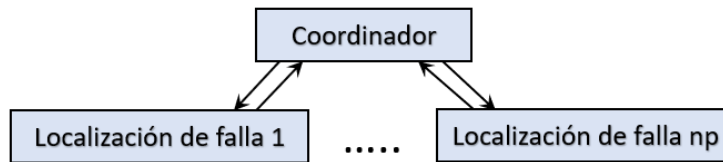


Figura 2.4: Descomposición por localización de falla

2.4.3. Descomposición por topología-localización de falla

El esquema de descomposición por localización de falla es aplicable en el caso de una topología fija. Esto abre la posibilidad de realizar una descomposición de dos niveles, donde cada subproblema atiende el caso de una localización de falla, y una topología. Con ello, la dimensionalidad del subproblema de optimización a resolver se ve significativamente reducida.

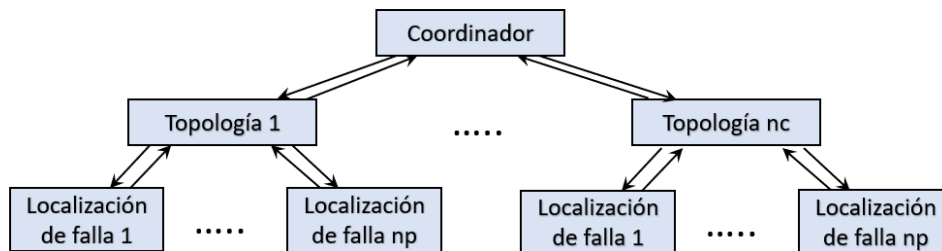


Figura 2.5: Descomposición por topología-localización de falla

Sumado a esto es posible seguir fraccionando el problema aún más. Donde se divide un subproblema para cada relé principal y luego otro subproblema para cada relé de respaldo, lo que culmina en una descomposición de 4 subproblemas.

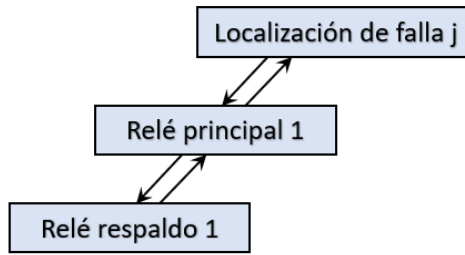


Figura 2.6: Descomposición por relés

2.5. Consideraciones generales

En las secciones anteriores se han expuesto diferentes formas de abordar la formulación de un problema de optimización para la coordinación de protecciones de sobrecorriente. En esta sección se discuten los elementos de la bibliografía presentada que se consideran más interesantes para aplicar en la presente memoria. También se discuten los motivos por el cual otros elementos son dejados de lado.

En primer lugar, es claro que hay aspectos de la formulación inicial de [14] que se han mantenido hasta ahora. Elementos como las restricciones del problema y las variables sobre las cuales optimizar son la base de cualquier formulación de un problema de optimización para coordinar protecciones.

Otros elementos destacables de la bibliografía tienen relación con el modo en que se deben manejar las múltiples topologías que se pueden presentar. Por ejemplo, en [16] agregan una sumatoria a la función objetivo con un enfoque de descomposición de dos niveles presentada anteriormente en la figura 2.5. Lo cual, llama la atención al ser una manera simple pero efectiva de trabajar múltiples topologías.

También se rescata de la bibliografía los algoritmos que emplean pasos para obtener un punto inicial, pasos lineales y pasos no-lineales. Así, no se descarta emplear el criterio de que I_p está acotado inferiormente por la máxima corriente de carga más un margen porcentual, para obtener un valor inicial para I_p . Posteriormente, se podría emplear un paso lineal para tener un buen acercamiento al punto inicial sobre el cual disponer de formulaciones más complejas (NLP, MILP, MINLP).

Por otro lado, vale la pena cuestionarse ciertos aspectos que son recurrentes en la literatura. Uno de estos aspectos es no adentrarse en optimizar considerando la direccionalidad o el tipo de curva del relé como variable de optimización, lo cual puede ser de sumo interés para encontrar una mejor solución al problema. Hasta ahora, ambos elementos han sido parámetros del problema, donde los relés tienen una dirección y un tipo de curva dado. Como los relés digitales permiten variar el tipo de curva y la dirección, vale la pena cuestionarse sobre si se debe dejar como constante o considerar como variables de optimización estas características del relé.

También es importante hablar sobre las restricciones transitorias introducidas en [14] y que son mencionadas también ocasionalmente a lo largo de la literatura. Se considera de dicha restricción que el valor que aporta al problema, no vale el costo que trae incorporarla. Por costo se hace referencia a las dificultades en la resolución del problema de optimización que trae consigo, lo cual no es menor dado que el problema ya es bastante difícil de resolver. Además, el fin de esta restricción, como se mencionó anteriormente, es asegurar la coordinación cuando hay cambios topológicos tras la apertura de un interruptor, no obstante, existen otros métodos para lograr esto por lo que se le ve poco valor a esta restricción.

Continuando con lo anterior, es fundamental plantearse el valor que agrega al problema el tipo de formulación a medida que este se complejiza. Si se desea que los métodos de resolución tradicionales resuelvan el problema, hay que ser cautelosos con la dimensionalidad y no-linealidad del problema. Respecto a esto hay dos ideas importantes. La primera, es sobre incorporar el carácter entero de I_p . Debido a que los pasos entre los valores que se pueden escoger son bastante pequeños, es una simplificación válida considerarla continuo en vistas a emplear el carácter entero a otra variable como qué tipo de curva es mejor usar. La segunda, es cuestionarse si el modelo no-lineal entrega mejores soluciones dadas las técnicas de linealización existentes, como la presentada en [18].

Por consiguiente, se debe ser sumamente cauteloso con las decisiones que se escogen en la formulación del problema debido a la existencia de un *trade-off* entre que tanto valor entrega una variable, una restricción, incorporar un carácter entero o una no-linealidad respecto a la dificultad que esto conlleva en resolver el problema.

2.6. Herramientas de resolución

Formular el problema de optimización es solo el primer paso para obtener los ajustes de las protecciones a coordinar. Una vez formulado el problema, es necesario contar con buenas herramientas para resolverlo. En esta sección se presenta información de GEKKO y cómo implementarlo en python.

Gekko es un paquete de python para problemas de optimización entero mixtos, *machine learning* y resolución de ecuaciones diferenciales. Está conectado con *solvers* de gran escala para problemas de programación lineal, cuadrática, no-lineal y de entero mixto (LP, QP, NLP, MILP, MINLP) [20],[21].

A continuación se muestra un problema de tipo *benchmark* de un problema de programación entero mixto no-lineal para posteriormente ser resuelto mediante Gekko [22].

$$\begin{aligned}
& \min_{x \in \mathbb{R}} && x_1 x_4 (x_1 + x_2 + x_3) + x_3 \\
& \text{s.t.} && x_1 x_2 x_3 x_4 \geq 25, \\
& && x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = 40, \\
& && x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 1, \\
& && x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 5, \\
& && x_1, x_4 \in \{1, 2, 3, 4, 5\}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Considerando el punto inicial $x_1 = 1, x_2 = 5, x_3 = 5, x_4 = 1$, se muestra a continuación el código de cómo resolver el problema en python mediante Gekko detallando las opciones que permite modificar el *solver* [23].

Código 2.1: Problema Benchmark resuelto en Gekko

```

1 from gekko import GEKKO
2 m = GEKKO() # Inicio GEKKO
3 m.options.SOLVER=1 #Fija APOPT como solver (el unico que resuelve minlp)
4
5 # Optional solver settings with APOPT
6 m.solver_options = ['minlp_maximum_iterations 500',
7                     # Maximo numero de iteraciones
8                     'minlp_max_iter_with_int_sol 10', \
9                     # Iteraciones con solucion entera
10                    'minlp_as_nlp 0', \
11                    # Trata minlp no como nlp
12                    'nlp_maximum_iterations 50', \
13                    # Numero maximo de iteraciones del sub-problema nlp
14                    'minlp_branch_method 1', \
15                    # Metodo de busqueda, 1=depth first (encontrar solucion entera
16                    ↪ mas rapido), 2=breath first
17                    'minlp_integer_tol 0.05', \
18                    # Desviacion maxima respecto al numero entero
19                    'minlp_gap_tol 0.01', \
20                    #Tolerancia de convergencia (Se mide respecto a la mejor solucion
21                    ↪ no entera)
22                    ]
23 # Declaracion de variables
24 x1 = m.Var(value=1,lb=1,ub=5)
25 x2 = m.Var(value=5,lb=1,ub=5)
26 # Declaracion de variables enteras x3 y x4
27 x3 = m.Var(value=5,lb=1,ub=5,integer=True)
28 x4 = m.Var(value=1,lb=1,ub=5,integer=True)
29 # Restricciones
30 m.Equation(x1*x2*x3*x4>=25)
31 m.Equation(x1**2+x2**2+x3**2+x4**2==40)
32 m.Obj(x1*x4*(x1+x2+x3)+x3) # Funcion objetivo
33 m.solve(disps=False) # Resolver
34 # Mostrar resultados
35 print('Results')
```

```
34 print('x1: ' + str(x1.value))
35 print('x2: ' + str(x2.value))
36 print('x3: ' + str(x3.value))
37 print('x4: ' + str(x4.value))
38 print('Objective: ' + str(m.options.objfnval))
```

El código presentado retorna la solución $x_1 = 1,358$, $x_2 = 4,599$, $x_3 = 4$, $x_4 = 1$ donde la función objetivo alcanza su mínimo 17,532.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Problema ilustrativo

Con el fin de desarrollar un código capaz de coordinar protecciones eléctricas de sobrecorriente mediante un problema de optimización, se necesita un punto de referencia. Para ello, se escoge un sistema ilustrativo, el cual consiste de un sistema radial con dos relés de sobrecorriente como se muestra en la figura 3.1. A partir de aquí, se espera encontrar un ajuste para las protecciones de sobrecorrientes temporizadas (TDS, corriente de pick up y tipo de curva) sin ayuda computacional que respete las restricciones de coordinación del sistema. Estos valores se usan posteriormente para probar que el código funciona correctamente y se encuentra en buen camino.

Así, para lograr encontrar un ajuste a las protecciones se calculan las corrientes de cortocircuito del sistema ilustrativo para fallas específicas. Luego, se definen dos curvas de sobrecorriente temporizadas que deben cumplir una operación coordinada para las fallas definidas y se itera mediante prueba y error hasta encontrar un ajuste que sea coordinado y rápido. Para ello, se varían los tipos de curva, TDS y corriente de pick up de las curvas de ambos relés a coordinar.

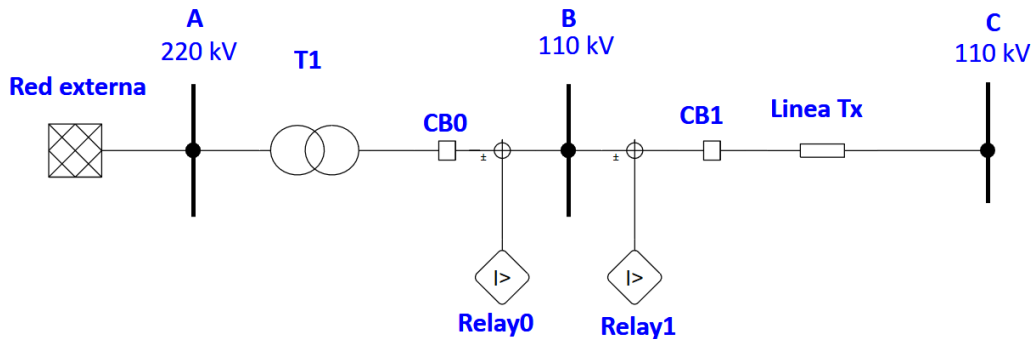


Figura 3.1: Problema ilustrativo

Con respecto al sistema ilustrativo, este consiste en un sistema de tres barras en el cual la barra A se encuentra conectada a la red eléctrica en 220 kV. A partir de aquí, se alimenta el sistema radial mediante un transformador T1, el cual baja la tensión a 110 kV a la barra B. Esta barra B está conectada a la barra C mediante una línea de 20 km. Por último, existen dos relés en el sistema, uno a cada lado de la barra B. Los datos del problema, considerando base común de 100 MVA, son:

1. Red externa:

- I_{cc} : 25 kA
- I_{cc} : 95.26 pu

2. Transformador T1: YNd1, 220kV/110kV

- $X_1 = X_2 = 0.15$ pu
- $X_0 = 0.12$ pu

3. Línea de transmisión:

- $X_1 = X_2 = 0.08$ pu
- $X_0 = 0.2$ pu

Por otro lado, para este sistema se estudian tres fallas: la falla A, se produce en 3/4 de la línea L1, la falla B, se produce a 1/4 de la línea L1 y la falla C se produce en la barra B. Para cada falla se estudian los casos de una falla bifásica y una trifásica.

3.2. Modelo del relé

Una vez calculados los ajustes que se usan como referencia para el sistema ilustrativo, se debe desarrollar un código y algoritmo que sean capaces de resolver la coordinación de protecciones para este sistema mediante un problema de optimización. Se espera con esto, conseguir resultados similares a los calculados anteriormente. No obstante, previo a implementar un código de optimización, se necesita desarrollar el modelo de un relé.

Para lograrlo, es necesario identificar la secuencia de eventos que ocurren desde que se produce una falla en el sistema hasta que el relé envía la señal de apertura al interruptor. Esto con el fin de determinar todos los elementos que se requieren, los valores con los que cuentan y las funciones que manejen. Así, se desarrolla un código orientado a objetos donde cada elemento del sistema es una clase, sus valores se ingresan como atributos y las funciones que ejecuten se programan como métodos de la clase.

3.3. Problema ilustrativo

El sistema ilustrativo coordinado anteriormente es ahora coordinado computacionalmente mediante un problema de optimización. Con este sistema se tienen dos objetivos

principales. Primero, lograr implementar el problema de optimización que resuelva la coordinación de protecciones. Esto es, definir las variables de optimización, restricciones, función objetivo, límites y punto inicial de las variables. Segundo, corregir errores asociados al código. Estos pueden ser de distinta naturaleza, pero es inherente al desarrollo de cualquier programa corregir los problemas que puedan surgir. Se da énfasis en corregir los errores debidos a la compatibilidad entre el modelo del relé y el optimizador. En consecuencia, a partir de este sistema se determinan las bases para implementar el programa para otros sistemas eléctricos. Esto abarca desde cómo se desarrolla a nivel de código el problema de optimización, los límites y puntos iniciales de las variables y la estructura de los distintos datos.

Así, a partir de la bibliografía consultada es posible establecer un problema de optimización para coordinar las protecciones del sistema ilustrativo. Las distintas partes del problema de optimización son descritas a continuación:

Parámetros

Los parámetros del problema de optimización corresponden a valores fijos que dependen de la marca y modelo del relé a coordinar. Estos son los siguientes:

- $I_{p_{i_min}}$: Corriente de pick up mínima para protecciones de sobrecorriente temporizadas del relé i .
- $I_{p_{i_max}}$: Corriente de pick up máxima para protecciones de sobrecorriente temporizadas del relé i .
- TDS_{i_min} : Time dial setting mínimo para protecciones de sobrecorriente temporizadas del relé i .
- TDS_{i_max} : Time dial setting máximo para protecciones de sobrecorriente temporizadas del relé i .
- C_i : Curvas disponibles para protecciones de sobrecorriente temporizadas del relé i .
- $I_{p50_{i_min}}$: Corriente de pick up mínima para protecciones de sobrecorriente instantáneas del relé i .
- $I_{p50_{i_max}}$: Corriente de pick up máxima para protecciones de sobrecorriente instantáneas del relé i .
- $Delay_{i_min}$: Retardo mínimo para protecciones de sobrecorriente instantáneas del relé i .
- $Delay_{i_max}$: Retardo máximo para protecciones de sobrecorriente instantáneas del relé i .

VARIABLES DE OPTIMIZACIÓN

Las variables de optimización son los valores que el optimizador debe determinar con tal de obtener un ajuste para las protecciones de sobrecorriente de manera que se respeten las restricciones y los relés operen de forma rápida. Así pues, en la mayoría de los casos estudiados en la bibliografía, estas variables corresponden a la corriente de pick up y TDS de las protecciones de sobrecorriente temporizadas. Para este trabajo se propone, de igual forma, optimizar respecto a aquellas variables. Además, se agregan como variable de optimización las curvas de las protecciones de sobrecorriente temporizada y las variables asociadas a la protección de sobrecorriente instantánea, es decir, corriente de pick up y tiempo de operación de esta. Para poder optimizar respecto al tipo de curva, esta se escribe como la suma de todas las curvas disponibles en el relé, multiplicadas por una variable binaria y_{ijm} donde solo una puede ser uno.

$$c_{ij} = \sum_m c_{ijm} * y_{ijm} \quad (3.1)$$

Dicho esto, explícitamente las variables de optimización son:

- $I_{p_{ij}}$: Corriente de pick up de la protección de sobrecorriente temporizada j del relé i. Se considera variable real.
- TDS_{ij} : Time dial setting de la protección de sobrecorriente temporizada j del relé i. Se considera variable real.
- y_{ijm} : Variable binaria asociada a las curvas de la protección de sobrecorriente temporizada j del relé i.
- I_{p50ij} : Corriente de pick up de la protección de sobrecorriente instantánea j del relé i. Se considera variable real.
- top_{ih} : Retardo en el tiempo de operación de la protección de sobrecorriente instantánea h del relé j. Se considera variable real.

Función objetivo

La función objetivo del problema de optimización representa el tiempo de actuación de los relés del problema ante las distintas fallas para las que se desea coordinar. Así, en la bibliografía estudiada se presentan dos tipos de funciones objetivo para el problema de optimización. Una donde se suma solo el tiempo de operación de los relés primarios, y otra donde además se suma el tiempo de operación de sus respaldos. Para este trabajo, se opta por incluir el tiempo de operación de los relés de respaldo en la función objetivo. De esta forma, la función objetivo es:

$$\sum_k \sum_i R_{ipk} + R_{ibk} \quad (3.2)$$

Donde R_{ipk} representa el tiempo de operación del relé primario i para la falla k y R_{ibk} representa el tiempo de operación del relé de respaldo i para la falla k.

Restricciones

Para este problema de optimización, es posible distinguir varios tipos de restricciones. Por ello, la bibliografía define una serie de restricciones propias al problema de coordinar protecciones de sobrecorriente. Así, para este trabajo, se distinguen 3 tipos de restricciones para el problema de optimización propuesto. Primero, restricciones por límites de ajuste del relé, segundo, criterio de coordinación y, tercero, restricciones para la parte entera asociada a elegir solo una curva para las protecciones de sobrecorriente temporizada.

- Límites de configuración del relé:

$$TDS_{i_min} \leq TDS_{ij} \leq TDS_{i_max} \quad (3.3)$$

$$Ip_{i_min} \leq Ip_{ij} \leq Ip_{i_max} \quad (3.4)$$

$$Ip50_{i_min} \leq Ip50_{ij} \leq Ip50_{i_max} \quad (3.5)$$

$$Delay_{i_min} \leq top_{ih} \leq Delay_{i_max} \quad (3.6)$$

- Criterio de Coordinación:

$$R_{ibk} - R_{ipk} \geq CTI \quad (3.7)$$

- Parte entera:

$$y_{ijm} \in \{0, 1\} \sum_m y_{ijm} = 1, \quad \forall i, j \quad (3.8)$$

3.4. Traspaso de datos

Otro aspecto fundamental del programa, fuera del modelo del relé y del optimizador, es el manejo de datos relacionados a las restricciones de coordinación. Teniendo en consideración que a estas alturas las estructuras de los datos ya están definidas en el optimizador y modelo del relé, es necesario desarrollar varias rutinas capaces de manejar los datos que ingresan al optimizador. El principal objetivo de desarrollar rutinas para el manejo de datos es lograr un nivel considerable de automatización en el programa. Así, a partir de los reportes de cortocircuito de ETAP, se llega a las restricciones que debe cumplir el optimizador. De este modo se espera desarrollar dos rutinas.

La primera rutina, se encarga de manejar los datos de ETAP y transformarlos en restricciones. Para ello, se deben definir todas las restricciones de coordinación necesarias para asegurar una operación coordinada de los relés. Luego, se debe crear la rutina capaz de establecer estas restricciones que, en esta etapa del programa, deben expresar qué relé es el primario, cuáles son sus respaldos, cuáles son las corrientes que ve cada uno ante la falla y cuál es el paso de coordinación. El paso de coordinación si bien es 300 ms por norma técnica, debe ser manipulable en caso de que sea requerido un paso diferente a 300 ms, por lo que la rutina debe contemplar el ingreso de un paso de coordinación diferente. A partir de aquí, la segunda rutina se encarga de leer el resultado de la rutina anterior y transformarlo en restricciones que sean manejables por el optimizador. Dado que el optimizador ya tiene una estructura de datos para ingresar

las restricciones, esta rutina se encarga de llevar la estructura de datos anterior a la del optimizador. Finalmente, las restricciones son escritas en su forma matemática dentro de la rutina del optimizador.

3.5. Problema Benchmark

El sistema eléctrico de potencia escogido como benchmark es el sistema IEEE 9 bus-bars, figura 3.2, el cual se caracteriza por ser un sistema enmallado. Este sistema cuenta con 9 barras, de las cuales 3 son de media tensión y 6 de alta tensión, 3 generadores, 3 transformadores y 3 consumos. Las barras de alta tensión se encuentran conectadas a través de 6 líneas de transmisión formando un anillo.

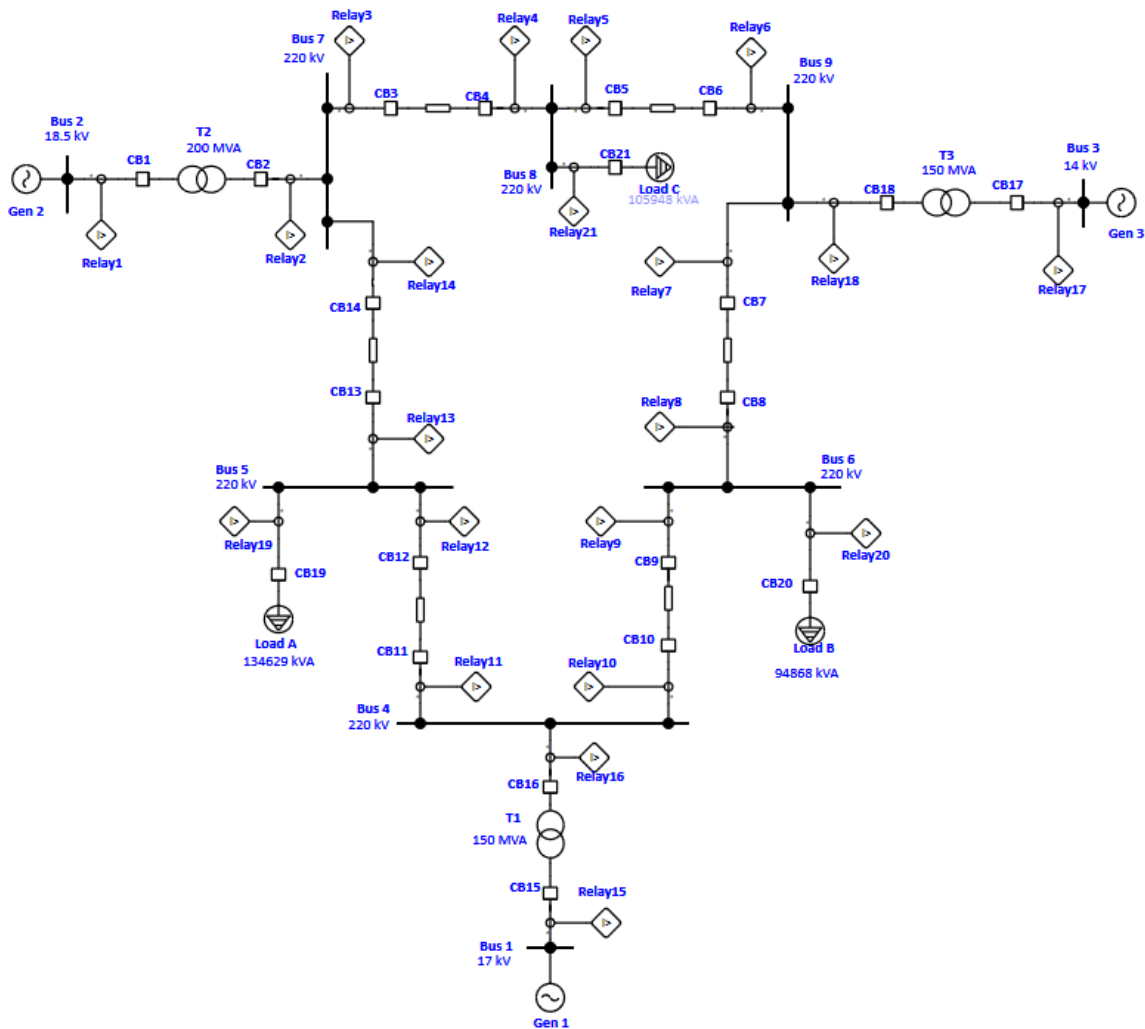


Figura 3.2: Sistema Benchmark

Este sistema cuenta con 21 relés, los cuales serán coordinados mediante el programa desarrollado para el sistema ilustrativo, para lo cual, es necesario adaptar el problema de optimización. Esto consta de dos aristas principales. Primero, se necesita adaptar

el código en sí. Esto implica ingresar los datos propios de este sistema, creando los objetos relés y las protecciones a optimizar de cada relé. Segundo, se debe adaptar el problema a un sistema enmallado. Los sistemas enmallados tienen otras necesidades propias de sus características en términos de coordinar protecciones, por lo que será necesario identificar los problemas que surjan al tratar de coordinar el sistema benchmark mediante el código resultante del problema ilustrativo. Por lo cual, tanto el modelo del relé como el problema de optimización no se encuentran exentos de cambios. En consecuencia, no se descarta incorporar protecciones direccionales al problema. Esto implica incorporarlas como funciones de protección al modelo y como variables de optimización.

Por otro lado, previo a comenzar con lo mencionado en el párrafo anterior, es necesario obtener un buen punto inicial y límites de las variables de optimización, puesto que es fundamental para resolver cualquier problema de optimización computacionalmente. Para lograr esto, se hará uso de las corrientes de cortocircuito, por lo cual es necesario implementar una rutina que determine, según diversos criterios, los mejores puntos iniciales y límites apropiados. Además, se debe considerar que la corriente de pick up cuenta con límites ya establecidos por su naturaleza eléctrica. Esto porque, la corriente de pick up debe ser mayor a 1.2 veces la corriente máxima de operación normal (para evitar que la protección se active en situación de sobrecarga), y menor a 0.8 veces la mínima corriente de cortocircuito (para asegurar que actúe ante toda falla), lo que se expresa en la ecuación 3.9. Por consiguiente, es habitual escoger la corriente de pick up muy cercana a su límite inferior, y mediante esta corriente, se pueden escoger puntos iniciales y límites para otras variables de optimización.

$$I_{loadmax} * 1.2 \leq I_p \leq I_{ccmin} * 0.8 \quad (3.9)$$

3.6. Problema Benchmark con múltiples escenarios

Por último, otro requisito en un estudio de coordinación de protecciones es que el ajuste resultante para las protecciones del sistema considere varias topologías. En otras palabras, los relés del sistema deben operar de forma coordinada para todas las topologías habituales del sistema. Dado que, incorporar más de una topología conlleva un nivel de dificultad extra al problema, es necesario escoger adecuadamente las topologías habituales para el sistema eléctrico. Para el caso del sistema benchmark, se escoge una topología con dos generadores en vez de tres, dejando de lado el generador 2, utilizando el mismo sistema de la figura 3.2 pero con el interruptor CB1 abierto.

Se escoge esta segunda topología pues, con tan solo desconectar una unidad generadora, se obtiene una segunda topología lo suficientemente diferente a la primera en términos de corrientes de cortocircuito. De este modo, el programa debe ser capaz de encontrar un ajuste a las protecciones de tal manera que los relés operen de forma coordinada para ambas topologías. Esto implica incorporar nuevas restricciones al problema de optimización asociadas a la nueva topología. Además, en caso de ser necesario, se debe adaptar el programa según las necesidades que surjan para encontrar un ajuste que cumpla con las nuevas exigencias.

Finalmente, se presenta un diagrama resumen de la metodología a emplear en este trabajo.

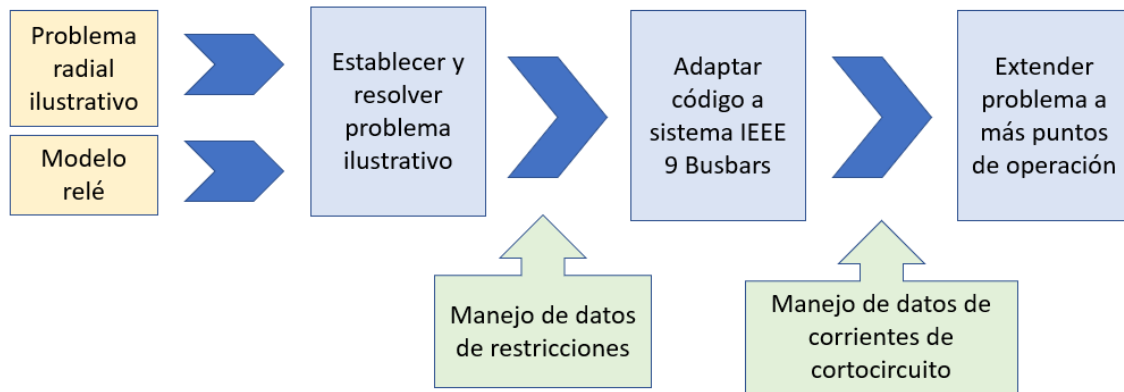


Figura 3.3: Diagrama metodología

Capítulo 4

Resultados

4.1. Desarrollo problema ilustrativo

En esta sección se expone el desarrollo con el cual se obtuvo la coordinación de las protecciones mediante prueba y error para el sistema ilustrativo (figura 3.1).

La primera etapa, previo a comenzar a manipular las protecciones, consiste en calcular las corrientes de cortocircuito para las fallas del sistema. Estas corrientes se obtienen a partir de las mallas de secuencia. Los diagramas de las tres mallas de secuencia se muestran a continuación.

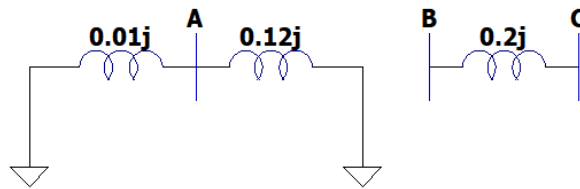


Figura 4.1: Secuencia homopolar

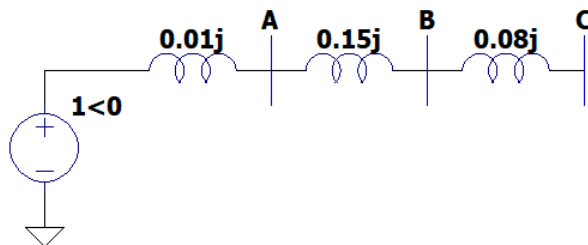


Figura 4.2: Secuencia directa

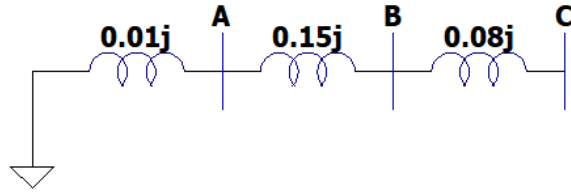


Figura 4.3: Secuencia inversa

Los resultados de cada falla se muestran a continuación en secuencias, luego en pu y luego en amperes.

Tabla 4.1: Corrientes de cortocircuito para las fallas propuestas

Falla	Corriente [sec]	Corriente [pu]	Corriente [A]
A bifásica	2.273	3.936	2065.85
B bifásica	2.778	4.812	2525.63
C bifásica	3.125	5.413	2841.07
A trifásica	4.545	4.545	2385.49
B trifásica	5.556	5.556	2916.12
C trifásica	6.250	6.250	3280.38

Considerando transformadores de corriente con razón de transformación de 300/5 para cada relé, las corrientes en amperes secundarios para las distintas fallas son:

Tabla 4.2: Corrientes en amperes secundarios

Falla	Corriente [A sec]
A bifásica	34.431
B bifásica	42.094
C bifásica	47.351
A trifásica	39.758
B trifásica	48.602
C trifásica	54.673

La segunda etapa es determinar un ajuste para las protecciones a partir de las corrientes de la tabla 4.2, con el cual dos relés de sobrecorriente operen de manera coordinada para estas fallas. El primer relé, R_0 , se encuentra en la barra B entre el transformador y la barra. El segundo relé, R_1 , se encuentra en la barra B entre la línea de transmisión y la barra. Así, considerando que las fallas A y B ocurren en la línea de transmisión, estas deben ser despejadas por el relé R_1 y respaldadas por el relé R_0 . Mientras que, la falla C, debe ser despejada por el relé R_0 pues en este caso el relé R_1 no ve corriente de cortocircuito. Luego, se debe encontrar un ajuste para ambos relés tal que respete las restricciones de coordinación para las fallas mencionadas (el relé de

respaldo actúa 300 ms después que el relé primario), y que resulte en una apertura rápida para los relés tanto en operación principal como de respaldo. Para ello, se considera que el tiempo de actuación mínimo de los relés para las máximas corrientes que verán es de 0.15 segundos.

De esta forma, mediante ensayo y error, se encuentra un ajuste de protecciones para ambos relés que cumple con lo descrito anteriormente:

Tabla 4.3: Ajustes para las protecciones del sistema ilustrativo

Relé	Curva	TDS	I_p
R_0	Standard Inverse	0.1	2.5
R_1	Standard Inverse	0.05	7.324

Tabla 4.4: Tiempos de actuación para las fallas estudiadas del sistema ilustrativo

Falla	Tiempo R_0 [seg]	Tiempo R_1 [seg]
A bifásica	0.540	0.227
B bifásica	0.499	0.200
C bifásica	0.478	-
A trifásica	0.510	0.207
B trifásica	0.473	0.185
C trifásica	0.454	-

Lo que en total suma: 3.773 segundos.

4.2. Modelo del relé

En esta sección se presenta el resultado final del modelo del relé. El modelo consiste en un programa orientado a objetos que incorpora todo lo necesario para describir los eventos que se producen desde ocurrida la falla hasta que el relé envía la señal de apertura del interruptor. El programa se construye de tal manera que el modelo del relé es capaz de tener más de una curva de protección, así, el tiempo de operación del relé ante una falla es el tiempo de la curva que actúe en menor tiempo para cierta corriente de cortocircuito. Las clases del programa que componen el modelo son detalladas a continuación.

4.2.1. Secuencia de eventos

El primer paso para construir un modelo completo es identificar todos los eventos que ocurren en el fenómeno a modelar. Así, se establece la secuencia de eventos que ocurren desde que se produce el cortocircuito hasta que el relé dispara su señal de apertura al interruptor. Para ello, se hace uso del diagrama mostrado en la figura 4.4.

Aquí se puede apreciar que existe un bloque de medición y otro bloque que contiene las cantidades límites, estos ingresan a un bloque donde se deben comparar estas cantidades para así pasar a un bloque de decisión y finalmente a uno de acción. Dicho de otra manera, la corriente de cortocircuito pasa por un relé de medida y se transforma a amperes secundarios, los cuales ingresan al relé. El relé evalúa los tiempos de actuación de sus diferentes funciones de protección según la corriente medida para luego, comparar y determinar cuál es el menor tiempo de actuación entre todas sus funciones para dicha corriente. Luego, dispara su señal tras el tiempo resultante de la comparación en caso de que esa haya sido la decisión.

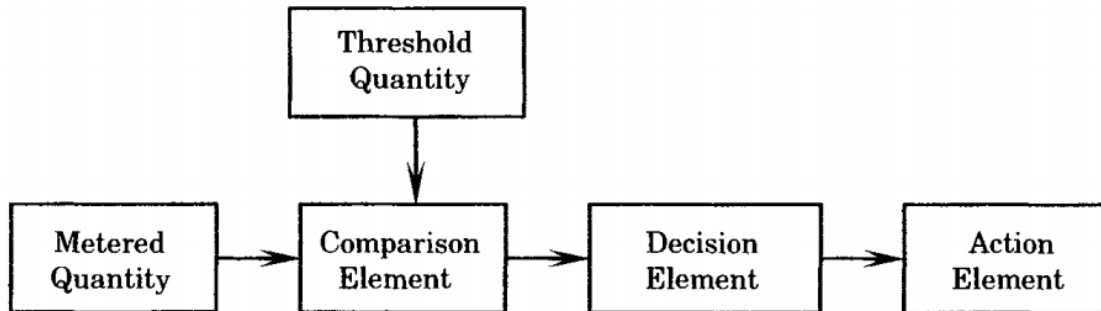


Figura 4.4: Secuencia de eventos una vez producida una falla [2]

A partir de la secuencia de eventos, es claro que se deben incluir ciertos objetos y métodos para desarrollar el modelo del relé. De ahí que, este debe contar con una clase que se encargue del transformador de medida, con un atributo para su razón de transformación. También, contar con clases para los distintos tipos de funciones de protecciones. En este caso, se consideran las de sobrecorriente instantáneas y temporizadas. Las clases consideradas para las funciones de protección contemplan atributos para sus ajustes, y un método capaz de recibir una corriente de cortocircuito y retornar un tiempo de operación según dicha corriente.

Para terminar, la clase relé es aquella encargada de agrupar todas las demás clases, para lo cual consideran tres características. Primero, contar con una serie de atributos asociados a los límites del relé. Por ejemplo, el valor mínimo y máximo que puede adquirir la variable TDS de una función de protección de dicho relé. Segundo, tener un método que, tras recibir la corriente de cortocircuito, retorna el menor tiempo de operación tras comparar todas sus funciones de protección. Y, por último, que sea capaz de manejar las distintas funciones que se le agregan al relé.

4.2.2. Modelo del relé

Para empezar, una vez producida alguna falla en el sistema, la información que llega al relé es recolectada a través de transformadores de medida con los que este cuenta. Por ello mismo, cada relé tendrá asociado un transformador de corriente (TTCC) y un transformador de potencial (TTPP) capaces de medir la corriente y el voltaje en un

punto del sistema respectivamente. Ambas clases tienen los atributos vueltas primarias y secundarias, que representan las vueltas de cada embobinado del transformador. Con ellas se calcula el atributo razón de transformación como vueltas primarias en secundarias.

Por otro lado, el modelo del relé cuenta con una serie de funciones de protección. Estas funciones de protección se construyen en base a funciones sigmoide para evitar el uso de las funciones “if” dentro del código. La razón de esto es que, las discontinuidades de la función if causan un mal desempeño del optimizador, el cual retorna malas soluciones si las funciones se construyen de esta manera. Si bien los desarrolladores del optimizador ofrecen funciones propias capaces de manejar las discontinuidades que producen funciones como “if” o “min”, solo la función min dio resultados positivos, mientras que la función if continuaba dando problemas al optimizador, independiente si era la función propia de Python o la del optimizador. Como alternativa, se optó por implementar funciones sigmoide adaptadas a las necesidades de la función de protección para que se encarguen de cumplir el rol de un if dentro del código. Esto trajo consigo excelentes resultados, pues el desempeño del optimizador mejoró considerablemente ya que las funciones fueron construidas a partir de funciones continuas y dos veces diferenciables. A modo de ejemplo, en la figura 4.5 se puede observar la diferencia entre usar una función sigmoide para construir la curva de protección en contraste a usar la función if.

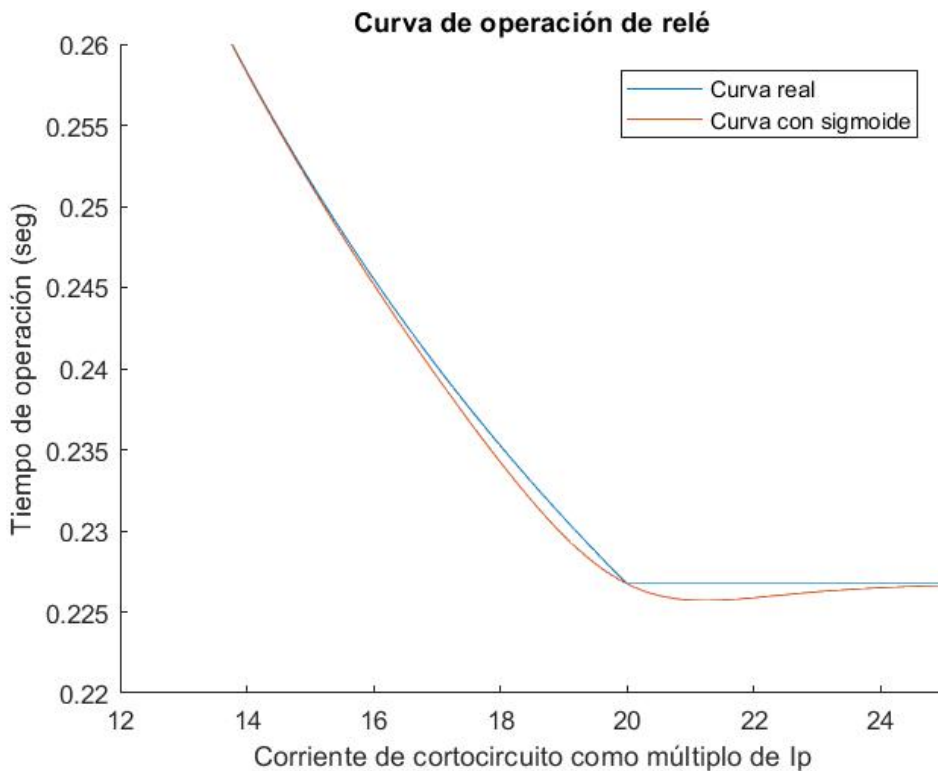


Figura 4.5: Comparación entre emplear función sigmoide vs emplear función if

Así, la primera función de protección del modelo es la de sobrecorriente temporizada (número 51 en el código numérico de protecciones ANSI), la cual posee el nombre de clase ANSI51. Esta clase corresponde a una protección que incorpora un retardo en base a la intensidad de la corriente de cortocircuito según los estándares IEC. De esta manera, esta clase presenta los atributos TDS, Ip, EI, VI, SI, LI, los cuales representan los ajustes de la curva: time dial setting, corriente de pick up, curva extremely inverse, vey inverse, standard inverse y long-time inverse respectivamente. Asimismo, los métodos de la clase ANSI51 corresponden a una función sigmoide, una función de la curva de protección de sobrecorriente temporizada iec para cada uno de los tipos de curva mencionados y un método de tiempo de actuación. Todos los métodos mencionados reciben como argumento una corriente y son empleados para modelar la función que retorna el tiempo de actuación de la protección. A continuación, se detalla cada uno de los métodos de la clase ANSI51.

El método sigmoide (Ec. 4.1) se incorpora para poder construir una función de protección ANSI51 que sea constante a partir de 20 veces la corriente de cortocircuito como múltiplo de la corriente de pick up. Esto se debe a que los modelos reales de los relés presentan esta característica, por lo cual se debe incorporar al modelo. Por ello, se adapta la función sigmoide para que retorne un valor 0 cuando la corriente de cortocircuito sea menor a 20 veces la corriente de pick up y que retorne 1 cuando sea mayor.

$$\text{sigmoide}(I_{cc}) = \frac{1}{1 + e^{-I_{cc}/I_p + 20}} \quad (4.1)$$

Los métodos asociados a las funciones iec se construyen según la ecuación 2.1 y los valores de la tabla 2.1, existiendo un método para cada una de las cuatro curvas. De forma genérica, estas curvas se representan con la ecuación 4.2.

$$\text{iec}(I_{cc}) = \frac{TDS * K}{\left(\frac{I_{cc}}{I_p}\right)^\alpha - 1} \quad (4.2)$$

Finalmente, la función tiempo de actuación o *trip time* de la clase ANSI51 corresponde al método que retorna el tiempo de actuación de la función de protección para una corriente específica. Esta se construye como la suma de las cuatro curvas iec, multiplicadas por una variable binaria (B_i). De este modo, la variable binaria es cero para todos los casos salvo para la curva seleccionada, donde adquiere el valor de uno. Por otra parte, en este método, cada curva iec se construye junto a la función sigmoide, para lograr que el tiempo de actuación sea constante a partir de veinte veces la corriente de corto circuito en términos de la corriente de pick up, como se mencionó anteriormente. Para lograr esto, se calcula y define este valor constante como (cte_i) para cada una de los cuatro tipos de curva, pues, es específico para cada una de estas. Esta constante es calculada según la ecuación 4.3. Luego, para modelar la curva de protección de sobrecorriente temporizada, se considera la curva iec seleccionada menos una curva sigmoide multiplicada por la misma curva iec seleccionada menos el valor constante de dicha curva. Así, para corrientes previas a 20 veces la corriente de pick up, la sigmoide es cero y el tiempo de actuación es el de la curva iec. Por el contrario, para corrientes superiores a 20 veces la corriente de pick up la sigmoide pasa a ser uno. Esto conlleva

a que, el valor de la curva iec se cancela y solo queda el valor de la constante, logrando el comportamiento deseado. Así, la función que retorna el tiempo de actuación es la ecuación 4.4.

$$cte_i = \frac{TDS * K_i}{20^{\alpha_i} - 1} \quad (4.3)$$

$$triptime(Icc) = \sum_i (iec_i(Icc) - (iec_i - cte_i) * sigmoide(Icc)) * B_i \quad (4.4)$$

La segunda función de protección del modelo es la de sobrecorriente instantánea (número 50 en el código numérico de protecciones ANSI) la cual posee el nombre de ANSI50. Esta clase corresponde a una protección que dispara su señal tras un retardo fijo si la corriente medida supera el umbral de ajuste. Así, los atributos de esta clase son el tiempo de operación (o retardo) y la corriente de pick up. Además, esta clase cuenta solamente con el método `triptime`, el cual retorna el tiempo de operación de la protección. No obstante, si bien el método `sigmoide` no existe como tal en esta clase, se emplea esta función de todas formas para construir el modelo de esta protección. En efecto, como esta protección se activa para corrientes mayores a la de pick up, una función `sigmoide` invertida en el eje X resulta sumamente conveniente para modelar el tiempo de actuación de esta protección. Así, es posible modelar el método `triptime` como un tiempo de operación constante (retardo) más una función `sigmoide`. Ya que, para valores de corriente de cortocircuito que estén bajo el ajuste de pick up de la ANSI50 (I_{p50}), la función `sigmoide` retorna el valor 1, el cual se multiplica por una constante 100 para modelar que la función no actúa. Si la corriente de corto circuito es superior a la corriente de pick up, esta retorna 0, siendo el tiempo de actuación el retardo fijo de la protección (t_{op}). El método `triptime` de la clase ANSI50 se muestra en la ecuación 4.5.

$$triptime(Icc) = \frac{e^{5(-Icc+I_{p50})}}{1 + e^{5(-Icc+I_{p50})}} * 100 + t_{op} \quad (4.5)$$

La tercera función de protección del modelo es la direccional (número 67 en el código numérico de protecciones ANSI). Esta función se combina con alguna de las otras dos funciones de protección de tal forma que, cuando la corriente viaja en la dirección contraria a la determinada, esta no opera. En caso contrario, el tiempo de operación de la protección es el de la función con la cual se combina la direccional. De este modo, para modelar la función direccional se crean las clases `ANSI51_67` y `ANSI50_67`. Cada una de estas clases poseen los mismos atributos que las clases `ANSI51` o `ANSI50` con los cuales se construye un atributo objeto, el cual es un objeto de tipo `ANSI51` o `ANSI50` según corresponda. Además, se agrega un atributo `dirección`, el cual puede adquirir un valor entero entre -1 y 1, y determina si la direccional esta apagada (valor 0), si mira hacia adelante (valor 1) o hacia atrás (valor -1). También, en ambas clases existe el método `triptime`, el cual retorna el tiempo de operación de la función de protección. Este método se construye a partir del tiempo de operación de la clase `ANSI51` o `ANSI50` según corresponda y una función `sigmoide`. Esto porque, al igual que en el caso de la clase `ANSI50`, resulta conveniente el uso de una función `sigmoide` que agregue un retardo cuando corresponda para construir el método `triptime`. En este caso, la función `sigmoide` se construye de tal manera que, para valores iguales o mayores a cero, retorne

el valor cero y cualquier otro caso retorne el valor 1 como se muestra en la ecuación 4.6.

La función sigmoide en esta clase es construida así porque, si el argumento de la función es el múltiplo entre la corriente de corto circuito y la variable de dirección, se obtiene el comportamiento de una función direccional. De esta forma, cuando la corriente vaya hacia adelante y la dirección sea la misma, el múltiplo será mayor a cero y la función sigmoide retornará cero. Análogamente, para el caso de reversa ocurre lo mismo, es decir, al multiplicar una corriente negativa (reversa) cuando la variable dirección también va en reversa (-1), se retorna el valor cero. Si la corriente va contraria a la dirección determinada, el producto entre ambos será menor a cero, por lo que la sigmoide retornará 1. Para el caso donde la dirección sea bidireccional (variable dirección con valor 0), la sigmoide se construye de tal manera que retorna el valor cero, desplazando el eje X levemente hacia la derecha.

De esta forma, el tiempo de actuación de la clase ANSI51_67 ó ANSI50_67 será el del objeto ANSI51 ó ANSI50 más el valor de la sigmoide multiplicado por 100. Así, si las direcciones concuerdan, no se agrega retardo al tiempo de actuación, dejando solo el tiempo de la curva de sobrecorriente temporizada o instantánea. Caso contrario, se agrega un retardo de 100 segundos equivalente a que la protección no operaría para dicha corriente, tal y como se muestra en la ecuación 4.7.

$$inv_sigmoide(y) = \frac{1}{1 + e^{100(-y+0.1)}} \quad (4.6)$$

$$triptime(Icc) = obj(Icc) + inv_sigmoide(-(Icc * direction)) * 100 \quad (4.7)$$

Para terminar, la última clase del modelo es la clase relé, la cual se encarga de modelar el funcionamiento de un relé en base a las clases anteriores. En esta clase se definen una serie de atributos necesarios para poder modelar el problema de optimización. El primero, es el atributo nombre, el cual se emplea para poder iterar sobre las distintas variables de optimización. Luego, los atributos TTCC y TTPP, que representan los transformadores de medida asociados al relé en particular. Después, existen varios atributos que fijan el valor máximo y mínimo que pueden adquirir las variables de optimización. Estos son: Ip máxima, Ip mínima, TDS máximo, TDS mínimo, tiempo de operación mínimo, tiempo de operación máximo, Ip ANSI50 máximo y Ip ANSI50 mínimo. Originalmente estos valores son los entregados por el fabricante según la marca y modelo del relé. No obstante, estos se actualizan según los valores de las corrientes de cortocircuito, lo cual será explicado más adelante. Finalmente, existe el atributo protecciones, el cual consiste en una lista de todas las funciones de protección que estarán activas en el relé.

Por otra parte, los métodos de la clase relé son add_protection y get_triptime. La primera, es un método que permite agregar una nueva función de protección al atributo protecciones del relé. La segunda, es el método que se encarga de entregar el tiempo de operación del relé ante una corriente determinada. Para ello, compara todas las funciones de protección del atributo protecciones para entregar el mínimo tiempo de actuación entre todas estas. Para ello, se considera la corriente de falla en amperes

secundarios según sus transformadores de medida dentro de este método.

4.3. Problema ilustrativo

En esta sección, se describe el algoritmo y código empleado para resolver el problema ilustrativo. Para ello, se escribe una rutina capaz de establecer el problema de optimización, es decir, crear las variables de optimización, restricciones y función objetivo en base al modelo del relé. A partir de esto, el optimizador es capaz de resolver el problema, entregando finalmente la información de los ajustes de todas las curvas de los relés que fueron especificadas en un comienzo. En esta sección del código es posible distinguir tres partes.

Primero, se crean los distintos objetos del sistema. Estos son los TTCC, TTPP y relés, junto con las funciones de protección con las que cuenta cada relé. Dicho de otra manera, se especifica si el relé cuenta con una protección de sobrecorriente instantánea, temporizada o ambas y si cuentan con direccional o no. En esta parte del código las protecciones se definen como listas, las cuales contienen los valores iniciales para las distintas variables de optimización de las protecciones. También, a cada relé se le ingresan los valores mínimos y máximos permitidos para las distintas variables de optimización dados los rangos que permite el modelo y marca del relé. No obstante, tanto los límites como el valor inicial de las variables son actualizados posteriormente con la información de las corrientes de cortocircuito, lo cual será detallado más adelante.

Segundo, se crean las variables de optimización. Esto se realiza iterando por cada relé e identificando las protecciones que se encuentran en forma de listas. Así, por cada lista, se determinan las variables de optimización, fijando su valor inicial, valor mínimo y máximo para cada una según corresponda. Con estas variables, se crea un objeto de clase ANSI51 o ANSI50, y se agrega al relé mediante el método `add_protection`. Es necesario especificar que, a medida que se crean las variables, hay restricciones asociadas a estas. Es por ello que se agregan las restricciones para las variables binarias asociadas a cada tipo curva de las protecciones ANSI51, donde la suma de estas variables debe ser 1. También, para todos los relés que cuenten con protecciones direccionales, se crea una restricción donde ambas no puedan ver al mismo lado, es decir, la suma debe ser mayor o igual a -1 y menor o igual a 1 (si ambas mirasen para el mismo sentido, la suma de estas variables sería -2 o 2).

Por último, se debe determinar la función objetivo y las restricciones. Para ello, toda la información necesaria está contenida en forma de tres listas, de las cuales dos de estas contienen listas como elementos, es decir, son listas de listas. Esto porque, para respaldar un relé puede que se requiera más de un relé de respaldo, así, se forman listas donde el primer ítem representa información del relé principal y luego la de sus respaldos. De este modo, la primera de las tres listas contiene la información de los valores de las corrientes de cortocircuito y corresponde a una de las listas de listas. La segunda lista contiene la información de los índices de los relés con los cuales es posible identificar el principal y cuales son sus respaldos, por lo que también es una lista de listas. La tercera lista es la única que no contiene listas en sus elementos, sino que

valores, los cuales indican los pasos de coordinación. Esto porque, algunas restricciones no cumplen una operación de respaldo como tal, por lo que a estas se les asigna un CTI menor. Por otro lado, es importante mencionar que una falla está contenida en más de una lista, pues con una lista solo se especifica cuál relé es el principal y cuáles deben actuar después para ciertas corrientes, no obstante, para despejar una falla se requiere la apertura de más de un relé. Además, las listas poseen la misma dimensión, y en el caso de las listas de listas, cada elemento de estas también posee la misma dimensión, pues para cada relé, ya sea respaldo o principal, debe haber una corriente respectiva.

De esta forma, mediante la información contenida en las tres listas, se itera sobre cada una de las listas para construir la función objetivo y las restricciones. Como las listas son de igual dimensión, se itera sobre cada elemento de estas de forma simultánea. En el caso de la función objetivo solo se usan las listas de corrientes e índices, por lo que por cada iteración se cuenta con dos listas. Luego, se itera sobre cada elemento de estas listas, logrando acoplar índice y corriente, con lo que es posible indicar que el tiempo de operación que se suma a la función objetivo corresponde a cierto relé que ve cierta corriente de falla. Por otro lado, para las restricciones, estas solo se generan si existe al menos un respaldo, es decir, si las listas contienen más de un elemento. Así, se fija el primer elemento de la lista, correspondiente al relé principal, y se itera sobre el resto. Análogamente a la función objetivo, es posible determinar el relé y la corriente que ve. Para el caso de las restricciones también se emplea la lista de pasos de coordinación.

4.3.1. Prueba del modelo

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos de la prueba del problema ilustrativo. Para probar el modelo, se comparan el resultado que entrega el optimizador para las mismas fallas de la tabla 4.1 con los resultados de coordinar este sistema a mano, mostrados en la tabla 4.4. Por otro lado, para obtener estos resultados se emplea como punto inicial los ajustes obtenidos previamente de la tabla 4.3 y se ajusta el tiempo de operación mínimo que puede tener un relé como 0.150 segundos. Esto debido a que, para coordinar mediante ensayo y error, el ajuste fue realizado considerando que el relé primario actuaría alrededor de este tiempo. De ahí que, para obtener un resultado con el que se pueda comparar, es necesario incluir esto dentro del problema.

Como resultado, el optimizador fue capaz de encontrar un ajuste tal que los relés actúan de forma coordinada y en un tiempo similar al obtenido originalmente. Los ajustes de los relés y los tiempos de actuación de estos se muestran en las tablas 4.5 y 4.6. Al sumar los tiempos de actuación se obtiene un tiempo total de 3.414 segundos, tiempo similar al obtenido mediante ensayo y error, lo que indica que el optimizador es capaz de coordinar el sistema ilustrativo para las condiciones mencionadas anteriormente.

Tabla 4.5: Ajustes para las protecciones del problema ilustrativo obtenidos por problema de optimización

Relé	Curva	TDS	I_p
R_0	Standard Inverse	0.186	2.919
R_1	Standard Inverse	0.058	2.338

Tabla 4.6: Tiempos de actuación para las fallas del problema ilustrativo obtenidos por problema de optimización

Falla	Tiempo R_0 [seg]	Tiempo R_1 [seg]
A bifásica	0.516	0.150
B bifásica	0.476	0.150
C bifásica	0.455	-
A trifásica	0.487	0.150
B trifásica	0.450	0.150
C trifásica	0.430	-

4.4. Traspaso de datos

En esta sección, se describen todos los procedimientos asociados al manejo de datos previo al problema de optimización. Los datos necesarios para el problema son obtenidos a partir de los estudios de cortocircuitos realizados en ETAP. Con estos datos es posible determinar límites, puntos iniciales, restricciones, etc. De este modo, el proceso de traspasar los datos desde ETAP al programa consta de dos etapas. Primero, se deben ejecutar todos los estudios eléctricos necesarios en ETAP. Segundo, se desarrolla una rutina que convierte la información de las corrientes de cortocircuito a restricciones. Cada una de estas etapas es descrita a continuación.

4.4.1. Estudios eléctricos

La primera etapa consiste en realizar todos los estudios necesarios para el problema de optimización en ETAP. Para ello, se debe contar con el modelo del sistema eléctrico a coordinar. En este caso, el modelo del sistema eléctrico a estudiar ya existe, y solo requiere cambios menores. Posterior a esto, se requiere realizar un estudio de flujo de potencia con tal de obtener la corriente que miden los relés en condiciones normales de operación. Esto pues, esta información se emplea para el cálculo de límites para las variables de optimización. Luego, se realizan los estudios de corrientes de cortocircuito. Estos estudios se realizan fallando todas las barras del sistema. Desde estos estudios, se extrae toda la información necesaria para el problema mediante los reportes que genera ETAP.

4.4.2. Restricciones del problema

A partir de los distintos reportes de fallas extraídos de ETAP, se construyen las distintas restricciones del problema. Esto se realiza a partir de un *data frame* intermedio, el cual consiste en una matriz donde los relés están en las columnas y el bus fallado en las filas, tal y como se muestra en la figura 4.6. Este data frame se construye iterando por bus fallado, donde se itera a su vez por relé del sistema. Así, se busca en los reportes de ETAP la corriente que corresponde al relé. Es importante destacar que en los reportes de ETAP, se indica desde cual bus y hacia cual fluye la corriente de cortocircuito. Por lo que es posible determinar la dirección de la corriente que ve el relé para la falla. Así, como cada relé también tiene una dirección asociada (desde un bus específico hacia otro), se le da un valor negativo si la corriente es contraria a la dirección del relé.

	Relé 1	...	Relé N
Falla Bus 1	<i>Icc R1 Falla B1</i>	...	<i>Icc RN Falla B1</i>
...
Falla Bus M	<i>Icc R1 Falla BM</i>	...	<i>Icc RN Falla BM</i>

Figura 4.6: Dataframe intermedio

Previo a generar las restricciones del problema, se debe realizar un ajuste en las barras con transformadores en el data frame intermedio. Esto porque, los reportes de cortocircuito de ETAP usan como referencia la tensión de la barra fallada, lo que provoca que, al fallar una barra con un transformador conectado a dicha barra, el reporte muestra la corriente de cortocircuito que va a través del transformador en base a la tensión de la barra fallada. Por ello, así como se encuentra el data frame intermedio, uno de los relés asociados al transformador ve la corriente del otro extremo del transformador y no la ve que realmente, por lo que es necesario corregir estos valores. Esta situación también se da para los relés que están a otros niveles de tensión dentro del sistema. Para solucionar esto, se especifican los relés que se encuentran asociados a un transformador, y se itera sobre ellos usando la razón de transformación del transformador que protegen según corresponda.

Además, para poder iterar sobre el data frame intermedio, se crea el data frame de las restricciones vacío solo con los encabezados para ir escribiendo sobre este. Para crear este data frame de restricciones, se debe tener en consideración que, en esta etapa del manejo de datos, una restricción de coordinación consiste en que un relé de respaldo debe actuar cierto tiempo después, o más, que el relé principal, dándole tiempo a que este actúe primero. Es por esto que previo a escribir las restricciones como ecuaciones para el optimizador, se escriben en un data frame de restricciones vacío con los encabezados. En este data frame, se especifican las columnas para el relé primario, la corriente que ve el relé primario, el paso de coordinación, y se deja espacio para varios relés de

respaldo con sus respectivas corrientes. Se consideran varios relés de respaldo porque en un sistema enmallado, para lograr dar respaldo a un relé es necesaria la apertura de más de un relé en ciertos casos. Luego, una vez creado el data frame de restricciones vacío y corregido el data frame intermediario, se itera sobre él para generar las restricciones de coordinación del problema.

Con esto en consideración, se distinguen tres tipos de restricciones que debe generar la rutina encargada de manejar los datos de ETAP. El primer tipo de restricciones, son las asociadas a falla en bus. Para este caso, se espera que todos los relés asociados a la barra actúen como primarios, ya que solo así es posible cortar todos los aportes de la corriente de cortocircuito y despejar la falla. Por otra parte, los relés correspondientes al otro extremo del elemento asociado al relé principal (además de la barra), actúan como respaldo en esta operación. En la figura 4.7 se ejemplifica una falla en barra donde en verde se muestran los relés principales y en rojo los de respaldo.

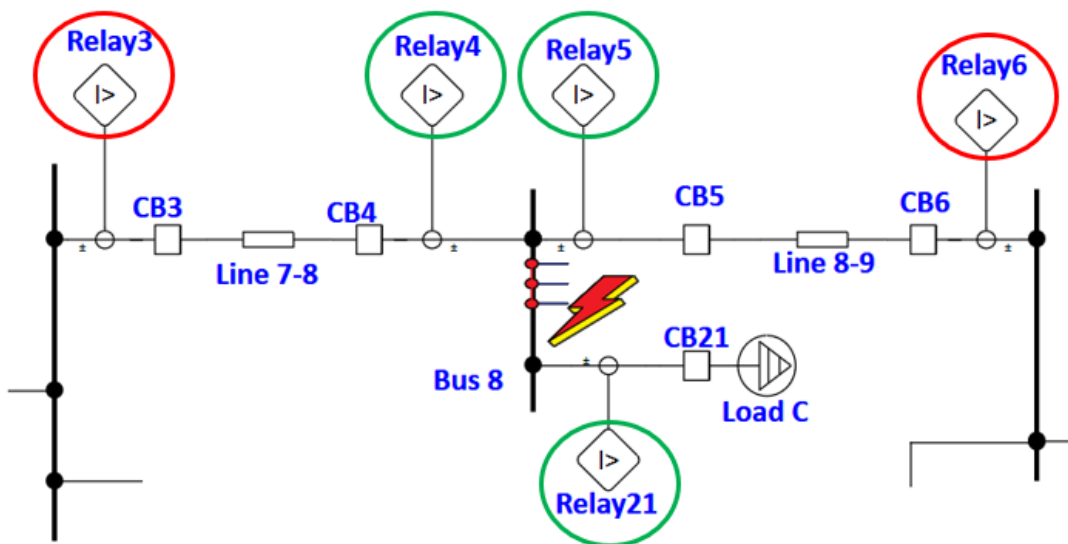


Figura 4.7: Restricciones de falla en barra

El segundo tipo de restricciones, son las asociadas a falla en elemento. Dado que en el caso de una línea de transmisión la corriente de cortocircuito que ve un relé depende de la ubicación de la falla a lo largo de la línea, se considera como falla en elemento el peor caso para el relé, es decir, cuando la falla se produce en bornes del transformador de medida del relé, pues, esa es la máxima corriente que debe despejar el relé. Para este caso, la corriente del relé principal es igual a la corriente que se produce al haber una falla en la barra asociada al relé, menos su aporte a dicha falla. Y sus respaldos son todos los demás relés de la barra, ya que, todos deben abrir para poder despejar la falla en caso de que el relé principal no abra. Por ello, en un sistema enmallado, para poder respaldar un relé se requiere la apertura de más de un relé, contando todos ellos como relés de respaldo. En la figura 4.8 se ejemplifica este caso mostrando la ubicación de la falla, el relé principal en verde y los respaldos en rojo.

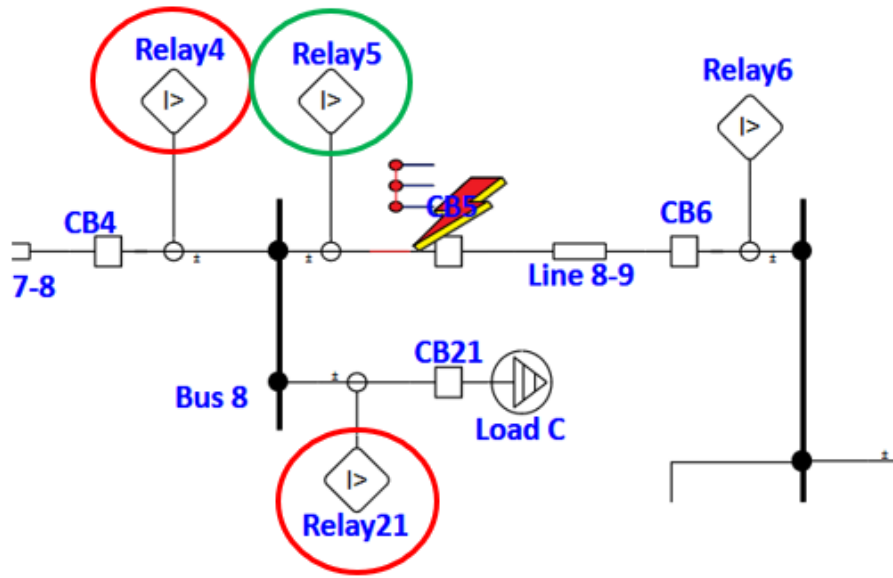


Figura 4.8: Restricciones de falla en línea

Por último, existe un tercer tipo de restricción a considerar que se desprende de la misma falla en elemento del caso anterior. Esta corresponde a la asociada al relé del otro extremo del elemento que se está protegiendo. Se espera que este relé tenga un ajuste tal que abra lo más rápido posible sin considerar comunicaciones. Para ello, este relé se considera como relé principal y sus respaldos son, análogo al caso anterior, los demás relés de su barra asociada. En la figura 4.9 se ejemplifica este caso mostrando la misma falla que en la figura 4.8 pero la restricción asociada al relé del otro extremo del elemento. Nuevamente, en verde se muestra el relé principal de esta restricción y en rojo sus respaldos.

Por otra parte, durante el desarrollo del trabajo se agrega un cuarto tipo de restricción además de las que se tenía contempladas en un principio. Esto ya que, para la restricción mostrada en la figura 4.9, nada impide que el ajuste resultante sea tal que, para un relé de respaldo en dicha restricción, los relés de la siguiente barra alejándose de la falla abran previo a este. Para evitar esto, se incorpora un tipo de restricción que impide que esto suceda. Esta restricción es la que se muestra en la figura 4.10, donde los relés en verde son los principales para esta restricción y sus respaldos se encuentran en rojo. Es importante destacar que aquí no es necesario cumplir con los 300 ms de paso de coordinación que exige la norma técnica, ya que, esta restricción está hecha para que los relés que deben respaldar en la figura 4.9 sean efectivamente los esperados y no algún otro relé en las proximidades. Por ello, el paso de coordinación para este caso es considerablemente menor y es de 50 ms.

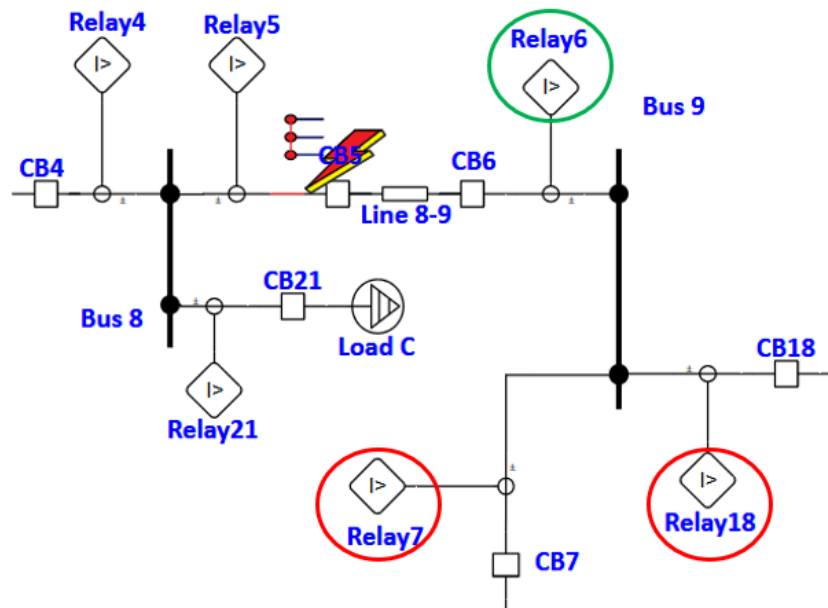


Figura 4.9: Restricciones del otro extremo de la línea

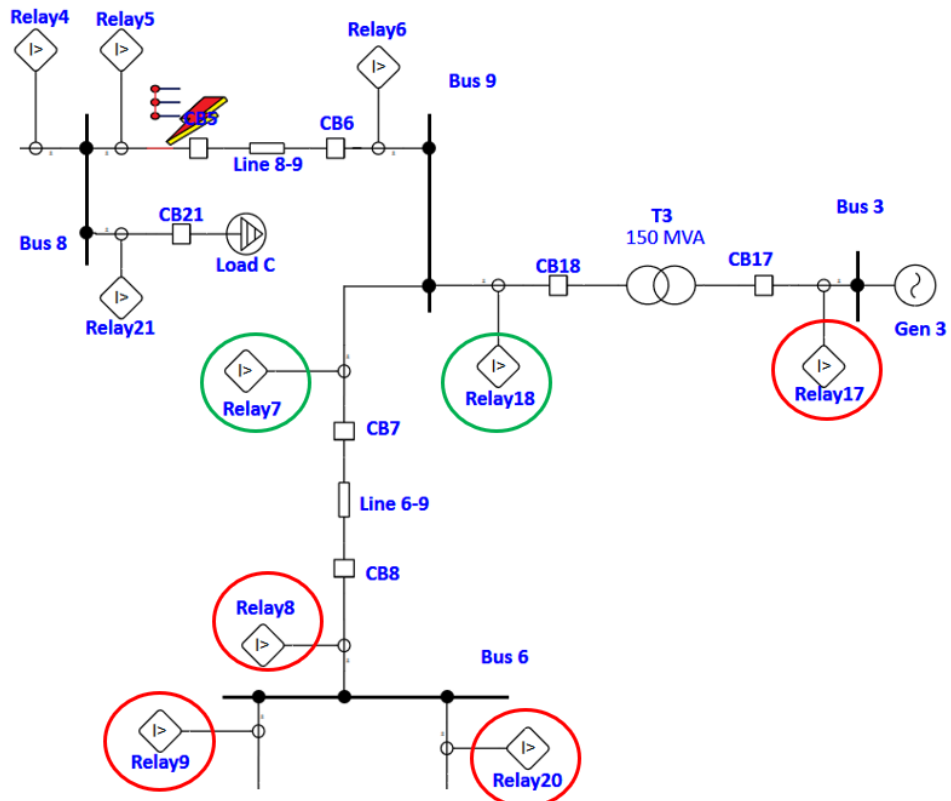


Figura 4.10: Restricciones para el último respaldo

4.5. Problema Benchmark

En esta sección se muestran todos los cambios realizados al programa, respecto al empleado para coordinar el problema ilustrativo, que fueron necesarios para lograr encontrar una solución al problema benchmark. Dichos cambios fueron producto a necesidades que surgieron al implementar el código resultante del problema ilustrativo a un sistema enmallado como lo es el IEEE 9 Busbars. Todo con el fin de lograr adaptar el programa a las nuevas necesidades y exigencias del sistema eléctrico a coordinar.

4.5.1. Límites y punto inicial

El primer cambio a considerar respecto al programa anterior es determinar los puntos iniciales y límites de las distintas variables de optimización del problema. Esto debido a la importancia que poseen estos valores para que el optimizador logre resolver el problema de optimización. Afortunadamente, la naturaleza del problema de coordinar protecciones eléctricas se presta para ello. A partir del flujo de carga y las restricciones del problema, es decir, las corrientes de cortocircuito, es posible elegir un punto inicial y límites razonables. No obstante, dichos puntos y límites se encuentran sujetos a los límites técnicos que permite el relé, debiéndose encontrar en el rango permitido.

Para la corriente de pick up de las protecciones ANSI51, los límites escogidos son en función de la máxima carga que ve el relé y la mínima corriente de corto circuito, tal y como se expresa en la ecuación 3.9. Así, el límite inferior corresponde a 1.2 veces la máxima corriente de carga en operación normal, y el límite superior como 0.8 veces la mínima corriente de cortocircuito que verá el relé. Así mismo, el punto inicial del problema se considera como 1.25 veces la corriente de carga máxima que verá el relé.

Para la variable TDS de las protecciones ANSI51 no existe referencia como en el caso de la corriente de pick up. No obstante, gracias a que ya se conocen valores para I_p , se emplea el punto inicial de la corriente de pick up para encontrar el punto inicial y límites para TDS. En primer lugar, se escoge el mínimo valor que acepta el relé como límite inferior, pues como se desea una operación rápida, a menor valor de TDS más rápida es la respuesta del relé. En segundo lugar, el valor inicial de TDS se calcula en base al valor inicial de la corriente de pick up. Así, se escoge la segunda corriente de cortocircuito más grande que verá el relé, pues corresponde a la falla en barra y, por la naturaleza del problema, el relé debiese operar alrededor de los 350 ms para esta corriente. Esto pues, para esa corriente se da que el relé actúa como respaldo cuando ocurre una falla en un elemento de otro relé de la misma barra, tal y como se muestra en la figura 4.8. Por ello, y suponiendo una operación instantánea del relé principal de la falla mencionada, se espera que el relé de respaldo opere tras 300 ms para la corriente que ve para falla en barra. Por consiguiente, se fija en 350 ms, dejando un margen extra de 50 ms para el punto inicial. De este modo, conociendo la variable I_p , la corriente de falla, el tiempo de operación, y el tipo de curva, es posible determinar el valor inicial de TDS como:

$$TDS_0 = \frac{0.35}{K} * \left(\frac{I_{cc_{min2}}}{Ip_0}\right)^\alpha \quad (4.8)$$

Por último, como el rango de valores admisibles para TDS suele ser muy amplio, se escoge un TDS máximo como múltiplo del valor inicial. Este valor puede variar según si el problema alcanza solución o no, estando entre 5-10 el valor inicial de TDS. Para este trabajo, se escoge un valor de 5 veces el valor inicial de TDS como límite superior.

Finalmente, para las protecciones ANSI51, es necesario escoger un tipo de curva inicial y direcciones iniciales en caso de contar con protección direccional. Para este caso, se considera como curva inicial una standard inverse para todas las curvas de sobrecorriente temporizadas. Mientras que, en caso de contar con direccional, se consideran 2 curvas ANSI51 para el relé comenzando una en cada dirección, pero permitiendo que puedan pasar a bidireccionales. Se profundiza respecto a la direccionalidad más adelante.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los puntos iniciales y límites superiores e inferiores para una protección de sobrecorriente temporizada ANSI51:

Tabla 4.7: Límites y punto inicial para las protecciones ANSI51

	Ip	TDS	Curva	Dirección
Valor inicial	I load * 1.25	$\frac{0.35}{K} * \left(\frac{I_{cc_{damin}}}{Ip_0}\right)^\alpha$	3	1/-1
Límite superior	Icc min * 0.8	TDS*5	1	1
Límite inferior	I load * 1.2	0.05	4	-1

Igualmente, se deben escoger valores iniciales y límites para las variables Ip y retardo de las protecciones ANSI50. Primero, para la corriente de pick up se escoge como valor inicial 0.8 veces la máxima corriente de cortocircuito que verá el relé, mientras que sus límites inferior y superior son 0.8 y 0.95 veces dicha corriente respectivamente. Esto debido a que las protecciones de sobrecorriente instantáneas en este caso cumplen el rol de despejar la máxima corriente de cortocircuito que verá un relé con el menor retardo posible, ya que, esta corriente al ser la más alta es la que expone a los equipos a un mayor peligro. Con ello, también se le resta el peso a las protecciones de sobrecorriente temporizadas de tener que despejar una corriente de gran magnitud. Sin embargo, esta función de protección presenta un retardo fijo ajustable, el cual para el problema de optimización comienza con un valor inicial de 0.1 segundo, 0 como límite inferior y 0.1 como máximo. Por último, dado que las funciones de protección de sobrecorriente instantáneas pueden contar con direccional, se fija como valor inicial hacia adelante, pues es donde se espera que vaya la máxima corriente la cual corresponde a la mencionada en la figura 4.8.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los puntos iniciales y límites superiores e inferiores para una protección de sobrecorriente instantánea ANSI50:

Tabla 4.8: Límites y punto inicial para las protecciones ANSI50

	I_p	Delay
Valor inicial	$I_{cc \max}^* 0.8$	0.1
Límite superior	$I_{cc \max}^* 0.8$	0.1
Límite inferior	$I_{cc \max}^* 0.95$	0

Ya para terminar, es conveniente recalcar que todos los valores calculados son comparados respecto a los límites técnicos de los relés. Así, cada vez que los límites y valores iniciales son calculados, estos son comparados con los límites técnicos del relé y se elige el menor o mayor según corresponda. Más específicamente, se elige el mínimo de los límites superiores y el máximo de los límites inferiores.

4.5.2. Direccionalidad

Como se mencionó al inicio de esta sección, es necesario adaptar el programa del problema ilustrativo que corresponde a un sistema radial al problema benchmark. Para resolver el problema ilustrativo no se implementaron las protecciones direccionales pues el problema consideraba el flujo de corrientes de cortocircuito en una dirección solamente. Este no es el caso en un sistema enmallado, donde se presentan flujos de las corrientes de cortocircuito en ambas direcciones para la mayoría de los relés.

Al aplicar el problema de optimización sin direccionales fue imposible para el optimizador encontrar una solución factible. Esto se debe a que, en varios casos, se producen situaciones donde las corrientes que fluyen de un lado para otro son muy similares, como por ejemplo en la figura 4.11. Aquí, se puede apreciar como para la falla en el Bus 7, se requiere que el relé 3 actúe como relé primario y el relé 4 como respaldo para una corriente de 1659 A. No obstante, al fallar el bus 8, se produce una corriente de 1395 A en dirección contraria a la corriente anterior que requiere del relé 4 actuar como principal y del relé 3 como respaldo. Esto es algo sumamente exigente para el optimizador, ya que, se espera que ambos relés se respalden para corrientes prácticamente iguales, según los órdenes de magnitud de las corrientes de cortocircuito. Más aún, aunque fuese posible coordinar dichas restricciones con la diferencia de 264 A, hay muchas otras restricciones que se deben respetar dentro del problema, por lo que es poco probable que siquiera exista una solución factible al problema de optimización planteado tal y como se encuentra sin protecciones direccionales.

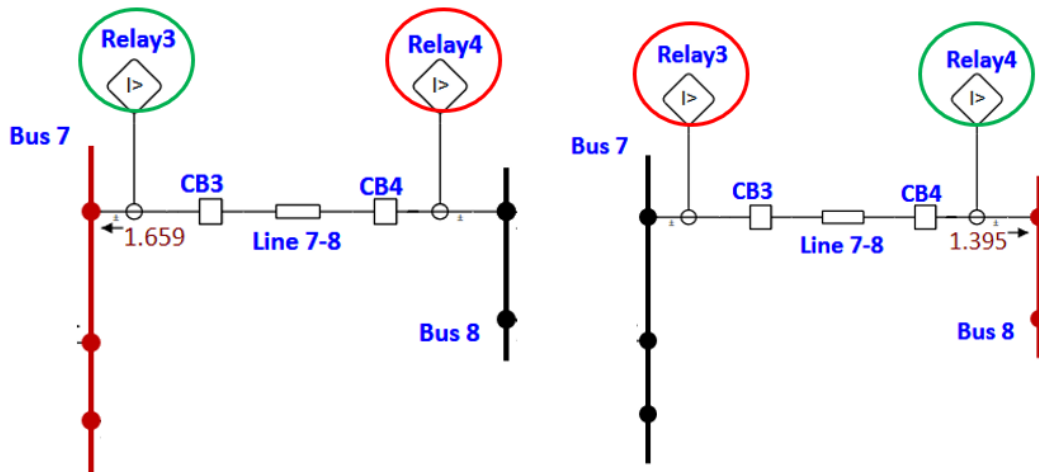


Figura 4.11: Requerimientos contradictorios en sistema enmallado

Por esta razón, se necesitan incorporar las protecciones direccionales con tal de encontrar una solución al problema de coordinación de protecciones para el sistema benchmark. Así, es necesario implementar dos protecciones de sobrecorriente temporizadas con direccional por relé. Como resultado, un par de estas curvas (una curva por relé) se encargan de una dirección de la corriente, y el otro par de la otra dirección. De esto se concluye que para que un relé pueda operar ante todas las corrientes de cortocircuito, este necesita 2 curvas de sobrecorriente temporizadas, una para cada dirección.

A partir de aquí, se producen los siguientes cambios al programa. Primero, se agregan al modelo del relé las clases ANSI51_67 y ANSI50_67, que corresponden a curvas de protección de sobrecorriente temporizada con protección direccional y protección de sobrecorriente instantánea con protección direccional respectivamente. El modelo de ambas clases es detallado en la sección 4.2. Segundo, se agrega una nueva variable de optimización encargada de definir la dirección de una curva. Finalmente, se incorporan restricciones que impiden que las 2 direcciones de las protecciones ANSI51 de un relé sean iguales. Esto con el fin de evitar que el optimizador busque en un espacio de búsqueda donde ambas protecciones direccionales miran para el mismo lado, lo que se sabe es infactible. Esto es importante, ya que, la variable de optimización encargada de la dirección es entera, por lo que restringir espacios de búsqueda para esta variable contribuye a un mejor desempeño del optimizador.

Nueva variable de optimización

- $v67_{ij}$: Variable encargada de determinar la dirección de la curva de sobrecorriente j del relé i . Se considera discreta tal que $v67 \in \{-1, 0, 1\}$.

Nuevas restricciones

$$\begin{aligned} v67_{1j} + v67_{2j} &\geq -1 && \forall j \\ v67_{1j} + v67_{2j} &\leq 1 && \forall j \end{aligned}$$

4.5.3. Corriente de pick up y TDS discretas

Por otro lado, además de incluir lo mencionado en las secciones anteriores, se debe incorporar al modelo la naturaleza discreta de la corriente de pick up y TDS. Si bien este problema no posee relación directa con el hecho de adaptar el problema a un sistema emallado, los resultados de la validación de la solución entregada por el optimizador, considerando dichas variables continuas, evidenció la necesidad de discretizar estas variables. Esto pues, el modelo de ETAP de un relé maneja hasta 2 decimales para las distintas variables que se pueden ajustar, por lo que, al redondear los resultados de las distintas variables se produce un error no despreciable.

A modo de ejemplo, considerando el caso de redondear TDS para un tiempo de operación mayor a 300 ms, se puede apreciar el efecto de redondear esta variable en el tiempo de actuación del relé. En efecto, dada la curva de una protección de sobrecorriente temporizada según la ecuación 2.1, redondear TDS resultó que empíricamente el tiempo de operación cambia en aproximadamente 30 ms. Este error depende del tercer decimal del resultado, es decir, que tanto se aleja del valor final. También depende del tiempo de operación, donde a mayor tiempo de operación mayor es la diferencia al redondear el resultado de la variable. Además, se debe tener en cuenta que los pasos de coordinación dependen de dos relés. Por esta razón, se pueden dar casos donde el paso de coordinación aumenta y en otros disminuyen respecto a la solución entregada por el optimizador. Esto ya que, se producen casos donde la diferencia en el tiempo de operación de ambos relés se anula y en otros se suman, pudiendo cambiar el paso de coordinación de 300 ms a 250 ms en un peor escenario.

De igual modo, redondear la corriente de pick up trae consigo el mismo problema. No obstante, dado que I_p tiene como función determinar el punto de inicio de la curva, es decir, desde qué corriente debiese actuar el relé, el impacto de redondear dicha variable en el tiempo de actuación es considerablemente menor en relación a TDS. Esto porque, la variable TDS tiene como fin ajustar el retardo, por lo que es razonable que el redondear esta variable cambie significativamente el tiempo de operación del relé.

Por consiguiente, se requiere incorporar la naturaleza discreta de estas variables al problema de optimización. De esta forma, se toma como ejemplo un caso similar de la bibliografía consultada, más específicamente en [17]. En dicho trabajo, solo la corriente de pick up se maneja como variable discreta en el problema de optimización, no obstante, como se mencionó en el párrafo anterior, no es posible pasar por alto la necesidad de discretizar TDS. Por ello, ambas variables pasan a ser variables discretas dentro del problema de optimización. Ahora bien, evidentemente las variables de por sí no son discretas, sino que cuentan con dos decimales, por lo que para el optimizador estas variables son multiplicadas por 100, pero para la ecuación 2.1 las variables son divididas por 100 para compensar. Así, la solución entregada por el optimizador es exactamente la que se ingresa a ETAP y los tiempos de actuación de los relés indicados por el optimizador son los de la validación en ETAP.

Por último, el motivo de haber manejado estas variables de forma continua en un comienzo es el trade-off existente entre incluir una variable discreta al problema y que

el optimizador sea capaz de encontrar una solución factible. Es más, por cada variable discreta que se agrega al problema de optimización, este se vuelve más complejo de resolver. Por lo que, incluir la corriente de pick up, por ejemplo, significa agregar 42 variables discretas, pues el sistema cuenta con 21 relés con 2 corrientes de pick up cada relé (debido a las direccionales). Debido a esto, incorporar la naturaleza discreta de la corriente de pick up y TDS efectivamente trajo consigo problemas para poder resolver el problema de optimización. Esto es explicado a fondo en la siguiente sección.

4.5.4. Co-optimización

Para lograr resolver el problema de optimización computacionalmente incorporando la corriente de pick up y TDS discretas se empleó un método iterativo. Ante esto, es conveniente definir el concepto de co-optimización. En [25] se define co-optimización como “[...] the simultaneous optimization of two or more different yet related resources within one optimization formulation”. No obstante, en la misma referencia se entrega una segunda definición a partir de la primera. Esta dice: “Another perspective to co-optimization of resources is given by relaxing definition A to: “co-optimization is the optimization of two or more different yet related resources within one planning framework.” Here the emphasis on simultaneous optimization within one formulation is relaxed, while still the objective is to comprehensively optimize all related resources within one framework. This can be achieved by introducing an “iterative approach [...]”. Dicho esto, para este trabajo la segunda definición de co-optimización es la empleada. A modo de ejemplo, en [25] se presenta un esquema iterativo donde optimizan la planificación de la generación y transmisión de forma iterativa como se muestra en la figura 4.12.

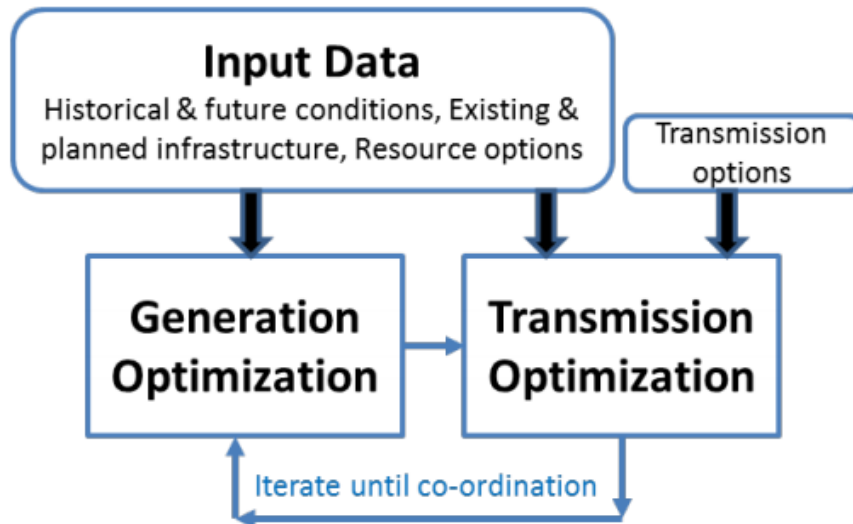


Figura 4.12: Ejemplo de co-optimización [25]

Teniendo en cuenta lo anterior, es fundamental detallar las causas que hicieron necesario emplear una co-optimización. Esto surge de cambiar a variables discretas la corriente de pick up y TDS en el problema de optimización. A grandes rasgos, el optimizador presentó problemas que suelen ser habituales al emplear algoritmos que trabajan problemas de optimización enteros mixtos no lineales. Esto culminó en implementar una co-optimización para que el problema pudiese ser resuelto.

En relación a los problemas presentados por el optimizador, estos surgen tras incorporar solo TDS como variable discreta para evaluar el desempeño del optimizador en una primera instancia. Sin embargo, el programa no es capaz de encontrar una solución con los límites de las distintas variables que se tenían en consideración originalmente. En este caso, la alternativa más intuitiva es ampliar los límites de TDS, puesto que esta variable no presenta límites por requerimientos eléctricos a diferencia de la corriente de pick up, por lo que cambiar estos límites resulta más sencillo. Finalmente, se determinan los límites de la tabla 4.7. Estos límites logran encontrar una solución factible al problema. No obstante, el optimizador resulta sumamente dependiente de los límites expresados en la tabla. Tal es así, que la más mínima variación resulta en que el optimizador se vuelve incapaz de encontrar la solución que había encontrado previamente.

Ante esto, en la literatura se mencionan los problemas existentes al trabajar con problemas de optimización con parte entera y/o no lineales, además de los problemas que presentan los optimizadores que resuelven este tipo de problemas. Por ejemplo, en [10] se enuncia que los problemas MILP son problemas de optimización combinatorial, por lo cual la mayoría de los algoritmos puede llegar a tener que realizar un número exponencial de subproblemas. Otro problema que surge es que, los algoritmos que resuelven este tipo de problemas, además de tener que encontrar la solución óptima, deben verificar que esta lo sea, aumentando el trabajo requerido para retornar una solución. Es más, incluso en el caso donde el punto inicial es el óptimo global del problema de optimización, los algoritmos requieren un número exponencial de iteraciones para poder reconocer el óptimo como tal. En el mismo texto se recalca también que, en la práctica, el tiempo para resolver este tipo de problemas crece exponencialmente en la medida que se incorporan variables de optimización. Por su parte, los problemas MINLP presentan los aspectos de un problema MILP y uno NLP, además de otras características propias, por lo que resolver el problema se vuelve aún más complicado y demandante para los algoritmos.

A pesar de los problemas mencionados anteriormente, algoritmos como el branch and bound han tenido éxito resolviendo este tipo de problemas de optimización. Tanto en [10] como en [24] se menciona dicho algoritmo como uno de los más exitosos y que se han creado otros algoritmos basados en él por lo mismo. Sin ir muy lejos, Gekko emplea un algoritmo propio basado en branch and bound. Se debe destacar también que, así como existen muchos algoritmos derivados de branch and bound, existen distintos tipos de estrategias que se pueden ajustar al algoritmo para que pueda encontrar una solución al problema. En [24] se enumeran varias pero es de particular interés la selección de nodo, pues Gekko, si bien ofrece varias alternativas, sugiere usar "Depth First Search". Esto es debido a que, en la práctica, esta selección de nodo encuentra el mayor número de soluciones factibles en comparación a otros métodos. No obstante,

presenta el problema que el algoritmo parte de un punto infactible y a partir de ahí busca la mejor solución que cumpla con el mayor número de restricciones [24].

Teniendo en cuenta lo ya mencionado, y que el problema de coordinar protecciones de sobrecorriente es altamente no lineal, es posible que el algoritmo sea simplemente incapaz de resolver el problema tal y como está planteado. Por lo que fue un evento azaroso que se hayan encontrado límites específicos para los cuales el algoritmo fue capaz de encontrar una solución factible. No obstante, esto no asegura que, a futuro, al implementar el programa desarrollado a otro sistema, este sea capaz de resolverlo. Por ende, el desempeño del optimizador no es confiable y debe buscarse una alternativa para evitar este comportamiento.

Así, se opta por implementar una co-optimización, iterando sobre las soluciones que se van encontrando con tal de llegar a tener una solución que considere la corriente de pick up y TDS como variables discretas. La co-optimización implementada consta de tres iteraciones, siendo cada una de ellas un problema de optimización. La primera iteración resuelve el problema como se tenía planteado originalmente, es decir, con las variables TDS y corriente de pick up continuas, además de todas las demás variables del problema en general con los límites de la tabla 4.7. Esta primera iteración mostró dar buenos resultados, por lo que su solución es una buena base para continuar iterando sobre ella. La segunda iteración cuenta solamente con la corriente de pick up y TDS como variables de optimización, siendo TDS discreta e I_p continua, dejando todas las demás variables del problema fijas al resultado de la primera optimización. Además, se usa el resultado de la primera optimización como punto inicial del segundo problema de optimización, y se fijan límites en relación a este punto inicial, siendo 0.8 y 4 veces del resultado de la primera iteración los límites inferiores y superiores respectivamente. Se debe recalcar que los nuevos límites son comparados con los límites originales, ya que, estos responden a limitaciones eléctricas o técnicas, por lo que deben respetarse en todas las iteraciones. Finalmente, la tercera iteración considera la corriente de pick up y TDS como variables de optimización discretas y, análogamente, su punto inicial es el resultado de la segunda optimización. Para este caso, los límites son 0.99 y 1.01 veces el resultado de la segunda iteración los límites inferiores y superiores respectivamente. Por otro lado, la función objetivo de cada iteración también cambia. Para la segunda y tercera iteración solo considera la suma de la acción primaria de los relés, mientras que la primera considera además el tiempo de operación de los respaldos. Un diagrama resumen de la co-optimización se encuentra en la figura 4.13.

El motivo tras implementar una co-optimización es acercarse a la solución final asegurando un buen desempeño del optimizador. Es por esta razón que desde la segunda iteración se descartan las demás variables, y así dar énfasis en las que deben ser discretas. Por otro lado, el motivo por el cual no se implementaron ambas variables de forma discreta en la segunda iteración es porque al hacerlo el optimizador no tuvo un buen desempeño. Por ende, y dado que la variable TDS es la que más afecta al tiempo de operación cuando es redondeada, se considera que la segunda iteración solo busque una solución con TDS discreto, dejando la variable I_p continua para que tenga un mayor espacio de búsqueda. De este modo, ya estando más cerca de la solución, se implementa un tercer problema de optimización que incluye ambas variables de forma discreta. Con

respecto a los límites, estos cada vez son más estrechos para evitar que el optimizador se aleje mucho de la solución anterior. Así, el optimizador busca la mejor solución para las variables discretas en torno a la solución entregada por la iteración anterior. Y dado que cada vez se está más cerca de la solución final, cada vez los espacios de búsqueda deben ser menores. Por último, el cambio de la función objetivo es con el fin de mejorar el desempeño del optimizador. Dado que la primera iteración se encarga de minimizar el tiempo de operación de los relés de respaldo, y que las siguientes iteraciones no se alejan considerablemente de ese resultado, resulta conveniente eliminar la operación de los relés de respaldo de la función objetivo.

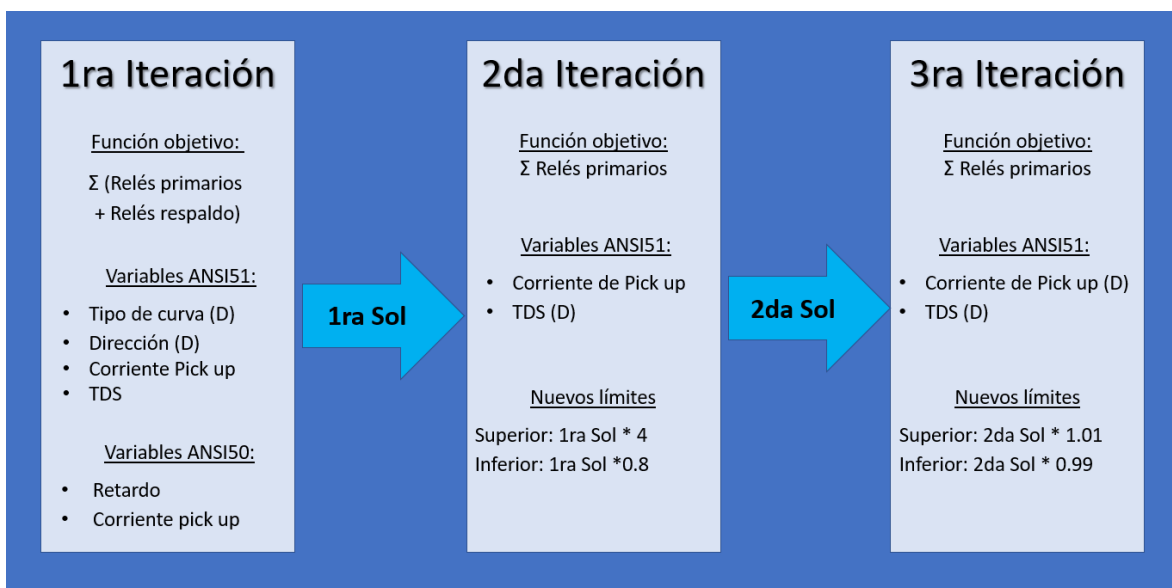


Figura 4.13: Co-optimización

4.5.5. Resultado final

Una vez implementadas todas las consideraciones mencionadas en la sección anterior, se obtienen los ajustes finales para que los relés operen de forma coordinada y rápida ante fallas en el sistema Benchmark. Estos resultados fueron validados en ETAP para las distintas fallas consideradas, teniendo el mismo comportamiento que el entregado por el programa. A modo de ejemplo de los resultados, en la figura 4.14 se puede apreciar la secuencia de apertura de los 9 primeros interruptores que abrirían ante una falla en la barra 4, marcados con una cruz y un número que indica su posición en la secuencia de apertura. Aquí se puede visualizar que los primeros relés que abren son los cercanos a la barra, es decir, los relés 16, 11 y 10, donde el relé 16 abre primero, luego el 11 y después el 10. Posteriormente, en caso de no operar estos, abrirían sus respaldos directos, es decir, los del otro extremo de la línea o elemento que protegen además de la barra, siendo los relés 15, 12 y 9, marcados con un número 4, 5 y 6 respectivamente en relación con la secuencia de apertura. Finalmente, se cuenta con los respaldos que involucran la apertura de los relés de las barras aledañas, es decir, los relés 13, 19 y 20, marcados con un número 7, 8 y 9 respectivamente.

A pesar de esto, si bien las secuencias de apertura tienen un comportamiento de acuerdo a lo esperado, no todos los pasos de coordinación logran ser de al menos 300 ms. No obstante, son pocos los pasos menores a este valor y estos no se alejan mucho de los 300 ms. Ante esto, se debe mencionar que, si bien uno espera conseguir un ajuste que logre cumplir con todas las exigencias, según como se encuentra planteado el problema no existe un ajuste tal que todos los pasos de coordinación sean mayores a 300 ms. Esto, por el contrario de ser algo negativo, es un buen indicador. En efecto, que el optimizador entregue una solución indicando cuales pasos de coordinación no se cumplen muestra que el problema de optimización, con las condiciones específicas entregadas, no tiene solución factible en el espacio de búsqueda del problema de optimización. En otras palabras, dados los relés, los elementos discretos del problema, las corrientes de carga, las corrientes de cortocircuito y la topología del sistema, se genera una situación tal que no es posible coordinar todos los relés para asegurar pasos de coordinación de 300 ms en todos los casos.

Por lo mencionado anteriormente, se destaca que el optimizador Gekko incluye en la función objetivo una penalización cada vez que no se cumple una restricción. Esta penalización es igual a la diferencia entre el paso de coordinación exigido menos el de la solución entregada. Por ello mismo, el optimizador tiene motivos para cumplir con todas las restricciones posibles, puesto que minimiza la función objetivo. Pero si no existe solución que cumpla con todas las restricciones busca aquella que cumpla con el mayor número de ellas y que aquellas que no se cumplen se acerquen lo más posible. Por ello, una medida que se puede implementar una vez encontrada la solución es ajustar los pasos de coordinación disminuyendo aquellos que no se lograron alcanzar. Esto se vuelve más relevante en la medida que existan pasos de coordinación que se alejan significativamente de los 300 ms.

Por último, se debe destacar que a medida que se avanza en las iteraciones del problema de co-optimización, existe un mayor número de pasos de coordinación que no alcanzan los 300. Esto respalda que, en la medida que uno incluye más exigencias dentro del problema de optimización, el número de soluciones factibles disminuye. Por ello, al manejar la corriente de pick up y TDS como variables continuas, la probabilidad de encontrar un ajuste que cumpla con todas las restricciones es mayor que al considerarlas discretas. En efecto, en la primera iteración casi no existen pasos de coordinación menores a 300 ms, salvo casos muy particulares del orden de 270 ms. Esto ocurre debido a lo similares que resultan en algunos casos las corrientes de cortocircuito junto con los límites de las variables. Posteriormente, tras la última iteración aparecen otros casos donde los pasos son de 295 ms. Esto se produce al convertir las variables TDS e I_p en discretas. Como se mencionó anteriormente, el error de discretizar TDS era mayor que el de discretizar la corriente de pick up, pero como se busca primero una solución para TDS con I_p continua, y luego para ambas en conjunto, el error de la solución final se asemeja al de I_p .

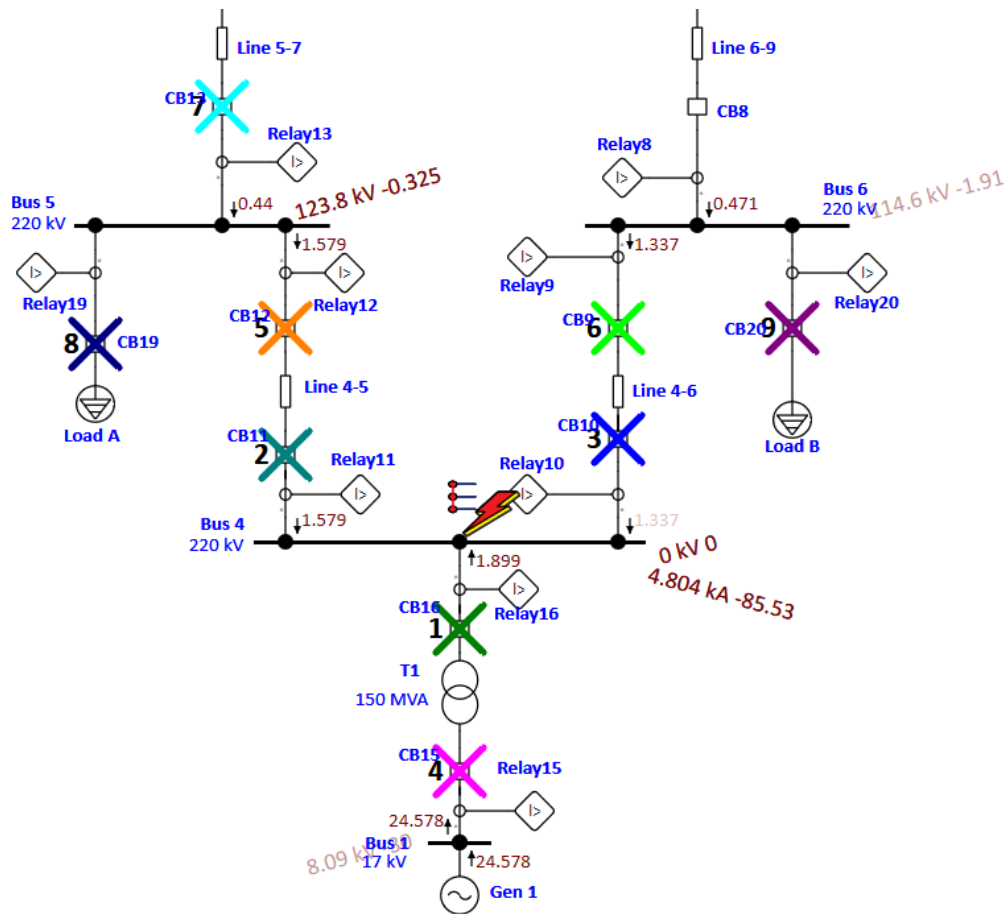


Figura 4.14: Resultados secuencia de apertura falla en barra 4

4.6. Problema Benchmark con múltiples escenarios

Dado que se logró conseguir un ajuste para los relés de tal forma que existe una operación coordinada para la topología base del sistema IEEE 9 Busbars, es necesario verificar que el programa sea capaz de entregar un ajuste que logre coordinar la operación de los relés para la segunda topología expuesta en la metodología. Teniendo en consideración los resultados expuestos anteriormente, se mostrarán a continuación los resultados de extrapolar el ajuste obtenido a la segunda topología. Así, es posible estudiar qué ocurre con los relés ante una falla en una topología similar pero no igual a la que se tenía considerada en el problema de optimización. De esta forma, tomando de ejemplo una barra cercana al generador dos (el generador ahora fuera de servicio), se considera la secuencia de apertura para una falla en la barra 8. En la figura 4.15, se aprecia que al fallar la barra con el ajuste obtenido anteriormente se producen una serie de descoordinaciones, en especial para los relés más cercanos al generador dos. Por ello mismo, es indispensable incluir dentro de las restricciones la segunda topología para encontrar un ajuste que resulte en la operación coordinada de los relés para ambos escenarios.

Por consiguiente, se incluyen ahora en el problema de optimización las restricciones asociadas a la nueva topología. Esto duplica el número de restricciones, volviendo más difícil de resolver el problema. No obstante, el programa fue capaz de encontrar un nuevo ajuste para los relés de tal manera que existe una operación coordinada para ambos escenarios, solución que es validada en ETAP para todas las fallas y para ambas topologías. Para ejemplificar la importancia de incluir ambas topologías como restricciones en el problema de optimización, se compara el caso anterior mostrado en la figura 4.15 con el nuevo ajuste, mostrado en la figura 4.16, donde ahora los relés sí actúan de forma coordinada.

Para finalizar, se recalca lo mencionado para la solución anterior con respecto a los pasos de coordinación. Al incluir ambas topologías en las restricciones se logra encontrar un ajuste tal que los relés operan de forma coordinada. No obstante, los pasos de coordinación no logran alcanzar los 300 ms para todos los casos. En efecto, al igual que para la coordinación de una topología, se repite la situación donde, debido a las exigencias del problema, puede que no se encuentre una solución que cumpla con todos los pasos de coordinación de al menos 300 ms. Ante esto, el optimizador entrega la mejor solución que es capaz de encontrar, repitiéndose el caso donde existen pasos de coordinación del orden de 270 ms y otros de 295 ms para ambas topologías por los motivos mencionados anteriormente. Sin embargo, se debe destacar que el resultado entregado por el optimizador logra ajustes de 300 ms para la mayoría de los pasos de coordinación en ambas topologías, lo que suele ser difícil de conseguir. Previo a encontrar este resultado, se manejaba como opción que, de haber problemas para encontrar una solución, la segunda topología considerara pasos de 250 ms en sus restricciones. De este modo, no se descarta que en caso de existir una topología muy distinta a las demás, esta considere un paso de coordinación menor a 300 ms, lo cual en este caso no fue necesario.

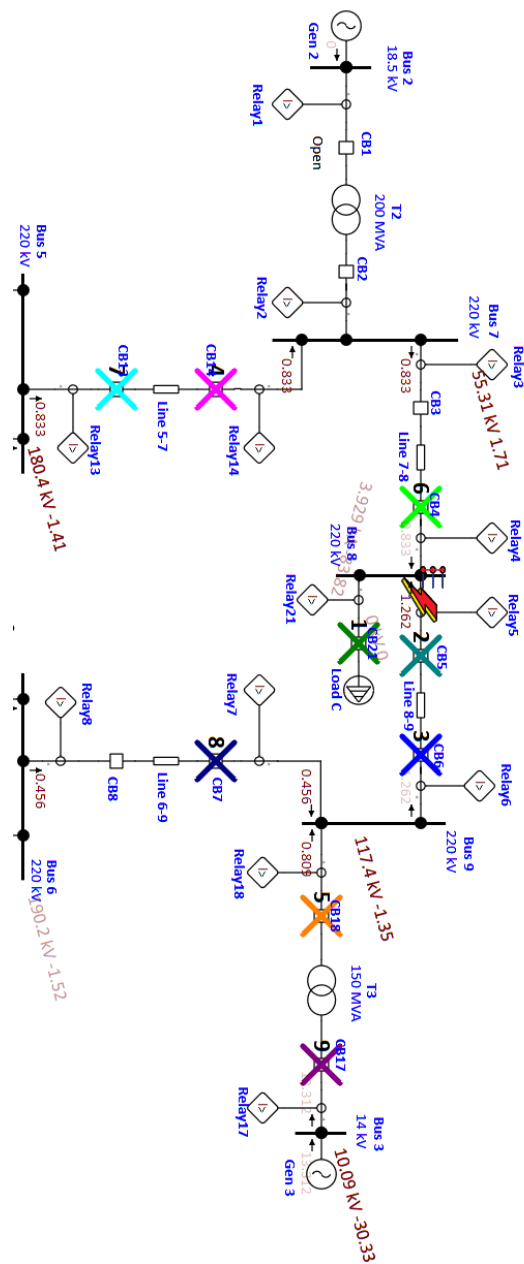


Figura 4.15: Secuencia de apertura falla en barra 8 para segunda topología con optimización considerando solo topología base

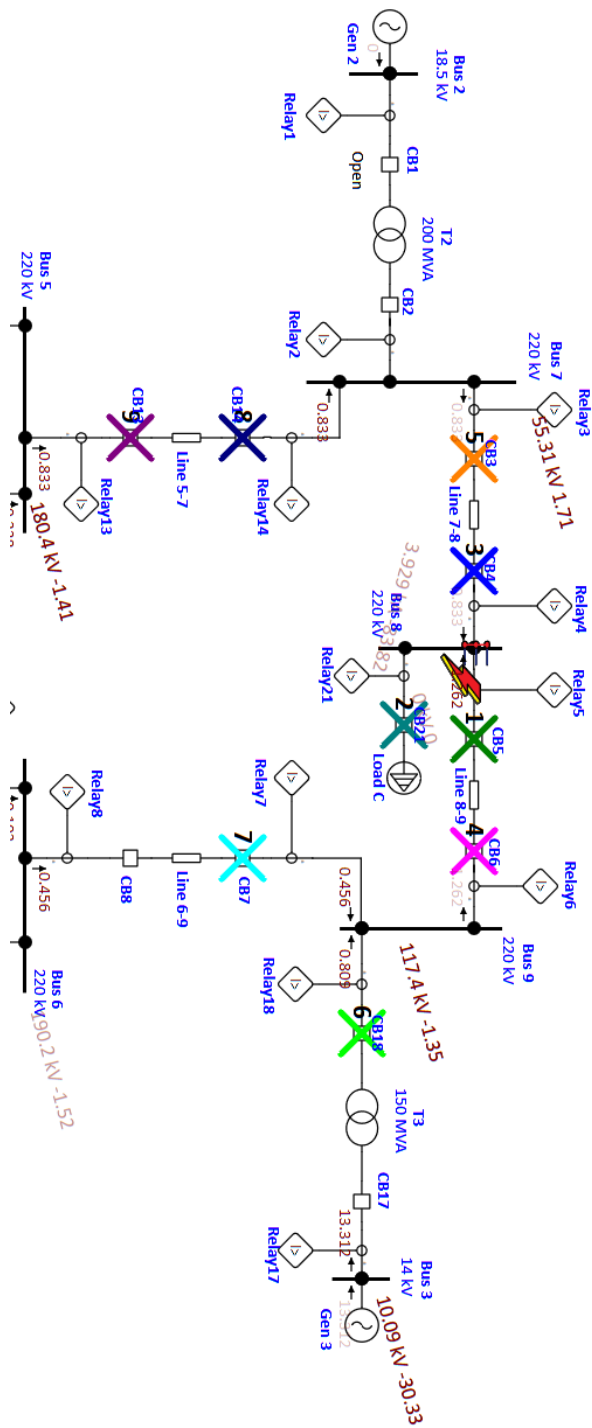


Figura 4.16: Secuencia de apertura falla en barra 8 para segunda topología con optimización considerando ambas topologías

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se propone coordinar protecciones de sobrecorriente mediante un problema de optimización entero mixto no-lineal con el fin de conseguir una operación rápida y coordinada de las protecciones. Para esto se desarrolla un algoritmo y código capaz de resolver el problema de optimización planteado. Dicho programa se prueba resolviendo el problema de coordinar las protecciones del sistema IEEE 9 Busbars, donde dicha solución es validada en el software ETAP. Del desarrollo del programa se extraen una serie de conclusiones que son expuestas a continuación.

Una buena construcción de las funciones de protección es fundamental para un buen desempeño del optimizador. Debido a las discontinuidades que provoca la función “if”, modelar las funciones de protección con esta función causa que el optimizador no sea capaz de encontrar una buena solución al problema. Ante esto, resulta una mejor alternativa construir las funciones de protección a partir de otras funciones continuas y dos veces diferenciables, como lo es la función sigmoide.

Las protecciones direccionales son indispensables para poder coordinar un sistema eléctrico enmallado. A raíz de lo similares que pueden llegar a ser las corrientes de cortocircuito fluyendo en direcciones opuestas en un sistema enmallado, la tarea de coordinar un sistema así resulta prácticamente imposible sin emplear protecciones direccionales. Ante esto, estas protecciones permiten encontrar un ajuste para cada dirección de la corriente y así lograr una operación coordinada de los relés.

Dada la naturaleza entera mixta y altamente no-lineal del problema, los optimizadores pueden no retornar buenas soluciones según como se encuentre planteado el problema de optimización. Ante esto, la co-optimización resulta una buena forma de abordar el problema. Así, realizando varios problemas de optimización consecutivos, es posible resolver problemas de optimización complejos y evitar los problemas comunes que los algoritmos presentan para resolverlos.

A pesar de todas las medidas incluidas, no se logra alcanzar pasos de coordinación superiores a 300 ms en todos los casos. Si bien este requerimiento es por norma técnica, en la práctica, lograr esto resulta difícil cuando los sistemas eléctricos son altamente enmallados. Por ello, el programa retorna la mejor solución posible, entendiendo que, dadas las exigencias planteadas en el problema de optimización, como límites o varia-

bles discretas, puede no haber una solución factible con todos los pasos de coordinación mayores a 300 ms. Por ello mismo, mientras la mayoría de los pasos cumplan con los 300 ms, o se acerquen a ese valor, se acepta que en la solución entregada por el optimizador puedan existir pasos menores, donde aquellos que no se cumplen deben ser tomados como un indicador de que ese paso en particular es muy exigente, y de ser necesario, puede volver a ejecutarse el programa disminuyendo los pasos de coordinación específicos que resultaron menores a 300 ms.

Incluir en el problema de optimización todas las topologías relevantes del sistema a coordinar en forma de restricciones es imprescindible, a pesar de volver más complejo el problema. En caso de no incluir todas las topologías, nada asegura una operación coordinada de los relés en todos los casos, especialmente en las barras cercanas donde se produce algún cambio topológico. En caso de que el problema se vuelva muy complejo de resolver para el optimizador, pueden relajarse los pasos de coordinación para las topologías menos recurrentes y así encontrar una solución.

5.1. Trabajo futuro

A raíz del trabajo expuesto surgen una serie de trabajos futuros propuestos.

Debido a que existen varios fabricantes de relés de protección en el mercado, algunos poseen ciertas particularidades. Las características más relevantes que varían según el modelo del relé son la variedad de curvas con las que este cuenta, y que algunos relés no aumentan el tiempo de actuación en la medida que la corriente de cortocircuito disminuye desde cierto punto. Concretamente, durante el desarrollo de este trabajo el modelo del relé empleado para la validación no considera un aumento en el tiempo de actuación para corrientes menores a 1.5 veces la corriente de pick up. Como el enfoque de este trabajo es manejar las curvas de forma general, esto fue pasado por alto. No obstante, incorporar el tipo de relé al modelo contribuiría a que los resultados del programa sean más fidedignos o encontrar otras soluciones. Para lograr esto, se puede realizar un estudio de los relés más comunes y agruparlos de tal manera que el modelo contemple características propias de cada tipo de relé.

Una vez realizado el paso anterior, resulta natural en la continuación del trabajo implementar el programa a un sistema real. De esta forma, se puede mostrar que el programa expuesto es capaz de resolver un sistema real o, por el contrario, estudiar los problemas que surgen en comparación con el sistema benchmark. En este último caso, se deben identificar las causas que provocan un peor desempeño del optimizador y corregirlas.

Con el fin de automatizar aún más el proceso, se puede desarrollar una rutina capaz de extraer los resultados del programa y traspasarlos al modelo del sistema en ETAP. Esto resulta un paso importante en la medida que el programa se implementa en sistemas de mayor número de barras, pues consigo hay un mayor número de relés. De esta forma, el traspaso automático de los resultados es de gran valor en términos de tiempo

y evitar el error humano, lo que ayuda a realizar la validación en ETAP.

Por último, dado que existen muchas otras funciones de protección, el modelo se puede volver más completo incorporando otras funciones de protección como las de distancia o diferenciales. Para esto se deben desarrollar las nuevas funciones de protección e incorporarlas al modelo como clases con sus respectivos métodos. Además, debido a que otras funciones de protección requieren información adicional a la corriente de cortocircuito de la falla, como el voltaje, se debe adaptar la forma en que los datos de la falla son ingresados a la clase relé del modelo para entregar todos los datos necesarios según las funciones de protección que existan en el modelo.

Bibliografía

- [1] W. Brokering, R. Palma y L. Vargas, *Ñom Lüfke (El Rayo Domado) o Los Sistemas Eléctricos de Potencia*, 1st ed. Santiago de Chile: Prentice Hall - Pearson Education, 2008, p. 4.
- [2] P. Anderson, *Power system protection*, 1st ed. Canadá: IEEE Press y John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [3] C. Russell Mason, *Art & Science of Protective Relaying*, 1st ed. Estados Unidos: General Electric, 2009.
- [4] Circuit Globe, “Overcurrent Relay.” <https://circuitglobe.com/overcurrent-relay.html>. Visitado: 11/06/2020
- [5] *IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book)*, IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book], 17 Dec. 2001.
- [6] B. Polajžer, M. Pintarič, M. Rošer and G. Štumberger, “Protection of MV Closed-Loop Distribution Networks With Bi-Directional Overcurrent Relays and GOOSE Communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 165884-165896, 2019.
- [7] *Norma Técnica de Calidad y Servicio*, CNE, 12-2019.
- [8] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*, 7th ed. Nueva York: Cambridge University Press, 2004.
- [9] D. Bertsimas and J. Tsitsiklis, *Introduction to lineal optimization*, 1st ed. Nashua: Athena Scientific , 1997.
- [10] S. Leyffer, “Deterministic Methods for Mixed Integer Nonlinear Programming,” PhD Thesis, Department of Mathematics & Computer Science, University of Dundee, Dundee, Reino Unido, Diciembre, 1993.
- [11] A. Schrijver, *Theory of Linear and Integer Programming*, 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [12] N. P. Padhy, “Unit commitment-a bibliographical survey,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1196-1205, May 2004.
- [13] H. Gao and C. Wang, “A Optimal Operation Scheduling Method of Pumped Storage Station and Thermal Power Station Coordination,” 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, pp. 1829-1832, 2006.
- [14] A. J. Urdaneta, R. Nadira and L. G. Perez Jimenez, “Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems,” *IEEE Transactions*

- on Power Delivery, vol. 3, no. 3, pp. 903-911, July 1988.
- [15] O. Nuñez-Mata, R. Palma-Behnke and P. Mendoza-Araya, “Robust Coordination of Overcurrent and Undervoltage Protection Devices for Microgrids,” 2018 IEEE 38th Central America and Panama Convention, pp. 1-6, 2018.
- [16] H. M. Sharaf, H. H. Zeineldin and E. El-Saadany, “Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, no. 1, pp. 143-151, Jan. 2018.
- [17] H. Zeienldin, E. F. El-Saadany and M. A. Salama, “A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination,” 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, pp. 48-52, 2004.
- [18] Y. Damchi, M. Dolatabadi, H. R. Mashhadi, and J. Sadeh, “MILP approach for optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems,” Electr. Power Syst. Res., vol. 158, pp. 267–274, Feb. 2018.
- [19] H.L. Li, C.T. Chang, “An approximate approach of global optimization for polynomial programming problems,” Eur. J. Oper. Res. 107, pp. 625-632, Jun 1998.
- [20] Gekko, “GEKKO Optimization Suite.” <https://gekko.readthedocs.io/en/latest/#>. Visitado: 30/06/2020
- [21] L. Beal, D. Hill, R. Martin, and J. Hedengren, “GEKKO Optimization Suite,” Processes, Volume 6, Number 8, p. 106, 2018.
- [22] Apmonitor.com, “GEKKO Python Tutorials.” <http://apmonitor.com/wiki/index.php/Main/GekkoPythonOptimization> Visitado: 30/Jun/2020
- [23] Apopt.com, “APOPT Solutions.” <https://apopt.com/download.php> Visitado: 30/ Jun/2020
- [24] A. Martin, “General Mixed Integer Programming: Computational Issues for Branch-and-Cut Algorithms,” Lecture Notes in Computer Science, vol. 2241, pp. 1-25, Jan. 2001.
- [25] Eastern Interconnection States’ Planning Council. (2013, Sept.). Co-optimization of Transmission and Other Supply Resources. [En línea]. Disponible: <https://pubs.naruc.org/pub.cfm?id=536D834A-2354-D714-51D6-AE55F431E2AA>