



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

POLÍTICA DE ENERGIZACIÓN PARA ATAQUES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN
CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE
OPERACIONES

FELIPE ANDRÉS SEPÚLVEDA SEPÚLVEDA

PROFESOR GUÍA:
FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO

PROFESOR CO-GUÍA:
RODRIGO MORENO VIEYRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ MANUEL ARROYO SANCHEZ
DENIS SAURÉ VALENZUELA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS
PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES
POR: FELIPE ANDRÉS SEPÚLVEDA SEPÚLVEDA
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: FERNANDO ORDÓÑEZ PIZARRO
PROF. CO-GUÍA: RODRIGO MORENO VIEYRA

POLÍTICA DE ENERGIZACIÓN PARA ATAQUES DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO INCERTIDUMBRE

Los sistemas de potencia forman parte de la infraestructura crítica de los países, sustentando el estilo de vida de las sociedades modernas. Su función es proveer la energía necesaria para la realización de todas las actividades industriales, comerciales y residenciales. Por tanto, su capacidad de respuesta frente a perturbaciones, ya sean de carácter natural o inducidas, se convierte en una propiedad deseada, tanto por organismos públicos como privados. En particular, el problema de una amenaza terrorista, que es una perturbación inducida por un agente disruptivo, si bien tiene una baja probabilidad de ocurrencia, es un evento de alto impacto. Estos ataques pueden afectar cualquier segmento del sistema, pero generalmente, se enfocan en componentes de transmisión, debido a que tienen un impacto global en la red. Dada la gran extensión del segmento de transmisión, el operador de la red solo puede localizar un ataque con un cierto nivel de granularidad, y no conoce el detalle de los componentes afectados, introduciendo incertidumbre en su plan de mitigación.

Para enfrentar este problema, se usa un enfoque de programación estocástica multietapas, con objeto de capturar la incertidumbre a la que se enfrenta el operador de la red y el fenómeno dinámico del plan de mitigación. El objetivo es obtener una política de energización para el operador, la cual entregue como respuesta, qué líneas energizar, y en qué momento, minimizando el costo de energía no suministrada. El enfoque asume que el ataque es dado, ya que el objetivo del trabajo es enfocarse en decisiones de carácter operativo, y no estratégico, como lo haría un enfoque binivel.

Para los experimentos computacionales, se usan tres casos de estudio, a saber: IEEE RTS-5, IEEE RTS-24, e IEEE RTS-118. Se obtienen las políticas de energización para subconjuntos de ataques de estos casos de estudio, se hace un análisis detallado de los resultados obtenidos, y, además, se hace un estudio de la utilización de los recursos computacionales y tiempos de ejecución de las formulaciones, con objeto de entender y mejorar la complejidad combinatorial involucrada en el abanico de decisiones posibles que enfrenta el operador de la red.

En este trabajo se hace una descripción de lo que se entiende por política de energización, se define la mecánica de un ataque, se explica la construcción de los árboles de decisión, y se presentan las formulaciones matemáticas. En primer lugar, se presenta una formulación estocástica multietapas monolítica. Con objeto de aumentar el tamaño de los casos de estudio analizados, la formulación anterior es mejorada, obteniendo una formulación de programación dinámica estocástica. Esta última es capaz de obtener el resultado óptimo de toda las instancias analizadas, reduciendo los tiempos de ejecución. Cabe señalar que la formulación monolítica es presentada dentro de un marco binivel aunque, para efectos de los experimentos computacionales, se asume que el ataque es dado.

Agradecimientos

A Fernando Ordóñez Pizarro docente guía, mis más sinceros agradecimientos por el constante apoyo entregado a mi persona en lo profesional y personal durante la realización de esta tesis. Por su buena disposición y acogida, por la oportunidad de aprender de él y de tener el honor de contar con su ayuda y conocimiento en todo momento.

A Rodrigo Moreno Vieyra docente co-guía y jefe del área de energía del Instituto Sistema Complejos de Ingeniería (ISCI), por su constante ánimo y estímulo, por sus críticas constructivas, consejos y su eterna disposición a atender mis dudas. Pero por sobre todo mis agradecimientos a su constante amabilidad, confianza y amistad brindada.

A Juan Manuel Arroyo Sanchez integrante de la Comisión Evaluadora, en primer lugar por aceptar ser miembro de mi investigación, motivo por lo cual me siento muy honrado. También por su retroalimentación, su valorable crítica y corrección en este trabajo de tesis. Finalmente, por sus constantes interrogantes que me ayudaron a darle un enfoque mucho más claro y conciso a este proyecto.

Y finalmente pero no menos importante, mis infinitas gracias a mi familia por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación tanto personal como profesional.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivo de la tesis	2
1.3.	Estructura de la tesis	3
2	Estado del arte	4
3	Marco teórico	7
3.1.	Confiabilidad en sistemas de potencia	7
3.2.	Problemas de operación en sistemas de potencia	8
3.2.1.	Problema del flujo óptimo de potencia para corriente alterna	8
3.2.1.1.	Índices y conjuntos	8
3.2.1.2.	Variables de decisión	8
3.2.1.3.	Parámetros	9
3.2.1.4.	Formulación AC-OPF en forma extendida	9
3.2.2.	Problema del flujo óptimo de potencia para corriente directa	10
3.2.2.1.	Índices y conjuntos	10
3.2.2.2.	Variables de decisión	10
3.2.2.3.	Parámetros	10
3.2.2.4.	Formulación DC-OPF sin desconexión de carga	11
3.2.2.5.	Formulación DC-OPF con desconexión de carga	11
3.2.3.	Problema de predespacho	11
3.2.3.1.	Índices y conjuntos	12
3.2.3.2.	Variables de decisión	12
3.2.3.3.	Parámetros	12
3.2.3.4.	Formulación UC multinodal	13
3.2.4.	Modelo de la amenaza terrorista	13
3.2.5.	Modelo de planificación	14
3.3.	Incertidumbre en sistemas de potencia	15
3.4.	Métodos de solución	16
3.5.	Casos de estudio	18
3.5.1.	IEEE RTS-5	19
3.5.2.	IEEE RTS-24	19
3.5.3.	IEEE RTS-118	20
4	Metodología	22
4.1.	Política de energización	22
4.2.	Mecánica de ataque	23
4.3.	Diseño del árbol de decisiones	25
4.4.	Modelo estocástico multietapas monolítico	31
4.4.1.	Índices y conjuntos	31

4.4.2.	Variables de decisión	31
4.4.2.1.	Variables de decisión del terrorista	31
4.4.2.2.	Variables de decisión del operador	31
4.4.3.	Parámetros	32
4.4.3.1.	Parámetros del terrorista	32
4.4.3.2.	Parámetros del operador	32
4.4.4.	Formulación monolítica no lineal	33
4.4.5.	Formulación monolítica lineal	37
4.4.6.	Método de programación dinámica estocástica	39
4.4.6.1.	Enfoque de recursión	39
4.4.6.2.	Etapas	39
4.4.6.3.	Variables de estado	39
4.4.6.4.	Variables de decisión	40
4.4.6.5.	Función de recurrencia	40
4.4.6.6.	Redespacho de energía	41
5	Resultados	43
5.1.	Política de energización	44
5.2.	Utilización de recursos	46
	Conclusión	50
	Bibliografía	52
	Anexos	55
A	Política de energización IEEE RTS-5	56
B	Política de energización IEEE RTS-24	59
C	Política de energización IEEE RTS-118	61

Índice de Figuras

3.1. Problema de la amenaza terrorista.	14
3.2. Modelo de planificación.	15
3.3. IEEE RTS-5	19
3.4. IEEE RTS-24	20
3.5. IEEE RTS-118	21
4.1. Política de energización con cuatro combinaciones de ataque y tres nodos	23
4.2. Ataque de dos buses en IEEE RTS-5	24
4.3. Ataque de un bus en IEEE RTS-5	26
4.4. Árbol de decisiones	27
4.5. Árbol de decisiones compacto	29
4.6. Árbol de decisiones completo	30
4.7. Indicatrices de energización	35
4.8. Indicatrices de generadores	36

Índice de Tablas

2.1. Literatura de modelos de defensa e interdicción en sistemas de potencia.	5
5.1. Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-5.	45
5.2. Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-24.	45
5.3. Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-118.	46
5.4. Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-5.	47
5.5. Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-24.	48
5.6. Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-118.	49
A.1. Costos de políticas de energización de enfoque monolítico vs enfoque dinámico para IEEE RTS-5.	57
A.2. Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-5.	58
B.1. Costos de políticas de energización en enfoque dinámico para IEEE RTS-24.	59
B.2. Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-24.	60
C.1. Costos de políticas de energización en enfoque dinámico para IEEE RTS-118.	61
C.2. Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-118.	62

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Los sistemas de potencia forman parte de la infraestructura crítica de los países, es decir, son vitales para la subsistencia de las sociedades modernas. Estos deben proveer la energía necesaria para el funcionamiento de consumidores residenciales, industriales y comerciales. Por esta razón, la confiabilidad es una característica deseable en los sistemas de potencia, y es una de las preocupaciones principales tanto de organismos públicos como privados. La confiabilidad evalúa la capacidad de respuesta frente a perturbaciones de un sistema para cumplir con la demanda eléctrica. Estas perturbaciones pueden ser fallas cotidianas y esperables de componentes del sistema, eventos climáticos, o amenazas terroristas tanto físicas como cibernéticas. En particular, los ataques terroristas pertenecen a una clase de eventos de baja probabilidad, y por esto, generalmente son ignorados en la planificación [16]. Sin embargo, son eventos de alto impacto, por lo que resulta importante modelar el efecto de eventos de estas características en infraestructura crítica.

Dado el gran tamaño y complejidad de los sistemas de potencia, estos pueden ser divididos en zonas funcionales y niveles jerárquicos, con tal de enfocar el análisis en áreas específicas, permitiendo el estudio de fenómenos locales y reduciendo esfuerzos computacionales. Entendiendo cómo funcionan los subsistemas de generación, transmisión y distribución, podemos medir el impacto sobre el sistema total de algún ataque localizado, y realizar acciones de planeación, control y mitigación. Sabemos que gran cantidad de las investigaciones se centran en ataques a las redes de transmisión [25], puesto que son los elementos más desprotegidos debido a su gran extensión, representando un objetivo relativamente fácil de alcanzar para un agente destructivo, y provocando un gran efecto en los costos de operación [5]. Por tanto, es importante entender las formulaciones que abordan los flujos de potencia para modelar el fenómeno del transporte de energía a través de las redes de transmisión, e incorporarlas en otros subsistemas para realizar análisis más complejos.

Con el fin de abordar problemas de ataques a redes eléctricas, se usa una línea de investigación que utiliza un enfoque de Teoría de Juegos para modelar la interacción entre un atacante y un defensor. Ambos individuos actúan de forma no cooperativa, y son racionales, por tanto, sus decisiones se consideran estratégicas. El atacante actúa en primer lugar, y el defensor responde a la estrategia del atacante, con acciones de mitigación. Por tanto, se tiene un marco de decisiones secuenciales, es decir, un Juego de Stackelberg aplicado a defensa de sistemas de potencia [37][35][34][33]. El terrorista tiene como misión identificar y atacar un conjunto de componentes críticos del sistema, maximizando el daño ocasionado, y respetando una restricción presupuestaria. Por otra parte, el defensor, más conocido como el operador del sistema, en este caso, resuelve el problema del despacho óptimo de energía, tomando acciones de mitigación para minimizar el daño causado por el terrorista. El problema de flujo óptimo por las redes, necesario de utilizar cuando se resuelve el despacho sobre una red, puede ser modelado principalmente de dos formas [40]. Por un lado, tenemos el *Alternating Current Optimal Power Flow*, que de aquí en adelante llamaremos AC-OPF, y que considera una representación más realista del sistema. Es una formulación de naturaleza no lineal, que generalmente es abordada a través de enfoques de simulación. Por otro lado, tenemos el *Direct Current Optimal Power*

Flow, que de aquí en adelante llamaremos DC-OPF, el cual es una aproximación más tratable computacionalmente del AC-OPF. El DC-OPF está en forma linealizada, y puede ser resuelto usando técnicas analíticas.

Un problema observable en las metodologías de resolución de ataques a sistemas eléctricos es que no se consideran las fuentes de incertidumbre que debe resolver el operador de la red, ocasionando que su estrategia de defensa esté subestimada. Por ejemplo, el terrorista ataca un conjunto de líneas de transmisión que maximizan el daño al sistema de potencia. Lo que el operador realmente sabe es que un sector específico de la red de transmisión falló, pero, en un inicio, desconoce exactamente cuáles fueron las componentes afectadas. Los estudios existentes suponen que el operador conoce exactamente cuáles fueron las líneas atacadas, y resuelven un redespacho de energía considerando las componentes averiadas, encontrando un punto de operación factible instantáneamente. Pero lo que en realidad sucede es que, una vez ocurrido un ataque, el operador debe ejecutar una política de energización, es decir, debe tomar un conjunto de decisiones de re-energización de componentes en un horizonte temporal acotado, con objeto de restablecer el funcionamiento del sistema. Esta política de energización, la cual no está muy bien definida, en un escenario ideal, debería estar compuesta por algún criterio de optimalidad, y sujeta a todo un aparato de coordinación con otros actores. Además, debería capturar el desconocimiento del operador respecto a las componentes específicas atacadas, con objeto de restablecer el funcionamiento del sistema, y llegar a un punto de operación factible, lo más pronto posible. Por tanto, se hace vital abordar el problema mencionado, con tal de obtener un plan de defensa que considere la incertidumbre que enfrenta el operador, y la evolución del sistema frente a cada una de sus decisiones de energización, además considerando un conjunto de restricciones técnicas y operativas de los componentes, para lograr una modelación más realista del fenómeno [23].

Con todo lo anterior, en este trabajo se aborda el problema de la generación de una política de energización, que se ajuste lo más posible a las condiciones reales de operación a las que se enfrenta un operador. Esta política se aplica al sistema de transmisión, e indica al operador qué líneas energizar y en qué momento, posterior a un ataque terrorista, y vela en todo momento por reducir la energía no suministrada. Para modelar la incertidumbre o falta de información del operador, se considera el enfoque de programación estocástica, ya que los agentes se enfrentan a escenarios inciertos, es decir, buscan reducir la energía no suministrada frente a ataques cuyas ubicaciones no se conocen exactamente. Además, para modelar la evolución del sistema, a medida que el operador va recogiendo información respecto a las características del ataque, un modelo multietapas se presenta como candidato natural. Este modelo, si cumple un conjunto de condiciones, puede ser resuelto a través de programación dinámica, lo que reduce significativamente la complejidad de una formulación monolítica.

1.2. Objetivo de la tesis

Esta tesis tiene como objetivo principal generar una política de energización para el operador de la red, frente a ataques terroristas al sistema de transmisión, considerando la incertidumbre que enfrenta el operador debido al desconocimiento de los componentes atacados, y la evolución del sistema a través de un horizonte temporal acotado, con objeto de encontrar un punto de operación factible que minimice la energía no suministrada.

Para lograr el objetivo principal, se seguirá un conjunto de etapas bien definidas, las cuales son:

- Construir un algoritmo que entregue un conjunto de escenarios potenciales de ataque y sus respectivas probabilidades, frente a cada acción posible del terrorista.
- Formular un modelo de programación estocástica para el DC-OPF con desconexión de carga, que recibe como entrada las salidas del algoritmo anterior, para caracterizar la incertidumbre del operador.
- Embeber el modelo anterior en una formulación multietapas, para caracterizar la evolución temporal del sistema ante cada decisión del operador.

- Resolver la formulación estocástica multietapas usando un enfoque monolítico y un enfoque de programación dinámica, para los casos de estudio IEEE-RTS de 5, 24 y 118 buses.
- Comparar la política de energización obtenida con los distintos enfoques y casos de estudio, respecto a recursos computacionales usados, tiempos de ejecución, mejor y peor caso, e impacto monetario.

Es necesario aclarar que, además de la formulación que permite encontrar una política de energización frente a distintos ataques, se presenta una extensión que permite encontrar una política de energización frente al peor escenario posible, es decir, frente al ataque más disruptivo. Sin embargo, en este trabajo se resuelve el primer enfoque, puesto que se abordan los aspectos operativos de la problemática, a saber, cómo reenergizar una red después de un ataque, más que aspectos tácticos y estratégicos, como planeación de expansión de capacidad o reforzamiento de componentes. Además, utilizando conocimiento experto, el cual detalla las acciones realizadas por el operador después de una contingencia, se revela que existe un proceso que involucra coordinación con otros actores del sistema. Este proceso habilita al operador a reenergizar un circuito en aproximadamente 10-15 minutos. Considerando este dato, se pueden ignorar los efectos de formulaciones que abordan el problema del predespacho, ya que son tiempos muy acotados que están por debajo de los tiempos mínimos necesarios para que las unidades de generación cambien de estado.

1.3. Estructura de la tesis

La tesis está organizada de la siguiente manera. En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica de trabajos relacionados. En el Capítulo 3 se establece el marco teórico, donde se explica el concepto de confiabilidad y problemas de operación en sistemas de potencia, se describe el fenómeno de incertidumbre y sus modelos típicos, y finalmente, se exponen los casos de estudio. En el Capítulo 4 se presenta la metodología propuesta para la obtención de la política de energización, la que incluye una explicación detallada de la construcción del enfoque estocástico multietapas. En el Capítulo 5 se presentan los resultados para las instancias IEEE RTS de 5, 24 y 118 buses. Finalmente, se presentan las conclusiones.

Capítulo 2

Estado del arte

La literatura existente sobre modelos de interdicción aplicados a sistemas de potencia, TTP por sus siglas en inglés, es muy extensa. Estos modelos pertenecen a un campo de estudio conocido como Juegos de Seguridad de Stackelberg. Estos últimos son formulaciones de carácter binivel, donde existen agentes que interactúan a través de decisiones secuenciales. Podemos distinguir dos casos. Por una lado, tenemos los modelos atacante-operador (A-D), donde el primero causa la máxima disrupción al sistema, y el segundo toma acciones de mitigación. Por otro lado, tenemos los modelos planificador-atacante (D-A), donde el primero busca proteger al sistema asignando recursos de defensa, y el segundo busca atacar las componentes con menor protección. El primer modelo busca responder ¿Cuáles son las vulnerabilidades del sistema? y ¿Qué tan bien el sistema es operado?. El segundo modelo busca responder ¿Cómo debemos invertir para hacer al sistema más confiable?. Algunas veces, es importante combinar ambos modelos, para obtener formulaciones trinivel, que incorporan un planificador-atacante-operador (D-A-D), y que se enfocan principalmente en detectar cuáles son las mejores decisiones de inversión, en cuanto a expansión de capacidad y asignación de recursos de defensa, considerando ataques de componentes y acciones de mitigación. Existe otro tipo de formulación trinivel planificador-incertidumbre-operador (D-U-D), donde el nivel de incertidumbre (U) es generado por un enfoque de optimización robusta, que busca situar al modelo en el peor de los casos posibles (ya sea variando la capacidad de generación o la demanda), con tal que la planificación y las acciones de mitigación puedan funcionar en todos los casos considerados. A continuación, en la Tabla 2.1, se presenta un resumen de los principales trabajos que abordan modelos de carácter binivel y trinivel aplicados a sistemas de potencia, además de algunos modelos de un único nivel y multietapas.

Tabla 2.1: Literatura de modelos de defensa e interdicción en sistemas de potencia.

Vista comparativa				
Autor	Año	Estructura	Tipo	Detalle
Salmeron et al. [37]	2003	Binivel	A-D	TTP sobre múltiples componentes
Salmeron et al. [34]	2004	Binivel	A-D	TTP sobre múltiples componentes
Salmeron et al. [35]	2004	Binivel	A-D	TTP sobre múltiples componentes y tiempos de restauración
Salmeron et al. [36]	2004	No aplica	No aplica	Desarrollo de sistema para evaluar vulnerabilidades de un sistema de potencia (VEGA)
Arroyo and Galiana [5]	2005	Binivel	A-D	TTP con umbral de desconexión de carga
Motto et al. [29]	2005	Binivel	A-D	Metodología para resolver problema TTP
Carrion et al. [11]	2007	Único nivel	D (generacion de escenarios)-A-D	Planeación de expansión de transmisión
Yao et al. [46]	2007	Trinivel	D-A-D	Metodología para resolver problemas TTP anidados
Salmeron et al. [33]	2009	Binivel	A-D	Descomposición de Benders aplicada a TTP
Delgadillo et al. [20]	2010	Binivel	A-D	TTP con conmutación de líneas
Arroyo [3]	2010	Binivel	A-D	Modelos de vulnerabilidad de mejor y peor caso para TTP
Arroyo et al. [4]	2010	Único nivel	D (generacion de escenarios)-A-D	Planeación de expansión de transmisión
Chen et al. [16]	2011	Binivel	D-A	Generación de estrategias de defensa fiables
Boonchuay et al. [9]	2011	Único nivel	D-generación de escenarios	DC-OPF con escenarios de generación eólica y restricciones robustas
Romero et al. [32]	2012	Trinivel	D-A-D	Incorporación de tiempos de restauración
Alguacil et al. [1]	2014	Trinivel	D-A-D	Propuesta de nuevas técnicas de resolución
Chen et al. [14]	2014	Trinivel	D-U(expansión y retiro de unidades de generación y cargas)-D	Planeación de expansión de transmisión
Chen and Wang [15]	2016	Trinivel	D-U(expansión y retiro de unidades de generación)-D	Planeación de expansión de transmisión
Chen [13]	2016	Binivel	D-A(generación de escenarios)	Métodos de reforzamiento de redes de distribución frente a eventos climáticos
Wu and Conejo [41]	2017	Trinivel	D-A-D	Descomposición de Benders con cortes primales
García-Bertrand and Mínguez [22]	2017	Trinivel	D-U(capacidad de generación y cargas)-D	Planeación de expansión de transmisión
Deng et al. [21]	2017	Binivel	D-A	Ataque de falsa inyección de datos
Xiang and Wang [43]	2017	Binivel	A-D	Ataque cibernético de redistribución de carga
Nezamoddini et al. [30]	2017	Único nivel	D-generación de escenarios	Se establece umbral para probabilidad de reducción de carga total
Xiang et al. [44]	2017	Binivel	A-D	Ataques cibernéticos y físicos coordinados
Cortina et al. [17]	2017	Binivel	A-D	TTP considerando AC-OPF y respuesta de la demanda
Hong et al. [24]	2017	Binivel	A-D	Identificación de la n-k contingencia
Sharifzadeh et al. [39]	2017	Multiperiodo	D-generación de escenarios	OPF con restricciones de seguridad
Lin and Bie [26]	2018	Trinivel	D-A-D	Ataque sobre redes de distribución
Davarikia and Barati [18]	2018	Trinivel	D-A-D	Obtención de índices de vulnerabilidad del sistema
Xiang et al. [45]	2018	Trinivel	D-U(generación eólica y demanda de carga)-D	Planeación de protección de componentes
Lai et al. [25]	2019	Trinivel	D-A-D	Ataques cibernéticos y físicos coordinados
Hasan et al. [23]	2020	Binivel	D-A	Incorporación de ataques cibernéticos dinámicos
Davarikia et al. [19]	2020	Trinivel	D-A-D	Uso del engaño como estrategia de defensa
Pena-Ordieres et al. [31]	2021	Único nivel	D	DC-OPF con restricciones de oportunidad

A grandes rasgos, la mayoría de estos trabajos, aborda la interacción entre un terrorista y un operador de la red, más conocida como el problema de la amenaza terrorista (problemas binivel). Este fue primeramente modelado por Salmeron y compañía [37][35][34][33]. En la última década, se han realizado esfuerzos para incluir otros actores del sistema como el planificador de la red (problemas trinivel), e incluir fenómenos dinámicos, como ataques en distintas ventanas temporales y tiempos de restauración o falla de componentes, y fenómenos estocásticos, como incertidumbre tanto en los retiros y expansión de unidades de generación, en la demanda, y en las decisiones de expansión o protección de líneas de transmisión y distribución. Además, se han desarrollado sistemas de apoyo para evaluar la vulnerabilidad de sistemas de potencia como VEGA, el cual fue patrocinado por el Departamento de Energía y el Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos [36]. Dentro de estas investigaciones, existen muchos componentes que pueden ser atacados, tales

como generadores, transformadores, buses, subestaciones, líneas, etc. El fundamento de estas formulaciones, es que el terrorista puede elaborar un plan de ataque que ocasione el máximo daño al sistema, identificando un conjunto de componentes críticos, y sujeto a una restricción de presupuesto. Por otro lado, el operador de la red toma acciones de mitigación, para restablecer en la medida de lo posible el funcionamiento de la red, resolviendo un problema de redespacho de energía. La forma común de cuantificar el daño en un sistema es a través de la desconexión de carga. Esta es la cantidad de energía no suministrada en un periodo de tiempo, y el objetivo del terrorista es maximizar esta cantidad, mientras que el operador busca minimizarla.

Más específicamente, se puede observar que solo un subconjunto de los trabajos presentados aborda problemas de incertidumbre en las decisiones, y son de carácter binivel o trinivel. Por un lado, en [13] se busca obtener un plan de endurecimiento sobre redes de distribución usando un enfoque de programación estocástica, considerando la ocurrencia de fenómenos climáticos. Por otro lado, en [14] se resuelve el problema de planificación de expansión de capacidad en líneas de transmisión, pero usando un enfoque de programación robusta, donde se caracteriza la incertidumbre del retiro y expansión de unidades de generación y cargas. En [15], se considera el mismo enfoque anterior sin considerar cargas, pero incorporando un horizonte temporal para caracterizar decisiones de inversión en líneas de transmisión, que pueden ser ejecutadas en distintos periodos de tiempo. En García-Bertrand and Mínguez [22], se busca resolver el mismo problema anterior con un enfoque de optimización robusta, considerando la incertidumbre respecto a la demanda y las capacidades de las unidades de generación, pero en conjuntos de incertidumbre que varían a través del horizonte de planificación. En [45], se busca obtener un plan de endurecimiento de componentes, modelando la incertidumbre de fuentes de generación eólica y demanda de carga con un enfoque de optimización robusta.

Dentro de los estudios que abordan incertidumbre con formulaciones de un único nivel y multietapas, se tiene [11], donde obtienen un plan de expansión de capacidad en líneas de transmisión usando un enfoque de programación estocástica. Generan un conjunto de escenarios de ataque sobre líneas de transmisión, resolviendo problemas A-D, sujetos a un número dado de líneas atacadas y tomando en cuenta los escenarios ya generados. Posteriormente, estos escenarios junto con su probabilidad de ocurrencia son entregados al planeador de la red, quien toma decisiones respecto a dónde construir nuevas líneas, minimizando la desconexión de carga esperada. En [4], se aborda el problema anterior usando el mismo enfoque, pero la función objetivo del planificador cambiará a minimizar el máximo arrepentimiento ponderado de la desconexión de carga. En [9], se resuelve el DC-OPF modelando la incertidumbre de fuentes de generación eólica con programación estocástica, y además se usan restricciones robustas para permitir ciertas infactibilidades, donde el grado de violación es controlado en la función objetivo por una función de penalización cuadrática. En [39], se resuelve el DC-OPF, modelando la incertidumbre de fuentes de generación eólica y demanda de carga con un enfoque de programación estocástica, y además se incorporan restricciones de contingencia, para modelar la no disponibilidad de líneas de transmisión. En [31], se resuelve el DC-OPF, considerando restricciones conjuntas de oportunidad para los límites en los flujos de las líneas de transmisión y las salidas de los generadores, con objeto de modelar la incertidumbre de las fuentes de generación de energía renovable. Finalmente, en [30], se busca asignar recursos de protección a líneas de transmisión usando un enfoque de programación estocástica, de tal forma que el plan de defensa garantice que el riesgo de reducción de carga excediendo un cierto umbral sea menor que un nivel de riesgo de tolerancia para todos los escenarios de ataque de líneas.

Finalmente, el resto de los trabajos presentados en la Tabla 2.1 corresponden a formulaciones binivel o trinivel sin incertidumbre. Se enfocan en obtener planes de expansión de capacidad o de protección de componentes, identificar elementos vulnerables del sistema, y mejorar procesos operativos. A saber, hasta el día de hoy, no existe un estudio que aborde el problema de la obtención de una política de energización de líneas de transmisión para el operador, que, considerando la incertidumbre del ataque de un agente disruptor, entregue una secuencia de energización. Los estudios presentados acá suponen que el operador tiene conocimiento perfecto respecto a las componentes atacadas, y, así, sus decisiones se centran en optimizar el funcionamiento del sistema sin esas componentes, no en qué hacer frente al desconocimiento de esa información.

Capítulo 3

Marco teórico

3.1. Confiabilidad en sistemas de potencia

La función primaria de un sistema de potencia es entregar energía eléctrica a sus clientes, tan económico como sea posible, y con un aceptable grado de continuidad y calidad [8]. Esto último es una de las mayores preocupaciones tanto de empresas como gobiernos, y recibe el nombre de confiabilidad. Poder evaluar esta propiedad es un gran desafío, puesto que estos sistemas son complejos y abarcan grandes extensiones territoriales. Fallas en cualquier parte pueden causar tanto inconvenientes en un pequeño número de residentes locales, como catastróficas y generalizadas interrupciones del suministro eléctrico. Uno de los apagones más severos ocurrió el 14 de agosto de 2003, en el sistema eléctrico de Estados Unidos y Canadá, perdiéndose alrededor de 63 GW, y afectando a alrededor de 50 millones de personas, involucrando 400 líneas de transmisión y 531 unidades de generación. El apagón más grande, en términos de potencia perdida y personas afectadas, ocurrió en India el 2012, afectando a un total de 300 millones de personas y perdiéndose alrededor de 32 GW [2].

Existen decisiones complejas que deben ser tomadas en fases de planificación, diseño y operación, con objeto de aminorar la probabilidad, frecuencia y duración de efectos dañinos que impacten directamente en la confiabilidad de los sistemas. Se debe recordar que estos efectos pueden ser provocados por fallas simples aleatorias de componentes, eventos climáticos o amenazas intencionadas. Además de las decisiones necesarias para prevenir, controlar, y mitigar los efectos provocados por ciertos eventos, existen restricciones complejas tanto económicas, de confiabilidad y operativas, que rigen el funcionamiento normal y frente a contingencias de los sistemas, las cuales deben ser consideradas. Los estudios de confiabilidad en sistemas de potencia intentan responder qué tan confiable es un sistema frente a distintas contingencias, utilizando para ello indicadores como energía no suministrada, SAIDI, SAIFI, etc. [28]. Se debe recordar que tanto planificadores como operadores forman parte del funcionamiento de los sistemas; por tanto, existirán distintos estudios de confiabilidad que involucran directamente su labor y que abarcan expansiones en infraestructura y reforzamiento de instalaciones, hasta nuevas metodologías y estrategias frente a contingencias.

Para comenzar un estudio de confiabilidad, se debe tener pleno conocimiento del objetivo a estudiar y lo que se quiere medir. Además, se debe tener un absoluto entendimiento del sistema, es decir, comprender la forma en la cual los componentes y el sistema operan y fallan. Posterior a eso, se podrán derivar modelos para representar sus características. Finalmente, se debe escoger la metodología empleada, la cual podría considerar enfoques probabilísticos o deterministas [8]. Los sistemas de potencia son inherentemente estocásticos, es decir, todos sus estados de entrada y salida, además de los parámetros de eventos, son variables aleatorias. Por tanto, los enfoques dominantes hoy en día son los probabilísticos. Estos logran capturar la severidad de un evento y su impacto sobre el sistema, además de su probabilidad de ocurrencia, resultando en una modelación más realista del fenómeno, y permitiendo por tanto la creación de estrategias más efectivas de prevención y mitigación.

Finalmente, dada la gran complejidad y extensión territorial de los sistemas de potencia, es necesario dividirlos para poder analizarlos. Dentro de estas divisiones se encuentran las zonas funcionales y niveles jerárquicos. Las zonas funcionales corresponden a los segmentos de generación, transmisión y distribución. Esta división es apropiada para propósitos de organización, planeación, operación y análisis, además que existen empresas que son responsables de solo una de las funciones. Estas zonas funcionales pueden ser agrupadas en niveles jerárquicos, con tal de enriquecer los análisis y detectar fenómenos globales complejos. Los niveles jerárquicos involucran instalaciones de generación, instalaciones de generación y transmisión, e instalaciones de generación, transmisión y distribución, y reciben los nombres de HLI, HLII y HLIII respectivamente [7].

3.2. Problemas de operación en sistemas de potencia

En esta sección, se presenta un conjunto de formulaciones, las cuales tienen por objeto introducir conceptos que servirán para entender el Capítulo 4. En primer lugar, se presenta el problema del flujo óptimo de potencia para corriente alterna (AC-OPF), cuyo propósito es explicar la complejidad inherente en la modelación del comportamiento de los flujos de potencia. En segundo lugar, se presenta el problema del flujo óptimo de potencia para corriente directa (DC-OPF), cuyo propósito es ilustrar cómo se modelan en la práctica los flujos de potencia, a través de un conjunto de simplificaciones del modelo AC-OPF, que permiten reducir la complejidad de modelación, sacrificando detalles técnicos y operativos. Finalmente, se presenta el problema de predespacho (UC), cuyo propósito es explicar la interacción entre la fuentes de generación y el transporte de los flujos de potencia.

3.2.1. Problema del flujo óptimo de potencia para corriente alterna

El modelo del problema AC-OPF, por sus siglas en inglés, se encarga de optimizar simultáneamente la potencia activa y reactiva. Es un modelo complejo económica, eléctrica, y computacionalmente [27]. Económicamente, ya que encontrar un equilibrio eficiente de mercado requiere pricing con tarifas no lineales multi-parte. Eléctricamente, ya que los flujos de potencia son modelados con corriente alterna, lo que introduce no linealidades adicionales. Computacionalmente, ya que la optimización tiene no convexidades, incluyendo variables binarias y continuas, lo cual dificulta la resolución. Actualmente, este problema es resuelto a través de aproximaciones, descomposiciones, e incorporación de conocimiento experto. Esto debe ser así debido a que los solvers no lineales no pueden garantizar un óptimo global, no son robustos, no resuelven suficientemente rápido, y, en condiciones normales de operación, el AC-OPF debe ser resuelto muchas veces al día, incluso cada cinco a diez minutos. A continuación, se presenta el modelo AC-OPF [12].

3.2.1.1. Índices y conjuntos

n, i, j = índices de nodos.

N = conjunto de nodos.

3.2.1.2. Variables de decisión

δ = ángulo de voltaje para el nodo n .

$I_{i \rightarrow j}$ = intensidad de corriente que fluye del nodo i al nodo j .

I_n = intensidad de corriente saliendo del nodo i .

P_g^G = potencia activa del generador g .

Q_g^G = potencia reactiva del generador g .

V_n = magnitud de voltaje para el nodo n .

3.2.1.3. Parámetros

c_g = costo de generación de potencia activa para el generador g .

$\delta_n^{min}, \delta_n^{max}$ = límites mínimo y máximo de ángulo de voltaje para el nodo n .

$I_{i \rightarrow j}^{max}$ = límite máximo de intensidad de corriente que circula por la línea $i \rightarrow j$.

$P_g^{G,max}$ = límite máximo de potencia activa para el generador g .

$Q_g^{G,max}$ = límite máximo de potencia reactiva para el generador g .

$S_{i \rightarrow j}^{max}$ = límite máximo de potencia aparente permitida en la línea $i \rightarrow j$.

S_n^L = carga de potencia aparente para el nodo n .

V_n^{min}, V_n^{max} = límites mínimo y máximo de magnitud de voltaje para el nodo n .

3.2.1.4. Formulación AC-OPF en forma extendida

$$\min_{\{P^G, Q^G, V, I, \delta\}} \sum_{\forall g \in G} c_g P_g^G \quad (3.1a)$$

$$\text{s.a} \quad \sum_{\forall g \in G_n} P_g^G - \text{Re}(\bar{S}_n^L) = \text{Re}(\bar{V}_n \bar{I}_n^*) \quad \forall n \in N \quad (3.1b)$$

$$\sum_{\forall g \in G_n} Q_g^G - \text{Im}(\bar{S}_n^L) = \text{Im}(\bar{V}_n \bar{I}_n^*) \quad \forall n \in N \quad (3.1c)$$

$$|\bar{I}_{i \rightarrow j}| \leq I_{i \rightarrow j}^{max} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (3.1d)$$

$$|\bar{I}_{j \rightarrow i}| \leq I_{j \rightarrow i}^{max} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (3.1e)$$

$$|\bar{V}_i \bar{I}_{i \rightarrow j}^*| \leq S_{i \rightarrow j}^{max} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (3.1f)$$

$$|\bar{V}_j \bar{I}_{j \rightarrow i}^*| \leq S_{j \rightarrow i}^{max} \quad \forall i \in N, \forall j \in N, i \neq j \quad (3.1g)$$

$$0 \leq P_g^G \leq P_g^{G,max} \quad \forall g \in G \quad (3.1h)$$

$$-Q_n^{G,max} \leq Q_g^G \leq Q_g^{G,max} \quad \forall g \in G \quad (3.1i)$$

$$V_n^{min} \leq V_n \leq V_n^{max} \quad \forall n \in N \quad (3.1j)$$

$$\delta_n^{min} \leq \delta_n \leq \delta_n^{max} \quad \forall n \in N \quad (3.1k)$$

A continuación, se explicarán brevemente cada una de las restricciones. Solo recordar que $\{\bar{A}\}$ representa un número complejo, mientras que $\{\bar{A}^*\}$ representa el conjugado de un número complejo, donde A puede ser reemplazado por la cantidad correspondiente. Se comienza por la minimización de la función objetivo (3.1a), la cual considera los costos de generación de potencia activa. Las restricciones (3.1b-3.1c) representan las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de los nodos, tanto para la potencia activa como reactiva. Las restricciones (3.1d-3.1e) representan las inecuaciones de flujo en las líneas a través de límites de corriente, mientras que (3.1f-3.1g) representan las inecuaciones de flujo en las líneas a través de límites de potencia aparente. Solo un par de las ecuaciones anteriores se usarán, y dependerá de cómo se representen los límites térmicos en las líneas. Si se representan a través de corrientes, se usará (3.1d-3.1e), mientras que si se representan a través de la potencia aparente, se usará (3.1f-3.1g). La restricción (3.1h) representa los límites de potencia activa de los generadores. La restricción (3.1i) representa los límites de potencia reactiva de los generadores. La restricción (3.1j) representa los límites para las magnitudes de voltaje en cada uno de los nodos. Finalmente, (3.1k) representa los límites para los ángulos de voltaje en cada uno de los nodos, y son utilizados para eliminar la degenerancia provocada por la utilización de números complejos, puesto que se podrían obtener varias soluciones de flujos de potencia exactamente iguales excepto en los ángulos. Es

importante resaltar que los cálculos relativos a la intensidad de corriente tanto para líneas como para nodos, siguen los lineamientos del modelo Π [12].

3.2.2. Problema del flujo óptimo de potencia para corriente directa

La formulación del problema DC-OPF, por sus siglas en inglés, es una aproximación del AC-OPF respecto a magnitudes y ángulos de voltaje, admitancias y potencia reactiva [40]. Se utiliza para obtener soluciones de potencia activa de grandes sistemas, reduciendo la complejidad de modelación, pero sacrificando detalles técnicos y operativos. Su nombre no tiene nada que ver con la corriente directa, sino que se refiere a una forma linealizada de las ecuaciones de flujo de potencia del modelo AC-OPF. A continuación, se presenta el modelo DC-OPF sin desconexión de carga, el cual se deriva directamente desde el modelo AC-OPF anterior. Además, se presenta la versión DC-OPF con desconexión de carga, que es cuando alguna línea se encuentra fuera de servicio producto de algún ataque. Se hace una única definición de índices, conjuntos, variables de decisión y parámetros, para ambos modelos, con objeto de no repetir conceptos.

3.2.2.1. Índices y conjuntos

$D(l)$ = nodo destino de la línea l .

g = índice de generador.

G = conjunto de generadores.

l = índice de línea de transmisión.

L = conjunto de líneas de transmisión.

n = índice de nodo.

N = conjunto de nodos.

$O(l)$ = nodo origen de la línea l .

3.2.2.2. Variables de decisión

P_g^G = potencia de salida del generador g .

P_l^L = flujo de potencia que circula a través de la línea l .

ΔP_n^D = desconexión de carga en el nodo n .

δ_n = ángulo de fase del voltaje en el nodo n .

3.2.2.3. Parámetros

P_n^D = demanda de potencia del nodo n .

\overline{P}_g^G = límite superior de potencia de salida en el generador g .

\underline{P}_g^G = límite inferior de potencia de salida en el generador g . Es igual a 0 en esta formulación

\overline{P}_l^L = límite superior de flujo de potencia en la línea l .

x_l = reactancia de la línea l .

c_g = costo de generación de potencia en el generador g .

c_n = costo de desconexión de carga en el nodo n .

v_l^{SI} = binaria representando el ataque a la línea l : 1 si es atacada y 0 de otra forma.

3.2.2.4. Formulación DC-OPF sin desconexión de carga

$$\min_{\{P^G, P^L, \delta\}} \sum_{g \in G} c_g P_g^G \quad (3.2a)$$

$$\text{s.a} \sum_{g \in G_n} P_g^G - P_n^D = \sum_{l|O(l)=n} P_l^L - \sum_{l|D(l)=n} P_l^L \quad \forall n \in N \quad (3.2b)$$

$$\frac{1}{x_l} (\delta_{O(l)} - \delta_{D(l)}) = P_l^L \quad \forall l \in L \quad (3.2c)$$

$$0 \leq P_g^G \leq \bar{P}_g^G \quad \forall g \in G \quad (3.2d)$$

$$-\bar{P}_l^L \leq P_l^L \leq \bar{P}_l^L \quad \forall l \in L \quad (3.2e)$$

A continuación se explican brevemente cada una de las restricciones. Se comienza por la minimización de la función objetivo (3.2a), la cual considera los costos de generación de potencia. La restricción (3.2b) representa el balance de potencia en cada nodo. La restricción (3.2c) representa el acople angular. Finalmente, las restricciones (3.2d -3.2e) representan los límites de generación de los generadores y los límites térmicos de las líneas de transmisión respectivamente.

3.2.2.5. Formulación DC-OPF con desconexión de carga

$$\min_{\{P^G, P^L, \delta, \Delta P^D\}} \sum_{g \in G} c_g P_g^G + \sum_{n \in N} c_n \Delta P_n^D \quad (3.3a)$$

$$\text{s.a} \sum_{g \in G_n} P_g^G - P_n^D = \sum_{l|O(l)=n} P_l^L - \sum_{l|D(l)=n} P_l^L - \Delta P_n^D \quad \forall n \in N \quad (3.3b)$$

$$\frac{1}{x_l} (\delta_{O(l)} - \delta_{D(l)}) (1 - v_l^{SI}) = P_l^L \quad \forall l \in L \quad (3.3c)$$

$$0 \leq P_g^G \leq \bar{P}_g^G \quad \forall g \in G \quad (3.3d)$$

$$-\bar{P}_l^L \leq P_l^L \leq \bar{P}_l^L \quad \forall l \in L \quad (3.3e)$$

$$0 \leq \Delta P_n^D \leq \bar{P}_n^D \quad \forall n \in N \quad (3.3f)$$

A continuación se explican brevemente cada una de las restricciones. Se comienza por la minimización de la función objetivo (3.3a), la cual considera los costos de generación de potencia y los costos de desconexión de carga. La restricción (3.3b) representa el balance de potencia en cada nodo considerando la desconexión de carga. La restricción (3.3c) representa el acople angular, incorporando las líneas de transmisión dañadas. Finalmente, las restricciones (3.3d -3.3f) representan los límites de generación de los generadores, los límites térmicos de las líneas de transmisión y los límites de la desconexión de carga, respectivamente.

3.2.3. Problema de predespacho

La formulación del problema UC, por sus siglas en inglés, aborda la programación de las unidades de generación dentro de un horizonte temporal, respetando sus restricciones técnicas y operativas. Se puede destacar tanto la formulación uninodal como la multinodal. La primera formulación no resuelve las ecuaciones de flujo de potencia; por tanto, no aborda el problema del transporte de potencia a los centros de distribución. Por otro lado, la segunda formulación considera las restricciones técnicas y operativas de las líneas de transmisión, es decir, además de generar la programación de las unidades de generación, se asegura que esta potencia generada llegue a los centros de distribución a través de las líneas de transmisión, sin violar las capacidades físicas tanto de las unidades de generación como de las líneas de transmisión, y optimizando el proceso de redistribución del flujo. A continuación, se muestra la versión multinodal del UC uninodal presente en Xavier et al. [42], junto con sus índices, conjuntos, variables de decisión y parámetros.

3.2.3.1. Índices y conjuntos

t = índice de período.

l = índice de línea de transmisión.

n = índice de nodo.

g = índice de generador.

k = índice de tramo de generación.

T = conjunto de períodos.

N = conjunto de nodos.

L = conjunto de líneas de transmisión.

G = conjunto de generadores.

K = conjunto de tramos de generación.

$O(l)$ = nodo origen de la línea l .

$D(l)$ = nodo destino de la línea l .

3.2.3.2. Variables de decisión

P_{gt}^G = potencia de salida del generador g en el período t .

P_{lt}^L = flujo de potencia que circula a través de la línea l en el período t .

x_{gt} = binaria representando estado del generador g en período t : 1 si generador g está ON y 0 si está OFF.

z_{gt} = binaria representando si el generador g arrancó en t : 1 si arrancó y 0 si no.

w_{gt} = binaria representando si el generador g se apagó en t : 1 si se apagó y 0 si no.

y_{kgt} = cantidad de potencia sobre el mínimo generada por generador g en el período t para tramo k .

r_{gt} = reserva giratoria del generador g en el período t .

δ_{tn} = ángulo de fase del voltaje en el nodo n para el período t .

3.2.3.3. Parámetros

P_{nt}^D = demanda de potencia del nodo n en el período t .

P_{gk}^G = cantidad de potencia disponible en tramo k para generador g .

\overline{P}_g^G = límite superior de potencia de salida en el generador g .

\underline{P}_g^G = límite inferior de potencia de salida en el generador g .

\overline{P}_l^L = límite superior de flujo de potencia en la línea l .

c_{kg} = costo de generación de potencia para tramo k en generador g .

c_g^S = costo de arranque del generador g .

c_g^O = costo de mantener el generador g produciendo a su mínimo nivel por un período t .

c_n = costo de desconexión de carga en el nodo n .

R_t = mínima cantidad de reserva requerida en período t .

RU_g = tasa de rampa up del generador g .

RD_g = tasa de rampa down del generador g .

UT_g = mínimo tiempo up del generador g .

DT_g = mínimo tiempo down del generador g .

x_l = reactancia de la línea l .

3.2.3.4. Formulación UC multinodal

$$\min_{\{P^G, P^L, x, y, z, w, r\}} \sum_{\forall g \in G} \sum_{\forall t \in T} (c_g^S z_{gt} + c_g^O x_{gt} + \sum_{\forall k \in K} c_{kg} y_{kgt}) \quad (3.4a)$$

$$\text{s.a.} \sum_{\forall g \in G_n} P_{gt}^G - P_{nt}^D = \sum_{l|O(l)=n} P_{tl}^L - \sum_{l|D(l)=n} P_{tl}^L \quad \forall t \in T, \forall n \in N, \quad (3.4b)$$

$$\frac{1}{x_l} (\delta_{tO(l)} - \delta_{tD(l)}) = P_{tl}^L \quad \forall t \in T, \forall l \in L \quad (3.4c)$$

$$-\bar{P}_l^L \leq P_{tl}^L \leq \bar{P}_l^L \quad \forall t \in T, \forall n \in N, \forall l \in L \quad (3.4d)$$

$$\sum_{\forall g \in G} r_{gt} \geq R_t \quad \forall t \in T \quad (3.4e)$$

$$\underline{P}_g^G x_{gt} \leq P_{gt}^G + r_{gt} \leq \bar{P}_g^G x_{gt} \quad \forall g \in G, \forall t \in T \quad (3.4f)$$

$$(P_{gt}^G + r_{gt}) - (P_{g,t-1}^G + r_{g,t-1}) \leq x_{g,t-1} R U_g + (1 - x_{g,t-1}) \underline{P}_g \quad \forall g \in G, \forall t \geq 2 \quad (3.4g)$$

$$(P_{gt}^G + r_{gt}) - (P_{g,t-1}^G + r_{g,t-1}) \geq -x_{gt} R D_g - (1 - x_{gt}) \bar{P}_g^G \quad \forall g \in G, \forall t \geq 2 \quad (3.4h)$$

$$\sum_{i=\max\{1, t-UT_g+1\}}^t z_{gi} \leq x_{gt} \quad \forall t \in T, \forall g \in G \quad (3.4i)$$

$$\sum_{i=\max\{1, t-DT_g+1\}}^t w_{gi} \leq 1 - x_{\max\{1, t-DT_g\}, t} \quad \forall t \in T, \forall g \in G \quad (3.4j)$$

$$y_{kgt} \leq P_{gk}^G \quad \forall k \in K, \forall g \in G, \forall t \in T \quad (3.4k)$$

$$P_{gt}^G = \underline{P}_g x_{gt} + \sum_{\forall k \in K} y_{kgt} \quad \forall k \in K, \forall g \in G, \forall t \in T \quad (3.4l)$$

$$x_{gt} - x_{g,t-1} = z_{gt} - w_{gt} \quad \forall g \in G, \forall t \geq 2 \quad (3.4m)$$

$$x, z, w \in \{0, 1\}, P^G, r \geq 0 \quad (3.4n)$$

A continuación se explican brevemente cada una de las restricciones. Se comienza por la función objetivo (3.4a), la cual minimiza los costos de generación de potencia y los costos de arranque y operación de los generadores. La restricción (3.4b) representa el balance de potencia en cada nodo, el cual debe cumplirse en cada período de tiempo. Las restricciones (3.4c -3.4d) representan el acople angular y los límites térmicos de las líneas respectivamente. La restricción (3.4e) representa las reservas de potencia en cada período de tiempo. La restricción (3.4f) fuerza a respetar los límites de producción incluidos las reservas. Las restricciones (3.4g -3.4h) representan las tasas de rampa up y rampa down respectivamente. Las restricciones (3.4i -3.4j) representan el mínimo tiempo up y down respectivamente. Las restricciones (3.4k -3.4m) mantienen las relaciones de consistencia de las variables. Finalmente, (3.4n) representa las restricciones de integralidad y no negatividad.

3.2.4. Modelo de la amenaza terrorista

En su forma más básica, es un modelo de interdicción de tipo Max-Min, definido como:

$$\max_{\{\delta \in \Delta\}} \min_y cy \quad (3.5a)$$

$$\text{s.a.} \quad Ay \leq B\delta \quad (3.5b)$$

$$y \geq 0 \quad (3.5c)$$

donde

δ = Plan de ataque

Esquemáticamente, el problema de la amenaza terrorista TTP, por sus siglas en inglés, está representado por la Figura 3.1.

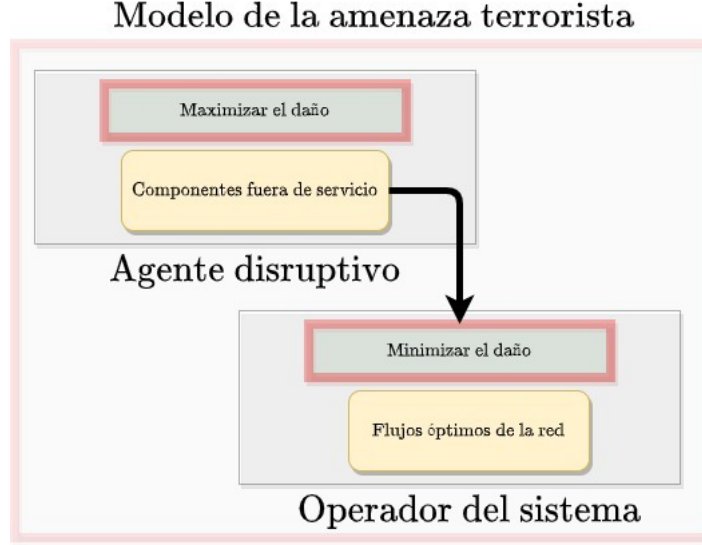


Figura 3.1: Problema de la amenaza terrorista.

Podemos observar que tenemos un modelo binivel, donde el nivel superior está representado por las decisiones de un agente disruptivo, que buscará maximizar el daño al sistema, dejando componentes fuera de servicio. El nivel inferior está representado por el operador del sistema, quien se encargará de determinar los flujos de potencia óptimos, con tal de minimizar el daño causado por el agente disruptivo. Como ejemplo, si suponemos que el agente disruptivo ataca líneas de transmisión, entonces el operador resolverá un DC-OPF (o AC-OPF) con desconexión de carga, el cual ya fue detallado anteriormente. Además, para hacer una modelación más realista, se podrían agregar restricciones físicas y operativas de los generadores, incorporando de esta forma el UC al nivel del operador.

3.2.5. Modelo de planificación

En su forma más básica, es un modelo de tipo Min-Max-Min, definido como:

$$\min_{\{p \in P\}} dp + \max_{\{\delta \in \Delta(p)\}} \min_y cy \quad (3.6a)$$

$$\text{s.a. } A(p)y \leq B(p)\delta \quad (3.6b)$$

$$y \geq 0 \quad (3.6c)$$

donde

p = Medida protectiva o plan de expansión

δ = Plan de ataque

Esquemáticamente, el modelo de planificación está representado por la Figura 3.2.

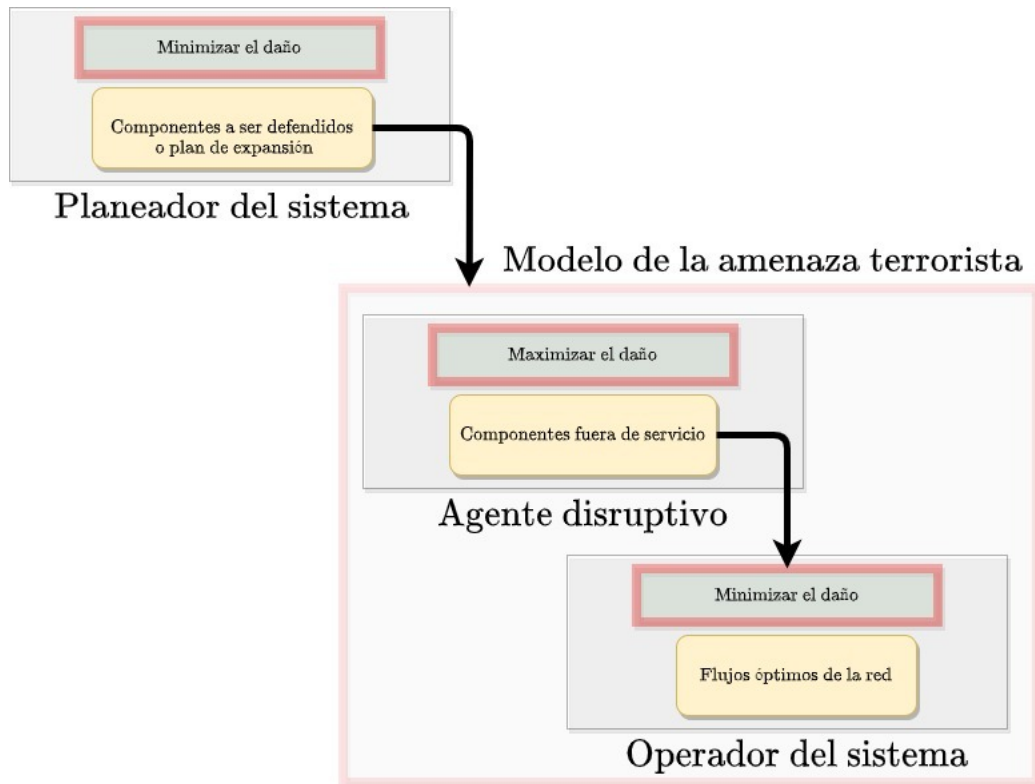


Figura 3.2: Modelo de planificación.

Podemos observar que tenemos un modelo trinivel, donde el nivel superior está representado por un planeador del sistema, quien intentará minimizar el daño de futuros ataques, tomando acciones protectivas sobre ciertos componentes o buscando planes de expansión que hagan al sistema más fiable ante amenazas. El nivel intermedio estará representado por un agente disruptivo, que buscará maximizar el daño al sistema, dejando componentes fuera de servicio, excepto los componentes que fueron protegidos por el planeador. El nivel inferior está representado por el operador del sistema, quien se encargará de determinar los flujos de potencia óptimos, con tal de minimizar el daño causado por el agente disruptivo. Como ejemplo, si suponemos que el planificador del sistema endurece líneas de transmisión, entonces el agente disruptivo atacará estos componentes, mientras que el operador resolverá un DC-OPF con desconexión de carga, modificado para considerar los componentes protegidos. Además, para hacer una modelación más realista, se podrían agregar restricciones físicas y operativas de los generadores, incorporando de esta forma el UC al nivel del operador.

3.3. Incertidumbre en sistemas de potencia

Tal como mencionamos en secciones anteriores, la naturaleza de un sistema de potencia es inherentemente estocástica. Tanto el funcionamiento e interacción interna de sus componentes, como los factores externos a los que se ve expuesto, tienen comportamientos inciertos. Dentro de estos destacan variaciones en la demanda de electricidad, intermitencias en el funcionamiento de fuentes de energía renovables, cambios en políticas energéticas, desastres naturales, ataques terroristas, etc. Si bien el funcionamiento de los componentes del sistema, y algunos fenómenos externos, pueden ser modelados a través de distribuciones de probabilidad, existen otros factores para los que, aún siendo inciertos, no existen suficientes datos para obtener distribuciones de probabilidad, o debido a su naturaleza no aleatoria, no es posible modelarlos probabilísticamente. Para lidiar con estas problemáticas, existen distintos enfoques de optimización, tales como programación estocástica y optimización robusta. El primero lo podemos usar para modelar fenómenos inciertos y aleatorios,

mientras que el segundo para modelar fenómenos inciertos y no aleatorios.

La programación estocástica es un enfoque utilizado para asegurar fiabilidad en un sistema ante la ocurrencia promedio de un fenómeno. En su concepción más básica, puede ser considerada como un modelo de optimización binivel. En el nivel superior, tenemos una función objetivo que representa la esperanza de algún fenómeno del sistema, el cual queremos minimizar o maximizar, y del que conocemos su distribución de probabilidad. Por otra parte, embebido en las restricciones del nivel superior, tenemos un modelo de nivel inferior, cuya función objetivo está constituida por las realizaciones de este fenómeno, y cuyo sentido de optimización es consistente con el nivel superior. En la mayoría de los casos, la distribución de probabilidades no nos permite obtener soluciones cerradas, y debemos recurrir a distribuciones con soporte finito, cuya función objetivo será un promedio ponderado de cada uno de los escenarios del fenómeno en estudio, siendo sus probabilidades usadas como ponderadores. Con objeto de garantizar factibilidad y buen rendimiento, un número razonable de escenarios debe ser considerado. Si el modelo involucra algún horizonte temporal discreto, entonces aparecen las llamadas restricciones de no anticipatividad, que entregan consistencia a la formulación. A continuación, presentamos un modelo de programación estocástica de dos etapas [13]:

$$\min_{\{x \in X\}} c^T x + E\{\mathbb{Q}(x, \tilde{b})\} \quad (3.7a)$$

donde

$$\mathbb{Q} = \min d^T y \quad (3.7b)$$

$$\text{s.a } Ax + By \leq \tilde{b} \quad (3.7c)$$

En el modelo anterior, observamos que la variable x representa las decisiones antes de que los fenómenos inciertos sean observados, la variable y representa las decisiones después de que los fenómenos inciertos son observados, y \tilde{b} representa las fuentes de incertidumbre.

La optimización robusta es un enfoque utilizado para asegurar confiabilidad en un sistema ante la ocurrencia del peor caso posible de un fenómeno. No requiere la utilización de una distribución de probabilidades, puesto que a priori se sitúa en el peor valor posible de los parámetros que caracterizan al fenómeno en estudio. A cambio, requiere la utilización de regiones de incertidumbre, que pueden ser descritas por conjuntos polihedrales, construidos gracias a conocimiento experto, y cuyas variables representan el fenómeno en estudio. Estos conjuntos son insertados en el modelo de optimización como niveles adicionales que requieren ser optimizados. Este enfoque puede garantizar la factibilidad de la solución óptima ante cualquier posible realización del fenómeno, y además entrega una cota inferior sobre el valor de la función objetivo. A continuación, se presenta un modelo de optimización robusta [13]:

$$\min_{\{x \in X\}} c^T x + \max_{\{b \in U\}} \min_{\{y \in Y(x, b)\}} d^T y \quad (3.8a)$$

donde

$$U = \text{Conjunto de incertidumbre} \quad (3.8b)$$

$$Y(x, b) = \{y | Ax + By \leq b\} \quad (3.8c)$$

En el modelo anterior, observamos que la variable x representa las decisiones antes de que los fenómenos inciertos sean observados, U representa el conjunto de incertidumbre, la variable y representa las decisiones después de que los fenómenos inciertos son observados, mientras que $Y(x, b)$ representa la región factible de la variable y .

3.4. Métodos de solución

Los modelos utilizados para abordar problemas de confiabilidad en sistemas de potencia poseen características intrínsecas que los hacen difíciles de resolver. Considerando las formulaciones de flujos de potencia

como el AC-OPF, se puede observar que tienen una naturaleza no convexa, lo que obliga a buscar aproximaciones como el DC-OPF. Sin embargo, estas últimas normalmente están embebidas en formulaciones de carácter binivel o trinivel, ya que interesa evaluar el funcionamiento del sistema en la interacción con distintos agentes. Por un lado, en el caso de problemas binivel, se pueden aplicar las condiciones de *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) [5] al modelo DC-OPF del nivel inferior, ya que este último es de naturaleza lineal, sin variables enteras, y cumple el teorema de dualidad fuerte. De esta forma, el problema binivel se transformaría en un problema de un único nivel *Linear Problem* (LP), o *Mixed-Integer Linear Problem* (MILP), soluble a través del típico método simplex, o usando *Branch and Bound* (B&B). Es importante destacar que tanto el DC-OPF sin desconexión de carga como con desconexión de carga verifican el teorema de dualidad fuerte, ya que aunque el último tenga variables binarias indicando contingencias, dichas variables pertenecerán al nivel superior, y en el nivel inferior serán solo parámetros. En el caso de que se considere el DC-OPF con alguna modificación que lo obligue a tener variables de decisión enteras, no se cumpliría el teorema de dualidad fuerte, y se tendría que recurrir a métodos como la descomposición de Benders, dividiendo el actual modelo binivel en un problema maestro y un subproblema, que son resueltos iterativamente, hasta cumplir ciertos criterios de factibilidad y optimalidad establecidos. Por otro lado, en el caso de problemas trinivel, pueden ser vistos como problemas de dos niveles, donde el nivel superior corresponde al problema del planificador, mientras que el nivel inferior corresponde a un problema binivel. Como ya se vio, el problema binivel puede ser transformado en un problema de un único nivel e inscrustado como restricciones del nivel superior, formando así, un nuevo problema binivel. Esta vez, la presencia de variables enteras en el nivel inferior resultante, obligará a aplicar el método de descomposición de Benders [38] a este problema binivel. Desde luego que pueden existir muchas variaciones en la modelación, que obliguen a ir por unos u otros caminos. Por ejemplo, ante la presencia de un problema binivel, donde tanto el sentido de optimización como la función objetivo de ambos niveles son iguales, y en el nivel superior no existen restricciones que involucren variables de decisión del nivel inferior, bastaría con mantener solo una función objetivo, e incrustar las restricciones del nivel inferior en el nivel superior, para obtener un único nivel. Por el contrario, si ambos niveles tienen sentidos de optimización diferentes con igual función objetivo, como los problemas max-min, o sentidos de optimización diferentes con funciones objetivos distintas, se tendrían que obtener las condiciones de KKT, e inscrustarlas en el modelo para obtener un único nivel.

Considerando las formulaciones que modelan el funcionamiento de las unidades de generación, como el problema del predespacho, se puede observar que tienen una naturaleza multietapa, puesto que poseen variables de decisión que están indexadas por parámetros temporales. Estas formulaciones pueden ser combinadas con las formulaciones de flujos de potencia, considerando así las limitaciones físicas y operativas no solo de las líneas de transmisión, sino también de las unidades de generación, a lo largo de un horizonte temporal. Estos nuevos modelos híbridos generan nuevos desafíos de cara a sus enfoques de solución. Dentro de la literatura, lo comúnmente utilizado para resolver problemas multietapas es la programación dinámica [10]. Este enfoque busca dividir el modelo en un conjunto de subproblemas, los cuales se resuelven de forma recursiva, hasta alcanzar el óptimo global. Si el modelo a resolver satisface el principio de optimalidad de *Bellman*, el cual dice que las decisiones involucradas desde una etapa en adelante solo dependen del estado inicial de la etapa y no de las decisiones previas, entonces se puede aplicar el enfoque de programación dinámica. Una pregunta natural sería: si se tiene un modelo multietapas, ¿Por qué se debería recurrir a un enfoque de programación dinámica, si es posible resolverlo a través de un enfoque convencional, considerando todas las variables indexadas por el tiempo, como variables de decisión de un único modelo?. La respuesta a esta interrogante es que los algoritmos de resolución actuales presentan complejidades exponenciales. Por tanto, no es lo mismo resolver un problema de $m * n$ variables, que m problemas de n variables, desde el punto de vista de tiempos de ejecución y recursos computacionales. Sin embargo, se debe tener cuidado, puesto que en programación dinámica, cada condición inicial corresponde a la resolución de m problemas con n variables, por tanto, si bien una resolución es más rápida (m problemas de n variables), el número de resoluciones necesarias puede también ser exponencial.

A continuación, se define el enfoque de programación dinámica. Sea M una formulación DC-OPF multietapas para un horizonte temporal T . Si cumple con el principio de optimalidad de *Bellman*, entonces es

posible dividir M en un conjunto de subproblemas $H_t = DC - OPF_t, \quad \forall t \in T$. Cada uno de estos subproblemas es idéntico, solo que consideran variables de decisión que pertenecen a distintos períodos de tiempo. Estos subproblemas serán ejecutados recursivamente, usando ecuaciones de recursión. Existen dos enfoques de recursión: *Backward* y *Forward*. En el primero, los subproblemas son resueltos escribiendo las ecuaciones de recursión desde la etapa final hacia la primera etapa. En el segundo, los subproblemas son resueltos escribiendo las ecuaciones de recursión desde la primera etapa hacia la última etapa. A continuación, se presenta la formulación del enfoque *Backward* [10]:

$$f_{T-i}^*(e_{T-i}) = \underset{X_{T-i}}{\text{optimizar}} \left[H_{T-i}(X_{T-i}, e_{T-i}) + f_{T-(i-1)}^*(\text{Trans}_{T-i}(X_{T-i}, e_{T-i})) \right] \quad i = 1, \dots, |T| - 1 \quad (3.9a)$$

donde

X_{T-i} = Variables de decisión para la etapa $T - i$.

e_{T-i} = Variable de estado para la etapa $T - i$.

$f_{T-i}^*(\cdot)$ = Valor óptimo de la función objetivo para las últimas i etapas.

$H_{T-i}(\cdot)$ = Problema DC-OPF para la etapa $T - i$.

$\text{Trans}_{T-i}(X_{T-i}, e_{T-i})$ = Función de transformación que da origen al estado $e_{T-(i-1)}$.

f_T^* = Valor óptimo conocido para la etapa T .

e_1 = Variable de estado conocida para la etapa 1.

A continuación, se presenta la formulación del enfoque *Forward* [10]:

$$f_i^*(e_i) = \underset{X_i}{\text{optimizar}} \left[H_i(X_i, e_i) + f_{(i-1)}^*(\text{Trans}_i(X_i, e_i)) \right] \quad i = 2, \dots, |T| \quad (3.10a)$$

donde

X_i = Variables de decisión para la etapa i .

e_i = Variable de estado para la etapa i .

$f_i^*(\cdot)$ = Valor óptimo de la función objetivo para las primeras i etapas.

$H_i(\cdot)$ = Problema DC-OPF para la etapa i .

$\text{Trans}_i(X_i, e_i)$ = Función de transformación que da origen al estado $e_{(i-1)}$.

f_1^* = Valor óptimo conocido para la etapa 1.

e_T = Variable de estado conocida para la etapa 1.

La elección de uno u otro enfoque de recursión dependerá de las condiciones de borde conocidas.

Finalmente, es importante mencionar que una forma de modelar disrupciones de cualquier clase al sistema de potencia es formular un problema de características binivel, pero considerando un ataque dado. Esto impide una preparación ante el peor escenario posible y tomar decisiones tácticas y estratégicas, pero permite reducir considerablemente los esfuerzos de resolución y tomar decisiones operativas.

3.5. Casos de estudio

Los sistemas de pruebas de confiabilidad, o *Reliability Test System* (RTS), han sido extensivamente usados por investigadores, como sistemas de comparación para estudios de confiabilidad, y otros desarrollos en el campo de las aplicaciones probabilísticas en sistemas de potencia. Uno de los más ampliamente usados es el IEEE RTS, cuyo desarrollo estuvo ligado a actividades y personas involucradas en el subcomité IEEE de confiabilidad, riesgo y aplicaciones probabilísticas, o *IEEE PES Reliability, Risk and Probability Applications* (RRPA), y que datan desde los años 80 [6]. Básicamente, un RTS se compone de un conjunto de nodos, un modelo de cargas, unidades de generación, y un conjunto de líneas transmisión y/o distribución. Distintas

configuraciones y cardinalidades de los elementos anteriormente mencionados, dan origen a distintos sistemas de pruebas.

3.5.1. IEEE RTS-5

El IEEE RTS-5 es uno de los sistemas de prueba mas pequeño, el cual se compone de 5 nodos, 5 unidades de generación, 5 puntos de carga y 6 líneas de transmisión. La Figura 3.3 muestra la representación del IEEE RTS-5.

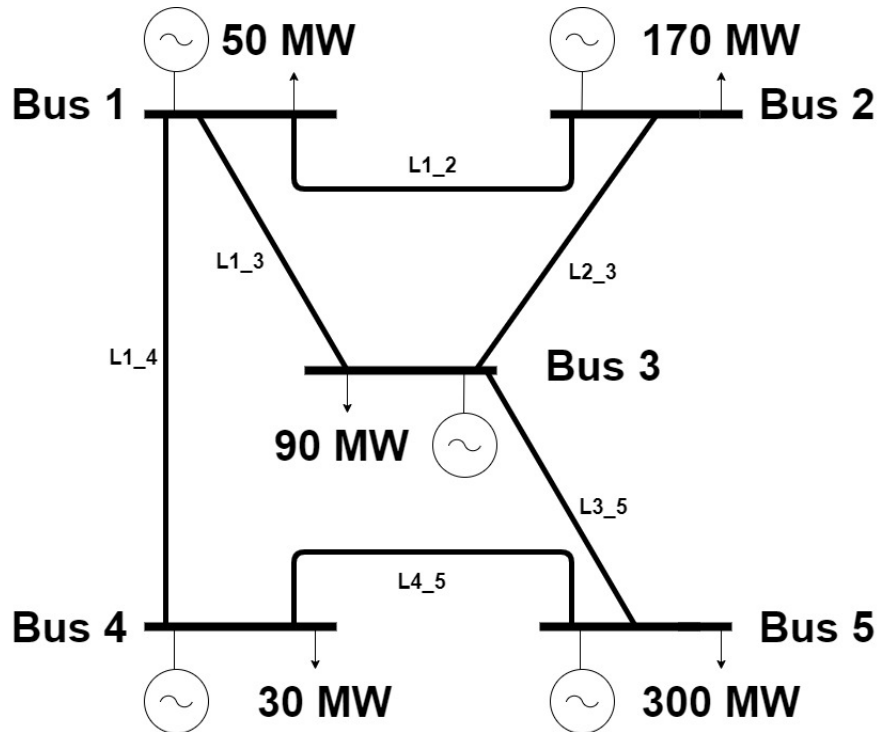


Figura 3.3: IEEE RTS-5

3.5.2. IEEE RTS-24

El IEEE RTS-24 se clasifica como un sistema de prueba de tamaño mediano, el cual se compone de 24 buses, 32 unidades de generación, 17 puntos de carga y 38 líneas de transmisión, además de presentar redundancia en algunos nodos, y varias unidades de generación por nodo. La Figura 3.4 muestra la representación del IEEE RTS-24.

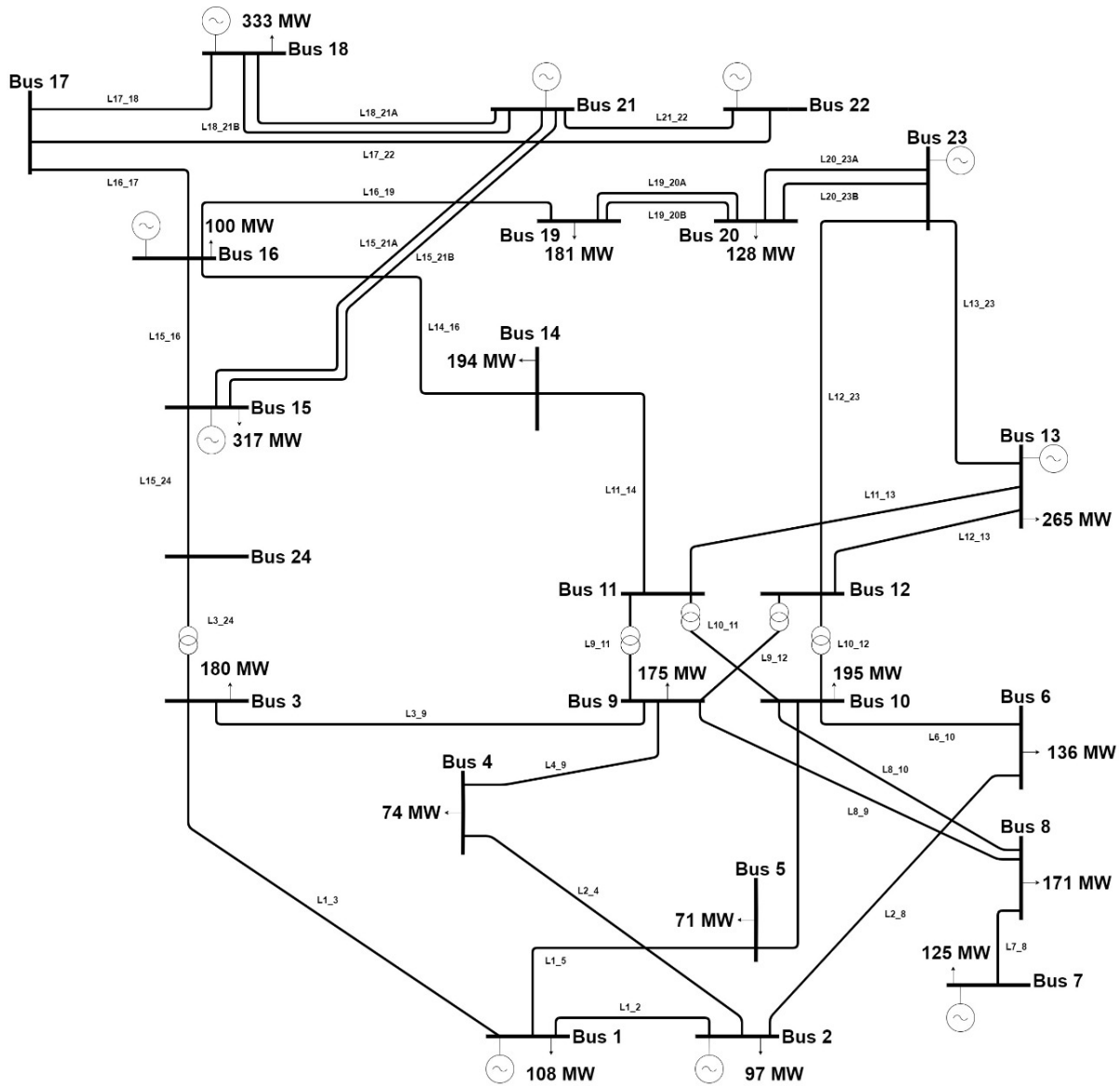


Figura 3.4: IEEE RTS-24

3.5.3. IEEE RTS-118

El IEEE RTS-118 se clasifica como un sistema de prueba de tamaño grande, y es más complejo de analizar, en comparación con los sistemas presentados anteriormente. Está formado por 118 buses, 54 unidades de generación, 91 puntos de carga y 186 líneas de transmisión, además de presentar redundancia en algunos nodos, y varias unidades de generacion por nodo. La Figura 3.5 muestra la representación del IEEE RTS-118.

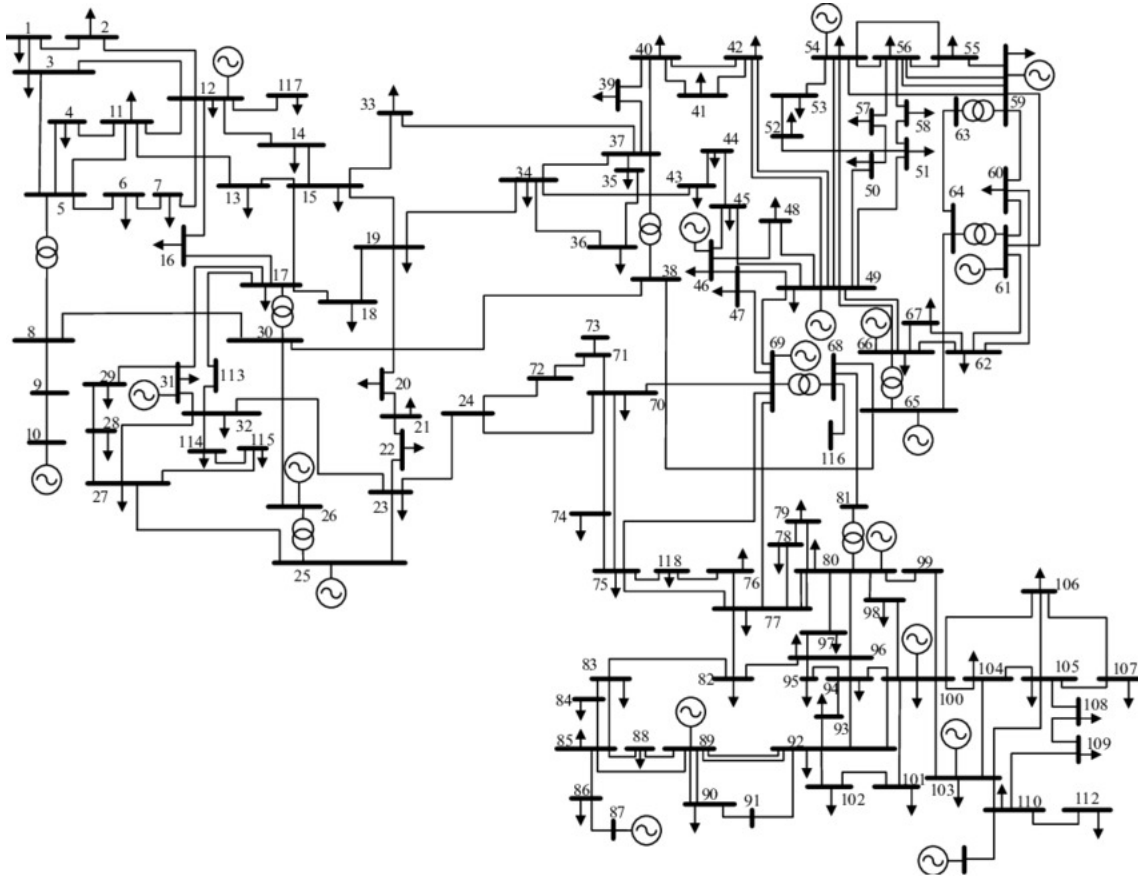


Figura 3.5: IEEE RTS-118

Con el paso del tiempo, ha habido grandes desarrollos tecnológicos en los sistemas de potencia. Particularmente, en el sector de generación, se ha introducido la generación distribuida, y más específicamente, la generación intermitente desde fuentes de energía renovable. En el sector de transmisión, se destaca el uso cada vez mayor de los sistemas de transmisión de corriente continua de alta tensión, o *High Voltage Direct Current* (HVDC). Finalmente, en el sector de distribución, se destaca el surgimiento del concepto prosumer, el cual hace referencia a usuarios de la electricidad que pueden tener los roles de consumidores y productores, al mismo tiempo. Todos estos avances tecnológicos van de la mano con actualizaciones tanto de modelos como de los casos de estudio presentados.

Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología propuesta para la obtención de una política de energización para el operador de la red, considerando incertidumbre respecto a la localización de los ataques. En primer lugar, se hace una descripción de lo que se entiende por política de energización. En segundo lugar, se establece una mecánica de ataque, la cual es el mecanismo lógico, a través del que se generan los ataques al sistema de transmisión. Posterior a esto, se presenta el árbol de decisiones generado por la mecánica de ataque, junto a todas las simplificaciones necesarias para reducir la complejidad combinatorial. Finalmente, se presentan las formulaciones matemáticas. Por un lado, se tiene una formulación monolítica estocástica multietapas, la cual es mejorada con objeto de reducir los tiempos de ejecución obteniéndose una formulación de programación dinámica estocástica.

4.1. Política de energización

Cuando el operador de la red se enfrenta a un ataque de componentes del sistema eléctrico, debe tomar un conjunto de decisiones que le permitan restablecer el funcionamiento al mínimo costo y en el menor tiempo posible. En honor a la simplicidad, y sin pérdida de generalidad, se abordará solo el caso de ataques a líneas de transmisión, y se minimizará la energía no suministrada ΔP^D . Desde esta perspectiva, un terrorista intentará impedir que los flujos de potencia circulen por la red, atacando directamente las líneas que comunican los distintos nodos N . El operador deberá tomar acciones de mitigación, redistribuyendo los flujos en el sistema. Para hacer esto, necesita una estrategia que le ayude a responder dos preguntas: ¿Qué líneas energizar? y ¿En qué momento?. La primera pregunta surge debido a que, como se explica en detalle más adelante, el operador desconoce cuáles fueron las líneas afectadas, y solo sospecha de ciertas combinaciones potenciales de ataque s con probabilidad p , alrededor de algunos nodos informados por dispositivos de detección. La segunda pregunta surge debido a que la energización de una línea involucra un proceso de coordinación con otros actores, lo que genera un tiempo muerto, en el que un conjunto de clientes estará sin suministro de energía. Este tiempo muerto será de alrededor de 15 minutos. Si el operador energiza una línea que fue atacada, no podrá activar su flujo, y tendrá que esperar otros 15 minutos hasta energizar la siguiente, totalizando 30 minutos sin suministro de energía. En cambio, si energiza una línea que no fue atacada, cuyo nodo tiene un generador con mucha capacidad, podrá satisfacer la demanda de nodos vecinos. En resumen, como el operador toma acciones de energización en un horizonte temporal con intervalos uniformes, sobre un conjunto de ataques potenciales simultáneos, debe saber muy bien qué líneas energizar y en qué momento, para aprovechar las opciones de reducir la energía no suministrada. La Figura 4.1 muestra una representación esquemática de la política de energización, donde 1 indica que la línea fue atacada, y 0 indica que la línea está en operación normal.

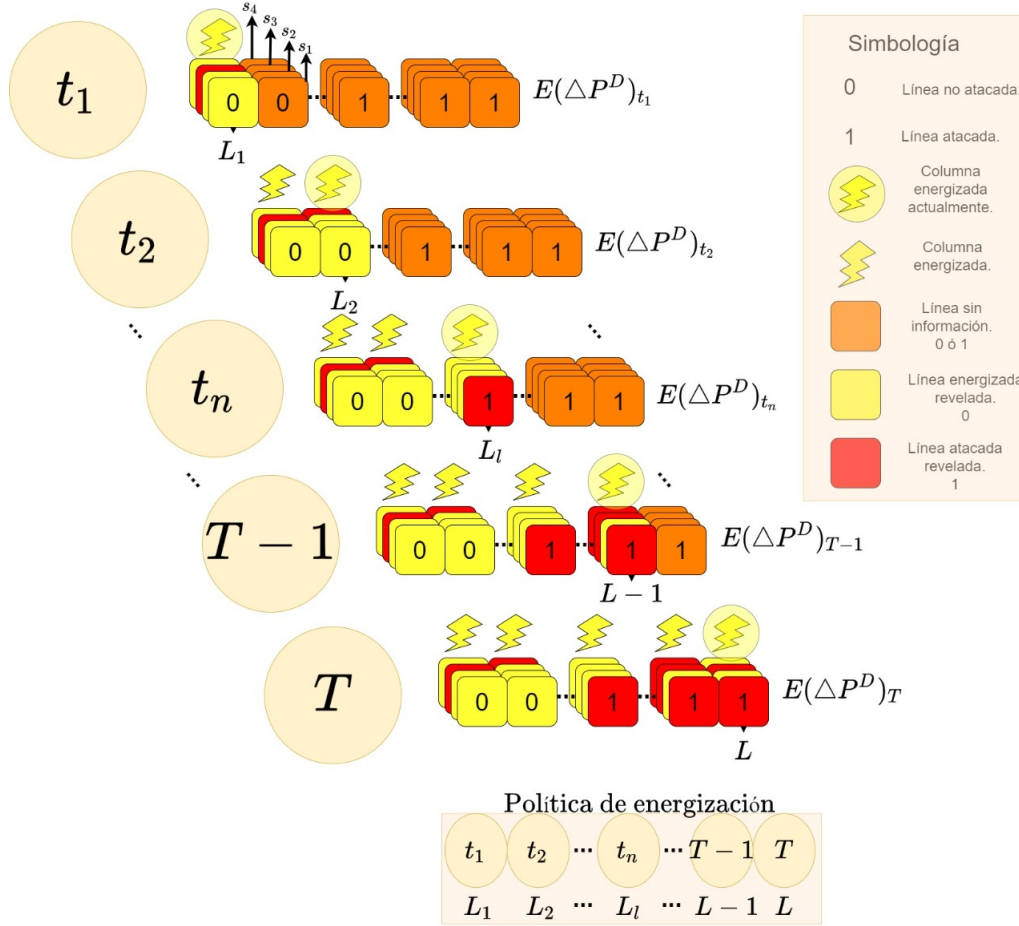


Figura 4.1: Política de energización con cuatro combinaciones de ataque y tres nodos

En esta figura el operador se enfrenta a 4 combinaciones potenciales de ataque, s_1, s_2, s_3 y s_4 . En cada periodo de tiempo t , el operador debe escoger qué línea energizar. La línea escogida podrá estar en estado atacado o no atacado, dependiendo de la combinación potencial de ataque. Posterior a esto, se calcula $E(\Delta P^D)_t$, es decir, la esperanza de la energía no suministrada para el periodo t . El resultado final, producto de repetir esta operación para todos los periodos de tiempo, será la política de energización, cuyo costo es igual a la suma de las esperanzas de la energía no suministrada para todo el horizonte temporal T .

4.2. Mecánica de ataque

Los ataques terroristas a las redes de transmisión son de carácter incierto, debido a que no se sabe a priori qué líneas serán atacadas, ni en qué momento. Cuando el operador de un sistema se enfrenta a una interrupción deliberada de componentes, debe actuar inmediatamente, con tal de asegurar el suministro de energía a los clientes del sistema. Estas acciones de mitigación pueden ser reducción o desconexión de carga, e involucran la ejecución de un redespacho de energía, con tal de reajustar los flujos de potencia de la red dañada a la demanda. Para representar la incertidumbre del operador respecto a qué líneas fueron dañadas, el ataque debe ser enmascarado utilizando los nodos (de aquí en adelante, se usará el término nodo y bus como sinónimos) de incidencia de las líneas afectadas. De esta forma, un ataque terrorista enmascarado, será representado como la elección de un conjunto de nodos (los cuales no son atacados), donde los componentes

atacados pueden ser cualquier combinación posible de líneas (en el mundo real solo una combinación ocurrirá, pero este enfoque considera todas las combinaciones simultáneamente) que entren o salgan de estos buses, y que tengan la capacidad de afectar el suministro de energía de todos estos. La justificación de que existan varias combinaciones potenciales de líneas atacadas, radica en el hecho de que el sistema tiende a mantener la potencia constante. Si una línea es dañada, se produce un circuito abierto que impedirá el flujo de corriente. Este flujo será canalizado a través de otras líneas las cuales podrían verse sobrecargadas, debido a que son superados sus límites de capacidad. Dependiendo la intensidad de la sobrecarga, algunas líneas podrían ser dañadas, y otras podrían ser desconectadas a través de la activación de distintos mecanismos de protección del sistema. Estos fallos en cadena se detendrán cuando el sistema alcance un punto de equilibrio. Una vez alcanzado, el operador detectará el ataque (los dispositivos de seguridad identificarán los nodos afectados por las líneas atacadas) y se comenzará con el proceso de energización, donde algunas líneas participantes del fallo en cadena podrán volver a funcionar, y otra no. Es importante remarcar que con esta metodología el operador podría rectificar la información entregada por el terrorista, ya que, en algunos casos es posible asignar probabilidades distintas a cada combinación potencial de líneas atacadas. Esto disminuirá la incertidumbre del operador, concretándose en una reducción de las combinaciones posibles de líneas atacadas y en una focalización de los esfuerzos de detección, a través de la asignación de una probabilidad cero para combinaciones de ataque no posibles, y un aumento de probabilidad para combinaciones de ataques muy sospechosos.

Para representar matemáticamente un ataque, se definirán varios conceptos. Sea a un ataque sobre un caso de estudio de 5, 24 o 118 nodos, con N representando el conjunto de nodos, L el conjunto de líneas de transmisión, Φ^N el conjunto de nodos afectados, Φ^L el conjunto de líneas posibles atacadas, BUS_n el n -ésimo nodo, y $L_{x,y}$ como una línea cuyo flujo sale de BUS_x y entra a BUS_y . Todas las combinaciones posibles de líneas atacadas, dadas por la elección del conjunto Φ^N , recibirán el nombre de conjunto de escenarios factibles $S(\Phi^N, \Phi^L)_1$. Se dice que un escenario s cualquiera, no necesariamente $s \in S(\Phi^N, \Phi^L)_1$, es un vector binario de líneas de transmisión, ordenado lexicográficamente según los índices x e y de todas las líneas de IEEE RTS-X, donde 1 indica ataque, 0 indica operación normal, y cuya longitud es igual a $|s| = |L|$. También se define $\Phi(s, L_{x,y})^{N*} = \{BUS_x \in \Phi^N \vee BUS_y \in \Phi^N\}$ como el conjunto formado por los nodos de incidencia de $L_{x,y}$ que pertenecen a Φ^N , dado que $L_{x,y}$ fue atacada en s . Así, $s \in S(\Phi^N, \Phi^L)_1$ si y solo si $\Phi(s)^{N*} = \{\cup \Phi(s, L_{x,y})^{N*}, \forall L_{x,y} \text{ atacada en } s\} = \Phi^N$, es decir, si el conjunto formado por los nodos de incidencia de las líneas atacadas en s es igual al conjunto de los nodos afectados Φ^N . Así, se define el ataque a como el conjunto $S(\Phi^N, \Phi^L)_1$.

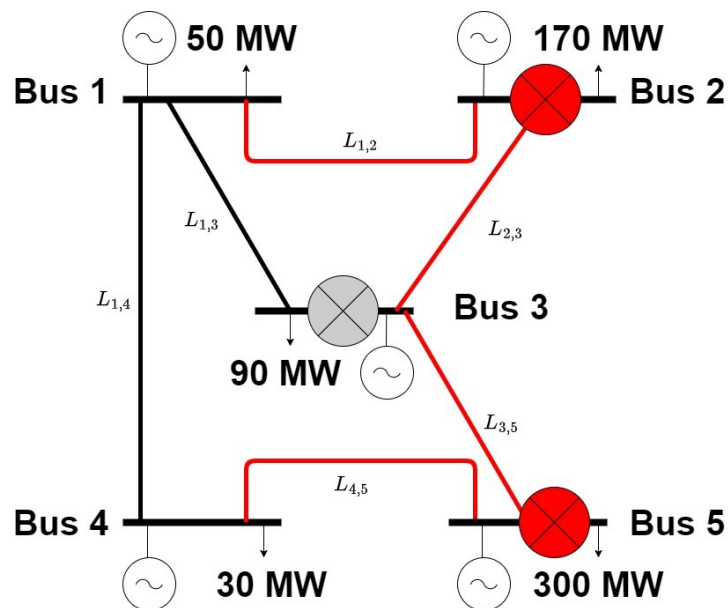


Figura 4.2: Ataque de dos buses en IEEE RTS-5

En la Figura 4.2 se presenta un ejemplo de un ataque en el caso de estudio IEEE RTS-5, donde se observa un conjunto de ataque $\Phi^N = \{BUS_2, BUS_5\}$. Existen cuatro líneas cuyos flujos entran o salen de los nodos atacados, y constituyen el conjunto $\Phi^L = \{L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{4,5}\}$. Todas las combinaciones posibles de estas cuatro líneas, que puedan afectar el suministro de energía de BUS_2 , y BUS_5 , constituyen un conjunto de escenarios S_1 factible. Considerando el orden lexicográfico $\{L_{1,2}, L_{1,3}, L_{1,4}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{4,5}\}$, se pueden definir dos escenarios de ejemplo, $s_1 = \{1, 0, 0, 0, 1, 0\}$ y $s_2 = \{1, 0, 0, 0, 0, 0\}$. Según la definición de combinación factible, se tiene un primer caso donde $s_1 \in S(\Phi^N, \Phi^L)_1$, y un segundo caso donde $s_2 \notin S(\Phi^N, \Phi^L)_1$. Para el primer caso, se observa $\Phi(s_1)^{N*} = \Phi^N$, ya que todas las líneas atacadas en s_1 tienen nodos de incidencia pertenecientes a los nodos afectados cuya unión es igual a Φ^N . Para el segundo caso, se observa que $\Phi(s_2)^{N*} \neq \Phi^N$, ya que, el conjunto formado por el nodo de incidencia $BUS_2 \in \Phi^N$ de la línea $L_{1,2}$ atacada en s_2 está estrictamente contenido en Φ^N , no verificándose así la igualdad requerida. Con este método de generación de escenarios, se puede definir el conjunto de escenarios factibles como:

$$S(\Phi^N, \Phi^L)_1 = \{\{1, 0, 0, 0, 1, 0\}, \{0, 0, 0, 1, 0, 1\}, \{1, 0, 0, 0, 0, 1\}, \{0, 0, 0, 1, 1, 0\}, \{1, 0, 0, 1, 1, 1\}, \{1, 0, 0, 1, 1, 0\}, \\ \{1, 0, 0, 0, 1, 1\}, \{1, 0, 0, 1, 0, 1\}, \{0, 0, 0, 1, 1, 1\}\}.$$

Finalmente, se puede representar matemáticamente el ataque $a = S(\{BUS_2, BUS_5\}, \{L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{4,5}\})_1$, con lo cual queda completamente caracterizado.

Según lo descrito más arriba, el operador puede rectificar la información del ataque del terrorista. Si se observan los datos del ataque a , es posible percatarse de que los nodos escogidos por el terrorista para enmascarar su ataque son BUS_2 y BUS_5 . Estos nodos afectan directamente las líneas $L_{1,2}$, $L_{2,3}$, $L_{3,5}$ y $L_{4,5}$. Por tanto, cualquier ataque que el terrorista realice a las líneas anteriormente mencionadas y que cumplan con las condiciones del conjunto de escenarios factibles $S(\Phi^N, \Phi^L)_1$, será interpretado por el operador como fallas en los nodos BUS_2 y BUS_5 . Sin embargo, si en la realidad, el operador aparte de detectar fallas en BUS_2 y BUS_5 , detecta fallas en BUS_3 , lo cual es bastante probable, si es que el ataque real del terrorista involucra las líneas $L_{2,3}$ y $L_{3,5}$, entonces puede asignar una distribución de probabilidades distinta al caso sin rectificación, aumentando la probabilidad de los escenarios $\{0, 0, 0, 1, 0, 1\}$ y $\{0, 0, 0, 1, 1, 0\}$.

Hoy en día, existen dispositivos y técnicas sofisticadas que pueden identificar diferencias de ángulos de fase garantizando una lectura certera hasta un cierto grado de granularidad. Por tanto, la mecánica del ataque anteriormente descrito se ajusta a la naturaleza incierta que afecta al operador, ya que solo puede localizar el daño a un nivel macroscópico (a nivel de nodos). Esto provoca que el ataque quede enmascarado y que el operador deba energizar estas zonas con apagones basándose en la información entregada por los dispositivos, y su experiencia desarrollando el cargo.

4.3. Diseño del árbol de decisiones

Una vez que un ataque $a = S(\Phi^N, \Phi^L)_1$ ha sido ejecutado, da origen a un árbol de decisiones $R(a)$. Este último está caracterizado por un horizonte temporal T , un conjunto de decisiones $D_{t \geq 1}$, un conjunto de escenarios $S_{t \geq 1}$, y un conjunto de probabilidades $P_{t \geq 1}$. La distribución de probabilidades para los escenarios en $t = 1$ puede ser de tipo uniforme o puede ser construida a través de conocimiento experto usando el proceso de rectificación detallado en la sección anterior. Para los periodos posteriores, la distribución de probabilidades irá evolucionando de acuerdo a las decisiones que vaya tomando el operador, proceso que será descrito más adelante. Matemáticamente, se puede representar un árbol de decisiones como el conjunto $R(S(\Phi^N, \Phi^L)_1) = \{(t, d, s, p) \mid \forall t \in T, \forall d \in D_t, \forall s \in S_{(t \geq 2, d)} \cup S(\Phi^N, \Phi^L)_1, \forall p \in P_{(t, d, s)}\}$. A continuación, se explicará detalladamente el proceso de creación de un árbol de decisiones, a través de un ataque de ejemplo.

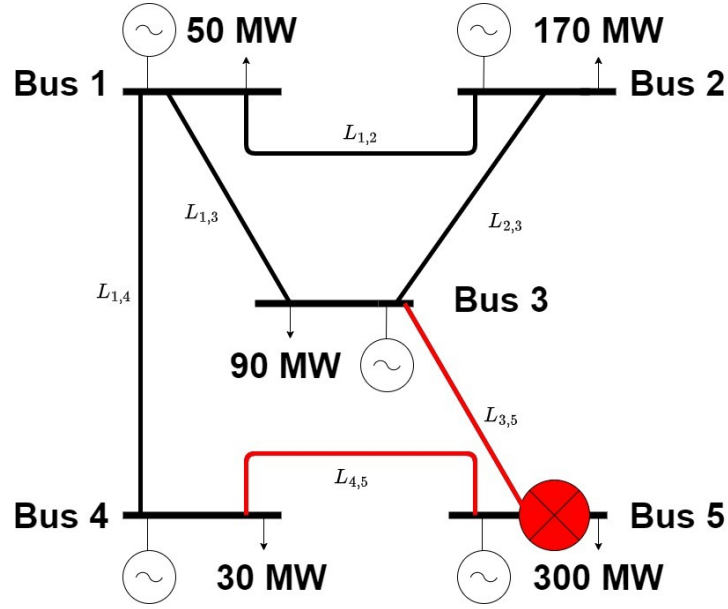


Figura 4.3: Ataque de un bus en IEEE RTS-5

La Figura 4.3 muestra un ataque $a = S(\Phi^N, \Phi^L)_1$, con $\Phi^N = \{BUS_5\}$ y $\Phi^L = \{L_{3,5}, L_{4,5}\}$, que dará origen al árbol de decisiones $R(S(\Phi^N, \Phi^L)_1)$ de la Figura 4.4. A continuación, se puede observar el valor de los parámetros que caracterizan al árbol de decisiones, a saber: el horizonte temporal T , el conjunto de decisiones $D_{t \geq 1}$, el conjunto de escenarios $S = S_{(t \geq 2, d)} \cup S(\Phi^N, \Phi^L)_{t_1}$, y el conjunto de probabilidades $P_{t \geq 1}$.

$$T = \{t_1, t_2, t_3\} \quad (4.1a)$$

$$D = \begin{cases} D_{t_1} = \{nada\} \\ D_{t_2} = \{L_{3,5}, L_{4,5}\} \\ D_{t_3} = \{(L_{3,5}, L_{4,5})\} \end{cases} \quad (4.1b)$$

$$S = \begin{cases} S_{(t_1, nada)} = \{s_1, s_2, s_3\} \\ S_{(t_2, L_{3,5}), S_{(t_2, L_{4,5})}} = \{\{s_1\}_0, \{s_2, s_3\}_1\}, \{\{s_2\}_0, \{s_1, s_3\}_1\} \\ S_{(t_3, (L_{3,5}, L_{4,5}))} = \{\{s_1\}_{(0,1)}, \{s_2\}_{(1,0)}, \{s_3\}_{(1,1)}\} \end{cases} \quad (4.1c)$$

$$P = \begin{cases} P_{(t_1, nada)} = \{0.33_{s_1}, 0.33_{s_2}, 0.33_{s_3}\} \\ P_{(t_2, L_{3,5}), P_{(t_2, L_{4,5})}} = \{\{0.33_{s_1}\}_0, \{0.33_{s_2}, 0.33_{s_3}\}_1\}, \{\{0.33_{s_2}\}_0, \{0.33_{s_1}, 0.33_{s_3}\}_1\} \\ P_{(t_3, (L_{3,5}, L_{4,5}))} = \{\{0, 33_{s_1}\}_{(0,1)}, \{0, 33_{s_2}\}_{(1,0)}, \{0, 33_{s_3}\}_{(1,1)}\} \end{cases} \quad (4.1d)$$

Todos los parámetros anteriores son representados gráficamente en la Figura 4.4 y en la Figura 4.5, cuyas diferencias se explicarán a continuación.

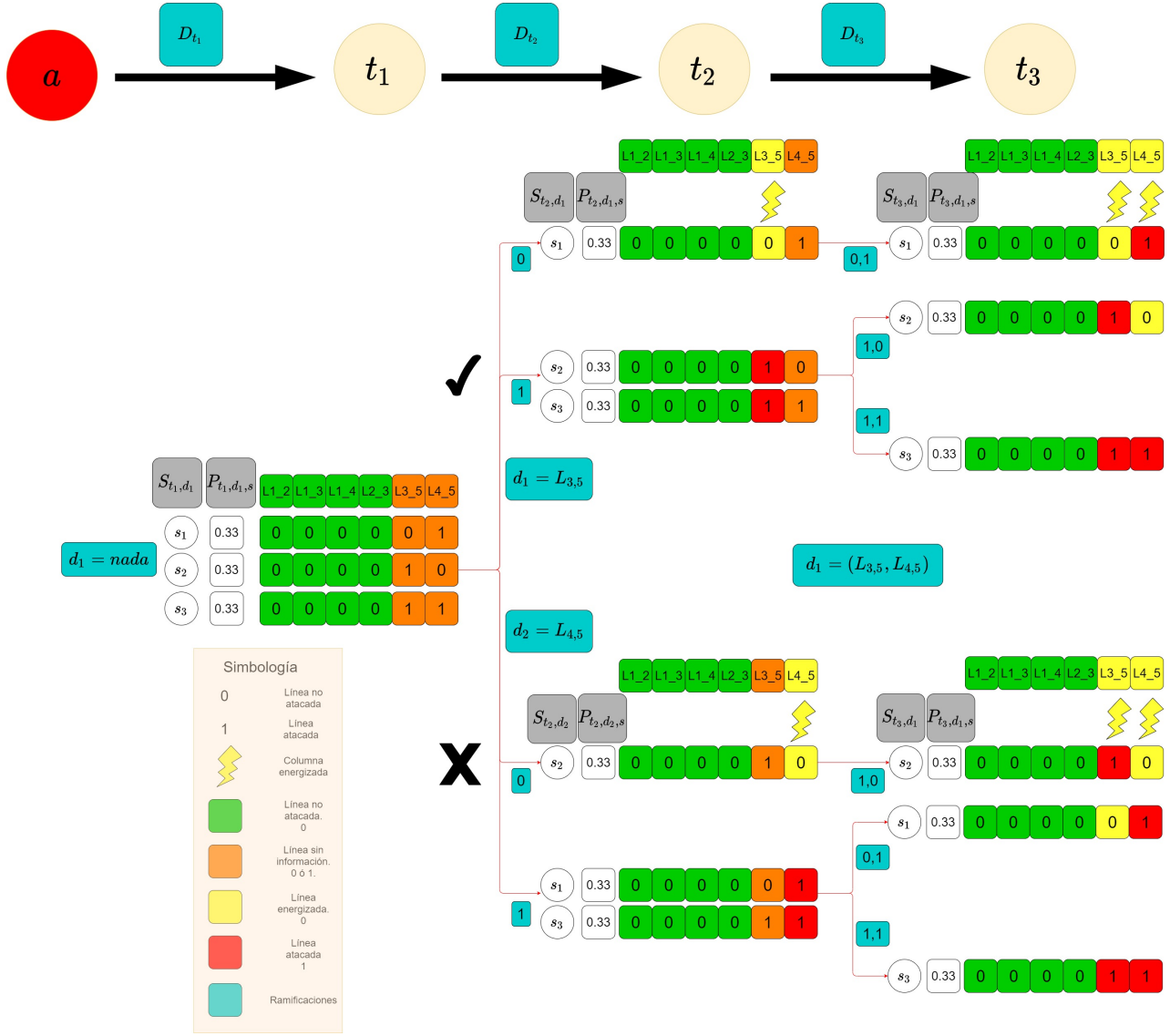


Figura 4.4: Árbol de decisiones

En primer lugar, el horizonte temporal T es determinado por la cardinalidad del conjunto de líneas posibles atacadas más uno, es decir, $T = |\Phi^L| + 1$. Esto es así, debido a que el operador puede energizar solo una línea por periodo de tiempo, y en el primer periodo no se toma una decisión, ya que solo se cuantifica ΔP^D al inicio de la condición post-ataque. Cuando el operador percibe el ataque del terrorista en el periodo t_1 , debe ejecutar la política de energización. Esta política se apoya en un modelo de redpacho de energía secuencial, que se describe en detalle en la sección 4.4. Entonces, al comienzo de cada periodo, el operador debe decidir qué línea energizar. Esta decisión es representada a través de una ramificación del árbol. Cada una de estas ramificaciones tiene subramificaciones, que representan todas las combinaciones de resultados posibles de ataque después de la energización. Por ejemplo, en la Figura 4.4, se puede observar que en el tiempo t_2 , se tienen dos decisiones posibles, energizar $L_{3,5}$ o $L_{4,5}$. Se puede suponer que se decide energizar $L_{3,5}$ (representada por el signo check). Entonces, al operador se le revela la información de esa línea, para todos los escenarios en cuestión s_1, s_2, s_3 , es decir, el operador ahora conoce en cada uno de los escenarios al que se enfrenta, si la línea $L_{3,5}$ fue atacada 1 o no 0. Por tanto, es posible agrupar por un lado los escenarios

que tienen ataques en $L_{3,5}$ (1), y en otro lado los que no (0). Estas dos agrupaciones representan las subramificaciones, las cuales no son decisiones que pueda tomar el operador puesto que, como desconoce cuál fue el escenario real de ataque, debe actuar como si todas esas subramificaciones ocurrieran al mismo tiempo y con una cierta probabilidad.

Al observar la Figura 4.4, se puede ver la existencia de una simbología. El color verde representa líneas que no fueron atacadas, el color anaranjado representa líneas que pueden haber sido atacadas o no, pero cuya información no es conocida por el operador, puesto que aún no las ha energizado. El símbolo de rayo representa la energización para la columna de todas las subramificaciones pertenecientes a una ramificación de decisión. El color celeste representa los conjuntos que provocan ramificaciones y subramificaciones. Los colores amarillo y rojo representan información que ha sido revelada al operador, después que ha energizado la línea en cuestión. De esta forma, el color amarillo representa que la línea ha podido ser energizada, ya que no estaba dañada, y el color rojo representa una línea que no ha podido ser energizada, puesto que estaba dañada. Toda la información recaudada por el operador en el período t_n puede ser utilizada en períodos posteriores. Finalmente, es importante recalcar que en el primer período, el operador no tomará decisiones, lo que se representa por la decisión *nada*, mientras que en el último período de tiempo, el operador habrá energizado todas las líneas potenciales atacadas. Por tanto, todas las ramificaciones del árbol convergerán al mismo resultado.

El árbol de decisiones de la Figura 4.4 puede ser representado de una forma más compacta, como se muestra en la Figura 4.5. Al observar el árbol en la Figura 4.4, se puede ver que existen subramificaciones que tienen más de un escenario. Todos los escenarios en una misma subramificación pueden ser representados por un único escenario genérico, sumando todas sus probabilidades. Este escenario genérico es equivalente a todos los escenarios de la subramificación, puesto que tiene la misma información en las líneas energizadas (amarillo y rojo) y en las líneas no atacadas (verde). Con respecto a las líneas que aún no han sido energizadas (anaranjado), para efectos del modelo, es irrelevante su valor, puesto que funcionan como si estuvieran apagadas. A continuación, se presenta el árbol de decisiones compacto derivado de la Figura 4.4:

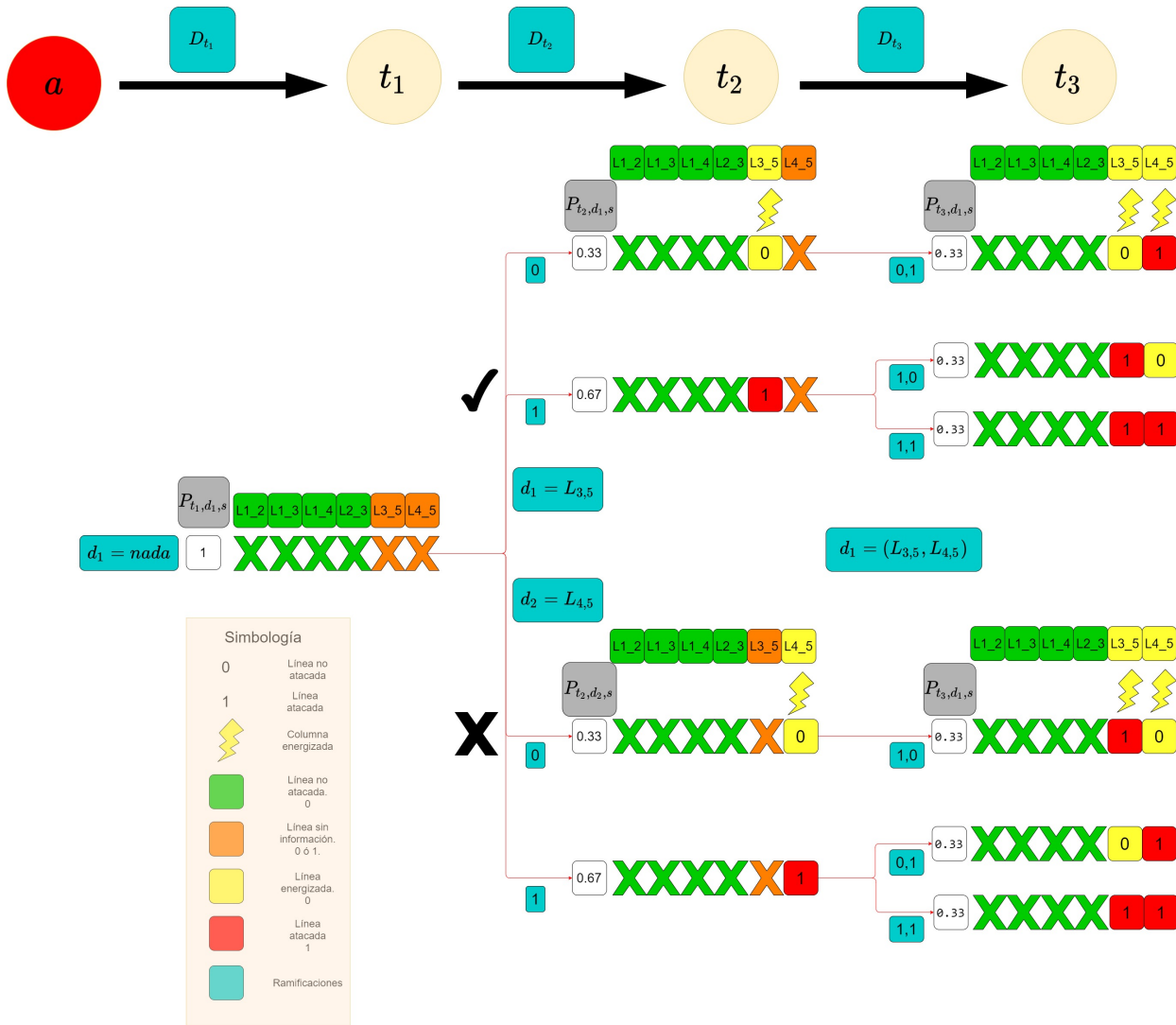


Figura 4.5: Árbol de decisiones compacto

Como se observa en la Figura 4.5, cada escenario genérico es equivalente a todos los escenarios de la subramificación. Como para un ataque dado se puede medir la complejidad de su árbol como el número de veces que un escenario debe ser evaluado por el modelo propuesto, la representación compacta presenta claras ventajas en reducción de combinatoriedad, ya que permite evaluar solo un escenario por subramificación. Finalmente, en la Figura 4.6, se puede observar el árbol de decisiones compacto para una secuencia de energización factible de un ataque a todos los buses del caso de estudio IEEE RTS-5. Los escenarios no factibles en esta representación compacta son tachados, y se les asigna una probabilidad de cero. Esta imagen muestra la relevancia de la representación compacta, pues cuando los casos de estudio crecen, la complejidad de los árboles de decisión crece exponencialmente.

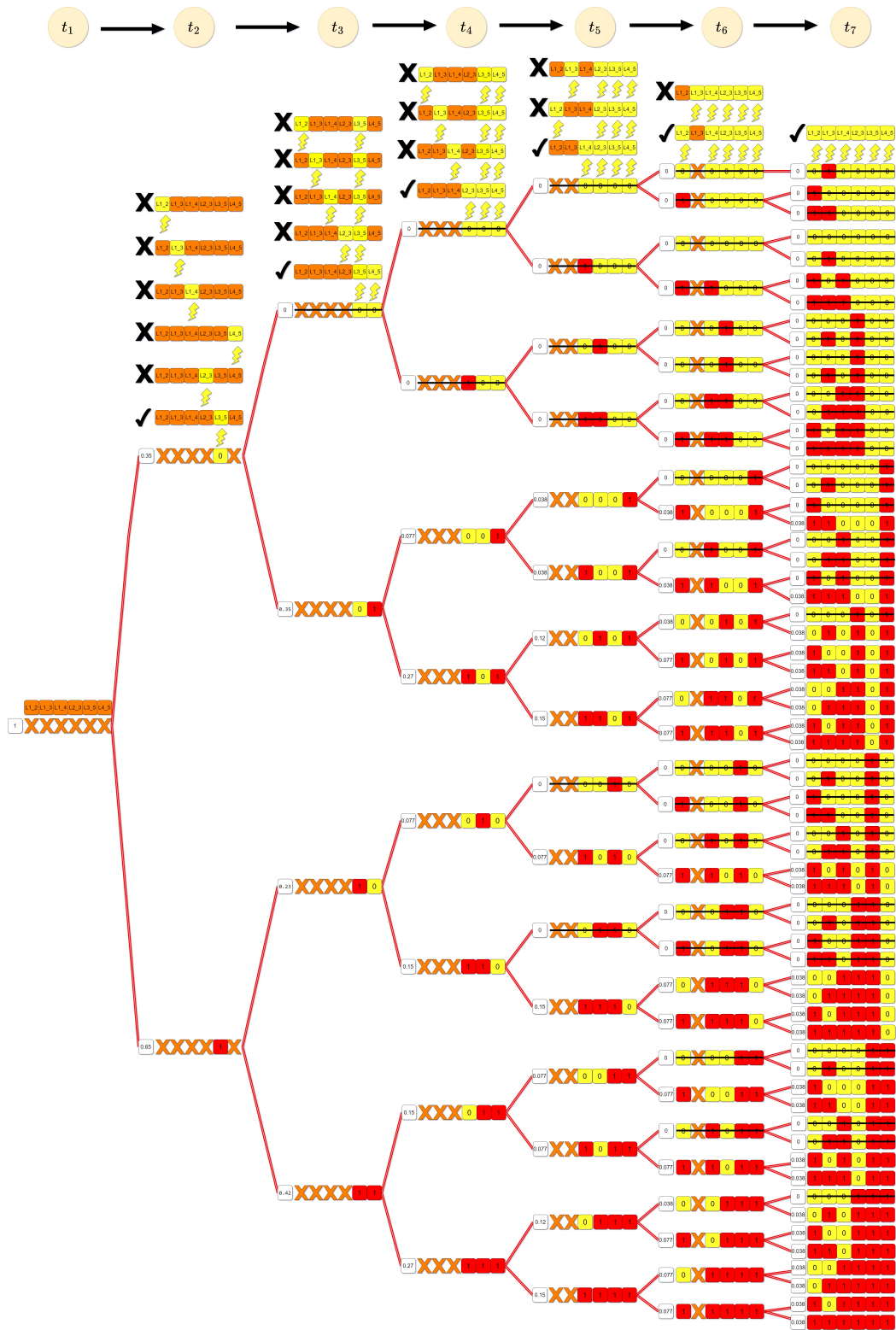


Figura 4.6: Árbol de decisiones completo

4.4. Modelo estocástico multietapas monolítico

A continuación, se presenta la primera formulación matemática, la cual considera como entrada el árbol de decisiones generado por la mecánica de ataque para un ataque particular, y cuya salida es una política de energización para el operador de la red. Recibe el nombre estocástico, debido a que el árbol de decisiones está constituido por un conjunto de escenarios de ataque que tienen ciertas probabilidades de ocurrencia, y recibe el nombre de multietapas, porque tiene variables de decisión que están indexadas por el tiempo.

4.4.1. Índices y conjuntos

s = Índice de escenarios posibles de ataque.

d = Índice de decisiones posibles del operador.

t = Índice de periodos.

l = Índice de línea de transmisión.

n = Índice de bus.

g = Índice de generador.

a = Índice de ataque.

T_a = Conjunto de índices de periodos para ataque a .

$D_{a,t}$ = Conjunto de decisiones posibles del periodo t en ataque a .

$S_{a,t,d}$ = Conjunto de escenarios posibles del periodo t para la decisión d en ataque a .

N = Conjunto de buses.

L = Conjunto de líneas de transmisión.

G = Conjunto de generadores.

A = Conjunto de Ataques.

$O(l)$ = Nodo origen de la línea l .

$D(l)$ = Nodo destino de la línea l .

$B_n = \{l | O(l) = n \vee D(l) = n\}$, conjunto de líneas de transmisión que entran o salen del nodo n .

G_n = Conjunto de generadores instalados en nodo n .

LN_l = Nodos de entrada y de salida de la línea l .

4.4.2. Variables de decisión

4.4.2.1. Variables de decisión del terrorista

q_a^A = Decisión de ataque a , tomada por el terrorista: 1 si es tomada y 0 de otra forma.

Φ_n^N = Nodo n afectado: 1 si es afectado y 0 de otra forma.

4.4.2.2. Variables de decisión del operador

$q_{a,t,d}^O$ = Decisión de energización d del periodo t en el ataque a tomada por el operador:

1 si es tomada y 0 de otra forma.

$NL_{l,a,t}$ = Nueva línea l energizada en tiempo t en ataque a : 1 si es energizada y 0 de otra forma.

$N_{a,t}$ = Informa si hubo alguna línea energizada para periodo t en ataque a : 1 si es energizada,

y 0 de otra forma.

Φ_{nl}^N = Línea l atacada, que entra o sale del nodo n : 1 si es atacada y 0 de otra forma.

$\phi_{n1,n2}^N$ = Explica si nodos $n1$ y $n2$ comparten línea atacada: 1 si la comparten y 0 de otra forma.

$OFF_{a,t,d,s}$ = Activación-desactivación del escenario s en subramificación d del periodo t para el ataque a : 1 si es activado y 0 de otra forma.

$v_{l,a,t}^{CI}$ = Energización de la línea l en el periodo t para ataque a : 1 si es energizada y 0 de otra forma.

$P_{g,a,t}^{GTRA}$ = Potencia de salida del generador g en el periodo t para ataque a .

$P_{a,t,d,s,l}^{LTRA}$ = Flujo de potencia que circula a través de la línea l del escenario s para la decisión d del periodo t para el ataque a .

$\delta_{a,t,d,s,n}$ = Ángulo de fase del voltaje en el bus n del escenario s para la decisión d del periodo t en el ataque a .

$\Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTTRA}$ = Desconexión de carga en el bus n del escenario s para la decisión d del periodo t para ataque a .

$x_{g,a,t}$ = Estado del generador g en el periodo t para el ataque a : 1 si está operando y 0 de otra forma.

$z_{g,a,t}$ = Encendido del generador g en el periodo t para el ataque a : 1 si es encendido y 0 de otra forma.

4.4.3. Parámetros

4.4.3.1. Parámetros del terrorista

$ATTACK$ = Presupuesto de ataque del terrorista.

c_n^Φ = Costo de ataque en el nodo n .

$patron_{a,n}^A$ = Patrón de ataque del nodo n debido al ataque a : 1 si es atacado y 0 de otra forma.

4.4.3.2. Parámetros del operador

$v_{a,t,d,s,l}^{SI}$ = Representa el ataque a la línea l en el escenario s para subramificación d del periodo t para el ataque a : 1 si es atacada y 0 de otra forma.

P_{nt}^D = Demanda de potencia del bus n en el tiempo t .

\overline{P}_g^G = Límite superior de potencia de salida del generador g .

\underline{P}_g^G = Límite inferior de potencia de salida del generador g .

\overline{P}_l^L = Límite superior de flujo de potencia en la línea l .

x_l = Reactancia de la línea l .

c_n = Costo de desconexión de carga en el nodo n .

$p_{a,t,d,s}$ = Probabilidad de ocurrencia de escenario s para subramificación d del periodo t para ataque a .

A_{ln} = Adyacencia entre línea l y bus n : -1 si $O(l) = n$, 1 si $D(l) = n$, y 0 de otra forma.

$patron_{a,t,l,d}^O$ = Patrón de energización de línea l para subramificación d del periodo t para ataque a : 1 si es energizada y 0 de otra forma.

$x_{g,a,0}$ = Estado inicial del generador g posterior al ataque a .

DT_g = Mínimo tiempo down del generador g .

4.4.4. Formulación monolítica no lineal

$$\max_{\{\Phi^N, q^A\}} G(\Phi^N, q^A) - \sum_{\forall n \in N} c_n \Phi_n^N \quad (4.2a)$$

$$\text{s.a.} \sum_{\forall n \in N} c_n \Phi_n^N \leq ATTACK \quad (4.2b)$$

$$\sum_{\forall n \in N} |\Phi_n^N - patron_{a,n}^A| \leq M(1 - q_a^A) \quad \forall a \in A \quad (4.2c)$$

$$\sum_{\forall a \in A} q_a^A = 1 \quad (4.2d)$$

$$\Phi^N, q^A \in \{0, 1\} \quad (4.2e)$$

$$G(\Phi^N, q^A) = \min_{\{OFF, q^O, v^{CI}, P^{GTRA}, NL, N, \Delta P^{DTRA}, P^{LTRA}, \delta\}} \sum_{\forall a \geq A} \sum_{\forall t \in T_a, t \geq 1} \sum_{\forall n \in N} c_n \sum_{\forall d \in D(a,t)} \sum_{\forall s \in S(a,t,d)} p_{a,t,d,s} q_{a,t,d}^O \Delta P_{a,t,d,s}^{DTRA} \quad (4.2f)$$

$$\text{s.a.} \sum_{\forall g \in G_n} P_{g,a,t}^{GTRA} OFF_{a,t,d,s} - \bar{P}_{n,a,t}^D OFF_{a,t,d,s} = \sum_{l|O(l)=n} P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - \sum_{l|D(l)=n} P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - \Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTRA}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d), \forall n \in N \quad (4.2g)$$

$$\sum_{\forall l \in L} |v_{l,a,t}^{CI} N_{a,t} - patron_{a,t,l,d}^O| \leq M(1 - q_{a,t,d}^O) \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t) \quad (4.2h)$$

$$\sum_{\forall d \in D(t,a)} q_{a,t,d}^O = q_a^A \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.2i)$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{a,t,d,s,i} \leq M(1 - \max\{v_{l,a,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\}(1 - v_{a,t,d,s,l}^{SI})) + P_{a,t,d,s,l}^{LTRA}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.2j)$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{a,t,d,s,i} \geq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - M(1 - \max\{v_{l,a,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\}(1 - v_{a,t,d,s,l}^{SI}))$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.2k)$$

$$-(1 - v_{l,a,t}^{CI} v_{a,t,d,s,l}^{SI}) OFF_{(a,t,d,s)} \bar{P}_l^L \leq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L (1 - v_{l,a,t}^{CI} v_{a,t,d,s,l}^{SI}) OFF_{(a,t,d,s)}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d), \forall l \in L \quad (4.2l)$$

$$-\max\{v_{l,a,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\} \bar{P}_l^L \leq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L \max\{v_{l,a,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.2m)$$

$$\delta_{a,t,d,s,slack} = 0 \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D(a,t), \forall s \in S(a,t,d) \quad (4.2n)$$

$$\Phi_{n,l}^N = \phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \quad \forall l \in L, \forall n \in LN_l \quad (4.2o)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N = \max\{\Phi_{LN_{l,1}}^N, \Phi_{LN_{l,2}}^N\} \quad \forall l \in L \quad (4.2p)$$

$$\sum_{\forall l \in L} NL_{l,a,t} = N_{a,t} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.2q)$$

$$v_{l,a,1}^{CI} = NL_{l,a,1} \quad \forall a \in A, \forall l \in L \quad (4.2r)$$

$$v_{l,a,t}^{CI} - v_{l,a,t-1}^{CI} = NL_{l,a,t} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 2, \forall l \in L \quad (4.2s)$$

$$OFF_{(a,t,d,s)} = q_{a,t,d}^O \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)} \quad (4.2t)$$

$$0 \leq \Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTTRA} \leq \bar{P}_{n,a,t}^D OFF_{(a,t,d,s)} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N \quad (4.2u)$$

$$x_{g,a,t} \underline{P}_g^G \leq P_{g,a,t}^{GTRA} \leq \bar{P}_g^G x_{g,a,t} \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.2v)$$

$$z_{g,a,t} \leq \max\{t - DT_g + 1, 1\} - 1 \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, \forall t \geq 1 \quad (4.2w)$$

$$x_{g,a,t} - x_{g,a,t-1} = z_{g,a,t} \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, \forall t \geq 2 \quad (4.2x)$$

$$x_{g,a,1} - x_{g,a,0} = z_{g,a,1} \quad \forall g \in G, \forall a \in A \quad (4.2y)$$

$$OFF, v^{CI}, NL, N, q^O, \delta, x, z \in \{0, 1\} \quad (4.2z)$$

A continuación se explicarán brevemente cada una de las restricciones. Se observa que las ecuaciones (4.2a -4.2e) corresponden al problema del terrorista, donde se maximiza la función objetivo (4.2a), la cual considera la diferencia entre los costo de energía no suministrada para todo el horizonte temporal, y los costos de ataque de cada uno de los nodos, (4.2b) representa el presupuesto para enmascarar el ataque de las líneas expresado en unidades monetarias, (4.2c -4.2d) representan la elección de ataque que producirá un apagón afectando un conjunto de líneas predeterminadas, y finalmente (4.2e) representa las restricciones de integralidad. Las restricciones (4.2f -4.2z) corresponden al problema del operador, donde se minimiza la función objetivo (4.2f), la cual considera los costos de la energia no suministrada para todo el horizonte temporal. La restricción (4.2g) corresponde a la restricción de balance de potencia en los nodos, la cual ya tiene incorporado los fenómenos de energización, circuito abierto y desactivación de escenarios. Las restricciones (4.2h -4.2i) definen la decisión de energización tomada por el operador. Las restricciones (4.2j -4.2k) definen el acople angular. Las restricciones (4.2l -4.2m) definen las indicatrices que permitirán el flujo de potencia a través de las líneas, tomando en cuenta si las líneas participan o no del apagón provocado por el ataque inicial, si fueron o no atacadas en un escenario particular, si fueron o no energizadas como parte de la política de energización del operador, y si se violan o no las limitaciones de capacidad máxima y mínima de flujo de potencia que pueden transportar.

Es importante detenerse un momento en la interacción entre las restricciones (4.2j -4.2m), puesto que en conjunto representan las indicatrices que permitirán el desacople angular de las líneas que participan del apagón, y que fueron energizadas pero causaron un circuito abierto, debido a que habían sido atacadas para un escenario particular. Por tanto, tal como indica la Figura 4.7 para un escenario hipotético s , existirán tres casos, que representan los estados a los cuales puede pertenecer una línea, y que van cambiando a través del horizonte temporal, según las decisiones que va tomando el operador. En particular, para el caso 1, la línea no participa del apagón inicial, por lo que permitirá el transporte de flujo de potencia de acuerdo a las ecuaciones de flujo óptimo que son resueltas en cada periodo de tiempo, y, por tanto, estará acoplada angularmente al sistema. Para el caso 2, la línea participa del apagón inicial y fue atacada en el escenario s , por tanto, originalmente estará desacoplada angularmente del sistema, pero solo para el escenario s . Si el operador decide energizarla, no podrá debido a la presencia de un circuito abierto, puesto que la línea efectivamente fue atacada, lo que causará que permanezca desacoplada. Finalmente, para el caso 3, la línea participa del apagón inicial, y no fue atacada en el escenario s , por tanto, originalmente estará desacoplada angularmente del sistema, pero solo para el escenario s . Si el operador decide energizarla, la línea se activará, transportando flujo, y acoplándose al sistema. Es importante recordar que no existirán escenarios que involucren líneas atacadas que no participen del apagón inicial, puesto que para ser consistentes, si una línea no está en el apagón inicial, no existe una sospecha del operador de que la línea pudo o no haber sido atacada, ya que

tiene la certeza de que no fue atacada. Las restricción (4.2n) le otorga un valor de cero al ángulo de fase del nodo de holgura del sistema. Las restricciones (4.2o -4.2p) representan el conjunto de líneas que participan del apagón inicial. Las restricciones (4.2q -4.2s) definen la cantidad de líneas a energizar en cada periodo de tiempo, y traspasan la información que el operador va ganando debido a sus decisiones, a través del horizonte temporal. La restricción (4.2t) activa o desactiva los escenarios, de acuerdo al ataque inicial, y las decisiones que va tomando el operador. Es importante recordar que una de las entradas del modelo son todos los escenarios de líneas afectadas posibles, para un ataque inicial dado, lo que da origen a un árbol de escenarios. El operador, a través de decisiones de energización, viajará a través de las ramas de este árbol, activando y desactivando escenarios, hasta encontrar una política óptima de energización. La restricción (4.2u) define las cotas inferiores y superiores que puede tomar la desconexión de carga en cada uno de los nodos, y hace una corrección, de acuerdo a si el escenario en estudio está o no en la rama activa del árbol. Si está, la desconexión de carga de uno de sus nodos podría ser distinta de cero, dependiendo de las ecuaciones de balance de flujo. Si no está en la rama, definitivamente la desconexión de carga debe ser cero, puesto que este escenario es ignorado del análisis, y para efectos del modelo, no es alcanzable dentro del árbol de decisiones.

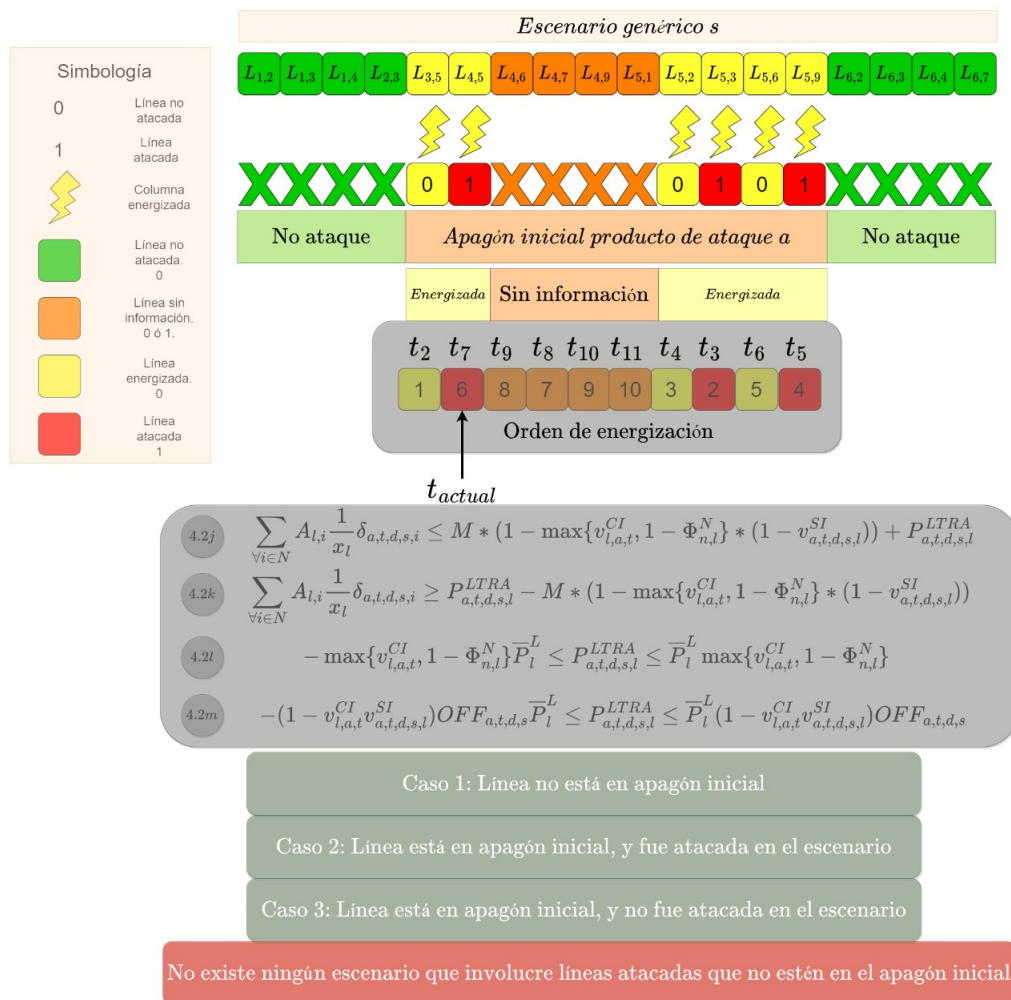


Figura 4.7: Indicadores de energización

Es importante detenerse un momento en la interacción entre las restricciones (4.2v -4.2y), puesto que en conjunto representan las indicatrices que permitirán encender o apagar generadores que estén involucrados

en el apagón inicial. Por tanto, tal como indica la Figura 4.8 para un escenario genérico s , existirán un conjunto de generadores afectados debido al apagón inicial. Estos generadores pertenecen al conjunto de nodos que enmascaran a las líneas atacadas. Como indica la figura, los generadores dañados tendrán que cumplir con las restricciones operativa del mínimo tiempo fuera de servicio. Los generadores fuera de servicio deben ser desactivados temporalmente del modelo, y su posterior activación dependerá de sus parámetros, y de las decisiones del operador. Existirán tres casos que deben ser abordados, a saber: nodos atacados sin generador, nodos atacados con un generador, y nodos atacados con dos o más generadores. Es importante recordar que una vez que el mínimo tiempo fuera de servicio para un generador dañado se cumple, este estará en condiciones de encenderse, y esa decisión dependerá únicamente del proceso de optimización. Finalmente, (4.2z) representa las restricciones de integralidad.

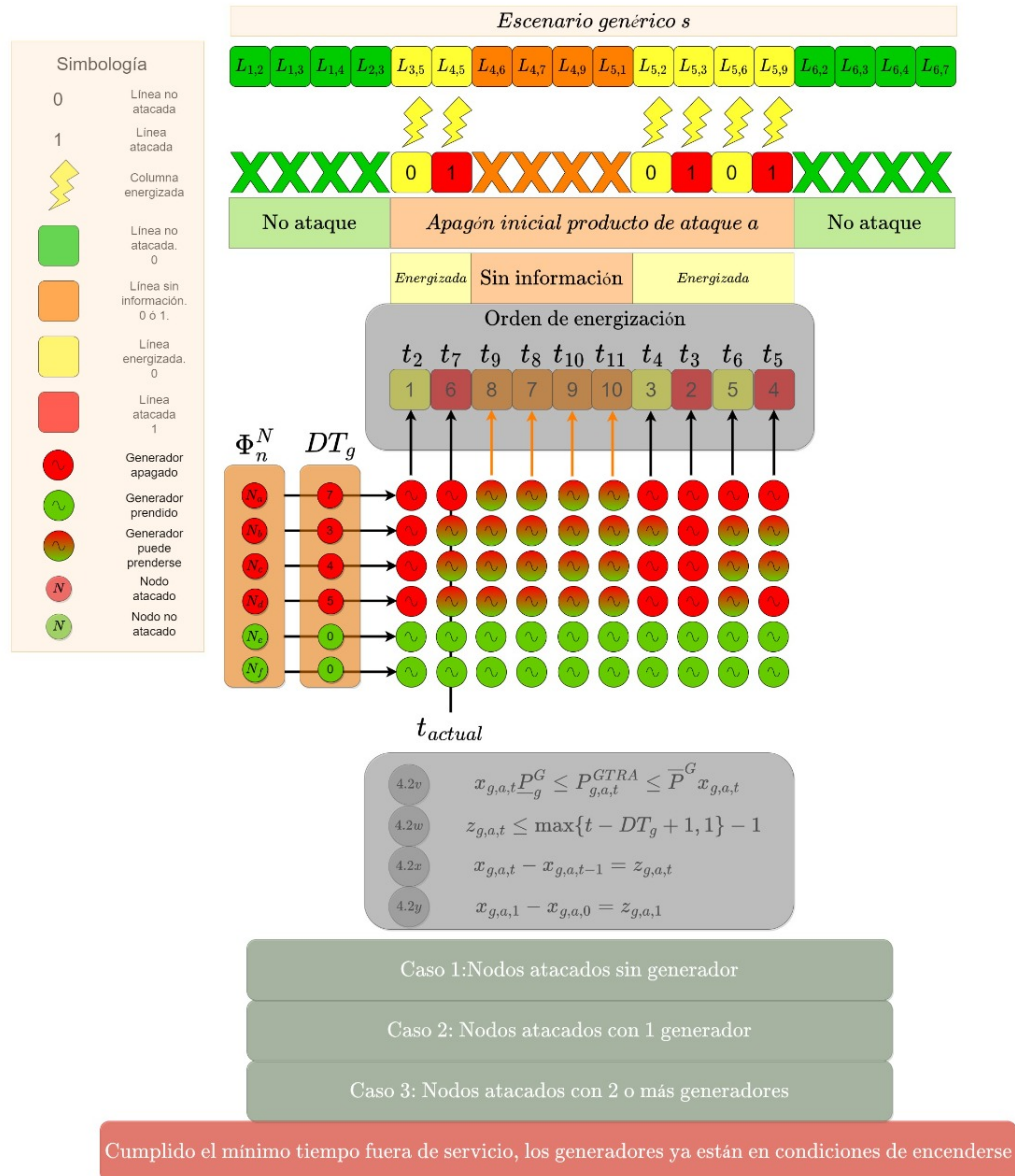


Figura 4.8: Indicadores de generadores

4.4.5. Formulación monolítica lineal

El modelo anteriormente presentado tiene características no lineales, lo que dificulta el proceso de resolución por parte de los software comerciales. Por esta razón, debemos linealizar cada una de las restricciones que tienen componentes no lineales, incorporando para esto, un conjunto de variables auxiliares, que nos ayudarán en el proceso. El modelo resultante es más extenso, y con un mayor número de variables, pero puede ser resuelto por los software existentes. No ahondaremos en el proceso de linealización, puesto que existe mucha literatura de cómo abordar estas no linealidades, a saber, máximos, multiplicación de variables binarias, multiplicación de una variable continua y una binaria, y valores absolutos.

$$\max_{\{\Phi^N, q^A\}} G(\Phi^N, q^A) - \sum_{\forall n \in N} c_n^\Phi \Phi_n^N \quad (4.3a)$$

$$\text{s.a.} \sum_{\forall n \in N} c_n^\Phi \Phi_n^N \leq ATTACK \quad (4.3b)$$

$$\sum_{\forall n \in N} \Phi_{patron_{a,n}} \leq M(1 - q_a^A) \quad \forall a \in A \quad (4.3c)$$

$$\sum_{\forall a \in A} q_a^A = 1 \quad (4.3d)$$

$$\Phi_{patron_{a,n}} \geq \Phi_n^N - patron_{a,n}^A \quad \forall a \in A, \forall n \in N \quad (4.3e)$$

$$\Phi_{patron_{a,n}} \geq -(\Phi_n^N - patron_{a,n}^A) \quad \forall a \in A, \forall n \in N \quad (4.3f)$$

$$\Phi_{patron_{a,n}} \leq \Phi_n^N - patron_{a,n}^A + M(1 - w_{a,n}^{\Phi_{patron}}) \quad \forall a \in A, \forall n \in N \quad (4.3g)$$

$$\Phi_{patron_{a,n}} \leq -(\Phi_n^N - patron_{a,n}^A) + Mw_{a,n}^{\Phi_{patron}} \quad \forall a \in A, \forall n \in N \quad (4.3h)$$

$$\Phi^N, q^A \in \{0, 1\} \quad (4.3i)$$

$$G(\Phi^N, q^A) = \min_{\{OFF, v^{CI}, PGTRA, NL, N, \Delta P^{DTRA}, PLTRA, \delta, q^O\}} \sum_{\forall a \geq A} \sum_{\forall t \in T_a, t \geq 1} \sum_{\forall n \in N} c_n \sum_{\forall d \in D_{(a,t)}} \sum_{\forall s \in S_{(a,t,d)}} p_{a,t,d,s} \Delta Q P_{a,t,d,s,n}^{DTRA} \quad (4.3j)$$

$$\text{s.a.} \sum_{\forall g \in G_n} POFF_{a,t,d,s,g}^G - \bar{P}_{n,a,t}^D OFF_{a,t,d,s} = \sum_{l|O(l)=n} P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - \sum_{l|D(l)=n} P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - \Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTRA} \quad (4.3k)$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N \quad (4.3k)$$

$$\sum_{\forall l \in L} NL_{l,a,t} = N_{a,t} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.3l)$$

$$\sum_{\forall l \in L} v_{patron_{a,t,l,d}} \leq M(1 - q_{a,t,d}^O) \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)} \quad (4.3m)$$

$$\sum_{\forall d \in D_{(t,a)}} q_{a,t,d}^O = q_a^A \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.3n)$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{a,t,d,s,i} \leq M(1 - \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} (1 - v_{a,t,d,s,l}^{SI})) + P_{a,t,d,s,l}^{LTRA}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3o)$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{a,t,d,s,i} \geq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} - M(1 - \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} (1 - v_{a,t,d,s,l}^{SI}))$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3p)$$

$$\delta_{a,t,d,s,slack} = 0 \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)} \quad (4.3q)$$

$$-\bar{P}_l^L \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \leq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3r)$$

$$\Phi_{n,l}^N = \phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \quad \forall l \in L, \forall n \in LN_l \quad (4.3s)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \geq \Phi_{LN_{l,1}}^N \quad \forall l \in L \quad (4.3t)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \geq \Phi_{LN_{l,2}}^N \quad \forall l \in L \quad (4.3u)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \leq \Phi_{LN_{l,1}}^N + M(1 - w_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^{\phi N}) \quad \forall l \in L \quad (4.3v)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \leq \Phi_{LN_{l,2}}^N + Mw_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^{\phi N} \quad \forall l \in L \quad (4.3w)$$

$$\Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \geq v_{l,a,t}^{CI} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3x)$$

$$\Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \geq 1 - \Phi_{n,l}^N \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3y)$$

$$\Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \leq v_{l,a,t}^{CI} + M(1 - w_{a,t,n,l}^{\Phi v^{NCI}}) \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3z)$$

$$\Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \leq 1 - \Phi_{n,l}^N + Mw_{a,t,n,l}^{\Phi v^{NCI}} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3aa)$$

$$\underline{P}_g^G OFF_{a,t,d,s} \leq POFF_{a,t,d,s}^G \leq \bar{P}_g^G OFF_{a,t,d,s}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall g \in G \quad (4.3bb)$$

$$P_{g,a,t}^{GTRA} - \bar{P}_g^G (1 - OFF_{a,t,d,s}) \leq POFF_{a,t,d,s}^G \leq P_{g,a,t}^{GTRA} - \underline{P}_g^G (1 - OFF_{a,t,d,s})$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall g \in G \quad (4.3cc)$$

$$0 \leq \Delta QP_{a,t,d,s,n}^{DTTRA} \leq \bar{P}_{n,a,t}^D q_{a,t,d}^O \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N \quad (4.3dd)$$

$$\Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTTRA} - \bar{P}_{n,a,t}^D (1 - q_{a,t,d}^O) \leq \Delta QP_{a,t,d,s,n}^{DTTRA} \leq \Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTTRA}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N \quad (4.3ee)$$

$$v_{l,a,t}^{CI} - v_{l,a,t-1}^{CI} = NL_{l,a,t} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 2, \forall l \in L \quad (4.3ff)$$

$$v_{l,a,1}^{CI} = NL_{l,a,1} \quad \forall a \in A, \forall l \in L \quad (4.3gg)$$

$$OFF_{a,t,d,s} = q_{a,t,d}^O \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)} \quad (4.3hh)$$

$$vpatron_{a,t,l,d} \geq VN_{l,a,t} - patron_{a,t,l,d}^O \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall l \in L \quad (4.3ii)$$

$$vpatron_{a,t,l,d} \geq -(VN_{l,a,t} - patron_{a,t,l,d}^O) \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall l \in L \quad (4.3jj)$$

$$vpatron_{a,t,l,d} \leq VN_{l,a,t} - patron_{a,t,l,d}^O + M(1 - w_{a,t,l,d}^{vpatron})$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall l \in L \quad (4.3kk)$$

$$vpatron_{a,t,l,d} \leq -(VN_{l,a,t} - patron_{a,t,l,d}^O) + Mw_{a,t,l,d}^{vpatron}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall l \in L \quad (4.3ll)$$

$$x_{g,a,t} \underline{P}_g^G \leq P_{g,a,t}^{GTRA} \leq \bar{P}_g^G x_{g,a,t} \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1 \quad (4.3mm)$$

$$- \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI} \bar{P}_l^L \leq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L \Phi v_{a,t,n,l}^{NCI}$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N, \forall l \in B_n \quad (4.3nn)$$

$$- (OFF_{a,t,d,s} - HOFF_{a,t,d,s,l}) \bar{P}_l^L \leq P_{a,t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L (OFF_{a,t,d,s} - HOFF_{a,t,d,s,l})$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall l \in L \quad (4.3oo)$$

$$HOFF_{a,t,d,s,l} \leq OFF_{a,t,d,s} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall l \in L \quad (4.3pp)$$

$$HOFF_{a,t,d,s,l} \leq v_{l,t}^{CI} v_{a,t,d,s,l}^{SI} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall l \in L \quad (4.3qq)$$

$$v_{l,a,t}^{CI} v_{a,t,d,s,l}^{SI} + OFF_{a,t,d,s} \leq HOFF_{a,t,d,s,l} + 1$$

$$\forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall l \in L \quad (4.3rr)$$

$$VN_{l,a,t} \leq v_{l,a,t}^{CI} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall l \in L \quad (4.3ss)$$

$$VN_{l,a,t} \leq N_{a,t} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall l \in L \quad (4.3tt)$$

$$v_{l,a,t}^{CI} + N_{a,t} \leq VN_{l,a,t} + 1 \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall l \in L \quad (4.3uu)$$

$$0 \leq \Delta P_{a,t,d,s,n}^{DTRA} \leq \bar{P}_{n,a,t}^D OFF_{a,t,d,s} \quad \forall a \in A, \forall t \in T_a, t \geq 1, \forall d \in D_{(a,t)}, \forall s \in S_{(a,t,d)}, \forall n \in N \quad (4.3vv)$$

$$z_{g,a,t} \leq \max\{t - DT_g + 1, 1\} - 1 \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, \forall t \geq 1 \quad (4.3ww)$$

$$x_{g,a,t} - x_{g,a,t-1} = z_{g,a,t} \quad \forall g \in G, \forall a \in A, \forall t \in T_a, \forall t \geq 2 \quad (4.3xx)$$

$$x_{g,a,1} - x_{g,a,0} = z_{g,a,1} \quad \forall g \in G, \forall a \in A \quad (4.3yy)$$

$$OFF, v^{CI}, NL, N, q^O, \delta, x, z \in \{0, 1\} \quad (4.3zz)$$

4.4.6. Método de programación dinámica estocástica

Como se verá en el Capítulo 5, el modelo anterior requiere bajos tiempos de ejecución para el caso de estudio IEEE RTS-5. Pero cuando se aumenta el tamaño, a saber, IEEE RTS-24 o IEEE RTS-118, el modelo aumenta considerablemente estos tiempos. Para abordar esta problemática y poder considerar ataques en sistemas más grandes, con un mayor número de líneas y generadores dañados, se transformará el modelo monolítico a un enfoque de programación dinámica. Este último mejora los tiempos de ejecución, y disminuye el consumo de memoria RAM.

4.4.6.1. Enfoque de recursión

Se usará el enfoque backward. Por tanto, se conoce el valor del estado en la primera etapa y el valor de la función de recurrencia en la última etapa.

4.4.6.2. Etapas

Corresponden al horizonte temporal al que se enfrenta el operador de la red, es decir, $\forall t \in T$.

4.4.6.3. Variables de estado

Corresponden al producto cartesiano entre las líneas energizadas L_t^{state} y los estados de los generadores G_t^{state} , para el periodo t . A continuación, se presenta la expresión matemática:

$$E_t = \{e_{t,d}, \forall d \in D_{t-1}\} = L_t^{state} \times G_t^{state} \quad \forall t \in T$$

donde

$$L_t^{state} = \{\{v_{l,t-1}^{CI} \mid v_{l,t-1}^{CI} = patron_{t-1,d,l}^O, \forall l \in L\} \mid \forall d \in D_{t-1}\} \quad \forall t \in T$$

$$G_t^{state} = \left\{ \prod_{\forall g \in G} \{x_{g,t-1} = \mathbb{1}_{|t-1| > DT_g} \cup x_{g,t-1} = \min\{0, 1 - \mathbb{1}_{|t-1| > DT_g}\}\} \right\} \quad \forall t \in T$$

4.4.6.4. Variables de decisión

Corresponden a las variables de decisión de un problema de redespacho de energía multinodal con ataques, a saber: desconexión de carga, flujos de potencia de líneas y generadores, y estados de los generadores. A continuación, se presenta la expresión matemática:

$$X_{t,d} = \{q^O, OFF, P^{GTRA}, \Delta P^{DTRA}, P^{LTRA}, N, NL, \delta, x, z, v^{CI}\} \quad \forall t \in T, \forall d \in D_t$$

4.4.6.5. Función de recurrencia

Cada posible combinación de valores del vector v_{t+1}^{CI} al final de la etapa $t+1$ se corresponde con una posible decisión $q_{t+1,d}^O$, para algún $d \in D_{t+1}$. Al comienzo de la etapa $t+1$, se conoce qué líneas se han energizado hasta el momento. Estas líneas forman el conjunto $Start(t+1, d_t) = \{v_{l,t}^{CI} \mid v_{l,t}^{CI} = patron_{t,d_t,l}^O = 1 \quad \forall l \in L\}$, el cual representa el estado e_{t+1,d_t} de la etapa $t+1$. Este estado es obtenido aplicando una función de transformación $Trans_t(e_{t,d_{t-1}}, X_t)$, la cual considera el estado $e_{t,d_{t-1}}$ y las variables de decisión x_t del problema de redespacho de energía $H_t(X_t)$ de la etapa t . En resumen, se puede representar el flujo anterior de la siguiente manera: $Trans_t(e_{t,d_{t-1}}, X_t) = e_{t+1,d_t} = Start(t+1, d_t)$. Al considerar el problema $H_{t+1}(X_{t+1})$ de la etapa $t+1$, se pueden distinguir dos fases, desde un punto de vista de acciones posibles del operador. La primera fase es recopilar información histórica de líneas energizadas, la cual es representada por el estado e_{t+1,d_t} . La segunda fase es energizar una nueva línea usando la información del estado e_{t+1,d_t} y resolviendo $H_{t+1}(x_{t+1})$. Para representar la fase de la segunda acción, se define el conjunto $End(t+1, d_{t+1}) = \{v_{l,t+1}^{CI} \mid v_{l,t+1}^{CI} = patron_{t+1,d_{t+1},l}^O = 1 \wedge v_{l,t+1}^{CI} \neq v_{l,t}^{CI}, \quad \forall l \in L\}$. Los conjuntos $Start(t+1, d_t) \cup End(t+1, d_{t+1})$ constituyen las líneas energizadas del conjunto $Start(t+2, d_{t+1})$, que representa el estado $e_{t+2,d_{t+1}}$ de la etapa $t+2$. Con esta información, se puede determinar cuál será la nueva línea energizada, resolviendo el problema de redespacho $H_{t+2}(X_{t+2})$. A continuación, se observa la representación matemática de la función de recurrencia, junto a su función de transformación, para la etapa $t+1$:

$$f_{t+1}(e_{t+1,d_t}) = \min_{X_{t+1}(e_{t+1,d_t})} \{f_{t+2}(Trans_{t+1}(e_{t+1,d_t}, X_{t+1})) + H_{t+1}(X)\} \quad \forall e_{t+1,d_t} \in E_{t+1} \quad (4.6a)$$

$$Trans_{t+1}^1(e_{t+1,d_t}, X_{t+1})_l = v_{l,t+1}^{CI} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_{l,t}^{CI} \in Start(t+1, d_t) \\ 1 & \text{si } v_{l,t+1}^{CI} \in End(t+1, d_{t+1}) \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases} \quad \forall l \in L \quad (4.6b)$$

$$Trans_{t+1}^2(e_{t+1,d_t}, X_{t+1})_g = x_{g,t+1} = \begin{cases} 1 & \text{si no fue atacado} \\ 0 & \text{si } t+1 \leq DT \\ 1 & \text{si } H_{t+1}(X) \text{ lo enciende} \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases} \quad \forall g \in G \quad (4.6c)$$

$$Trans_{t+1}(e_{t+1,d_t}, X_{t+1}) = Trans_{t+1}^1(e_{t+1,d_t}, X_{t+1}) \times Trans_{t+1}^2(e_{t+1,d_t}, X_{t+1}) \quad (4.6d)$$

Definiendo $D_0 = D_1 = \{nada\}$, se puede representar el estado e_{1,d_0} , el cual es conocido a priori:

$$v_{l,0}^{CI} = 0 \quad \forall l \in L \quad (4.7a)$$

$$x_{g,0} = \begin{cases} 1 & \text{si no fue atacado} \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases} \quad \forall g \in G \quad (4.7b)$$

por tanto, $Start(1, d_0) = End(1, d_1) = Start(2, d_1) = \{\emptyset\}$.

4.4.6.6. Redespacho de energía

En esta sección se distinguen tres fases dentro de la ejecución del algoritmo de programación dinámica, puesto que de cara a la implementación presentan características distintas. La primera fase corresponde a la ejecución de $H_1(X_1, v_0^{CI}, x_0)$ para $t = 1$, donde el estado v_0^{CI} y x_0 son conocidos a priori. La segunda fase corresponde a $H_t(X_t, v_{t-1}^{CI}, x_{t-1})$, que es el problema de redespacho de energía generalizable para $1 < t < T$. Finalmente, la fase tres corresponde a $H_T(X_T, v_{T-1}^{CI}, x_{T-1})$ para $t = T$, cuyo valor es conocido a priori para un estado x_{T-1} dado, puesto que el operador sabe qué debe energizar todas las líneas, pero desconoce el estado de los generadores. A continuación, se presenta la formulación para la fase generalizable $H_t(X_t, v_{t-1}^{CI}, x_{t-1})$:

$$\min_{\{OFF, v^{CI}, P^{GTRA}, NL, N, \Delta P^{DTRA}, P^{LTRA}, \delta, q^O, x, z\}} \sum_{\forall n \in N} c_n \sum_{\forall d \in D_t} \sum_{\forall s \in S(t,d)} p_{t,d,s} q_{t,d}^O \Delta P_{t,d,s,n}^{DTRA} \quad (4.8a)$$

$$\mathbf{s.a} \sum_{\forall g \in G_n} P_{g,t}^{GTRA} OFF_{t,d,s} - \bar{P}_{n,t}^D OFF_{t,d,s} = \sum_{l|O(l)=n} P_{t,d,s,l}^{LTRA} - \sum_{l|D(l)=n} P_{t,d,s,l}^{LTRA} - \Delta P_{t,d,s,n}^{DTRA} \quad (4.8b)$$

$$\forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall n \in N$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{t,d,s,i} \leq M(1 - \max\{v_{l,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\}(1 - v_{t,d,s,l}^{SI})) + P_{t,d,s,l}^{LTRA} \quad (4.8c)$$

$$\forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n$$

$$\sum_{\forall i \in N} A_{l,i} \frac{1}{x_l} \delta_{t,d,s,i} \geq P_{t,d,s,l}^{LTRA} - M(1 - \max\{v_{l,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\}(1 - v_{t,d,s,l}^{SI})) \quad (4.8d)$$

$$\forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n$$

$$\delta_{t,d,s,slack} = 0 \quad \forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d) \quad (4.8e)$$

$$\Phi_{n,l}^N = \phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N \quad \forall l \in L, \forall n \in LN_l \quad (4.8f)$$

$$\phi_{LN_{l,1}, LN_{l,2}}^N = \max\{\Phi_{LN_{l,1}}^N, \Phi_{LN_{l,2}}^N\} \quad \forall l \in L \quad (4.8g)$$

$$\sum_{\forall l \in L} |v_{l,t}^{CI} N_t - patron_{t,l,d}^O| \leq M * (1 - q_{(t,d)}^O) \quad \forall d \in D_t \quad (4.8h)$$

$$\sum_{\forall d \in D_t} q_{(t,d)}^O = 1 \quad (4.8i)$$

$$\sum_{\forall l \in L} NL_{l,t} = N_t \quad (4.8j)$$

$$v_{l,t}^{CI} - v_{l,t-1}^{CI} = NL_{l,t} \quad \forall l \in L \quad (4.8k)$$

$$OFF_{t,d,s} = q_{t,d}^O \quad \forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d) \quad (4.8l)$$

$$x_{g,t} P_g^G \leq P_{g,t}^{GTRA} \leq \bar{P}_g^G x_{g,t} \quad \forall g \in G \quad (4.8m)$$

$$- (1 - v_{l,t}^{CI} v_{t,d,s,l}^{SI}) OFF_{(t,d,s)} \bar{P}_l^L \leq P_{t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L (1 - v_{l,t}^{CI} v_{t,d,s,l}^{SI}) OFF_{(t,d,s)} \quad (4.8n)$$

$$\forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall l \in L$$

$$- \max\{v_{l,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\} \bar{P}_l^L \leq P_{t,d,s,l}^{LTRA} \leq \bar{P}_l^L \max\{v_{l,t}^{CI}, 1 - \Phi_{n,l}^N\} \quad (4.8o)$$

$$\forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall n \in N, \forall l \in B_n$$

$$0 \leq \Delta P_{t,d,s,n}^{DTRA} \leq \bar{P}_{n,t}^D OFF_{(t,d,s)} \quad \forall d \in D_t, \forall s \in S(t,d), \forall n \in N \quad (4.8p)$$

$$z_{g,t} \leq \text{máx}\{t - DT_g + 1, 1\} - 1 \quad \forall g \in G \quad (4.8q)$$

$$x_{g,t} - x_{g,t-1} = z_{g,t} \quad \forall g \in G \quad (4.8r)$$

$$OFF, v^{CI}, NL, N, \delta, q^O x, z \in \{0, 1\} \quad (4.8s)$$

En (4.8k) y (4.8r) se reemplaza (v_{t-1}^{CI}, x_{t-1}) por (v_0^{CI}, x_0) en la fase 1, y por (v_{T-1}^{CI}, x_{T-1}) en la fase 3.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos para los casos de estudio IEEE RTS-5, IEEE RTS-24, e IEEE RTS-118, respecto a la obtención de políticas de energización óptimas para el operador de la red, el cual se enfrenta a diferentes ataques del sistema de transmisión, desconociendo qué líneas son atacadas.

El objetivo de estos experimentos es:

1. Obtener un conjunto de políticas de energización óptimas, frente a diferentes ataques, para una configuración paramétrica determinada.
2. Comparar la utilización del enfoque monolítico frente al enfoque de programación dinámica, tanto en aspectos de uso de recursos, como en ventajas y desventajas inherentes a cada formulación.
3. Medir el impacto del uso de la herramienta en los casos de estudio, calculando el ahorro monetario entre la mejor y peor política de energización, como el rango o porcentaje de variación respecto a la mejor política.

La característica multietapas de las formulaciones genera variables de decisión indexadas por el tiempo. Como el operador se enfrenta a un conjunto de ataques ocasionados por agentes disruptivos, es natural que su métrica de interés sea la desconexión de carga. Este indicador tiene unidades de potencia (MW), pero como el horizonte temporal está compuesto por intervalos de tiempo uniformes (15 minutos), se miden los flujos de potencia a través de estos intervalos, transformando las unidades de potencia (MW) a unidades de energía (MWh). Por tanto, la métrica de interés será la energía no suministrada (ENS).

Tal como se mencionó anteriormente, el horizonte temporal, a través del cual el operador toma sus decisiones de energización, está compuesto por intervalos uniformes de 15 minutos. Este tiempo fue escogido gracias a conocimiento experto, y captura todas las interacciones del operador con otros actores, con objeto de lograr energizar una línea. Por tanto, lo ideal es que para cada ataque, los tiempos de ejecución sean menores a 900 segundos, es decir, 15 minutos. De esta forma, la herramienta propuesta podría ser utilizada para casos reales.

Si se considera que la potencia (MW) está fluyendo a través de un intervalo de tiempo de 15 minutos t , entonces se debe costear ENS_t por un cuarto de hora. Utilizando un precio medio de mercado de \$73.581 por MWh, obtenido desde la página de la Comisión Nacional de Energía (CNE) chilena para el segundo semestre del año 2021, se calcula que el costo de 1 MW fluyendo en un intervalo de tiempo de 15 minutos, es \$18.385,25. Este valor es utilizado para costear la ENS_t de los casos de estudio. El costo de la energía no suministrada total del sistema ENS , será la suma de ENS_t para todos los periodos del horizonte temporal, y cada ENS_t corresponde a la suma de $ENS_{t,n}$, donde n representa cada uno de los nodos del sistema.

Dentro de los supuestos, se considera que los nodos no son iguales, por tanto, el valor obtenido para costear 1 MW en cada nodo es calculado a través de una distribución de probabilidades uniforme inversa, fijando unos límites superior e inferior, y generando un valor aleatorio entre 0 y 1 alrededor de

\$18.385,25. El objetivo de esto es disminuir la degenerancia presente en las formulaciones. Otro supuesto es que el costo de generacion de potencia de los generadores no es considerado en la función objetivo. Por tanto, los modelos tratarán de utilizar al máximo las unidades de generación, con tal de disminuir la energía no suministrada, respetando restricciones físicas y operativas. El objetivo de esto es simplificar los análisis y enfocarse solo en la ENS. Finalmente, a todos los escenarios de ataque factibles se les asigna una probabilidad uniforme de ocurrencia, con objeto de simplificar los análisis. Sin embargo, el modelo permite que sea el operador quien escoga una adecuada probabilidad de ocurrencia, según su conocimiento experto.

Los resultados obtenidos con el enfoque propuesto son árbol dependientes, no escenario dependientes. Dicho de otra forma, para cada instante de tiempo t , se genera un árbol de decisiones, que depende de la decisión de energización del operador en el periodo t , siendo el enfoque de esta forma árbol dependiente. Luego, para cada árbol generado en el periodo t , se calcula la ENS esperada de sus escenarios, siendo el enfoque de esta forma escenario no dependiente. Si bien en la realidad, para cada periodo t , solo un escenario se concreta, el enfoque propuesto calcula el valor esperado de la ENS, debido a que se busca una política de energización que sea óptima en promedio, y no es objetivo de esta tesis descubrir cuál fue el ataque real del terrorista.

Todos los experimentos computacionales fueron realizados en una instancia de *GOOGLE CLOUD* con sistema operativo Ubuntu 18.04 con 16 procesadores y 128 GB de RAM. Todos los programas fueron escritos en el lenguaje de programación Python 3.8 y los modelos matemáticos fueron resueltos con el solver Gurobi 9.0. No se utilizaron librerías especiales para implementar el proceso recursivo del enfoque de programación dinámica. Finalmente, es importante recalcar que los criterios de parada para las ejecuciones se establecieron ya sea fijando tiempos límites, utilizando completamente la memoria RAM, u obteniendo la solución óptima de la instancia en cuestión.

A continuación, se presentan los resultados divididos en dos secciones: 5.1 y 5.2. En 5.1 se hace una comparación detallada, para distintas cardinalidades de líneas atacadas de cada uno de los casos de estudio, de los valores promedio de las siguientes cantidades: costo monetario en pesos chilenos de la política de energización óptima, impacto del uso de la herramienta como rango de variación respecto a la política de energización óptima, tiempo de ejecución, y consumo de memoria RAM. Es importante destacar que, para el caso de estudio IEEE RTS-5, la comparación de tiempos de ejecución y consumos de memoria RAM se hace tanto para el enfoque monolítico como el enfoque dinámico, mientras que, para los casos de estudio IEEE RTS-24 e IEEE RTS-118, se considera solo el enfoque dinámico. Esto último es debido a que no todas las ejecuciones para los casos de estudio IEEE RTS 24 e IEEE RTS-118 fueron obtenidas para el enfoque monolítico. Finalmente, en 5.2, para conjuntos de ataques de cada uno de los casos de estudio, se muestra la utilización de recursos, el GAP óptimo (GAP*), y el GAP del solver Gurobi para problemas MIP (GAP-GRB), tanto para el enfoque monolítico, como para el enfoque dinámico. Como detalle adicional, para el IEEE RTS-5, se consideran todos los ataques posibles, totalizando 31, para el IEEE RTS-24, se consideran 24 ataques, y para el IEEE RTS-118, se consideran 9 ataques.

5.1. Política de energización

En esta sección, se presenta un resumen, de los costos promedio de las políticas de energización óptimas para distintos conjuntos de líneas atacadas. El costo de una política de energización corresponde al valor monetario de su ENS, para todo el horizonte temporal, en el cual el operador de la red debe tomar decisiones de energización. Además, se presenta el rango de estrategia promedio, respecto al costo de la política de energización óptima. El rango de estrategia, expresado como porcentaje, indica el ahorro máximo posible de capturar, ya que corresponde a la diferencia entre el costo de la mejor y peor política de energización. Por mejor costo de política de energización, se hace referencia al costo óptimo. A continuación, en la Tabla 5.1, se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-5.

Tabla 5.1: Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-5.

Parámetros	Resultado estrategia		Tiempos de ejecución (s)		Memoria RAM (GB)	
	Líneas Atacadas	ENS Mejor Política (\$)	Rango de Estrategia (%)	Modelo Completo	Enfoque Dinámico	Modelo Completo
2	7.596.559,33	0,00	0,07	0,01	0,21	0,01
3	8.499.752,70	0,07	0,20	0,02	0,22	0,02
4	15.700.840,17	0,23	0,52	0,05	0,23	0,05
5	22.174.703,82	0,13	1,68	0,35	0,24	0,08
6	32.492.524,65	0,08	4,88	1,10	0,27	0,15

En esta tabla se observan los valores promedio del costo de las políticas de energización para todos los conjuntos de ataques posibles, que involucran desde 2 a 6 líneas. Los rangos de estrategia no sobrepasan el 1 %, lo que indica que el costo de equivocarse, por parte del operador, al tomar sus decisiones de energización, no sobrepasan los \$ 37.000, para el caso de 4 líneas. El caso de estudio IEEE RTS-5 tiene una capacidad de generación de 750 MW (1 generador por nodo, con capacidad de 150 MW cada uno), y una demanda de 640 MW, representando la demanda un 85 % de la capacidad de generación. Respecto a los tiempos de ejecución, los valores oscilan entre 0,07 y 4,88 segundos para el enfoque monolítico, y entre 0,01 y 1,10 para el enfoque dinámico, estando todos los ataques por debajo de los 900 segundos. Respecto al consumo de memoria RAM, los valores oscilan entre 0,21 y 0,27 GB para el enfoque monolítico, y entre 0,01 y 0,15 GB para el enfoque dinámico. Para un estudio en detalle de cada uno de los ataques, desde un punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, sus costos de políticas de energización y las políticas de energización propiamente, véase Anexos, Sección A. Por ejemplo, en la Tabla A.1, se observa que el ataque percibido en los nodos N_1 y N_2 , que involucra 4 líneas, tiene el mayor rango de estrategia, el cual corresponde a 0,45 %, es decir, \$ 40.036,72.

Tabla 5.2: Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-24.

Parámetros	Resultado estrategia		Tiempos de ejecución (s)	Memoria RAM (GB)
	Líneas Atacadas	ENS Mejor Política (\$)	Rango de Estrategia (%)	Enfoque Dinámico
6	28.307.996,68	8,65	20,85	0,30
7	44.835.658,33	4,42	65,14	0,35
8	48.040.037,41	7,88	205,13	0,47
9	69.854.886,31	6,31	509,74	0,06
10	69.830.366,05	5,18	1.639,79	5,70
11	87.950.271,27	6,98	5.239,19	56,91

A continuación, en la Tabla 5.2 se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-24. En esta tabla se observan los valores promedio del costo de las políticas de energización para algunos conjuntos de ataques posibles, que involucran desde 6 a 11 líneas. Los rangos de estrategia no sobrepasan el 10 %, lo que indica que el costo de equivocarse, por parte del operador, al tomar sus decisiones de energización, no sobrepasa los \$ 6.138.928,93, para el caso de 11 líneas. El caso de estudio IEEE RTS-24 tiene una capacidad de generación de 3405 MW y una demanda de 2850 MW, representando la demanda un 84 % de la capacidad de generación. Respecto a los tiempos de ejecución, los valores oscilan entre 20,85 y 5239,19 segundos para el enfoque dinámico, estando todos los ataques que involucren 9 o menos líneas, por debajo de los 900 segundos. Respecto al consumo de memoria RAM, los valores oscilan entre 0,30 y 56,91 GB para el enfoque dinámico. Para un estudio en detalle de cada uno de los ataques, desde un punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, sus costos de políticas de energización, y la política de energización propiamente, véase

Anexos, Sección B. Por ejemplo, en la Tabla B.1 se observa que el ataque percibido en los nodos N_{13} y N_{17} , que involucra 6 líneas, tiene el mayor rango de estrategia, el cual corresponde a 14,07%, es decir, \$ 2.609.866, 81.

Tabla 5.3: Valores promedio de política de energización para IEEE RTS-118.

Parámetros	Resultados de estrategia		Tiempos de ejecución (s)	Memoria RAM (GB)
Líneas Atacadas	ENS Mejor Política (\$)	Rango de estrategia (%)	Enfoque Dinámico	Enfoque Dinámico
8	43.430.913,84	4,58	1.627,79	0,80
9	63.502.133,19	3,62	5.681,51	1,47
10	81.105.689,71	3,92	17.245,01	7,00

A continuación, en la Tabla 5.3 se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-118. En esta tabla se observan los valores promedio del costo de las políticas de energización para algunos conjuntos de ataques posibles, que involucran desde 8 a 10 líneas. Los rangos de estrategia no sobrepasan el 5%, lo que indica que el costo de equivocarse, por parte del operador, al tomar sus decisiones de energización, no sobrepasan los \$ 3.179.343,04, para el caso de 10 líneas. El caso de estudio IEEE RTS-118 tiene una capacidad de generación de 7.220 MW y una demanda de 6.599,99 MW, representando la demanda un 91% de la capacidad de generación. Respecto a los tiempos de ejecución, los valores oscilan entre 1.627,79 y 17.245,01 segundos para el enfoque dinámico, estando todos los ataques que involucren 8 o menos líneas, por debajo de los 1600 segundos. Respecto al consumo de memoria RAM, los valores oscilan entre 0,80 y 7 GB para el enfoque dinámico. Para un estudio en detalle de cada uno de los ataques, desde un punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, sus costos de políticas de energización, y la política de energización propiamente, véase Anexos, Sección C. Por ejemplo, en la Tabla C.1, se observa que el ataque percibido en los nodos N_{17} y N_{99} , que involucra 8 líneas, tiene el mayor rango de estrategia, el cual corresponde a 11,09%, es decir, \$ 3.339.120, 68.

5.2. Utilización de recursos

En esta sección se presenta una comparación detallada de la utilización de recursos computacionales, y la obtención del GAP de optimalidad, para cada uno de los ataques de los casos de estudio, desde el punto de vista desde donde el operador percibe el ataque (N_i). En particular, se hace una comparación entre los resultados obtenidos tanto para el enfoque monolítico, como para el enfoque dinámico. Se establecieron tiempos de ejecución límites para el enfoque monolítico iguales al tiempo máximo requerido por el enfoque de programación dinámica, para obtener una solución óptima a un ataque de un caso de estudio particular. De esta forma, para IEEE RTS-24, el tiempo límite será de 10.000 segundos, para IEEE RTS-118, será de 20.000 segundos, y para IEEE RTS-5, no se establece tiempo límite, debido a que la instancia es muy pequeña y es posible obtener el óptimo con ambos enfoques en muy poco tiempo. Para el enfoque monolítico, además de mostrar los recursos computacionales consumidos y los tiempos de ejecución, se presenta el GAP-GRB y el GAP*. El primero corresponde al GAP obtenido por la ejecución B&B con el solver Gurobi, mientras que el segundo corresponde al GAP relativo a la solución obtenida por el enfoque dinámico. Con este último enfoque siempre se obtiene la solución óptima, por lo tanto, no se muestra ningún GAP en las tablas.

Tabla 5.4: Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-5.

N_i	Enfoque Monolítico				Enfoque Dinámico	
	Tiempo (s)	RAM (GB)	GAP-GRB (%)	GAP* (%)	Tiempo (s)	RAM (GB)
1	0,17	0,21	0	0	0,01	0,01
2	0,08	0,21	0	0	0,01	0,01
3	0,26	0,21	0	0	0,01	0,01
4	0,07	0,21	0	0	0,01	0,01
5	0,07	0,21	0	0	0,01	0,01
1,2	0,60	0,23	0	0	0,05	0,05
1,3	1,60	0,23	0	0	0,05	0,05
1,4	0,44	0,23	0	0	0,05	0,05
1,5	1,97	0,23	0	0	0,05	0,05
2,3	0,55	0,23	0	0	0,05	0,05
2,4	0,50	0,23	0	0	0,05	0,05
2,5	0,50	0,23	0	0	0,05	0,05
3,4	1,98	0,23	0	0	0,05	0,05
3,5	0,52	0,23	0	0	0,05	0,05
4,5	0,18	0,23	0	0	0,05	0,05
1,2,3	1,48	0,24	0	0	0,50	0,10
1,2,4	1,28	0,24	0	0	0,50	0,10
1,2,5	4,95	0,24	0	0	0,50	0,10
1,3,4	5,54	0,24	0	0	0,50	0,10
1,3,5	6,23	0,24	0	0	0,50	0,10
1,4,5	1,69	0,24	0	0	0,50	0,10
2,3,4	4,76	0,24	0	0	0,50	0,10
2,3,5	1,82	0,24	0	0	0,50	0,10
2,4,5	1,64	0,24	0	0	0,50	0,10
3,4,5	1,66	0,24	0	0	0,50	0,10
1,2,3,4	4,60	0,29	0	0	1,00	0,15
1,2,3,5	5,02	0,29	0	0	1,00	0,15
1,3,4,5	5,04	0,29	0	0	1,00	0,15
1,2,4,5	4,16	0,29	0	0	1,00	0,15
2,3,4,5	4,13	0,29	0	0	1,00	0,15
1,2,3,4,5	4,38	0,30	0	0	4,00	0,30

A continuación, en la Tabla 5.4 se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-5. En esta tabla, se presenta una comparación detallada entre el enfoque monolítico y el enfoque dinámico, para cada uno de los ataques del IEEE RTS-5, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, respecto a tiempos de ejecución, consumo de memoria RAM, y GAP de optimalidad. Para este caso de estudio, de tan solo 5 nodos, siempre es posible obtener una política de energización óptima para ambos enfoques, por tanto, todos los GAP de optimalidad son de 0%. Además, se observa que los tiempos de ejecución y consumos de memoria RAM, son directamente proporcionales al número de nodos donde el operador percibe el ataque, y dentro de una misma cardinalidad de nodos atacados, los valores son distintos, pero manteniendo el mismo orden de magnitud. Esto es así debido a que, para una misma cardinalidad de nodos atacados, se verá involucrado un distinto número de líneas, dependiendo del nivel de enmallamiento de los nodos.

Tabla 5.5: Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-24.

N_i	Enfoque Monolítico				Enfoque Dinámico	
	Tiempo (s)	RAM (GB)	GAP-GRB (%)	GAP* (%)	Tiempo (s)	RAM (GB)
1, 9, 19	2.000	> 128	No encontrado	-	6.239,00	57,40
2, 15, 19	2.835	> 128	Heurística	7,10	1.806,70	5,80
5, 15, 19	2.760	> 128	Heurística	1,51	575,90	5,60
11, 16, 24	> 10.000	58,1	10.540,81	0,03	1.888,77	5,80
5, 13, 19	> 10.000	9,2	30,15	0,00	203,04	0,40
15, 19	> 10.000	4,0	27,11	0,00	70,41	0,35
7, 14, 20	637	3,0	0,00	0,00	52,08	0,30
16, 18	1.340	4,8	0,00	0,00	72,93	0,40
1, 3, 7	123	1,2	0,00	0,00	17,74	0,30
3, 6, 12	1.200	> 128	Heurística	2,75	618,30	2,30
4, 16, 20	> 10.000	57,7	5.945,69	0,29	1.883,00	5,80
7, 9, 15, 24	2.000	> 128	No encontrado	-	4.356,30	56,70
4, 10, 20	2.000	> 128	No encontrado	-	7.116,80	57,30
3, 5, 7, 14, 24	5.527	> 128	33,80	0,20	335,01	0,65
5, 7, 14, 18, 24	> 10.000	32,1	32,70	16,10	994,80	5,40
3, 5, 14, 18, 24	2.000	> 128	No encontrada	-	4.741,60	56,60
3, 5, 11, 14	4.124	> 128	Heurística	1,62	1.625,70	5,70
3, 5, 7, 11, 14	8.160	> 128	No encontrada	-	3.699,60	5,40
3, 5, 11, 13	5.340	> 128	No encontrada	-	5.769,00	57,10
7, 9, 10	2.000	> 128	No encontrada	-	4.752,00	56,90
3, 4, 24	2.482	1,4	0,00	0,00	19,55	0,30
13, 17	1.308	1,5	0,00	0,00	25,27	0,30
3, 21	300	> 128	Heurística	4,31	209,38	0,50
2, 10	10.000	9,9	2,21	0,11	203,00	0,50

A continuación, en la Tabla 5.5 se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-24. En esta tabla se presenta una comparación detallada entre el enfoque monolítico y el enfoque dinámico, para cada uno de los ataques del IEEE RTS-24, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, respecto a tiempos de ejecución, consumo de memoria RAM y GAP de optimalidad. Acá, no siempre es posible obtener una política de energización óptima para el enfoque monolítico, por tanto, existen distintas categorías para el GAP-GRB. Cuando se tiene un valor GAP-GRB igual a 0%, significa que se encontró el valor óptimo de la política de energización a través del solver Gurobi, resolviendo un B&B. Cuando el GAP-GRB tiene un valor numérico distinto de 0%, significa que se encontró un valor factible para la política de energización, pero, debido a que se alcanzó el tiempo límite establecido (10.000 segundos), o se acabó la cantidad de memoria RAM disponible (128 GB), no fue posible seguir mejorando la solución. Cuando en la celda GAP-GRB aparece la palabra Heurística, significa que se encontró una solución factible para la política de energización a través de métodos heurísticos del solver, pero no fue posible construir el árbol de B&B, ya que se agotó el tiempo límite establecido o se agotó la memoria RAM disponible. Finalmente, cuando en la celda de GAP-GRB aparece la palabra No encontrada, significa que el solver no pudo encontrar soluciones, ya que se agotó el tiempo límite o la memoria RAM disponible. Por supuesto, cada vez que se encuentra una solución, ya sea óptima o factible, es posible compararla con la solución obtenida por el enfoque dinámico (siempre es el óptimo), y calcular así el valor GAP*. Respecto a los tiempos de ejecución para el enfoque dinámico, se observa que existe un grupo de ataques cuyas soluciones son obtenidas en menos de 900 segundos (15 minutos). Esto es lo ideal, ya que, el enfoque dinámico necesita entregar la política de energización en menos de 900 segundos para que el operador de la red pueda responder dentro del límite fijado de 15 minutos. Respecto a los valores de memoria RAM consumida para el enfoque dinámico, estos oscilan entre 0,3 y 57,4 GB.

Tabla 5.6: Comparación de uso de recursos para IEEE RTS-118.

N_i	Enfoque Monolítico				Enfoque Dinámico	
	Tiempo (s)	Ram (GB)	GAP-GRB (%)	GAP* (%)	Tiempo (s)	Ram (GB)
1, 14, 69	7.140	> 128	No encontrado	-	17.901, 19	6, 7
16, 88, 90, 114	4.800	> 128	No encontrado	-	5.636, 03	1, 3
4, 70, 114	4.800	> 128	No encontrado	-	6.834, 05	1, 8
10, 64, 99, 118	2.225	> 128	Heurística	0,11	1.390, 74	0, 6
10, 45, 64, 99	2.280	> 128	No encontrado	-	4.574, 45	1, 3
1, 51, 67, 112	1.417	> 128	Heurística	0,53	1.401, 73	0, 6
40, 51, 67, 112	7.140	> 128	No encontrado	-	13.862, 48	6, 3
8, 77	7.140	> 128	No encontrado	-	19.971, 37	8, 0
17, 99	900	> 128	No encontrado	-	2.090, 90	1, 2

A continuación, en la Tabla 5.6 se presenta el detalle para el caso de estudio IEEE RTS-118. En esta tabla se presenta una comparación detallada entre el enfoque monolítico y el enfoque dinámico, para cada uno de los ataques del IEEE RTS-118, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque, respecto a tiempos de ejecución, consumo de memoria RAM, y GAP de optimalidad. Para este caso de estudio, como el caso anterior, no siempre es posible obtener una política de energización óptima para el enfoque monolítico. De hecho, solo existen 2 ataques para los cuales se pudo encontrar una solución factible a través de métodos heurísticos del solver. Debido al tamaño de este caso de estudio, los tiempos de ejecución para el enfoque dinámico van desde los 2.090 hasta los 19.971,37 segundos, lo que está sobre el límite de 900 segundos que posee el operador de la red para reaccionar. Respecto a los valores de memoria RAM consumida para el enfoque dinámico, estos oscilan entre 0,6 y 6,7 GB.

Conclusión

En esta tesis se han propuesto dos enfoques para determinar una política de energización óptima frente a ataques del sistema de transmisión con incertidumbre. El primer enfoque corresponde a un modelo monolítico estocástico multietapas, y el segundo enfoque corresponde a una formulación de programación dinámica estocástica. Ambos se han probado en los casos de estudio IEEE RTS de 5, 24 y 118 buses.

Se ha demostrado que es posible obtener una política de energización frente a incertidumbre respecto a cuáles líneas fueron atacadas, minimizando el costo de ENS. Es importante recalcar que hasta la fecha de hoy no existe una herramienta de gestión que resuelva esta problemática. La literatura existente supone que el operador siempre tiene información completa respecto a la localización del ataque y, por tanto, se enfoca en generar modelos de operación post contingencia, con todos los detalles de un ataque conocidos. Pero en el mundo real, rara vez un operador podría conocer todos estos detalles, y debe tomar decisiones de forma rápida, ya que cada segundo que pasa afecta las vidas de consumidores residenciales, industriales, y comerciales.

Los experimentos computacionales señalan que el primer enfoque presenta tiempos de ejecución oscilando entre 1 y 5 segundos para instancias pequeñas como el IEEE RTS-5. Sin embargo, para instancias más grandes, como el IEEE RTS-24 o el IEEE RTS-118, los tiempos de ejecución son menores a 900 segundos para ataques que involucran menos de 6 líneas, pero no es posible obtener resultados óptimos para ataques más grandes, que involucren más de 9 líneas, debido a que se ha establecido un tiempo de ejecución límite, igual a lo que demoraría el segundo enfoque. Por otro lado, el segundo enfoque presenta tiempos de ejecución que oscilan entre 0,01 y 1 segundo para instancias pequeñas como el IEEE RTS-5. Para instancias medianas, como el IEEE RTS-24, presenta tiempos de ejecución que oscilan entre 20,85 y 5.239,19 segundos, para ataques que involucran entre 6 y 11 líneas. Para instancias más grandes, como el IEEE RTS-118, se observan tiempos de ejecución que oscilan entre 1.627,79 y 17.245,01 segundos, para ataques que involucran entre 8 y 10 líneas. Dados los recursos computacionales usados, el enfoque de programación dinámica no ha podido obtener resultados para ataques de 12 o más líneas, ya que explota el consumo de memoria RAM, al evaluar todas las ramas del árbol de decisiones generado. Sin embargo, para todos los ataques considerados, este enfoque fue capaz de obtener una política de energización óptima.

El enfoque de programación dinámica presenta una gran ventaja respecto al enfoque monolítico. Debido a su naturaleza de dividir para conquistar, es posible calcular su tabla de opciones para un conjunto de líneas una sola vez. Posteriormente, si los parámetros que afectan a ese ataque cambian, como los tiempos de recuperación de los generadores, o si algunos escenarios de ataque de líneas no son considerados, es posible reconfigurar la tabla de opciones sin recalcularla, y ejecutar la función de recurrencia. Los resultados muestran que del tiempo de ejecución total para el enfoque de programación dinámica, aproximadamente un 75 % corresponde a tiempo de cálculo de la tabla de opciones. Por tanto, dado un ataque, si cambian los valores de sus parámetros, ya no será necesario recalcular la tabla de opciones, y los tiempos de ejecución disminuirían un 75 %. Sin dudas, esto podría ser una solución para obtener políticas de energización que involucren un mayor número de líneas afectadas, con tiempos de operación del mundo real, ya que se podrían almacenar repositorios de ataques precalculados, y luego solo cambiar sus parámetros y ejecutar la función de recurrencia.

Para los casos de estudio y ataques considerados, el impacto máximo del uso de estas herramientas, medi-

do como ahorro neto por concepto de ENS, no supera los \$6.500.000. Este número fue obtenido considerando la diferencia entre usar la mejor y peor política de energización, ambas obtenidas con la herramienta. Al usar la peor política de energización como marco de comparación, se podría pensar que se está sobreestimando el impacto, pero si se considera que tanto para la mejor como la peor política, existen múltiples soluciones, debido a la degeneración de estos problemas, no se puede ignorar la posibilidad de que el operador del sistema, usando conocimiento experto, escoja una política no óptima, o derechamente, una de las tantas peores políticas.

Dentro de los supuestos considerados, existe una característica que no se explotó, y corresponde a la asignación de probabilidades a cada uno de los escenarios potenciales de líneas afectadas. Cuando el operador percibe un ataque en un conjunto de nodos, todas las líneas que entran o salen de estos, son candidatas a haber sido atacadas, y formarán un conjunto de escenarios de ataques. El supuesto considerado en esta tesis es que cada uno de estos escenarios tiene probabilidad uniforme de ocurrencia, lo que sin duda condiciona el costo de la política de energización obtenida. Sin embargo, la herramienta permite asignar probabilidades a estos escenarios, basándose en conocimiento experto. Por tanto, si el operador logra reunir suficiente información sobre las líneas afectadas, puede cargarla a priori en la herramienta, lo que ayudará a obtener resultados más precisos, pues disminuirá la incertidumbre.

En la práctica, el enfoque propuesto puede ser aplicado considerando pequeñas modificaciones en su implementación. Por un lado, en esta trabajo, después de energizar una línea seguirán existiendo escenarios donde esta ha sido atacada y otros donde no. Por otro lado, en el mundo real solo un ataque se concretaría, es decir, el ataque real. Al usar este enfoque el operador seguiría observando un ataque enmascarado. La diferencia radica en que el ataque real permitiría actualizar el árbol de decisiones en cada periodo, ya que, después de energizar una línea, solo un estado sería posible para esta, atacada o no atacada, y el árbol convergería a esta rama.

Finalmente, queda abierto el punto de explorar en técnicas que permitan aumentar el tamaño de los ataques. Por un lado, estas técnicas deberían enfocarse en estrategias de corte para árboles de decisión, con objeto de evitar la enumeración explícita. Por otro lado, estas técnicas también deberían buscar estrategias para aproximar formulaciones de programación dinámica, y evitar el consumo excesivo de recursos. Para terminar, estudios posteriores deberían enfocarse en incorporar este proceso de decisiones multietapas estocástico en marcos biniveles o triniveles, para pasar de decisiones de carácter operativas, a decisiones de carácter tácticas y estratégicas.

Bibliografía

- [1] Alguacil, N., Delgadillo, A., and Arroyo, J. M. (2014). A trilevel programming approach for electric grid defense planning. *Computers and Operations Research*, 41(1):282–290.
- [2] Alhelou, H. H., Hamedani-Golshan, M. E., Njenda, T. C., and Siano, P. (2019). A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges. *Energies*, 12(4):682.
- [3] Arroyo, J. M. (2010). Bilevel programming applied to power system vulnerability analysis under multiple contingencies. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 4(2):178–190.
- [4] Arroyo, J. M., Alguacil, N., and Carrión, M. (2010). A risk-based approach for transmission network expansion planning under deliberate outages. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3):1759–1766.
- [5] Arroyo, J. M. and Galiana, F. D. (2005). On the solution of the bilevel programming formulation of the terrorist threat problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2):789–797.
- [6] Bertling Tjernberg, L., Bangalore, P., and Tuan, L. (2011). On the use of reliability test systems: A literature survey. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–9.
- [7] Billinton, R. and Li, W. (1994a). Basic concepts of power system reliability evaluation. In *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Plenum Press.
- [8] Billinton, R. and Li, W. (1994b). Introduction. In *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Plenum Press.
- [9] Boonchuay, C., Tomsovic, K., Li, F., and Ongsakul, W. (2012). Robust optimization-based DC optimal power flow for managing wind generation uncertainty. In Barsoum, N., Faiman, D., and Vasant, P., editors, *Power Control and Optimization*, volume 1499 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 31–35.
- [10] Bradley, S., Hax, A. E., Hax, A. C., and Magnanti, T. (1977). Dynamic programming. In *Applied Mathematical Programming*. Addison-Wesley Publishing Company.
- [11] Carrion, M., Arroyo, J. M., and Alguacil, N. (2007). Vulnerability-constrained transmission expansion planning: A stochastic programming approach. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4):1436–1445.
- [12] Chatzivasileiadis, S. (2018). Lecture notes in optimization in modern power systems. *Technical University of Denmark (DTU)*.
- [13] Chen, B. (2016). *Applications of Optimization Under Uncertainty Methods on Power System Planning Problems*. PhD thesis, Iowa State University.
- [14] Chen, B., Wang, J., Wang, L., He, Y., and Wang, Z. (2014). Robust optimization for transmission expansion planning: Minimax cost vs. minimax regret. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 29(6):3069–3077.

- [15] Chen, B. and Wang, L. (2016). Robust transmission planning under uncertain generation investment and retirement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(6):5144–5152.
- [16] Chen, G., Dong, Z., Hill, D., and Xue, Y. (2011). Exploring reliable strategies for defending power systems against targeted attacks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(3):1000–1009.
- [17] Cortina, J., López-Lezama, J., and Munoz, N. (2017). Modelo de interdicción de sistemas de potencia considerando el efecto de la respuesta a la demanda. *Información Tecnológica*, 28(3):197–208.
- [18] Davarikia, H. and Barati, M. (2018). A tri-level programming model for attack-resilient control of power grids. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(5):918–929.
- [19] Davarikia, H., Barati, M., Al-Assad, M., and Chan, Y. (2020). A novel approach in strategic planning of power networks against physical attacks. *Electric Power Systems Research*, 180:106140.
- [20] Delgadillo, A., Arroyo, J. M., and Alguacil, N. (2010). Analysis of electric grid interdiction with line switching. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 25(2):633–641.
- [21] Deng, R., Xiao, G., and Lu, R. (2017). Defending against false data injection attacks on power system state estimation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(1):198–207.
- [22] García-Bertrand, R. and Mínguez, R. (2017). Dynamic robust transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4):2618–2628.
- [23] Hasan, S., Dubey, A., Karsai, G., and Koutsoukos, X. (2020). A game-theoretic approach for power systems defense against dynamic cyber-attacks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115:105432.
- [24] Hong, S., Cheng, H., and Zeng, P. (2017). An n-k analytic method of composite generation and transmission with interval load. *Energies*, 10(2):168.
- [25] Lai, K., Illindala, M., and Subramaniam, K. (2019). A tri-level optimization model to mitigate coordinated attacks on electric power systems in a cyber-physical environment. *Applied Energy*, 235(C):204–218.
- [26] Lin, Y. and Bie, Z. (2018). Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding. *Applied Energy*, 210(C):1266–1279.
- [27] Mary, A., Cain, B., and O’Neill, R. (2012). History of optimal power flow and formulations. *Fed. Energy Regul. Comm.*, 1:1–36.
- [28] Medjoudj, R., Bediaf, H., and Aissani, D. (2017). Power system reliability: Mathematical models and applications. In Volosencu, C., editor, *System Reliability*, chapter 15. IntechOpen, Rijeka.
- [29] Motto, A., Arroyo, J. M., and Galiana, F. D. (2005). A mixed-integer LP procedure for the analysis of electric grid security under disruptive threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3):1357–1365.
- [30] Nezamoddini, N., Mousavian, S., and Erol-Kantarci, M. (2017). A risk optimization model for enhanced power grid resilience against physical attacks. *Electric Power Systems Research*, 143(C):329–338.
- [31] Pena-Ordieres, A., Molzahn, D., Roald, L., and Waechter, A. (2021). DC optimal power flow with joint chance constraints. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(1):147–158.
- [32] Romero, N., Xu, N., Nozick, L., Dobson, I., and Jones, D. (2012). Investment planning for electric power systems under terrorist threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1):108–116.
- [33] Salmeron, J., Wood, K., and Baldick, R. (2009). Worst-case interdiction analysis of large-scale electric power grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(1):96–104.

- [34] Salmeron, J., Wood, R., Kevin, R., and Baldick, R. (2004a). Analysis of electric grid security under terrorist threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):905–912.
- [35] Salmeron, J., Wood, R., Kevin, R., and Baldick, R. (2004b). *Optimizing electric grid design under asymmetric threat (II)*. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [36] Salmeron, J., Wood, R., Kevin, R., and Baldick, R. (2004c). *Optimizing electric grid design under asymmetric threat (III)*. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [37] Salmeron, J., Wood, R. K., and Baldick, R. (2003). *Optimizing electric grid design under asymmetric threat*. Monterey, California. Naval Postgraduate School.
- [38] Shahidehpour, M. and Fu, Y. (2005). Benders decomposition: Applying Benders decomposition to power systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(2):20–21.
- [39] Sharifzadeh, H., Amjady, N., and Zareipour, H. (2017). Multi-period stochastic security-constrained OPF considering the uncertainty sources of wind power, load demand and equipment unavailability. *Electric Power Systems Research*, 146:33–42.
- [40] Sun, J. and Tesfatsion, L. (2010). DC optimal power flow formulation and solution using QuadProgJ. *ISU Economics Working Paper No 06014*, pages 1–62.
- [41] Wu, X. and Conejo, A. (2017). An efficient tri-level optimization model for electric grid defense planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4):2984–2994.
- [42] Xavier, A., Qiu, F., and Ahmed, S. (2020). Learning to solve large-scale security-constrained unit commitment problems. 33(2):739–756.
- [43] Xiang, Y. and Wang, L. (2017). A game-theoretic study of load redistribution attack and defense in power systems. *Electric Power Systems Research*, 151:12–25.
- [44] Xiang, Y., Wang, L., and Liu, N. (2017). Coordinated attacks on electric power systems in a cyber-physical environment. *Electric Power Systems Research*, 149:156–168.
- [45] Xiang, Y., Zhang, X., Shi, D., Jin, Y., Wang, Z., and Wang, L. (2018). A robust power grid defense model considering load demand and wind generation uncertainties. In *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pages 1–5.
- [46] Yao, Y., Edmunds, T., Papageorgiou, D., and Alvarez, R. (2007). Trilevel optimization in power network defense. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(4):712–718.

Anexos

Anexo A

Política de energización IEEE RTS-5

En esta sección se presenta un detalle de todos los ataques al sistema de transmisión, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque (N_i), para el caso de estudio IEEE RTS-5. En particular, la Tabla A.1 muestra los parámetros que caracterizan los ataques como líneas afectadas ($L_{i,j}$), generadores dañados (G_i) y tiempos de recuperación de generadores (DT_i) medidos en intervalos de 15 minutos, los costos de las políticas de energización y su rango de estrategia, y tiempos de ejecución medidos en segundos. Por otra parte, la Tabla A.2 muestra el detalle de las políticas de energización obtenidas para cada ataque, es decir, las líneas energizadas y el costo de ENS para cada periodo de tiempo.

Tabla A.1: Costos de políticas de energización de enfoque monolítico vs enfoque dinámico para IEEE RTS-5.

N_i	Parámetros			Resultado Estrategia		Tiempos de Ejecución (s)	
	$L_{i,j}$	G_i	DT_i	ENS Mejor Política (\$)	Rango de Estrategia (%)	Enfoque Monolítico	Enfoque Dinámico
1	$L_{1,2}, L_{1,4}, L_{1,3}$	1	2	2.492.972,3	0,14	0,17	0,01
2	$L_{1,2}, L_{2,3}$	2	2	6.364.863,1	0,00	0,08	0,01
3	$L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}$	3	2	6.575.965,3	0,05	0,26	0,01
4	$L_{1,4}, L_{4,5}$	4	2	3.580.885,0	0,00	0,07	0,01
5	$L_{3,5}, L_{4,5}$	5	2	12.843.930,0	0,00	0,07	0,01
1,2	$L_{1,2}, L_{1,4}, L_{2,3}, L_{1,3}$	1,2	2	8.897.048,5	0,45	0,60	0,05
1,3	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{1,4}$	1,3	2	12.237.718,3	0,32	1,60	0,05
1,4	$L_{1,2}, L_{1,4}, L_{1,3}, L_{4,5}$	1,4	2	12.237.365,9	0,27	0,44	0,05
1,5	$L_{1,2}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,5	2	22.370.453,6	0,12	1,97	0,05
2,3	$L_{1,2}, L_{3,5}, L_{2,3}, L_{1,3}$	2,3	2	14.517.529,1	0,25	0,55	0,05
2,4	$L_{1,2}, L_{1,4}, L_{2,3}, L_{4,5}$	2,4	2	12.355.503,8	0,25	0,50	0,05
2,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{4,5}$	2,5	2	25.051.704,4	0,08	0,50	0,05
3,4	$L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	3,4	2	19.578.801,8	0,14	1,98	0,05
3,5	$L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}$	3,5	2	21.145.889,3	0,07	0,52	0,05
4,5	$L_{1,4}, L_{3,5}, L_{4,5}$	4,5	2	16.430.320,5	0,00	0,18	0,05
1,2,3	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{1,4}$	1,2,3	2	17.575.872,7	0,21	1,48	0,50
1,2,4	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,2,4	2	19.511.712,5	0,20	1,28	0,50
1,2,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,2,5	2	32.747.802,6	0,09	4,95	0,50
1,3,4	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,3,4	2	26.458.405,1	0,12	5,54	0,50
1,3,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,3,5	2	30.585.162,9	0,10	6,23	0,50
1,4,5	$L_{1,2}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,4,5	2	23.389.333,8	0,09	1,69	0,50
2,3,4	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	2,3,4	2	29.956.829,2	0,10	4,76	0,50
2,3,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}$	2,3,5	2	31.154.570,3	0,09	1,82	0,50
2,4,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{4,5}, L_{1,4}$	2,4,5	2	29.012.051,0	0,04	1,64	0,50
3,4,5	$L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	3,4,5	2	24.741.820,4	0,02	1,66	0,50
1,2,3,4	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,2,3,4	2	31.796.240,3	0,09	4,60	1,00
1,2,3,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,2,3,5	2	35.922.531,2	0,09	5,02	1,00
1,3,4,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,3,4,5	2	31.609.230,0	0,08	5,04	1,00
1,2,4,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{3,5}, L_{1,4}$	1,2,4,5	2	33.769.434,2	0,07	4,16	1,00
2,3,4,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	2,3,4,5	2	35.118.397,2	0,03	4,13	1,00
1,2,3,4,5	$L_{1,2}, L_{2,3}, L_{3,5}, L_{1,3}, L_{4,5}, L_{1,4}$	1,2,3,4,5	2	36.961.213,8	0,02	4,38	4,00

En la Tabla A.1 se observa que el 100% de los ataques tiene tiempos de ejecución por debajo de los 900 segundos, lo que significa que el enfoque propuesto es aplicable en el mundo real para casos de estudio similares.

Tabla A.2: Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-5.

N _i	Enfoque Dinámico						
	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇
1	nada 1.090,615	L _{1,4} 1.060,611, 8	L _{1,2} 171,023, 7	L _{1,3} 170,721, 8	—	—	—
2	nada 3.022,594, 9	L _{2,3} 2.998,601, 7	L _{1,2} 343,666, 5	—	—	—	—
3	nada 2.443,935	L _{1,3} 2.421,431, 8	L _{3,5} 855,690	L _{2,3} 854,908, 5	—	—	—
4	nada 1.363,312, 5	L _{4,5} 1.363,312, 5	L _{1,4} 854,260	—	—	—	—
5	nada 5.140,575	L _{3,5} 5.138,072, 5	L _{4,5} 2.565,282, 5	—	—	—	—
1, 2	nada 3.941,857, 4	L _{1,4} 3.910,035, 8	L _{2,3} 350,000, 5	L _{1,2} 348,373, 3	L _{1,3} 346,781, 5	—	—
1, 3	nada 3.718,796, 9	L _{1,4} 3.687,993, 6	L _{1,2} 1.209,498	L _{2,3} 1.208,456	L _{3,5} 1.207,227, 7	L _{1,3} 1.205,746, 1	—
1, 4	nada 3.310,690	L _{1,3} 3.282,280, 9	L _{4,5} 1.882,147, 5	L _{1,4} 1.881,465	L _{1,2} 1.880,782, 5	—	—
1, 5	nada 6.059,837, 5	L _{1,4} 6.040,548, 6	L _{4,5} 2.567,785	L _{3,5} 2.567,785	L _{1,3} 2.567,427, 5	L _{1,2} 2.567,070	—
2, 3	nada 5.466,529, 9	L _{1,2} 5.440,355, 5	L _{2,3} 1.205,063, 6	L _{1,3} 1.203,699, 6	L _{3,5} 1.201,880, 5	—	—
2, 4	nada 4.385,907, 4	L _{1,2} 4.364,416, 7	L _{1,2} 1.203,765, 6	L _{1,5} 1.201,263, 1	L _{1,4} 1.200,150, 9	—	—
2, 5	nada 8.163,169, 9	L _{1,2} 8.150,843, 4	L _{2,3} 2.913,954	L _{4,5} 2.912,563, 7	L _{3,5} 2.911,173, 4	—	—
3, 4	nada 4.064,010	L _{3,5} 4.644,724, 3	L _{4,5} 2.567,785	L _{2,3} 2.567,785	L _{1,4} 2.567,427, 5	L _{1,3} 2.567,070	—
3, 5	nada 6.727,747, 5	L _{2,3} 6.717,516, 8	L _{4,5} 2.567,557, 5	L _{3,5} 2.566,875	L _{1,3} 2.566,192, 5	—	—
4, 5	nada 5.647,125	L _{3,5} 5.647,125	L _{4,5} 2.568,786	L _{1,4} 2.567,284, 5	—	—	—
1, 2, 3	nada 6.385,792, 4	L _{1,4} 6.354,289	L _{1,2} 1.210,372	L _{2,3} 1.209,703, 6	L _{1,3} 1.208,664	L _{3,5} 1.206,891, 7	—
1, 2, 4	nada 5.990,579, 9	L _{1,4} 5.961,168, 1	L _{1,3} 1.893,220, 9	L _{4,5} 1.890,571, 2	L _{1,2} 1.889,054, 2	L _{1,4} 1.887,118, 1	—
1, 2, 5	nada 9.082,432, 4	L _{1,4} 9.061,974, 4	L _{4,5} 2.923,384, 4	L _{1,2} 2.921,908, 8	L _{2,3} 2.920,856, 3	L _{1,3} 2.919,380, 8	L _{3,5} 2.917,865, 3
1, 3, 4	nada 5.938,871, 9	L _{3,5} 5.919,256, 5	L _{2,3} 2.923,086, 8	L _{4,5} 2.920,391, 8	L _{1,4} 2.920,391, 8	L _{1,2} 2.918,896, 6	L _{1,3} 2.917,509, 7
1, 3, 5	nada 8.002,609, 4	L _{1,4} 7.982,990, 7	L _{1,2} 2.923,133, 1	L _{4,5} 2.920,694, 8	L _{1,4} 2.919,581, 6	L _{1,3} 2.918,717, 8	L _{3,5} 2.917,435, 5
1, 4, 5	nada 6.566,387, 5	L _{1,3} 6.549,720, 8	L _{4,5} 2.568,619, 2	L _{3,5} 2.568,619, 2	L _{1,4} 2.568,202, 1	L _{1,2} 2.567,785	—
2, 3, 4	nada 7.686,604, 9	L _{3,5} 7.666,150, 4	L _{4,5} 2.923,384, 4	L _{2,3} 2.921,685, 9	L _{1,4} 2.921,685, 9	L _{1,2} 2.919,516, 3	L _{1,3} 2.917,801, 4
2, 3, 5	nada 9.750,342, 4	L _{1,2} 9.740,866, 2	L _{4,5} 2.917,508, 6	L _{2,3} 2.916,657, 3	L _{1,3} 2.915,186, 4	L _{3,5} 2.914,009, 3	—
2, 4, 5	nada 8.669,719, 9	L _{2,3} 8.665,378, 3	L _{1,4} 2.922,921, 4	L _{1,2} 2.919,956	L _{3,5} 2.917,788, 5	L _{4,5} 2.916,287	—
3, 4, 5	nada 7.234,297, 5	L _{3,5} 7.234,297, 5	L _{4,5} 2.568,619, 2	L _{1,4} 2.568,619, 2	L _{2,3} 2.568,202, 1	L _{1,3} 2.567,785	—
1, 2, 3, 4	nada 8.605,867, 4	L _{3,5} 8.585,544, 8	L _{4,5} 2.923,222, 9	L _{2,3} 2.921,414, 9	L _{1,4} 2.921,414, 9	L _{1,2} 2.920,260, 1	L _{1,3} 2.918,515, 3
1, 2, 3, 5	nada 10.669,604, 9	L _{1,4} 10.649,278, 9	L _{4,5} 2.923,222, 9	L _{1,2} 2.921,652, 2	L _{2,3} 2.920,718, 5	L _{1,3} 2.919,631, 8	L _{3,5} 2.918,421, 9
1, 3, 4, 5	nada 8.509,159, 4	L _{1,2} 8.495,403	L _{1,4} 2.923,717, 3	L _{4,5} 2.921,897, 3	L _{2,3} 2.920,757, 1	L _{3,5} 2.919,772, 1	L _{1,3} 2.918,523, 8
1, 2, 4, 5	nada 9.588,982, 4	L _{3,5} 9.571,571, 7	L _{4,5} 2.924,278, 1	L _{2,3} 2.923,244, 4	L _{3,5} 2.921,815, 9	L _{1,4} 2.920,743, 7	L _{1,2} 2.918,797, 9
2, 3, 4, 5	nada 10.256,892, 4	L _{1,2} 10.256,892, 4	L _{1,4} 2.923,329, 8	L _{4,5} 2.921,721, 1	L _{3,5} 2.920,894, 1	L _{1,3} 2.920,048, 1	L _{2,3} 2.918,619, 2
1, 2, 3, 4, 5	nada 11.176,154, 9	L _{2,3} 11.176,154, 9	L _{4,5} 2.923,263, 8	L _{3,5} 2.922,494, 6	L _{1,4} 2.922,494, 6	L _{1,2} 2.921,117, 7	L _{1,3} 2.919,533, 3

Anexo B

Política de energización IEEE RTS-24

En esta sección se presenta un detalle de algunos ataques al sistema de transmisión, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque (N_i), para el caso de estudio IEEE RTS-24. En particular, la Tabla B.1 muestra los parámetros que caracterizan los ataques como líneas afectadas ($L_{i,j}$), generadores dañados (G_i) y tiempos de recuperación de generadores (DT_i) medidos en intervalos de 15 minutos, los costos de las políticas de energización y su rango de estrategia, y tiempos de ejecución medidos en segundos. Por otra parte, la Tabla B.2 muestra el detalle de las políticas de energización obtenidas para cada ataque, es decir, las líneas energizadas y el costo de ENS para cada periodo de tiempo.

Tabla B.1: Costos de políticas de energización en enfoque dinámico para IEEE RTS-24.

N_i	Parámetros			Enfoque Dinámico		
	$L_{i,j}$	G_i	DT_i	Tiempo ejecución (s)	ENS mejor política (\$)	Rango de estrategia (%)
1, 9, 19	$L_{8,9}, L_{9,12}, L_{19,20B}, L_{1,3}, L_{19,20A}, L_{9,11}, L_{3,9}, L_{1,5}, L_{16,19}, L_{4,9}, L_{1,2}$	1, 2, 3, 4	4	6.239,00	73.512.183,16	7, 91
2, 15, 19	$L_{15,24}, L_{1,2}, L_{15,16}, L_{19,20B}, L_{2,6}, L_{15,21B}, L_{19,20A}, L_{15,21A}, L_{16,19}, L_{2,4}$	5,6,7,8,15,16,17,18,19,20	4	1.806,70	74.819.371,89	7, 39
5, 15, 19	$L_{15,21B}, L_{19,20A}, L_{15,16}, L_{5,10}, L_{19,20B}, L_{1,5}, L_{15,24}, L_{16,19}, L_{15,21A}$	15,16,17,18,19,20	4	575,90	75.250.152,43	5, 46
11, 16, 24	$L_{15,24}, L_{14,16}, L_{3,24}, L_{10,11}, L_{16,19}, L_{11,13}, L_{11,14}, L_{15,16}, L_{16,17}, L_{9,11}$	21	4	1.888,77	39.352.353,30	1, 99
5, 13, 19	$L_{15}, L_{19,20B}, L_{12,13}, L_{11,13}, L_{13,23}, L_{16,19}, L_{19,20A}, L_{5,10}$	12, 13, 14	4	203,02	58.264.434,40	5, 80
15, 19	$L_{15,16}, L_{15,24}, L_{19,20A}, L_{19,20B}, L_{16,19}, L_{15,21A}, L_{15,21B}$	15,16,17,18,19,20	4	70,41	53.698.474,60	3, 27
7, 14, 20	$L_{7,8}, L_{19,20A}, L_{19,20B}, L_{20,23B}, L_{11,14}, L_{20,23A}, L_{14,16}$	9, 10, 11	4	52,08	48.820.742,40	1, 26
16, 18	$L_{15,16}, L_{14,16}, L_{18,21B}, L_{16,19}, L_{16,17}, L_{18,21A}, L_{17,18}$	21, 22	4	72,93	31.987.758,00	8, 73
1, 3, 7	$L_{7,8}, L_{1,2}, L_{1,5}, L_{1,3}, L_{3,24}, L_{3,9}$	1,2,3,4,9,10,11	4	17,74	36.983.408,50	4, 92
3, 6, 12	$L_{1,3}, L_{9,12}, L_{12,13}, L_{3,9}, L_{6,10}, L_{10,12}, L_{2,6}, L_{3,24}, L_{12,23}$	—	—	618,30	53.614.172,90	8, 51
4, 16, 20	$L_{2,4}, L_{16,17}, L_{16,19}, L_{19,20B}, L_{14,16}, L_{20,23B}, L_{4,9}, L_{19,20A}, L_{15,16}, L_{20,23A}$	21	4	1.883,00	78.350.610,76	4, 99
7, 9, 15, 24	$L_{8,9}, L_{3,24}, L_{15,24}, L_{9,12}, L_{7,8}, L_{4,9}, L_{15,21A}, L_{9,11}, L_{15,21B}, L_{15,16}, L_{3,9}$	9,10,11,15,16,17,18,19,20	4	4.356,30	76.685.647,57	6, 77
4, 10, 20	$L_{4,9}, L_{8,10}, L_{20,23B}, L_{10,12}, L_{2,4}, L_{19,20B}, L_{5,10}, L_{19,20A}, L_{10,11}, L_{20,23A}, L_{6,10}$	—	—	7.116,80	76.579.363,96	6, 78
3, 5, 7, 14, 24	$L_{1,5}, L_{7,8}, L_{5,10}, L_{3,24}, L_{1,3}, L_{14,16}, L_{11,14}, L_{3,9}, L_{15,24}$	9, 10, 11	4	335,01	80.700.334,60	4, 96
5, 7, 14, 18, 24	$L_{18,21A}, L_{7,8}, L_{5,10}, L_{17,18}, L_{18,21B}, L_{1,5}, L_{3,24}, L_{15,24}, L_{11,14}, L_{14,16}$	9, 10, 11, 12	4	994,80	79.121.291,00	5, 58
3, 5, 14, 18, 24	$L_{5,10}, L_{3,24}, L_{14,16}, L_{17,18}, L_{18,21B}, L_{11,14}, L_{1,3}, L_{18,21A}, L_{3,9}, L_{15,24}, L_{1,5}$	22	4	4.741,60	110.875.556,77	6, 60
3, 5, 11, 14	$L_{1,5}, L_{10,11}, L_{1,3}, L_{11,13}, L_{5,10}, L_{14,16}, L_{3,24}, L_{11,14}, L_{9,11}, L_{3,9}$	—	—	1.625,70	77.508.203,29	5, 85
3, 5, 7, 11, 14	$L_{1,3}, L_{5,10}, L_{7,8}, L_{11,13}, L_{3,24}, L_{14,16}, L_{10,11}, L_{9,11}, L_{11,14}, L_{3,9}, L_{1,5}$	9, 10, 11	4	3.699,60	93.978.277,14	5, 63
3, 5, 11, 13	$L_{1,3}, L_{5,10}, L_{13,23}, L_{11,13}, L_{3,24}, L_{10,11}, L_{12,13}, L_{9,11}, L_{11,14}, L_{3,9}, L_{1,5}$	12, 13, 14	4	5.769,00	69.560.201,75	9, 04
7, 9, 10	$L_{8,10}, L_{8,9}, L_{7,8}, L_{9,12}, L_{10,12}, L_{3,9}, L_{4,9}, L_{5,10}, L_{6,10}, L_{10,11}, L_{9,11}$	9, 10, 11	4	4.752,00	114.460.668,56	6, 14
3, 4, 24	$L_{4,9}, L_{15,24}, L_{2,4}, L_{1,3}, L_{3,24}, L_{3,9}$	—	—	19,55	29.391.421,55	6, 95
13, 17	$L_{17,22}, L_{16,17}, L_{12,13}, L_{17,18}, L_{13,23}, L_{11,13}$	12, 13, 14	4	25,27	18.549.160,00	14, 07
3, 21	$L_{18,21B}, L_{18,21A}, L_{15,21A}, L_{3,9}, L_{15,21B}, L_{3,24}, L_{1,3}, L_{21,22}$	23	4	209,38	26.323.195,71	11, 65
2, 10	$L_{10,11}, L_{6,10}, L_{10,12}, L_{8,10}, L_{1,2}, L_{2,6}, L_{2,4}, L_{5,10}$	5, 6, 7, 8	4	203,00	59.532.482,11	6, 18

En la Tabla B.1 se observa que el 50% de los ataques tiene tiempos de ejecución por debajo de los 900 segundos. Los restantes oscilan entre 900 y 7.000 segundos. Esto último es debido a la alta combinatoriedad de la problemática estudiada y al tamaño del caso estudio.

Tabla B.2: Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-24.

N_i	t_i	Enfoque Dinámico																
		t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}						
1, 9, 19	nada	$L_{6,19}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,11}$	$L_{8,9}$	$L_{3,9}$	$L_{9,12}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$	$L_{1,9}$
2, 15, 19	nada	$L_{15,21A}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21B}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,16}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$
5, 13, 19	nada	$L_{15,21A}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21B}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,16}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$
11, 16, 24	nada	$L_{16,19}$	$L_{6,19}$	$L_{16,17}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$	$L_{16,19}$
5, 13, 19	nada	$L_{13,23}$	$L_{9,20B}$	$L_{13,23}$	$L_{9,20A}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$	$L_{13,23}$
15, 19	nada	$L_{15,21B}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21A}$	$L_{6,19}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,16}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$	$L_{15,16}$
7, 14, 20	nada	$L_{9,20B}$	$L_{6,19}$	$L_{9,20A}$	$L_{6,19}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$	$L_{9,20A}$	$L_{9,20B}$
16, 18	nada	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$	$L_{18,21B}$	$L_{18,21A}$
1, 3, 7	nada	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$
3, 6, 12	nada	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$	$L_{6,10}$	$L_{3,21}$
4, 16, 20	nada	$L_{15,16}$	$L_{15,21B}$	$L_{20,23B}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23A}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23B}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23A}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23B}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23A}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23B}$	$L_{15,16}$	$L_{20,23A}$
7, 9, 15, 24	nada	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$	$L_{15,21B}$	$L_{15,21A}$
4, 10, 20	nada	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$
3, 5, 7, 14, 24	nada	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$	$L_{9,9}$	$L_{1,3}$
5, 7, 14, 18, 24	nada	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$
3, 5, 14, 18, 24	nada	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21B}$	$L_{17,18}$	$L_{18,21A}$	$L_{17,18}$
3, 5, 11, 14	nada	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$	$L_{3,9}$	$L_{3,24}$
3, 5, 7, 11, 14	nada	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$	$L_{9,9}$	$L_{9,24}$
3, 5, 11, 13	nada	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$	$L_{13,24}$	$L_{13,23}$
7, 9, 10	nada	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$
3, 4, 24	nada	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$	$L_{3,9}$	$L_{1,3}$
13, 17	nada	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$	$L_{11,13}$	$L_{12,13}$
3, 21	nada	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$	$L_{3,9}$	$L_{3,21}$
2, 10	nada	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$	$L_{10,12}$	$L_{10,11}$

Anexo C

Política de energización IEEE RTS-118

En esta sección, se presenta un detalle de algunos ataques al sistema de transmisión, desde el punto de vista de los nodos donde el operador percibe el ataque (N_i), para el caso de estudio IEEE RTS-118. En particular, la Tabla C.1, muestra los parámetros que caracterizan los ataques como líneas afectadas ($L_{i,j}$), generadores dañados (G_i) y tiempos de recuperación de generadores (DT_i) medidos en intervalos de 15 minutos, los costos de las políticas de energización y su rango de estrategia, y tiempos de ejecución medidos en segundos. Por otra parte, la Tabla C.2, muestra el detalle de las políticas de energización obtenidas para cada ataque, es decir, las líneas energizadas y el costo de ENS para cada periodo de tiempo.

Tabla C.1: Costos de políticas de energización en enfoque dinámico para IEEE RTS-118.

N_i	Parámetros			Enfoque Dinámico		
	$L_{i,j}$	G_i	DT_i	Tiempo ejecución (s)	ENS mejor política (\$)	Rango de estrategia (%)
1, 14, 69	$L_{49,69}, L_{68,69}, L_{12,14}, L_{69,75}, L_{69,77}, L_{47,69}, L_{69,70}, L_{1,2}, L_{14,15}, L_{1,3}$	44	4	17.901, 19	46.143.408, 44	6, 25
16, 88, 90, 114	$L_{16,17}, L_{12,16}, L_{90,91}, L_{114,115}, L_{32,114}, L_{89,90B}, L_{89,90A}, L_{88,89}, L_{85,88}$	41	4	5.636, 03	64.371.093, 47	4, 24
4, 70, 114	$L_{70,74}, L_{32,114}, L_{114,115}, L_{69,70}, L_{4,11}, L_{70,75}, L_{70,71}, L_{24,70}, L_{4,5}$	2, 31	4	6.834, 05	49.510.377, 15	2, 19
10, 64, 99, 118	$L_{63,64}, L_{64,65}, L_{61,64}, L_{80,99}, L_{99,100}, L_{76,118}, L_{75,118}, L_{9,10}$	5, 44	4	1.390, 74	54.938.604, 95	0, 44
10, 45, 64, 99	$L_{45,49}, L_{45,46}, L_{99,100}, L_{44,45}, L_{64,65}, L_{80,99}, L_{9,10}, L_{63,64}, L_{61,64}$	5, 44	4	4.574, 45	76.624.928, 93	4, 42
40, 51, 67, 112	$L_{51,58}, L_{51,52}, L_{40,42}, L_{39,40}, L_{110,112}, L_{40,41}, L_{49,51}, L_{62,67}, L_{37,40}, L_{66,67}$	18, 52	4	13.862, 48	54.118.754, 63	2, 27
1, 51, 67, 112	$L_{51,58}, L_{1,2}, L_{66,67}, L_{62,67}, L_{49,51}, L_{1,3}, L_{110,112}, L_{51,52}$	1, 52	4	1.401, 73	45.244.842, 82	2, 23
8, 77	$L_{77,80A}, L_{8,30}, L_{77,80B}, L_{77,78}, L_{69,77}, L_{77,82}, L_{5,8}, L_{75,77}, L_{76,77}, L_{8,9}$	4, 36	4	19.971, 37	143.054.906, 05	3, 25
17, 99	$L_{17,18}, L_{17,31}, L_{15,17}, L_{17,113}, L_{16,17}, L_{80,99}, L_{17,30}, L_{99,00}$	44	4	2.090, 90	30.109.293, 76	11, 09

En la Tabla C.1, se observa que el 100% de los ataques tiene tiempos de ejecución por encima de los 900 segundos. Esto último es debido a la alta combinatoriedad del problema estudiado y al tamaño del caso de estudio.

Tabla C.2: Política de energización para enfoque dinámico en IEEE RTS-118.

N_i	Enfoque Dinámico										
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}
1, 14, 69	mada 4,690,525, 69	$L_{1,2}$ 4,586,913, 53	$L_{1,3}$ 4,480,888, 07	$L_{1,2,14}$ 4,459,701, 48	$L_{1,4,15}$ 3,926,621, 59	$L_{6,6,77}$ 3,926,621, 59	$L_{6,6,70}$ 3,926,624, 11	$L_{6,6,75}$ 3,927,145, 23	$L_{6,6,69}$ 3,999,382, 72	$L_{6,6,69}$ 4,074,110, 23	$L_{47,69}$ 4,144,874, 21
10, 88, 90, 114	mada 7,035,002, 79	$L_{8,8,89}$ 6,845,489, 19	$L_{6,6,88}$ 6,648,587, 91	$L_{9,0,91}$ 6,595,687, 44	$L_{8,9,90,92}$ 6,229,570, 45	$L_{3,2,114}$ 6,222,748, 25	$L_{8,9,90,4}$ 6,207,286, 94	$L_{1,14,115}$ 6,192,495, 22	$L_{6,6,17}$ 6,192,188, 31	$L_{1,2,16}$ 6,192,091, 98	—
4, 70, 114	mada 5,852,922, 06	$L_{7,0,71}$ 5,081,367, 97	$L_{2,4,70}$ 5,582,947, 65	$L_{7,0,75}$ 5,549,809, 38	$L_{3,2,114}$ 4,504,428, 50	$L_{4,11}$ 4,488,558, 12	$L_{4,5}$ 4,473,185, 57	$L_{1,14,115}$ 4,458,542, 03	$L_{6,6,70}$ 4,452,130, 66	$L_{7,0,74}$ 4,406,489, 62	—
10, 64, 99, 118	mada 6,135,631, 74	$L_{7,5,118}$ 6,116,793, 34	$L_{7,6,118}$ 6,097,986, 05	$L_{6,1,64}$ 6,097,986, 05	$L_{4,4,65}$ 6,097,914, 74	$L_{9,10}$ 6,097,914, 74	$L_{9,9,100}$ 6,097,914, 74	$L_{8,0,99}$ 6,097,914, 74	$L_{3,3,64}$ 6,098,548, 82	—	—
10, 45, 64, 99	mada 8,099,615, 89	$L_{4,5,46}$ 7,839,769, 34	$L_{4,5,49}$ 7,662,020, 17	$L_{4,4,45}$ 7,572,356, 27	$L_{6,6,64}$ 7,572,356, 27	$L_{6,1,61}$ 7,572,248, 87	$L_{9,10}$ 7,572,243, 87	$L_{9,9,100}$ 7,572,243, 87	$L_{8,0,99}$ 7,572,243, 87	$L_{6,4,65}$ 7,589,825, 50	—
40, 51, 67, 112	mada 5,948,315, 78	$L_{5,1,52}$ 5,855,187, 46	$L_{6,1,58}$ 5,790,203, 59	$L_{6,6,67}$ 5,759,219, 30	$L_{4,2,67}$ 4,429,117, 88	$L_{4,6,51}$ 4,391,009, 44	$L_{4,0,41}$ 4,391,427, 29	$L_{3,6,40}$ 4,387,154, 22	$L_{1,10,112}$ 4,385,183, 98	$L_{1,10,112}$ 4,385,183, 98	$L_{4,0,42}$ 4,388,691, 71
1, 51, 67, 112	mada 6,020,619, 65	$L_{1,2}$ 5,915,743, 74	$L_{1,3}$ 5,810,103, 81	$L_{1,5,8}$ 5,722,946, 46	$L_{6,1,52}$ 4,395,094, 60	$L_{6,6,67}$ 4,370,216, 27	$L_{6,6,67}$ 4,343,726, 97	$L_{4,9,51}$ 4,333,195, 66	$L_{1,1,12}$ 4,333,195, 66	—	—
8, 77	mada 14,143,753, 13	$L_{77,82}$ 14,004,334, 81	$L_{77,80,4}$ 13,950,136, 68	$L_{77,80,9}$ 13,926,816, 74	$L_{77,78}$ 12,108,838, 97	$L_{8,8}$ 12,108,838, 97	$L_{8,9}$ 12,108,838, 97	$L_{8,9,9}$ 12,257,835, 94	$L_{6,6,77}$ 12,726,746, 52	$L_{9,6,77}$ 12,824,321, 77	$L_{67,77}$ 12,886,023, 55
17, 99	mada 3,328,326, 51	$L_{17,113}$ 3,283,810, 85	$L_{17,31}$ 3,229,872, 57	$L_{17,30}$ 3,209,188, 41	$L_{9,9,100}$ 3,209,188, 41	$L_{8,0,99}$ 3,209,188, 41	$L_{16,17}$ 3,242,087, 72	$L_{17,18}$ 3,444,618, 57	$L_{1,5,17}$ 3,953,012, 30	—	—