



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

**FILTROS DE CONTINGENCIAS EN TRANSMISIÓN PARA PROBLEMA DE FLUJO
DE POTENCIA ÓPTIMO CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

FELIPE ANDRÉS RIQUELME LARENAS

**PROFESOR GUÍA:
RODRIGO MORENO VIEYRA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RODRIGO PALMA BEHNKE
LUIS VARGAS DÍAZ**

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Eléctrico
POR: Felipe Andrés Riquelme Larenas
FECHA: Marzo 2015
PROFESOR GUÍA: Rodrigo Moreno Vieyra

FILTROS DE CONTINGENCIAS EN TRANSMISIÓN PARA PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA ÓPTIMO CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD

La complejidad del análisis de seguridad de las redes eléctricas se origina, entre otras cosas, por el nivel de incertidumbre asociado a las contingencias que pueden ocurrir, lo cual requiere un gran número de restricciones en el problema matemático de optimización de flujo de potencia con restricciones de seguridad (SCOPF, *Security Constrained Optimal Power Flow*). En algunos sistemas eléctricos los problemas SCOPF son muy grandes, no siendo posible obtener, mediante la aplicación de métodos tradicionales de optimización, una solución en tiempos razonables. En esta memoria se analizan las propiedades de tres métodos que permiten *reducir* el tamaño de un problema SCOPF determinístico con contingencias en transmisión (mediante criterio N-1) a través de distintos algoritmos que aseguran obtener la misma solución del problema original *no reducido*. Además de este análisis se realizan mejoras sustanciales que entregan resultados exitosos en la reducción del problema (número de restricciones) y en los tiempos de ejecución.

El primer algoritmo determina, mediante una técnica analítica, las regiones de factibilidad para eliminar restricciones innecesarias/redundantes, generando un conjunto de restricciones umbrales, siendo éstas las necesarias y suficientes que determinan la región del problema de despacho completo. Este método de literatura, se mejoró de manera que entregue además el despacho óptimo. Los otros dos algoritmos, mediante una técnica maestro-esclavo, realizan una búsqueda iterativa de conjuntos reducidos pero relevantes de estados de operación de la red eléctrica y de restricciones. Los elementos relevantes (estados de operación o restricciones) son los que reconstruyen el vértice de la región factible donde se encuentra la solución óptima. Los tres métodos son primeramente estudiados tanto en una red pequeña de prueba para ver su validez y funcionalidad, como en un sistema mediano para ver su desempeño computacional. En el caso de la red mediana IEEE RTS de 24 nodos, el primer método obtiene una reducción del 98% de la dimensión del problema, demorando 996[s] en encontrar el conjunto umbral. El segundo método de búsqueda de estados relevantes reduce en un 85% el tamaño original del problema, tardando 2,01[s]. Para el tercer método de selección de restricciones relevantes se logra reducir un 98% el conjunto original de restricciones en transmisión en 1,66[s], y un 99% el conjunto original de generación y transmisión, en 1,92[s]. Finalmente, una vez determinado el mejor algoritmo (tercer método), éste es mejorado resultando en el Método de Despacho Iterativo, testeado en la red IEEE de 300 nodos, el cual produce una reducción del problema en más de un 99% en términos del número de restricciones y tardando cerca del 20% del tiempo que tardaría un método tradicional. Los conjuntos reducidos pueden informar sobre contingencias y líneas críticas que debiesen ser relevantes para la operación y planificación de la infraestructura en transmisión.

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a dos grandes profesores, que si bien no pudieron darme mucha ayuda en los momentos en que necesitaba conocer sobre materias particulares de mis estudios, me guiaron en algo más allá que eso, en una carrera que dura más que un par de años, en la carrera que llaman vida. Ellos fueron quienes me abrieron las puertas a este maravilloso universo en el que he podido aprender, a través de la ciencia y las personas. A ellos que con esfuerzo, paciencia y perseverancia, permitieron que mi vida tuviese la posibilidad que ahora estoy concretando. Gracias padres. Además mencionar a mi hermanita (mayor) que me entregó sus críticas, comentarios e ideas sobre este trabajo, también por sus distracciones, risas, bromas, abrazos y jugarretas, gracias Dani.

Gracias a todos quienes han formado parte de mi vida hasta este momento, ya que de todos ellos es que se ha hecho mi vida. De cada uno de ustedes que he sacado un aprendizaje, entregándome una conversación durante el recreo del colegio, o las risas compartidas de Manao, un intercambio de palabras durante el cambio de sala en la Universidad, o las largas, alegres y a veces sentimentales conversaciones de los días Viernes.

Mencionando a algunas de quienes conformaron esto, gracias a quienes que desde comienzos de la escolaridad, hace cerca de 20 años y un poco después, me han acompañado y me han permitido acompañarlos y aprender de ellos: Mauro, Benjamín, Pablo, Cristian, Pato, Gabriel. Gracias a las tremendas personas que conocí en Bachillerato: Cristopher, Valentina, Daniel, David, Hugo, Tomás, algunas de las cuales literalmente cambiaron mi forma de ver el mundo. Y durante los últimos años, gracias a todos los personajes de eléctrica con los que compartí y aprendí, tanto de los ramos de la universidad como de ellos, en particular a Daniel, Tomislav, Nico, los Felipes (González y Carrasco), Cata, y los del laboratorio de Control, que me aceptaron varias veces aunque perteneciese a otra área.

También a los profesores de esta universidad, gracias, que si bien algunos pudiesen ser más afables, entendibles o entretenidos que otros, es de todos ustedes, además de los alumnos, que se forma esta gran y prestigiosa institución. En particular gracias al profesor Rodrigo Moreno que recién comenzando su docencia me permitió desarrollar esta memoria con mucho interés, preocupación y energía.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Contenido.....	3
2.	Marco Teórico.....	4
2.1.	Problema de Flujo de Potencia Óptimo DC con Seguridad Determinística.....	4
2.2.	Problema de Flujo de Potencia Óptimo DC con Seguridad Probabilística.....	11
2.3.	Filtro de Contingencias y Técnicas de Reducción.....	15
3.	Metodología Propuesta.....	25
3.1.	Modelo de flujo óptimo de potencia implementado.....	25
3.2.	Redes de prueba.....	27
3.3.	Mejora al método de Bouffard et al aplicado a un problema determinístico.....	31
3.4.	Transformación del método de Moreno et al (por estado) para ser aplicado a un problema determinístico.....	35
3.5.	Mejora al método de Moreno et al (por restricción) aplicado a un problema determinístico.....	38
4.	Funcionamiento, Validación y Resultados.....	43
4.1.	Ilustración y validación de los métodos de filtrado a red de 3 barras.....	43
4.2.	Simulación del Modelo de SCOPF de 24 nodos sin filtrado.....	46
4.3.	Aplicación del Filtro de Bouffard et al mejorado a red de 24 nodos.....	49
4.4.	Aplicación del Método de Moreno et al por estados y por restricciones a red de 24 nodos.....	50
5.	Análisis de Resultados.....	57
5.1.	Métodos en sistema de 3 nodos.....	57
5.2.	Métodos en sistema de 24 nodos.....	61
5.3.	Comparación de Resultados.....	68
6.	Conclusiones y trabajo futuro.....	76
6.1.	Trabajo Futuro.....	77
7.	Bibliografía.....	78
8.	Anexos.....	80
8.1.	Sistema de 24 nodos.....	80
8.2.	Sistema de 300 nodos.....	86
8.3.	Obtención de matrices PTDF.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros líneas sistema 3 barras.	28
Tabla 3.2. Parámetros generadores sistema 3 barras.	28
Tabla 3.3. Consumos por barra sistema 3 barras.	28
Tabla 3.4. Generación sistema 24 nodos (por generador).	31
Tabla 4.1. Despacho con restricciones de seguridad para Sistema de 3 barras.	43
Tabla 4.2. Restricciones activadas por el método de Bouffard para 3 barras (Sup: límite de capacidad máxima, Inf: límite de Capacidad mínima).....	44
Tabla 4.3. Despacho entregado por mejora a método de Bouffard.	45
Tabla 4.4. Estados activados por método de Moreno para 3 nodos.	45
Tabla 4.5. Restricciones activadas por método de Moreno para 3 nodos.	46
Tabla 4.6. Restricciones activas para punto óptimo del sistema de 24 nodos.	48
Tabla 4.7. Restricciones de líneas activadas por método de Bouffard para 24 nodos (Inferior o direccion contraria de flujo, Superior o dirección configurada).....	50
Tabla 4.8. Estados activados por método de Moreno para 24 barras.....	51
Tabla 4.9. Restricciones activadas por método de Moreno para 24 nodos.	53
Tabla 4.10. Últimas Restricciones de líneas y generación activadas por método de Moreno para 24 nodos.	55
Tabla 4.11. Costo y Tiempo Despacho completo sistema 300 nodos.....	56
Tabla 4.12. Restricciones activadas método de Despacho Iterativo aplicado en red de 300 nodos.....	56
Tabla 5.1. Volumen de restricciones obtenidas para cada método aplicado en sistema de 24 nodos. T: transmisión, G: generación.	69
Tabla 5.2. Restricciones en transmisión resultantes de los filtros.	69
Tabla 5.3. Tiempo de ejecución para cada método. T: transmisión, G: generación.	70
Tabla 5.4. Tiempos de ejecución del problema de despacho bajos las restricciones encontradas. T: transmisión, G: generación.	71
Tabla 8.1. Datos de demanda por barra IEEE RTS.	80
Tabla 8.2. Datos de Transmisión IEEE RTS.	80
Tabla 8.3. Datos de transmisión IEEE RTS (continuación).	81
Tabla 8.4. Comparación de despachos por generador entre el despacho del sistema y los métodos.	81
Tabla 8.5. Comparación de despachos por generador entre el despacho de sistema y los métodos (Continuación). ...	82
Tabla 8.6. Restricciones umbrales método Bouffard et al para sistema de 24 nodos IEEE RTS.	82
Tabla 8.7. Restricciones umbrales método Bouffard et al para sistema de 24 nodos IEEE RTS (continuación).	83
Tabla 8.8. Restricciones de Líneas y generación Activadas por Método de Moreno para 24 nodos.	84
Tabla 8.9. Restricciones de líneas y generación activadas por método de Moreno para 24 nodos (continuación).	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Balance Operación (O) y Riesgo (X) para determinar la transferencia óptima en una línea dada.	12
Figura 2.2. Balance Transmisión (T), operación (O) y Riesgos (X) para determinar la decisión óptima de inversión.	13
Figura 2.3. Modelo general del problema PSCOPF con módulo operacional, de planificación y filtrado.	14
Figura 2.4. Restricciones umbrales (1, 2, 3, 4) y no umbrales (5, 6).	17
Figura 2.5. Esquema general de flujo del módulo de filtrado.	24
Figura 3.1. Sistema de 3 barras.	27
Figura 3.2. Sistema de 24 barras IEEE RTS.	30
Figura 3.3. Diagrama de flujo de la metodología del método de Bouffard.	33
Figura 3.4. Diagrama de flujo de la aplicación del método de Moreno por Estado.	37
Figura 3.5. Diagrama de flujo de la aplicación del método de Moreno por Restricción.	40
Figura 3.6. Diagrama de Flujo de la Aplicación del Método Por Restricción a 300 nodos.	42
Figura 4.1. Sistema resultante del despacho para 3 barras.	44
Figura 4.2. Despacho con restricciones de seguridad para sistema de 24 barras.	47
Figura 4.3. Generación en sistema de 24 barras.	48
Figura 4.4. Generación y consumo por sector en sistema de 24 barras.	49
Figura 4.5. Despachos sectores norte y sur por iteración en activación de estados.	52
Figura 4.6. Generadores con Variaciones por iteración en activación de estados.	52
Figura 4.7. Despachos sectores norte y sur por iteración en activación de restricciones.	54
Figura 4.8. Generadores con Variaciones por iteración en activación de restricciones.	54
Figura 5.1. Representación bidimensional de la Restricción de costo de despacho en el método de Bouffard mejorado.	58
Figura 5.2. Capacidad de Generación y Demanda Sistema de 24 nodos.	62
Figura 5.3. Capacidad de transmisión y flujo óptimo en sistema de 24 barras.	63
Figura 5.4. Flujos por sobre la capacidad de transmisión normalizados en método de Moreno por estado.	65
Figura 5.5. Desarrollo del máximo costo por iteración para método de moreno por estado.	66
Figura 5.6. Flujos de Sobre-Transmisión Método Moreno por restricción. (a) Iteración 1, (b) Iteración 2, (c) Iteración 3. En rojo se representa el nivel de costo maximo, las otras curvas representan costos menores cercanos. .	67
Figura 5.7. Representación de restricción umbral que deja de ser relevante.	72
Figura 5.8. Gráfica del tiempo de ejecución del Despacho Completo en red de 300 nodos.	74
Figura 5.9. Gráfica del tiempo de ejecución del Método de Despacho Iterativo en red de 300 nodos.	74
Figura 5.10. Gráfica del total de restricciones relevantes agregadas por cada variación.	75
Figura 8.1. Flujos por sobre la capacidad de transmisión normalizados, metodo de moreno por estados (iteración 1 a 3).	84
Figura 8.2. Flujos por sobre la capacidad de transmisión normalizados, metodo de moreno por estado (iteración 4 a 6).	84
Figura 8.3. Sistema de 300 nodos IEEE.	86

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

Debido a la integración de nuevas tecnologías de generación y demanda, el nivel y la diversidad de incertidumbres han crecido constantemente sobre todo en redes interconectadas de transmisión y distribución de gran escala. Sólo por nombrar algunos ejemplos de estas nuevas tecnologías está la generación con energías renovables, los consumos inteligentes, los equipos de respuesta rápida, entre otros. Para poder manejar estas incertidumbres en las redes y así garantizar la seguridad de los sistemas de potencias, los estudios de despacho y planificación deben modelar los posibles impactos que estas puedan causar.

La manera clásica en que los sistemas eléctricos son modelados, se hace mediante la formulación del flujo de potencia óptimo con restricciones de seguridad, SCOPF por sus siglas en inglés (*Security Constrained Optimal Power Flow*). La seguridad a la que se ajusta este modelo se refleja en la aplicación de un control predictivo bajo ciertas restricciones que tienen por objetivo considerar distintos escenarios posibles respecto a un caso base. De esta forma, al obtener la solución, se tienen los flujos del sistema que implícitamente incluyen posibles eventos en la red. Sin embargo, para incorporar las nuevas incertidumbres que han surgido a lo largo de los años, también se deben tener en cuenta potenciales contingencias en las cuales haya que actuar a través de, por ejemplo, desconexiones en generación para mantener la estabilidad del sistema. La forma en que esto puede realizarse es mediante un problema de flujo de potencia óptimo con seguridad probabilística (PSCOPF, *Probabilistic Security Constrained Optimal Power Flow*), en donde además de una optimización pre-contingencia, también se realiza una post-contingencia, ahora considerando además un costo por operación post-contingencia en su función objetivo y posibles acciones correctivas sobre la generación, demanda y/o topología de la red. Este tipo de resolución del problema de flujo de potencia óptimo (OPF, *Optimal Power Flow*) ha sido poco explorado debido a sus dimensiones y a la baja efectividad práctica que tendría la obtención de la solución. Por otro lado los modelos SCOPF, aunque en general poseen dimensiones menores que los PSCOPF, igualmente contemplan una gran cantidad de restricciones que hacen de éste un problema de mucha carga computacional.

Por este motivo es que la eficacia de los modelos, sea éste probabilístico o determinístico (robusto), tanto en la solución como en su rapidez, es determinante al momento de valorar las incertidumbres y posibilidades o consideraciones que se tendrían al incorporarlas. En esta memoria se abarcará en específico lo referente a un proceso de filtración inicial que se realiza para este tipo de problemas, el cual se basa en la identificación de las restricciones, estados o contingencias necesarias para solucionar el problema SCOPF, en particular con seguridad en transmisión, encontrando la misma solución óptima del problema completo pero con menor número de restricciones.

1.2. OBJETIVOS

Los objetivos generales consisten en:

- Entender el estado del arte de métodos y técnicas para la selección/filtrado de contingencias necesarias para problemas OPF.
- Lograr un mejoramiento en métodos de filtrado.
- Establecer una comparación de filtros de contingencias probados en problemas de flujo de potencia óptimo *DC* con restricciones de seguridad.

Los objetivos específicos contemplan:

- Disponer de la modelación y simulación de sistemas eléctricos.
- Optimización de flujos de potencias en sistemas eléctricos.
- Aplicación de métodos de reducción del problema SCOPF.
- Obtención de un método de filtrado de contingencias más eficiente para un modelo de inversión para redes de transmisión con seguridad.
- Validación del filtro mediante la realización de simulaciones bajo alguna técnica de reducción y establecer comparativas entre métodos.
- Analizar sobre las ventajas y desventajas de los métodos respecto a, principalmente, los costos en tiempo e información sobre la red.

1.3. ALCANCES

Se prueban métodos de filtrado de contingencias que, a través de distintos manejos del problema de optimización de la operación, serían aplicables a problemas de flujo óptimo con seguridad en transmisión. Se toma como punto de partida un modelo existente que determina la operación y las inversiones necesarias para una red de transmisión considerando seguridad probabilística con control correctivo [1], y que utiliza un filtro de contingencias que considera costos (monetarios) por las fallas. Se debe mencionar que este filtro no será aplicado directamente, sino que una transformación de éste enfocada a problemas determinísticos. Si bien este filtro inicial disminuye el tiempo total de optimización, no se ha estudiado en mayor profundidad un método de reducción. Se quiere entonces hacer más eficiente este filtrado y ver los resultados que se obtienen al implementar otra técnica.

Las pruebas se realizan sobre modelos con flujo *DC* determinísticos, ya que esto reduce la complejidad del problema a analizar, siendo extrapolable al caso probabilístico, el cual no es desarrollado en esta memoria. Para estos sistemas determinísticos, se analizará una hora desacoplada de la siguiente, entendiendo que los resultados pueden ser extendidos a modelos multi-horarios del tipo predespacho. Además, sólo se consideran fallas en transmisión bajo el criterio N-1, sin tomar en cuenta las pérdidas que pudiesen existir a lo largo de las líneas.

Los datos de las redes son ingresados en *Microsoft Excel* para ser leídos por los métodos programados y simulados en *FICO Xpress Optimization Suite*, mientras que la obtención de las matrices de factores de distribución de transferencia de potencia (PTDF, *Power Transfer Distribution Factor*), explicados en 2.1.1.3, se obtienen desde la plataforma *MATLAB*.

1.4. CONTENIDO

El contenido de esta memoria comienza con la introducción al tema, que incluye su motivación, objetivos y alcances, para luego proceder a un marco teórico del trabajo a desarrollar. Aquí se quiere abarcar el estado del arte de los problemas de flujos de potencia óptimos y conocer el funcionamiento de los métodos y/o técnicas para la reducción de contingencias, o de forma más general, de conjuntos de restricciones. En particular se abordarán los siguientes tópicos:

- Problema de flujo de potencia óptimo DC con seguridad determinística
- Problema de flujo de potencia óptimo DC con seguridad probabilística
- Filtro de contingencias y técnicas de reducción

Posteriormente se encuentra una descripción sobre la metodología utilizada para los casos de estudios. Se presentarán las redes a utilizar, y se dispondrá y explicará el funcionamiento de los tres métodos de filtración desarrollados:

- Método de Bouffard mejorado
- (Transformación del) Método iterativo de Moreno por estados
- Método iterativo de Moreno por restricciones (de transmisión y de transmisión-generación)

Luego se exponen los resultados de los casos estudiados, en donde se ilustra y valida el funcionamiento de los métodos en una red pequeña de 3 nodos, y sobre una red de 24 nodos se obtienen resultados para el análisis de sus propiedades. En el análisis de resultados, además de establecer el análisis ilustrativo y de validación de la red pequeña, se presentan los desempeños de los métodos así como las comparaciones entre estos. De esta comparación se elige el mejor método en términos de características y eficiencia respecto al despacho completo, y en una tercera red de 300 nodos, se evalúa una versión mejorada de éste, resultando en un último método:

- Método de Despacho Iterativo

A modo de cierre se concluyen las principales directrices del desarrollo del trabajo, así como el planteamiento de un trabajo futuro con las posibles mejoras a realizar.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los principales conceptos para contextualizar y desarrollar el cuerpo de esta memoria. Aquí se establecerán las diferencias existentes entre métodos de filtrado probabilístico y determinísticos, considerando que el método de filtrado de estados de Moreno et al. [1] (ver sección 2.2.1), nace a partir de un problema probabilístico, pero sin embargo se ocupará para un problema determinístico. Este establecimiento de las diferencias entre los dos tipos de filtrado, probabilístico y determinístico, se hace con el fin de poseer una revisión completa de los tipos de filtros conocidos, ya que todos los métodos son aplicados sólo a modelos determinísticos. Se disponen los tres principales temas con los cuales se logra abarcar este objetivo:

- Problema de flujo de potencia óptimo DC con seguridad determinística
- Problema de flujo de potencia óptimo DC con seguridad probabilística
- Filtro de contingencias y técnicas de reducción

Las dos primeras secciones hacen referencia a los problemas o modelos en los cuales los métodos de filtrado son utilizados, mientras que la tercera los explica en sí.

2.1. PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA ÓPTIMO DC CON SEGURIDAD DETERMINÍSTICA

La solución a problemas de flujo de potencia a largo plazo es comúnmente usada para la determinación de inversiones necesarias en una red mediante la construcción de líneas de transmisión, o la potencia de operación en el corto plazo. Es entonces de gran importancia el conocimiento de la solución óptima de este escenario, generando un problema de flujo de potencia óptimo (OPF). Este problema se basa en encontrar el mínimo costo de producción de las centrales en un sistema [3], de tal manera que abarque el suministro de las demandas y que cumpla con las leyes físicas y eléctricas en la red.

Un problema SCOPF, no es más que una extensión del problema OPF, añadiendo restricciones referentes a la operación del sistema bajo un conjunto de contingencias consideradas. Más aún, el problema SCOPF DC (considerando flujos solamente de potencia activa) entrega una resolución más inmediata del sistema. Esta es una herramienta esencial para los operadores de sistemas de transmisión ya que, al menos actualmente, les permiten mantener un rango de seguridad confiable en la red bajo las restricciones (contingencias) consideradas.

La formulación del problema SCOPF convencional, considerando un criterio de seguridad determinístico, puede ser descrita como sigue [4]:

$$\min C_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) \quad (2.1)$$

$$\bar{g}_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) = \bar{0} \quad (2.2)$$

$$\bar{h}_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) \leq \bar{L}_l \quad (2.3)$$

$$\bar{g}_k^s(\bar{x}_k^s, \bar{u}_0) = \bar{0} \quad k = 1, \dots, c \quad (2.4)$$

$$\bar{h}_k^s(\bar{x}_k^s, \bar{u}_0) \leq \bar{L}_s \quad k = 1, \dots, c \quad (2.5)$$

$$\bar{g}_k(\bar{x}_k, \bar{u}_k) = \bar{0} \quad k = 1, \dots, c \quad (2.6)$$

$$\bar{h}_k(\bar{x}_k, \bar{u}_k) \leq \bar{L}_m \quad k = 1, \dots, c \quad (2.7)$$

$$|\bar{u}_k - \bar{u}_0| \leq \Delta \bar{r}_k \quad k = 1, \dots, c \quad (2.8)$$

Donde C_0 es el costo en el sistema intacto, o condición en la que no existe ninguna contingencia, \bar{x}_k y \bar{u}_k son los vectores de variables de estado y control respectivamente, en la k -ésima contingencia. Aquí se entiende por variable de estado a la tensión eléctrica en todos los nodos y por control a la acción realizada sobre la producción de los generadores. Lo anterior bajo el supuesto de que el sistema es estable a la transición modelada. Además, \bar{x}_k^s es el vector de variables de estado justo después de la contingencia y antes de que el operador del sistema tenga tiempo para modificar las variables de control. \bar{L}_s , \bar{L}_m y \bar{L}_l son los rangos de las líneas en el corto, mediano y largo plazo. Finalmente $\Delta \bar{r}_k$ representa el rango máximo permitido de las variables de control. Se debe notar que para $u_k = u_0$ no existen acciones correctivas, siendo las señales de control post-falla iguales a las pre-falla. Se considera el número total de contingencias c como sólo las creíbles. Las ecuaciones (2.2), (2.4) y (2.6) representan el flujo de potencia que puede ser tanto en AC como en DC. Por otro lado, las restricciones (2.3), (2.5) y (2.7) se refieren a los límites físicos de las líneas, mientras que la restricción (2.8) considera acciones correctivas. Todas las ecuaciones anteriores están basadas en un análisis del sistema bajo estado estable.

2.1.1. CONSIDERACIONES PARA LA FORMULACIÓN

2.1.1.1. MODELACIÓN DE UN NÚMERO LIMITADO DE ACCIONES DE CONTROL POST-CONTINGENCIA

Un inconveniente usual que se conoce en la formulación de los problemas convencionales tipo SCOPF, se refiere a la elección de las acciones correctivas a ser usadas para cada contingencia. Estas pueden variar en la cantidad de pasos a realizar y en tiempo, y son elegidas por los analistas de red obteniendo una lista de acciones. Sin embargo, debido a la variabilidad de la red y su incertidumbre creciente, las acciones pueden no ser las más efectivas para cada contingencia, teniendo mayores costos en las acciones preventivas.

Los operadores sólo pueden implementar un número limitado de acciones de control y en general, para la elección frente a una contingencia, se eligen las más “efectivas”. Sin embargo, en términos de modelación, esta elección de efectividad no es fácil, ya que las acciones no están necesariamente relacionadas con magnitud y porque cada control contribuye conjuntamente tanto al cumplimiento del objetivo de minimización como al cumplimiento de restricciones.

Existen varios enfoques que proponen técnicas de limitación del número de acciones de control en el modelo del OPF, y se pueden extender al problema SCOPF, pero es difícil predecir cómo podría afectar en el rendimiento computacional considerando que en este caso existe más de un estado post-contingencia.

Una representación conceptual para limitar el número de acciones correctivas permitidas en cada estado post-contingencia es mostrada a continuación [2]:

$$-s_k \Delta \bar{u}_k \leq u_k - u_0 \leq s_k \Delta \bar{u}_k \quad k = 1, \dots, c \quad (2.9)$$

$$1^T s_k \leq N_k \quad k = 1, \dots, c \quad (2.10)$$

$$s_k \in \{0, 1\} \quad k = 1, \dots, c \quad (2.11)$$

Donde, para una contingencia k , N_k es el número máximo de acciones correctivas que se permitirían y s_k es un vector de estado de las acciones correctivas, permitiendo o no la asignación de u_k a un valor distinto de u_0 para una contingencia dada. Se debe mencionar que la ecuación (2.10) también puede ser expresada de acuerdo al tiempo de control permitido ($s_k^T t_k \leq T_k$, donde t_k es el vector de tiempos necesarios para implementar las acciones de control).

Dado que se quiere determinar el número mínimo de acciones de control, la función objetivo estaría determinada por:

$$\min 1^T s_0 \quad (2.12)$$

Donde s_0 es el vector de estados de acciones preventivas. A esto además de las restricciones (2.10) y (2.11) se debe considerar la siguiente restricción para incluir los estados pre y post-contingencia:

$$-s_0 \Delta \bar{u}_0 \leq u_0 - \bar{u}_0 \leq s_0 \Delta \bar{u}_0, \quad s_0 \in \{0, 1\} \quad (2.13)$$

Donde \bar{u}_0 es un vector que contiene los actuales valores de acciones preventivas.

Luego de que el conjunto de acciones para cada contingencia es óptimamente obtenido, se debe elegir el orden en que, dada una contingencia, las acciones respectivas deben actuar. Esta secuencia de acciones de control requiere una simulación dinámica de tensión y estabilidad.

2.1.1.2. MANEJO DE LA ESTABILIDAD DE TENSIÓN Y TRANSITORIA

En la formulación de los problemas SCOPF se asume implícitamente que en el estado post-contingencia el sistema no pierde estabilidad y buscará un estado estable viable. Esta suposición en realidad depende de la dinámica del sistema, la cual no está considerada en el modelo convencional del problema SCOPF. Dentro de este dinamismo del sistema, debido a la diferencia entre escalas de tiempo, se puede reconocer la estabilidad transitoria y permanente de tensión.

Para esto existen enfoques principales para abordar el tema:

- Enfoque 1: incluye restricciones de estabilidad en forma de ecuaciones algebraicas que se derivan de simulaciones bajo el dominio del tiempo. Si bien esto generaría una solución óptima, consume muchos recursos computacionales y dependiendo del tamaño del problema podría ser infactible en la práctica.
- Enfoque 2: en este caso se consideran restricciones de estabilidad heurísticas, lineales en su mayoría, que también se obtienen luego de simulaciones en el dominio del tiempo. Si bien no agregan mucha carga computacional debido a su menor impacto al tamaño del problema, pueden llevar a soluciones sub-óptimas. Se requieren varias iteraciones para refinar estas restricciones.

2.1.1.3. CÁLCULO DEL FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DE TRANSFERENCIA DE POTENCIA (PTDF)

Existe una forma de reducir el número de variables de un problema SCOPF determinístico, sólo para el caso en que se tiene flujos *DC* en restricciones lineales. Esto se basa en el cálculo de un factor que permite saber cuánto afecta la potencia disponible (diferencia entre inyección y retiro) de cada nodo de la red sobre una determinada línea. De esta forma, el flujo neto sobre esta línea en cuestión se obtiene mediante la suma de todas estas potencias barra por su respectivo factor (h

en la ecuación). Así la variable de flujo se eliminaría reemplazándola por el valor de la ecuación (2.14), teniendo sólo la inyección necesaria como variable (potencia).

$$Flujo_l = \sum_{i \in I} (h(l,i) \cdot (Inyección_i - Demanda_i)) \quad (2.14)$$

Donde l es la línea a analizar, i un nodo en particular e I el conjunto de nodos. Este factor h se conoce como PTFDF (*Power Transmission Distribution Factor*) o también como GSF (*Generation Shift Factor*) y puede ser entendido como el cambio o sensibilidad de potencia activa en una dirección de referencia en una línea l , respecto a una variación de la inyección en el nodo i , y a su respectiva variación de consumo en un nodo de referencia [5]. Estos factores sólo cambian si la topología de la red cambia o si la impedancia de las líneas cambia, manteniéndose constantes al variar las potencias inyectadas o retiradas de la red.

Para el cálculo de este factor, bajo flujos *DC*, se debe tener en cuenta que cada factor está asociado a un nodo i y a una línea l , denotándose como $h(l,i)$. Además es necesario escoger un nodo de referencia N para el cuál $h(l,N) = 0, \forall l$, en donde cualquier inyección de potencia en este nodo y su retiro en el mismo, no afectan a la red. Notar que en principio, el retiro siempre está referido al nodo de referencia. Ahora bien, para saber el flujo sobre una línea en particular de una red, con un retiro en un nodo que no es el de referencia en dicha red, sólo basta con hacer la superposición de ambos factores, en la dirección de referencia elegida sobre esta, no importando donde se localice el nodo de referencia que se tome. Conceptualmente se tienen tres pasos:

1. Sensibilidad de los ángulos respecto a la inyección de potencia:

$$\bar{\theta}' = [B']^{-1} \cdot \bar{P}'$$

B es la matriz de admitancias de $n \times n$, n número de nodos, y B' es la misma matriz sin el nodo de referencia, es decir, una sub-matriz de B de una dimensión menor ($(n-1) \times (n-1)$). Esta matriz es obtenida de acuerdo a:

$$B(i,i) = \sum_j \frac{1}{x_{ij}}, \forall j \text{ conectado a } i \quad (2.15)$$

$$B(i,j) = -\frac{Nc_{ij}}{x_{ij}} \quad (2.16)$$

Donde Nc es el número de circuitos que existe en la línea del nodo i al j y x_{ij} es la reactancia del circuito entre i y j .

2. Sensibilidad de los flujos de línea respecto a los ángulos:

$$\bar{P}' = [F] \cdot \bar{\theta}'$$

F es la matriz de conexión de la red de tamaño $L \times n$, con L el número de líneas (contando los circuitos de cada línea por separado, es decir, L cuentan los circuitos totales de la red), y donde, para una k -ésima línea:

$$F(k, i) = \frac{1}{x_{ij}}, \text{ para el nodo de partida de la línea } k \quad (2.17)$$

$$F(k, j) = -\frac{1}{x_{ij}}, \text{ para el nodo de llegada de la línea } k \quad (2.18)$$

3. Combinación de 1 y 2 mediante las expresiones (2.15), (2.16), (2.17) y (2.18):

$$[H] = [F] \cdot [B]^{-1}$$

Los factores PTFDF son entonces los obtenidos en la matriz H . Cabe notar que en caso de que una línea se considere en falla (un circuito en falla) la fila correspondiente a la línea de la matriz H es igual a 0.

2.1.2. CONSIDERACIONES PARA LA OBTENCIÓN DE LA SOLUCIÓN

2.1.2.1. REDUCCIÓN EL TAMAÑO DEL PROBLEMA

Sin duda, uno de los inconvenientes más importantes que existe para la resolución de problemas OPF es el tamaño que estos pueden llegar a alcanzar dependiendo del sistema. Sumado a esto, para los problemas SCOPF, las restricciones que se agregan para asegurar al sistema aumentan aún más el tamaño del problema a resolver, y frente a distintas variantes o nuevas consideraciones aumentaría más aún, ya que se traducirían en restricciones.

La mayoría de las investigaciones enfocadas en la reducción de tamaño para este tipo de problemas proponen realizar esta disminución mediante la reducción del número de contingencias que serán incluidas en el problema SCOPF y/o mediante la reducción del tamaño del estado post-contingencias. En esta memoria se estudiará en profundidad la reducción del número de contingencias y de restricciones en sí a considerar en un problema SCOPF.

2.1.2.2. MANEJO DE VARIABLES DISCRETAS

Para manejar la optimización de los problemas SCOPF incluyendo las variables discretas sin relajarlas, se debe considerar un problema entero-mixto no lineal (MINLP, *Mixed Integer Non Linear Problem*). Es por esto que el problema SCOPF es conceptualmente un problema MINLP.

Hacer eficiente la resolución de estos problemas ha sido por mucho tiempo foco principal de atención. Sin embargo, el problema SCOPF es un problema MINLP de gran tamaño, y su resolución, como se ha visto en las secciones anteriores requiere de varios módulos. Así, una

solución rigurosa del problema SCOPF mediante métodos MINLP clásicos (*branch and bound*, aproximación externa, etc.) es intratable para sistemas muy grandes con un alto número de variables. Por lo tanto, técnicas heurísticas rápidas y robustas son necesarias para lidiar con las variables discretas en el SCOPF.

Previo a utilizar métodos de solución, es conveniente clasificar los tratamientos de las variables discretas en dos principalmente:

- Con pequeños *steps*: para este tipo de variables, la forma más simple, rápida y ampliamente usada está basada en estrategias de redondeo de las variables discretas sobre el problema de optimización. Dado que los valores del problema cambian en cierta medida al hacer esto, el problema de esta aproximación es que no considera los efectos que causa ni en la función objetivo ni en las restricciones, abstrayéndose de los valores del problema en sí y preocupándose sólo de la búsqueda de la solución (si es que se encuentra). Por tanto la factibilidad no se garantiza si es que no se realiza un método posterior para validar la solución, además de que la función objetivo podría alcanzar un valor sub-óptimo. Para esto existen variadas proposiciones probadas en problemas OPF, basadas en funciones de penalización utilizadas implícitamente en *solvers* genéricos de problemas no lineales (NLP, *Non Linear Problem*) o problemas lineales (LP, *Linear Problem*).
- Con grandes *steps*: estas variables discretas se caracterizan por modelar fenómenos con grandes ventanas de tiempo, existiendo variadas dinámicas asociadas. Ejemplos de estos fenómenos son las acciones de *switching* en la red, realizadas para abaratar costos y mantener la estabilidad y seguridad del sistema y que modifican la dinámica de la red. Otro ejemplo son las conexiones de unidades de generación inicialmente no despachadas, produciendo el mismo tipo de fenómeno. Así, estas variables determinan varias ventanas pequeñas de tiempo que en conjunto modelan los fenómenos de larga duración como los ejemplos nombrados. Es por esto que estas variables se deben tratar separando el problema heurísticamente dentro de estas ventanas de tiempo en que actúan.

Además, y aparte de lo anterior, es posible tratar ambos tipos de variable discreta (de pequeños y grandes *steps*) mediante la linealización tanto del problema SCOPF, como de cada estado post-contingencia, aproximación que correspondería a un enfoque de problema entero-mixto lineal (MILP, *Mixed Integer Linear Problem*).

2.1.2.3. ALGORITMOS EFICIENTES PARA SOLUCIÓN RELAJADA

El problema SCOPF real posee variables de naturaleza continua y discreta. Generalmente se propone que al optimizar las variables continuas, las discretas se mantengan constantes. Alternativamente se propone relajar las variables discretas a continuas. Al hacer esto, la optimización se convierte en un problema no lineal (NLP, *Non Linear Problem*) si se considera su versión de flujos de potencia AC. Para resolverlo existen dos formas principales según la

referencia [2]: la de barrido y la de conjunto activo. En la de barrido, se usa el método del punto interior (IPM, *Interior Point Method*), mientras que en la de conjunto activo, se usa programación cuadrática secuencial de conjuntos activos.

- IPM: es el que se ha usado mayormente para la solución de OPF, debido a su rapidez y relativa sencillez. Frente a algoritmos de mayor orden es en donde este método muestra sus ventajas, permitiendo aplicaciones no sólo en testear nuevos sistemas sino que también en probar los modelos de sistemas actuales.
- Programación Cuadrática Secuencial: mientras que el IPM se centra en la rapidez, la programación cuadrática secuencial de conjuntos activos se enfoca en la robustez del algoritmo y en la convergencia global del problema, entregando una herramienta para asegurar la mejor solución. Debido a la carga computacional es poco usado, y se aplica sólo para sistemas pequeños.

2.2. PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA ÓPTIMO DC CON SEGURIDAD PROBABILÍSTICA

El problema SCOPF convencional con criterio de seguridad determinística para manejar contingencias, descrito en la sección anterior, posee tres principales inconvenientes [4]:

- Considera a todas las contingencias como equiprobables dejando de lado la probabilidad individual de ocurrencia.
- Se optimiza sólo el costo del control de estado en pre-contingencia, sin tomar en cuenta el costo de las acciones correctivas post-contingencia, asumiendo que la probabilidad de su ocurrencia es pequeño y que en el largo plazo su costo será insignificante.
- No modela el costo social y económico de desconexiones de generación o carga que pueden resultar de la falla de acciones correctivas.

Dado que sólo el costo de las desconexiones es mucho mayor que el costo de las acciones correctivas usualmente usadas, la pregunta es si se debe considerar el supuesto de no incluirlas en un componente post-contingencia es relevante. En lugar de tomar decisiones de acuerdo a niveles de redundancia en la red (por ejemplo el criterio N-1, N-2, etc.) se podría realizar un cálculo de riesgo, mediante probabilidades, de tal forma de encontrar niveles eficientes en las acciones de mitigación considerando distintos casos.

Desde el punto de vista de eficiencia económica, realizar continuas mejoras en los niveles de confiabilidad de un sistema grande de potencia, incurrirían en un punto en el que el costo asociado a dichas mejoras excedería los beneficios de hacerlo. Esto quiere decir que la transferencia óptima durante la operación de una red, para una condición dada, corresponderá a al mínimo costo que equilibra tanto costos de operación (O) (por ejemplo restricciones de transmisión o pérdidas), como costos esperados de demanda no abastecida (X). Esto lleva a un vector de estados de operación (i.e. contingencias) que son ponderadas de acuerdo a sus

probabilidades de ocurrencia. Como resultado se obtienen niveles eficientes de la utilización de la red (y redundancia), balanceando los niveles de riesgo asociados a esa operación (utilización) en particular. En la Figura 2.1 se puede ver gráficamente lo anterior. En ésta se muestran los costos crecientes (como demanda no abastecida, uso de control correctivo o pérdidas) y los costos decrecientes (como las restricciones de transmisión), que juntos arrojan un costo total con un mínimo que refleja la transferencia óptima de potencia por esa línea en particular.

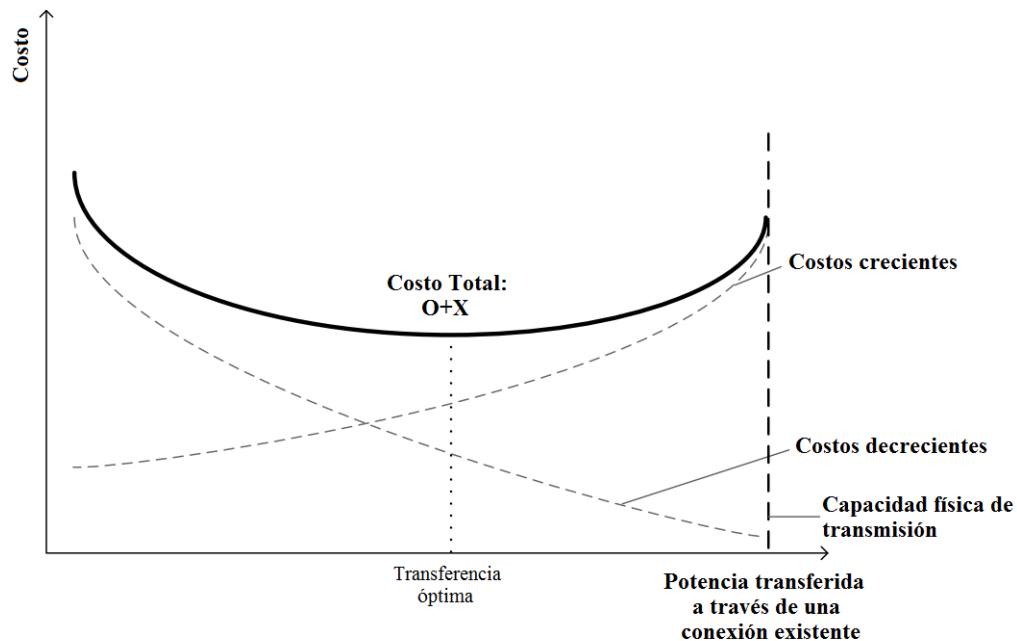


FIGURA 2.1. BALANCE OPERACIÓN (O) Y RIESGO (X) PARA DETERMINAR LA TRANSFERENCIA ÓPTIMA EN UNA LÍNEA DADA.

Además de los costos anteriores, también se debiese minimizar el costo total óptimo de inversión (T), respecto a todos los costos de operación (O) y todos los riesgos (X), de manera similar a la anterior pero considerando ahora los niveles de inversión en la transmisión. Esto es reflejado en la Figura 2.2 donde las curvas se comportan de manera similar al anterior frente a variaciones de inversión, considerando en este caso los costos decrecientes como O+X (debido a su dinámica frente a las inversiones en transmisión) y los costos crecientes como las inversiones y mantenciones.

Las optimizaciones O+X y T+O+X se refieren al problema operacional y al de planificación respectivamente, y dada la naturaleza probabilística de éstas, deberían incluir rangos de contingencias más allá de las redundancias típicas de eventos N-1 y N-2. Para ambos casos, operacional y de planificación, la posición de equilibrio es distinta para diferentes límites del sistema, dependiendo de las características de la red, cambiando con el mercado y condiciones en que éste opera.

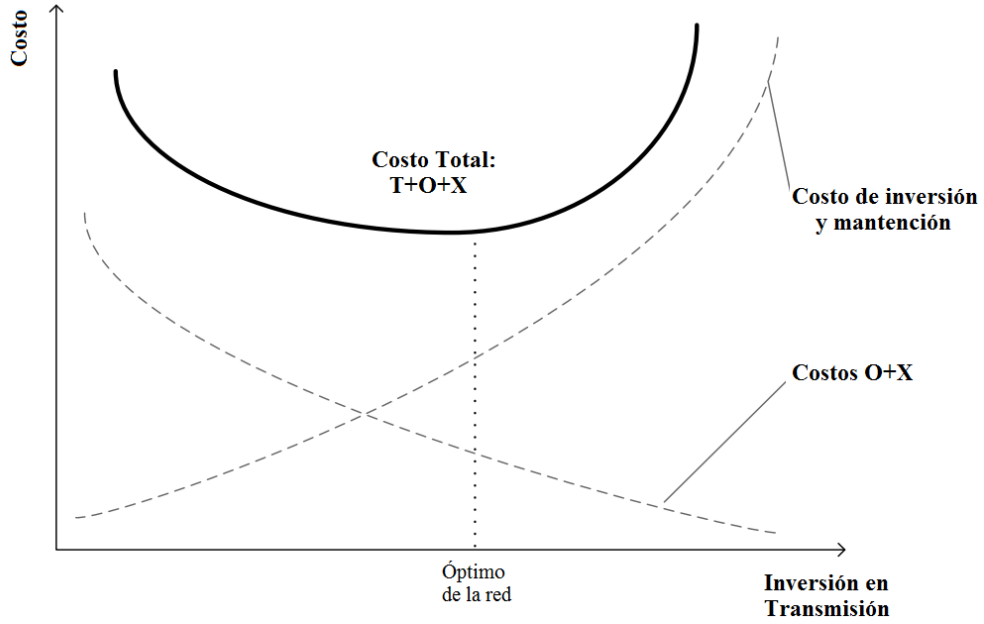


FIGURA 2.2. BALANCE TRANSMISIÓN (T), OPERACIÓN (O) Y RIESGOS (X) PARA DETERMINAR LA DECISIÓN ÓPTIMA DE INVERSIÓN.

A continuación se introduce la formulación del problema de flujo óptimo de potencia probabilístico (PSOPF) [1] dado por:

$$\min C_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) + \sum_{k=1}^M p_k C_k(\bar{x}_k, \bar{u}_0, \bar{u}_k) \quad (2.19)$$

$$\bar{g}_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) = \bar{0} \quad (2.20)$$

$$\bar{h}_0(\bar{x}_0, \bar{u}_0) \leq \bar{L}_l \quad (2.21)$$

$$\bar{g}_k^s(\bar{x}_k^s, \bar{u}_0) = \bar{0} \quad k = 1, \dots, M \quad (2.22)$$

$$\bar{h}_k^s(\bar{x}_k^s, \bar{u}_0) \leq \bar{L}_s \quad k = 1, \dots, M \quad (2.23)$$

$$\bar{g}_k(\bar{x}_k, \bar{u}_k) = \bar{0} \quad k = 1, \dots, M \quad (2.24)$$

$$\bar{h}_k(\bar{x}_k, \bar{u}_k) \leq \bar{L}_m \quad k = 1, \dots, M \quad (2.25)$$

$$|\bar{u}_k - \bar{u}_0| \leq \Delta \bar{r}_k \quad k = 1, \dots, M \quad (2.26)$$

Donde C_k es el costo de operación en el estado k y p_k es la probabilidad de esa contingencia (estado). M representa el número total de contingencias posibles. El resto de las restricciones (2.20)-(2.26) siguen la misma idea expresada para las ecuaciones (2.2)-(2.8). Cabe mencionar que una diferencia fundamental entre la formulación determinística y la probabilística es que en esta

última existe la posibilidad de desconexión de carga, siendo así, la demanda, una variable de control.

2.2.1. MODELO PSCOPF EN QUE SE BASA EL FILTRO DE ESTADOS

Esta memoria utilizará una transformación de un filtro de estados extraído de un modelo para problemas SCOPF probabilísticos (PSCOPF) [1], éste se explica a continuación sólo con el objeto de entender el estado del arte. El fin de éste modelo, es entregar la solución para el problema OPF con seguridad, realizando el problema de optimización de forma probabilística. El esquema general de este proceso se muestra en la Figura 2.3.

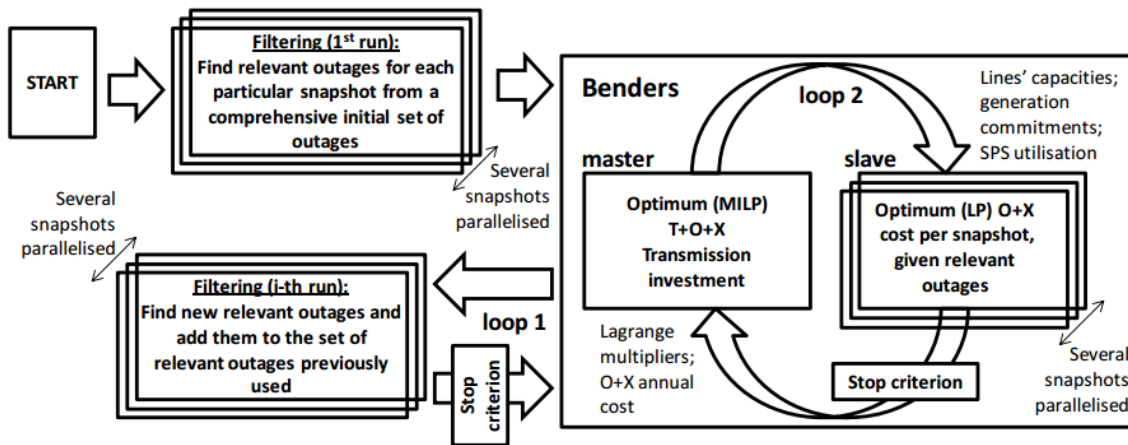


FIGURA 2.3. MODELO GENERAL DEL PROBLEMA PSCOPF CON MÓDULO OPERACIONAL, DE PLANIFICACIÓN Y FILTRADO.

El modelo del problema PSCOPF, básicamente posee tres módulos que en conjunto obtienen la solución del problema. Estos módulos son: el operacional, el de planificación y el de filtrado de contingencias. En el módulo operacional, se determinan las decisiones óptimas de operación del sistema, para una condición de operación dada. El módulo de planificación por su parte está apoyado por varias ejecuciones del módulo de operación y, por ende, por varias condiciones de operación, determinando así:

- La inversión óptima de la red para un año.
- La generación óptima para cada condición de operación.
- El nivel de utilización de SPS (*Special Protection Scheme*) para cada contingencia.

Ambos módulos, operacional y de planificación, son coordinados mediante el algoritmo de Benders [8]. Por otro lado, el módulo de filtrado se encarga de la disminución del número de estados de operación (contingencias) considerados en el análisis de cada condición de operación. Este filtrado es aplicado iterativamente:

- Obtención de la falla relevante en la red inicial para cada condición de operación (*1st run* en Figura 2.3).

- Obtención de la falla relevante en la red “siguiente” para cada condición de operación, agregando estas fallas, si es que no fueron incluidas, al conjunto de fallas relevantes previamente obtenido.

El algoritmo de Benders (*loop 2*) se detiene cuando las estimaciones alta y baja de la función de costo de transmisión (Z_{Lower} and Z_{Upper} en referencia [8]), que considera inversión, operación y demanda no abastecida ($T+O+X$), son iguales o cercanas. El *loop 1* se detiene si no existen más contingencias para ser agregadas al conjunto relevante de contingencias dado el último conjunto obtenido de capacidad de transmisión en la red y generación. Además, en la Figura 2.3, se muestran cómo diferentes condiciones de operación pueden ser ejecutadas en paralelo.

2.3. FILTRO DE CONTINGENCIAS Y TÉCNICAS DE REDUCCIÓN

El aumento de la rapidez de convergencia a la solución, para cualquier método, es un punto crucial para considerarlo aplicable en la práctica. Dentro de los problemas SCOPF, el mayor peso que se considera en la resolución es el tamaño del conjunto de restricciones. Dada la variedad de redes, la distribución de generación, y las nuevas tecnologías que se incorporan, el tamaño del problema crece más aún si se agregan consideraciones o variaciones de la red. Considerando que se tiene un problema de optimización, y que no todas las restricciones contribuyen a encontrar la solución óptima, una forma de amortiguar este aumento de las dimensiones del problema, es mediante la consideración de sólo los casos relevantes para éste, a través de un filtro previo a la resolución, que seleccione aquellas contingencias más importantes.

Existe una gran diferencia entre la aplicación de filtros para reducir los número de contingencias dependiendo de si el problema abarca o no consideraciones probabilísticas en su función objetivo. Esto debido a que al considerar probabilidad o pesos en la función objetivo, como se vio en la sección 2.2, y al considerar o no ciertas contingencias, esta función objetivo también cambia, por lo que no se puede aplicar directamente el filtro de un problema determinístico a un problema probabilístico. De esta forma se presentan a continuación algunos métodos para ambas naturalezas de problema SCOPF.

2.3.1. DEFINICIÓN DEL CONJUNTO UMBRAL

El filtrado de contingencias para los problemas SCOPF, se basan en la representación de ciertas restricciones umbrales (*umbrella constraints*) y del conjunto umbral (*umbrella set*). Estos conceptos, si bien pueden variar en su construcción dentro de la formulación de un método, básicamente pueden ser entendidos desde una idea netamente matemática de optimización. Sea el siguiente problema de optimización:

$$\min f(p) \tag{2.27}$$

Sujeto a

$$Ap \leq b \quad (2.28)$$

A es matriz de $J \times I$ y b es vector de $J \times 1$. Se tienen entonces las siguientes definiciones [6]:

- Restricciones umbrales: sea Γ el conjunto de los índices correspondientes a todas las restricciones (filas) de un problema de optimización formulado como (2.27) y (2.28), y sea $j \in \Gamma$. La restricción (fila) j es una restricción umbral de Γ si y sólo si eliminando ésta de Γ , se altera el conjunto de soluciones factibles del problema original de optimización.
- Conjunto umbral: el conjunto umbral $U \subseteq \Gamma$ de un problema de optimización es el conjunto que contiene el número mínimo de restricciones (filas) necesarias para formar su conjunto de soluciones factibles. Eliminando cualquier miembro del conjunto umbral U alteraría el conjunto de soluciones factibles del problema de optimización original, mientras que agregar cualquiera de las restricciones del conjunto no-umbral, $\bar{U} \subseteq \Gamma$, donde $U \cap \bar{U} = \emptyset$ y $U \cup \bar{U} = \Gamma$, no cambiaría el conjunto de soluciones factibles.

Los conceptos anteriores son representados a través de la Figura 2.4, en un problema de optimización de dos variables con seis restricciones lineales. Aquí, las restricciones 1-4 son restricciones umbrales ya que eliminando cualquiera de ellas cambiaría el conjunto de soluciones factibles (región rayada), mientras que las restricciones 5 y 6 son restricciones no-umbrales ya que no interfieren en este conjunto ni en la solución óptima. De esta forma las restricciones 1-4 forma el conjunto umbral. Cabe notar que las restricciones umbrales 2 y 3, son parte del conjunto umbral por necesidad, ya que la solución óptima se encuentra en su intersección. Por lo tanto aquí también se podría distinguir entre restricciones umbrales y restricciones umbrales vinculantes (activas). Los parámetros s_5 y s_6 representan la distancia de las restricciones no umbrales al punto más cercano de la región factible.

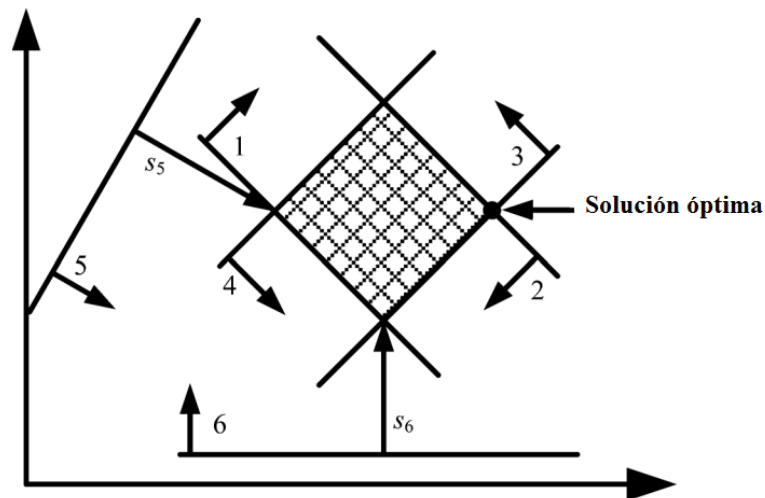


FIGURA 2.4. RESTRICCIONES UMBRALES (1, 2, 3, 4) Y NO UMBRALES (5, 6).

Cabe mencionar que existen ciertos procesos iterativos en los que se puede ir encontrando una solución óptima por iteración, existiendo ciertas restricciones umbrales vinculantes activas por iteración que determinan la solución óptima. En particular para el problema SCOPF determinístico que se desarrollará en el cuerpo de la memoria, estas restricciones serán llamadas relevantes, dado que van determinando el punto óptimo del problema en cada iteración, creando así, al final del proceso iterativo, un conjunto de restricciones relevantes.

2.3.2. MÉTODOS BASADOS EN SCOPF DETERMINÍSTICOS

2.3.2.1. MÉTODO GENERAL DE MODELO PARA ESTADOS DE POST-CONTINGENCIA

Esencialmente se identifican eficientemente, tan pequeño como se pueda, el subconjunto que incluye todas las restricciones umbrales del problema SCOPF óptimo. Se iteran cuatro módulos que conforman este algoritmo de filtrado hasta que todas las restricciones post-contingencia son conocidas:

- Formulación de un SCOPF que considera sólo el subconjunto de contingencias potencialmente relevantes
- Un análisis de estado estable de seguridad basado en un modelo clásico de flujo de potencia
- Un filtro de contingencias
- Un OPF post-contingencia que chequea si las contingencias pueden ser aseguradas por las acciones correctivas

La mayoría de los filtros de contingencias utilizan una variedad de índices y seleccionan aquellos que están sobre un límite establecido.

2.3.2.2. MÉTODO GENERAL DE MODELO SIMPLIFICADO PARA ESTADOS DE POST-CONTINGENCIA

En general, los problemas SCOPF se descomponen de tal manera que se puedan resolver de forma paralela las particularidades respectivas. La descomposición de Benders proporciona una estrategia estándar para el desarrollo y resolución de este tipo de problemas a través de cualidades específicas. En esta descomposición, el problema SCOPF original es descompuesto en un problema maestro y varios sub-problemas esclavos que interactúan iterativamente, redistribuyendo la carga computacional entre varios procesadores, que elevarían considerablemente la velocidad de computación.

El problema SCOPF también puede ser simplificado agregando al caso base sólo las restricciones de desigualdades relevantes post-contingencia, linealizadas en torno al caso base, mientras elige todas las restricciones de igualdad post-contingencia. La principal ventaja de esta programación es que la convergencia al óptimo global del problema linealizado está garantizada y es bastante rápida.

Otro concepto utilizado para aumentar la rapidez del filtrado de contingencias consiste en mantener el modelo exacto de un área “directa”, donde la contingencia respectiva tenga un impacto considerable y, desde un área “indirecta”, comprenda el control de las variables que tengan un efecto importante en las restricciones del área directa. Mientras más contingencias sean incluidas en el problema SCOPF, más comprimido será el estado de post-contingencias.

2.3.2.3. MÉTODO DE FRANCOIS BOUFFARD

Este método aborda el problema de encontrar el conjunto de contingencias necesarias desde el punto de vista matemática, centrándose así en encontrar sólo las restricciones (filas) necesarias [6]. Está ligado estrechamente con las definiciones redactadas en 2.3.1.

Dos observaciones importantes de este método es que, por un lado, existe al menos un punto sobre una restricción y que satisface todas las restricciones umbrales, y por otro, que no existe un solo punto en una restricción no-umbral que satisfaga a todas las otras restricciones del problema. Esto se puede ver tomando como ejemplo las restricciones explicadas en la Figura 2.4.

Considerando el problema de optimización (2.27) y (2.28), sea a_j el vector que representa la j -ésima fila de la matriz A y sea b_j el j -ésimo elemento del vector b . Además se define un vector arbitrario $w_j \in \mathbb{R}^I$. Se propone que la restricción j es umbral si y sólo si existe un punto w_j que reposa sobre el hiperplano $a_j^T w_j = b_j$ y es consistente respecto a todas las demás restricciones $j' = 1, \dots, J$, satisfaciendo $a_{j'}^T w_j \leq b_{j'}$ para todo j' .

Proposición 1: sea $u_j \in \{0,1\}$, para todo $j = 1, \dots, J$, que satisface

$$u_j = \begin{cases} 0, & \text{si la restricción } j \text{ es umbral} \\ 1, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.29)$$

Resolviendo el siguiente problema matemático entero-mixto se determina el conjunto de restricciones umbrales del problema de optimización (2.27) y (2.28):

$$\min_{w, u \in \{0,1\}^J} \sum_{j=1}^J u_j \quad (2.30)$$

Sujeto a, para todo $j = 1, \dots, J$

$$a_{j'}^T w_j \leq b_{j'} \quad j' = 1, \dots, J \quad (2.31)$$

$$(1 - u_j) a_j^T w_j \geq (1 - u_j) b_j \quad (2.32)$$

En esta proposición se tiene que al ser una restricción j umbral, se activan tanto (2.31) (para $j' = j$) como (2.32), quedando una igualdad $a_j^T w_j = b_j$, donde w_j hace factible la igualdad y además todas las demás restricciones $j' \neq j$. Si no es restricción umbral, sólo se tiene la restricción (2.31), removiendo la restricción j -ésima de (2.32).

La proposición anterior entrega una solución para determinar las restricciones necesarias y suficientes para resolver un problema de optimización como el enunciado. Sin embargo no es un problema trivial por dos motivos: por su naturaleza que combina variables de distintos tipos, y por su gran tamaño, con $J(J+1)$ restricciones, IJ variables continuas y J variables binarias.

Por esto es necesario replantear su formulación. Se define un nuevo conjunto de variables $s_j \in \mathbb{R}_+$ para $j = 1, \dots, J$. Se considera la siguiente proposición:

Proposición 2: sea $s_j \geq 0$, para todo $j = 1, \dots, J$, satisfaciendo:

$$s_j = \begin{cases} 0, & \text{si la restricción } j \text{ es umbral} \\ > 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2.33)$$

Resolviendo la siguiente programación lineal (LP) se determina el conjunto de restricciones factibles de (2.27) y (2.28):

$$\min_{w, s \geq 0} \sum_{j=1}^J s_j \quad (2.34)$$

Sujeto a, para todo $j = 1, \dots, J$

$$a_{j'}^T w_j \leq b_{j'} \quad j' = 1, \dots, J \quad (2.35)$$

$$a_j^T w_j + s_j \geq b_j \quad (2.36)$$

Esta segunda proposición entrega el mismo análisis hecho para la proposición 1 de las restricciones umbrales y no umbrales. Lo interesante es que en este caso se tiene además que todas las restricciones pueden ser llevadas a la región de factibilidad mediante el término s_j , entregando una especie de peso a cada restricción, y así ver en qué caso éstas podrían ser consideradas umbrales y en qué medida.

Para reducir la dificultad en cuanto al tamaño del problema propuesto, sobre todo considerando su aplicación en problemas SCOPF, se propone además una descomposición del problema de la proposición 2 en tres partes: separación, divide y conquista, y particionar.

- *Separación*: por inspección se puede ver que la proposición 2 es separable, ya que tanto s_j como w_j pueden ser resueltos independientemente de cualquier otro $s_{j'}$ y $w_{j'}$, $j \neq j'$. De esta forma, resolviendo el problema de la siguiente proposición independientemente de cada $j = 1, \dots, J$ se puede descubrir el conjunto de restricciones umbrales.

Proposición 3:

$$\min_{w, s_j \geq 0} s_j \quad (2.37)$$

Sujeto a

$$a_{j'}^T w_j \leq b_{j'} \quad j' = 1, \dots, J \quad (2.38)$$

$$a_j^T w_j + s_j \geq b_j \quad (2.39)$$

- *Divide y Conquista*: si bien a través de la proposición 3 se puede realizar una optimización en paralela de todos los casos, el problema en sí no deja de tener un gran tamaño. Se considera entonces el siguiente lema como enfoque de una división del problema propuesto para encontrar las restricciones umbrales.

Lema 1: si se encuentra que la restricción $j \in \tilde{\Gamma}$, donde $\tilde{\Gamma} \subseteq \Gamma$, es no-umbral resolviendo el problema de la proposición 2 para el conjunto de restricciones $\tilde{\Gamma}$, entonces la restricción j también es encontrada no-umbral al resolver el mismo problema para el conjunto entero de restricciones Γ .

Se debe notar que si $j \in \tilde{\Gamma}$ es restricción umbral, j no necesariamente es umbral para Γ . El corolario de este lema es que si se encuentra una restricción no umbral resolviendo el problema de la proposición 2 sobre un subconjunto de Γ , entonces también es no-umbral para el conjunto de restricciones completo. Así se propone el siguiente algoritmo:

- Paso 1: Particionar el conjunto completo de restricciones $\Gamma = \{\Gamma_1, \dots, \Gamma_M\}$ en bloques de restricciones computacionalmente manejables y resolver el problema planteado en la proposición 2 para cada uno de estos conjuntos. Estos pueden ser ejecutados en procesos paralelos.
 - Paso 2: Recombinar las restricciones umbrales generadas por la solución en bloques de restricciones computacionalmente manejables y resolver para cada uno de estos. Pudiendo ser ejecutadas en procesos paralelos también.
 - Paso 3: Repetir Paso 2 hasta que la solución de un problema (de la proposición 2) es obtenida o cuando se haya alcanzado un límite de reducciones previamente establecido.
- *Particionar*: los principales problemas del algoritmo anterior, es la determinación de la partición inicial y la forma en que las restricciones son recombinadas. Para esto, se particiona el conjunto de restricciones completo en subconjuntos $\Gamma = \{\Gamma_\pi, \Gamma_\lambda\}$, donde el subconjunto Γ_π corresponde al conjunto de los índices de las restricciones relacionadas al balance de potencia y los límites de generación, mientras que Γ_λ es el subconjunto de los índices correspondientes a los límites de flujo por línea. Las restricciones Γ_π aplican en cada uno de los posibles estados de contingencia. Por otro lado, las restricciones en Γ_λ no dependerán del estado de contingencia y pueden incluso ser particionadas de acuerdo a $\Gamma_\lambda = \{\Gamma_\lambda(0), \dots, \Gamma_\lambda(K)\}$, donde $\Gamma_\lambda(k)$ corresponde a todos los límites de flujo de línea asociada a la contingencia k . Asimismo se pueden agrupar las contingencias en vez de las líneas, tal que $\Gamma_\lambda = \{\Gamma_\lambda^1, \dots, \Gamma_\lambda^l\}$, donde Γ_λ^l agrupa todas las restricciones asociadas a la línea l para todos los estados de contingencias.

Partición basada en contingencias ($\Gamma_\lambda(k)$): esta es una partición bastante intuitiva debido al desacople natural que existe entre diferentes estados de contingencias. Sin embargo, luego de ser probado [6] en diferentes casos, muestra un comportamiento en el que las restricciones no-umbrales que va encontrando por pasos de iteración, es bastante pequeño, siendo necesario mayor tiempo para tener un conjunto de restricciones cercano o igual al umbral.

Partición basada en líneas (Γ_λ^l): esta partición es mucho más efectiva que la anterior porque genera relativamente un gran número de restricciones no-umbrales en cada paso. Este hecho radica principalmente en la naturaleza de las contingencias, ya que sólo un pequeño número de ellas llevan a las líneas sus límites de flujo.

2.3.3. MÉTODOS BASADOS EN SCOPF PROBABILÍSTICOS

2.3.3.1. MÉTODO DE KIRSCHEN ET AL. [9]

Debido a que, por un lado la carga computacional que conllevaría calcular la solución óptima de un problema SCOPF, y en su efecto PSCOPF, considerando todas las contingencias, es bastante alta, y por otro lado, que la misma solución (o bastante cercana) puede ser entregada considerando un menor número de estas contingencias, se realizan técnicas de disminución de las dimensiones del problema de flujo óptimo. Dentro de estas técnicas, la más básica y rápida de realizar es mediante un ordenamiento respecto de las probabilidades de estas contingencias o *fast sorting technique* (FST).

Kirschen utiliza esta técnica para su modelo de optimización del balance entre seguridad y economía para redes eléctricas [9]. Para esto considera tres pasos:

- Selección de estados

El conjunto de contingencias es seleccionado mediante el uso del algoritmo de FST [10], en donde los estados que se eligen para ser considerados, tienen una contribución significativa a los índices de seguridad. Estos se ordenan descendientemente de acuerdo a las probabilidades obtenidas para cada una.

- Análisis de estados

Para cada estado seleccionado por la FST se realizan dos análisis a partir de los cuales se puede cualificar los estados. El primero consiste en un flujo de potencia AC para examinar la condición de la red, siendo posible indicar si el estado considerado conllevaría a pérdidas de estabilidad de tensión si es que el flujo de potencia diverge, y por tanto, saber cuánta demanda puede llegar a ser desconectada, determinando la relevancia del estado. El segundo análisis considera el incumplimiento de los límites de operación para cada contingencia, donde las acciones correctivas debiesen disipar estos incumplimientos. Estas acciones son realizadas principalmente por los generadores, considerando tecnologías básicas en una red, agregando así a cada contingencia otro peso más a considerar en caso de que la carga a los generadores sea mayor.

- Limitación del espacio de estados

Considerando el análisis de cada contingencia, la FST puede obtener, de forma descendente mediante la probabilidad de los distintos estados, un ranking que resume las posibilidades de la red. Esta lista es considerada sólo hasta una probabilidad de corte, eliminando todos aquellos estados o contingencias que tengan menor probabilidad.

2.3.3.2. MÉTODO ITERATIVO (MORENO ET AL [1])

El presente método está basado en el modelo PSCOF, que fue explicado de forma general en la anterior sección 2.2.1.

El conjunto relevante de contingencias, desde el punto de vista probabilístico, es un subconjunto de contingencias que es necesario para mantener los niveles de rendimiento económico y de seguridad, siendo cercano, difícilmente igual, al encontrado considerando todas las contingencias del problema [7].

De acuerdo a esta proposición, el conjunto relevante de contingencias está determinado considerando un riesgo de cada contingencia individual (contenida en un conjunto inicial) sobre el despacho del sistema intacto dado, (valor de generación pre-falla y reservas en cada generación). Esto se lleva a cabo de acuerdo a los siguientes pasos iterativos:

1. Definir el conjunto relevante como un conjunto vacío.
2. Ejecutar el módulo operacional sobre la condición de operación objetivo cuando se consideran sólo las ocurrencias de las contingencias relevantes, obteniendo el despacho óptimo.
3. Asocia el riesgo respectivo a cada evento individual que está fuera del conjunto relevante de contingencias sobre la solución de despacho intacto obtenido en el paso anterior. La contingencia con mayor riesgo es identificada y agregada al conjunto relevante.
4. Suma el riesgo de todas las contingencias que están fuera del conjunto relevante. Si esta suma es menor que cierta tolerancia preestablecida por el usuario (en \$), el algoritmo se detiene, sino se vuelve al paso 2.

El proceso general descrito en los pasos iterativos anteriores es reflejado en la Figura 2.5. Aquí se puede ver que por definición (del procedimiento), las contingencias dejadas fuera del conjunto relevante no implicarían un mayor riesgo para la operación del sistema. De hecho, constantemente se va comparando la diferencia del costo total de operación y riesgo de corte de carga entre la optimización con todas las contingencias y las que sólo tienen las contingencias relevantes, es menor o igual a un valor de tolerancia dado. Por otro lado, la línea punteada indica que este algoritmo puede ser ejecutado dos veces seguidas usando los resultados del despacho final para refinar las probabilidades de las contingencias en una segunda ejecución del algoritmo. El conjunto de contingencias relevantes, también pueden ser utilizadas para catalogar la importancia de cada componente de la red de acuerdo a su contribución al riesgo del sistema.

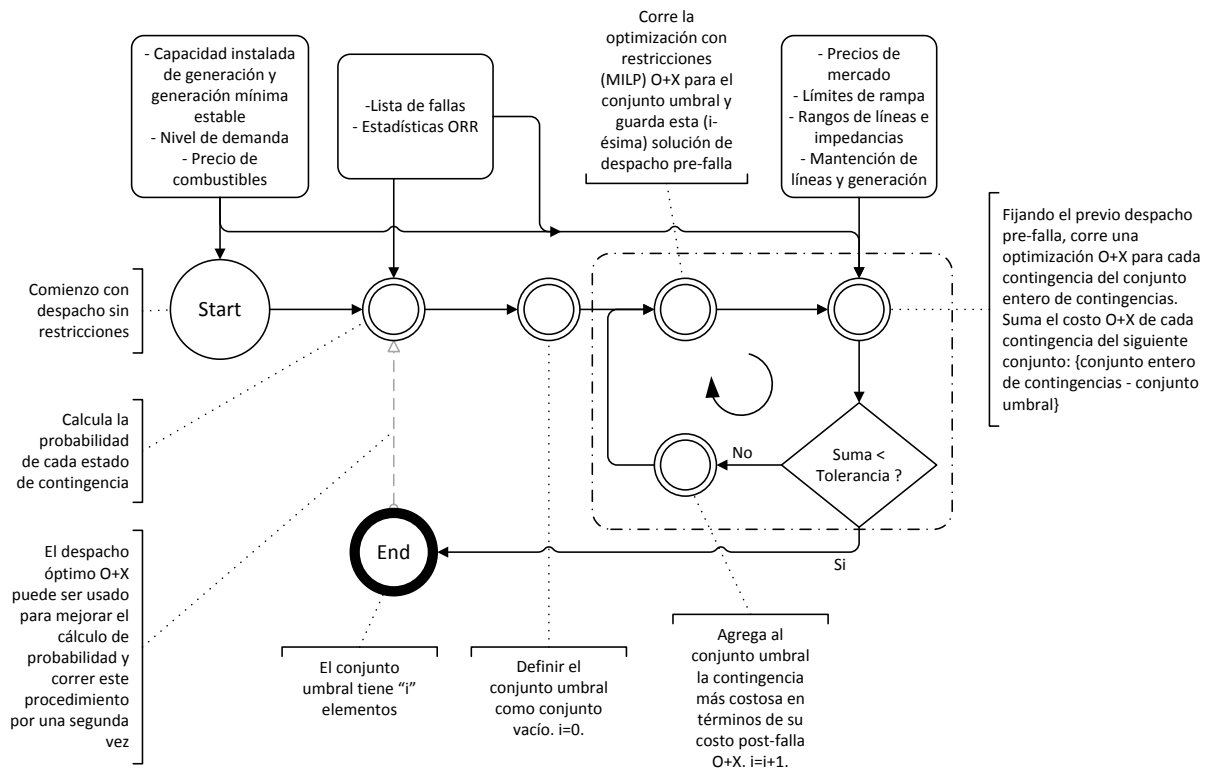


FIGURA 2.5. ESQUEMA GENERAL DE FLUJO DEL MÓDULO DE FILTRADO.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

El mejoramiento al filtro de contingencias se basa en un modelo ya planteado para problemas de despacho económico probabilístico, PSCOPF, por Moreno et al [1]. Si bien este modelo considera las probabilidades para efectos de despacho, en esta memoria sólo se quiere considerar el concepto del filtrado aplicado en él. En este modelo existe un filtro de estados que permite reducir las dimensiones del problema a optimizar, en particular del número de restricciones, este método de reducción fue explicado previamente en la sección 2.3.3.2, al igual que el modelo probabilístico respectivo en la sección 2.2.1. Se quiere entonces probar otro método que también filtre una red eléctrica antes de ser simulada para su despacho económico, de tal forma de analizar los resultados y así determinar qué método es mejor y si es que es posible realizar mejoras a los ya existentes. Bouffard et al propone el método expuesto en la sección 2.3.2.3, con el cual se quiere comparar los resultados del filtrado de Moreno et al. Finalmente, se tiene un tercer método aquí desarrollado, que realiza una variación del enfoque de eliminación de estados de Moreno et al, centrándose ahora en restricciones.

De esta forma se tendrán en total tres metodologías de filtrado previo para el despacho económico de potencia, además del modelo para el despacho económico de una red eléctrica elegida. Para estos se consideran dos redes inicialmente: la primera de 3 nodos en donde se prueban los funcionamientos de los métodos, y la segunda de 24 nodos en la que se ve el desempeño también de los tres métodos. La tercera red, de 300 nodos, se utiliza para comparar el mejor método elegido con el problema de despacho completo (sin filtración).

Cabe mencionar que entre los tres métodos, dos de ellos son mejoras a un algoritmo previo y el tercero es una transformación del existente. La mejora al método de Bouffard et al es complementaria y se basa en agregar una restricción que considera la función objetivo, entregando mayor información. La mejora al método iterativo de Moreno et al (método iterativo de Moreno por restricciones) se basa en un cambio conceptual (al tratar restricciones y no estados) y de enfoque (al basarse en problemas determinísticos y no probabilísticos), siendo una mejora sustituta al método previo. Finalmente la transformación realizada sobre el mismo método iterativo de Moreno et al (por estados) se debe a la aplicación de éste en un problema determinístico y no probabilístico, haciendo sólo un cambio de enfoque de este.

3.1. MODELO DE FLUJO ÓPTIMO DE POTENCIA IMPLEMENTADO

Dado que se quiere analizar la eliminación de estados o restricciones, la modelación de la red no es necesaria que sea simulada bajo flujos AC, es por esto que sólo se consideran flujos DC, simplificando las ecuaciones y el modelo de la red en sí, sin dejar de lado las restricciones conceptualmente necesarias para un problema SCOPF de este tipo. Todos los modelos de despacho económico ocupados para las pruebas y análisis son determinísticos, dado que se pone como meta un análisis de pre-contingencias, sin necesidad de conocer las probabilidades de fallas

de generación o líneas para post-contingencias. En este mismo sentido las contingencias consideradas sólo son las caídas de líneas, con criterio N-1. De aquí en adelante se considerará como “estado 1” al estado del sistema intacto (si ninguna contingencia), “estado 2” al estado del sistema bajo la caída de la línea 1, “estado 3” al estado del sistema bajo la caída de la línea 2, etc. Así, el modelo de despacho económico utilizado tanto para la red de 3 nodos como para la de 24 nodos, teniendo en cuenta la formulación expuesta en la sección 2.1, es el mostrado a continuación:

$$\min \sum_{g \in G} C_g \cdot P_g \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} P_i = \sum_{i \in I} D_i \quad (3.2)$$

$$P_{\min}(g) \leq P_g \leq P_{\max}(g), \quad \forall g \in G \quad (3.3)$$

$$P_i = \sum_{g \in G | g \text{ esté en nodo } i} P_g, \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

$$-F_{\max}(l) \leq \sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i - D_i)) \leq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \quad \forall s \in S \quad (3.5)$$

G :	Conjunto de generadores	P_i :	Potencia de la barra i
I :	Conjunto de barras	D_i :	Demanda en la barra i
L :	Conjunto de líneas	$P_{\min}(g)$:	Potencia mínima generador g
S :	Conjunto de estados	$P_{\max}(g)$:	Potencia máxima generador g
C_g :	Costo del generador g	$F_{\max}(l)$:	Capacidad máxima línea l
P_g :	Potencia del generador g	$h(l, i, s)$:	Factor PTDF

Gracias al método de Bouffard et al, se ve la posibilidad de mejorar el modelo de despacho económico en el sentido de requerir menos variables, aprovechando que se considerarán flujos DC para las simulaciones con restricciones lineales. Es por esto que se toma la idea de ocupar factores PTDF (ver sección 2.1.1.3 para la obtención de los flujos, no siendo necesario expresarlo como variable, sino que estarían determinados sólo por una expresión que incluye la diferencia entre inyecciones y retiros de potencia existentes en cada nodo de la red, y la ponderación por estos factores, que dependen de cada línea y cada nodo (eventualmente de cada contingencia en transmisión). Como la topología del sistema cambia de acuerdo a cada falla de línea, es necesario realizar un cálculo de la matriz PTDF para cada falla, teniendo así $N_l + 1$ matrices, donde N_l es el número de líneas en la red, más el caso del sistema intacto en donde todas las líneas están operando. Por otro lado, en la sección 8.2 de Anexos, se puede ver el código programado en *MATLAB* para la obtención de las matrices PTDF para cada estado.

La realización de las simulaciones se obtienen en *FICO Xpress Optimization Suite*. En términos simples, se trata de una plataforma para construir problemas de optimización que maneja

procesos con grandes cantidades de información, utilizando algoritmo de alto desempeño. Este software es utilizado dado que el modelo que se quiere trabajar está escrito en este lenguaje (*Xpress-Mosel*) e implementado en este software (*FICO*). Para poder establecer un problema, se pueden identificar tres bloques principales de la estructura en la programación: la primera en donde se declaran las variables y constantes, otra en donde se escriben las ecuaciones y restricciones del problema, y finalmente el tratamiento de los datos para su salida.

3.2. REDES DE PRUEBA

3.2.1. SISTEMA DE 3 NODOS

Inicialmente para poder realizar las pruebas necesarias de los métodos a utilizar, se toma una red de 3 nodos, 4 líneas, 3 generadores y 2 puntos de demanda como se ilustra en la Figura 3.1. Esta configuración fue extraída directamente del trabajo de Bouffard et al [6], con el sentido de poder comparar y asegurar que los resultados estuviesen correctos, por ende el modelo de despacho, y posteriormente el método para filtrado. La idea de tener un modelo simple al comienzo es poder plantear los problemas y solucionarlos a una pequeña escala, asegurando su funcionamiento, apoyándose también en análisis posteriores de posibles resultados de interés, y las ideas que pudiesen surgir de éste. Es así como aparecen las mejoras propuestas a los métodos que se explicarán más adelante.

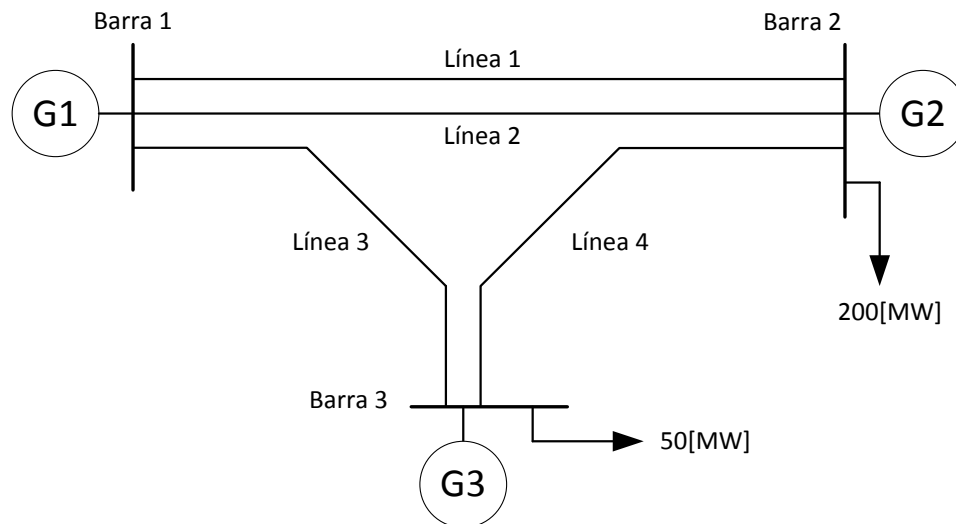


FIGURA 3.1. SISTEMA DE 3 BARRAS.

El modelamiento para esta red es determinístico con restricciones de seguridad, considerando la caída de una línea (N-1) por estado, falla o contingencia, teniendo entonces para este caso 5 estados en total: el estado del sistema intacto más un estado por cada línea en falla. Los parámetros de la red están indicados en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3. Se debe notar que sólo existe demanda en las barras 3 y 4, por lo que se puede intuir los sentidos de los flujos de potencia, y de esta forma determinar el sentido de flujo de las líneas explicitado en la Tabla 3.1.

Los alcances sobre el sistema son los siguientes:

- Transmisión sin pérdidas.
- Solución mediante flujo *DC*
- Sólo contingencias de líneas con criterio N-1.
- Despacho para una hora, por lo que la demanda es constante.

Línea	Desde	Hasta	Flujo máximo [MW]	Reactancia [p.u.]
1	1	2	100	0,1
2	1	2	100	0,1
3	1	3	60	0,1
4	3	2	80	0,1

TABLA 3.1. PARÁMETROS LÍNEAS SISTEMA 3 BARRAS.

Generador	Barra	Costo [\$/MWh]	Potencia mínima [MW]	Potencia máxima [MW]
1	1	20	100	250
2	2	40	20	100
3	3	50	0	50

TABLA 3.2. PARÁMETROS GENERADORES SISTEMA 3 BARRAS.

Barra	Demanda [MW]
1	0
2	200
3	50

TABLA 3.3. CONSUMOS POR BARRA SISTEMA 3 BARRAS.

Considerando las restricciones descritas, el modelo para el despacho de esta red poseería:

- 1 restricción de igualdad para la ecuación de balance.
- 6 restricciones de desigualdad para los límites de potencia de los generadores.
- 3 ecuaciones de igualdad para la potencia total por nodo (que para esta red sería igual a la potencia de cada generador).
- 8 restricciones de desigualdad para los límites de flujo de potencia por las líneas, donde cada conjunto de estas 8 restricciones es replicado para cada estado de contingencia más el sistema intacto, sin ninguna contingencia, siendo en total 40 restricciones para las líneas.

3.2.2. SISTEMA DE 24 NODOS

Con el fin de ver el desempeño de los métodos de filtración de contingencias previo al despacho, y asegurar sus funcionamientos, se configura una red de mayor tamaño considerando 24 nodos. Este modelo se extrajo de la IEEE, en particular se trabajó con el área 1 del IEEE RTS 96. Las especificaciones más detalladas pueden encontrarse en [11]. Si bien es un sistema para probar en particular método de despacho o *unit commitment*, se ocupa de forma determinística dado que la forma en que se aplicarán los métodos y la forma en que estos mismo operan lo permiten. Además es posible compararlo con otros resultados basados en el mismo sistema pero considerando en esos casos probabilidades en la modelación.

En esta red existen 38 líneas, que interconectan las barras y en particular pudiendo haber más de una línea entre dos barras. Además hay 32 generadores de distintas tecnologías y por ende costos de generación. Normalmente estos generadores se conectan en conjunto a una barra, teniendo así más de una fuente de generación por nodo. Por el lado de la demanda se tienen 17 centros de consumo de potencia repartidos entre distintas barras. La configuración se puede ver en la Figura 3.2.

Cabe notar que en esta red existen dos sectores principales: por un lado en el lado norte de los transformadores, existe una gran concentración de generación, mientras que al lado sur, hay principalmente consumos, de esta forma se podría intuir a grandes rasgos las direcciones de los flujos que existirían al solucionar el problema de despacho para esta red. Más aún, si se revisan los datos de generación en la Tabla 3.4, se puede notar que en el sector sur, la capacidad de los generadores es bastante menor a los del sector norte, pudiendo ser el sur un sector mayormente importador.

Para efectos de los flujos *DC*, los transformadores son modelados como una línea con su reactancia respectiva, con un límite de transmisión igual a la capacidad del transformador. De esta forma no es necesario considerar las diferencias de tensión existentes entre los sectores norte y sur.

Otra característica de esta red, es la particularidad de la barra 7. Como se ve en la Figura 3.2, es un sistema que si falla la línea que conecta la barra 7 y 8, queda como sistema aislado, donde, si no es capaz el generador de suministrar la demanda existente, el problema es infactible debido a que no existe otra forma de abastecer la demanda de este nodo. Sin embargo sólo basta con revisar que para esta barra la capacidad de generación, supera en 200[MW] a la demanda existente en el mismo. En este caso entonces, cabe la posibilidad de que de no existir generación suficiente en las barras restantes, al quedar la línea que conecta la barra 7 con 8 fuera de operación, también podría ser infactible el problema. Pero en el sistema restante existen más de 200[MW] para poder seguir operando sin contar con la generación de la barra 7, tal como se ve en los resultados de despacho para esta red en la sección 4.2.

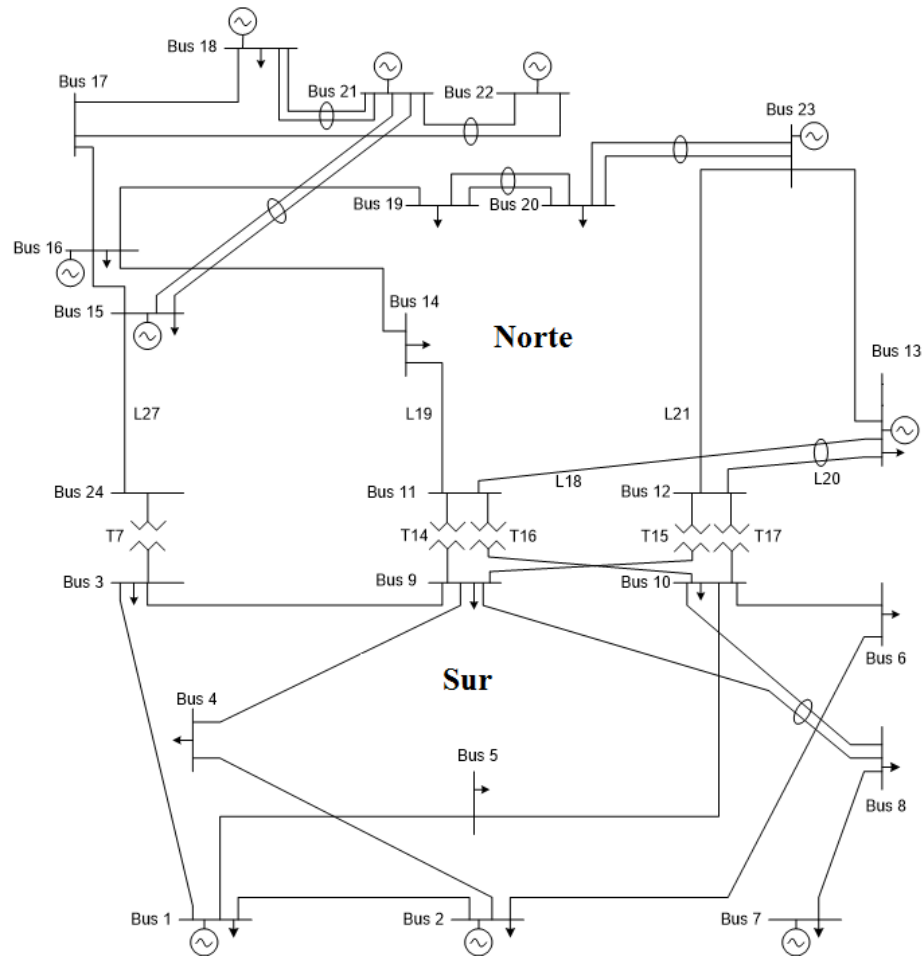


FIGURA 3.2. SISTEMA DE 24 BARRAS IEEE RTS.

Se debe mencionar que para efectos de las simulaciones realizadas fue necesario variar algunos parámetros dados del sistema, de esta forma mostrar mayor información en cuanto a lo que los métodos son capaces de realizar. En particular, los cambios provocan un desequilibrio de las cargas de la red de forma más evidente, entrando en conflicto con las capacidades de transmisión y con esto poder tener mayor cantidad de restricciones o estados que fuesen relevantes para determinar el despacho óptimo en el sistema intacto pre-contingencia.

Estos cambios fueron:

- Aumento de capacidad de generación generador 23 desde 400[MW] a 600[MW].
- Aumento de demanda en el nodo 2 desde 97[MW] a 297[MW].

En la Tabla 3.4 se pueden ver los datos de generación. El resto de los datos se encuentran disponibles en la sección 8.1 de Anexos en la Tabla 8.1, Tabla 8.3 y Tabla 8.3. Aquí se pueden encontrar las demandas por nodo, los límites de capacidad de las líneas, así como los nodos a los que están conectados y sus reactancias, datos importantes para el cálculo de las matrices PTDF que representan la proporción flujo existente en la red para cada estado o contingencia.

Generador	Barra	P min [MW]	P max [MW]	Costo [€/MWh]
1; 2	1	0	20	150
3; 4	1	0	76	50
5; 6	2	0	20	150
7; 8	2	0	76	50
9 - 11	7	0	100	150
12 - 14	13	0	197	150
15 - 19	15	0	12	150
20	15	0	155	50
21	16	0	155	50
22	18	0	400	0
23	21	0	600	0
24 - 29	22	0	50	80
30; 31	23	0	155	50
32	23	0	350	50

TABLA 3.4. GENERACIÓN SISTEMA 24 NODOS (POR GENERADOR).

3.2.3. SISTEMA DE 300 NODOS

Se presenta a continuación una red mediana de 300 nodos para efectos de comparación entre el mejor método elegido y el problema de despacho completo. Este modelo fue desarrollado por la IEEE *Test Systems Task Force* y fue extraído desde la página web de la Universidad de Washington [12], además de apoyarse en los archivos para la plataforma *MATLAB*, para el mismo modelo, de la Universidad de Edimburgo [13], desde donde se extrajeron los costos de combustible, manejándose en pequeña medida para obtener mayor variabilidad de estos. Esta red cuenta con 300 nodos, 69 generadores y 411 líneas de transmisión, mostrándose en la Figura 8.3 de la sección 8.2 de Anexos una vista general de esta red. Esta posee una capacidad de generación de 32.678[MW] y una demanda de 23.525[MW], además todas las líneas poseen una capacidad máxima de transmisión de 9.900[MW]. De esta red se extrajo todo lo necesario para el problema de flujo de potencia óptimo DC.

3.3. MEJORA AL MÉTODO DE BOUFFARD ET AL APLICADO A UN PROBLEMA DETERMINÍSTICO

La metodología que plantea Bouffard et al [6] se basa en que la única variable es la potencia. Justamente por esto fue que se modela el despacho económico mediante factores PTDF dejando sólo la variable de potencia. Sin embargo, en el *paper*, el costo de generación es por barra al igual que la potencia generada. Dado que se quiere varias generaciones por barra, se realiza un pequeño cambio mostrado a continuación en el modelo de despacho de una red, reemplazando la potencia por barra por una sumatoria de las generaciones en dicha barra, permitiendo así también considerar el costo por generador.

$$\min \sum_{g \in G} C_g \cdot P_g$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} P_g \right) = \sum_{i \in I} D_i$$

$$P_{\min}(g) \leq P_g \leq P_{\max}(g), \quad \forall g \in G$$

$$-F_{\max}(l) \leq \sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} P_g \right) - D_i \right) \leq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \quad \forall s \in S$$

G :	Conjunto de generadores	D_i :	Demanda en la barra i
I :	Conjunto de barras	$P_{\min}(g)$:	Potencia mínima generador g
L :	Conjunto de líneas	$P_{\max}(g)$:	Potencia máxima generador g
S :	Conjunto de estados	$F_{\max}(l)$:	Capacidad máxima línea l
C_g :	Costo del generador g	$h(l, i, s)$:	Factor PTDF
P_g :	Potencia del generador g		

Esta formulación sin lugar a dudas conlleva a una mayor carga de cálculo, dado que por barra ahora se tiene un conjunto de variables de generación, consumiendo mayor memoria para guardar los valores de sumas, además de manejar una mayor cantidad de variables debido a que el número de generadores para el caso de la red de 24 nodos es de 32. Sin embargo, esto nos da la libertad de tener una red más real con costos de generación independientes de un generador a otro para el despacho, incluso si estos están conectados a la misma barra.

Como se explicó en la sección 2.3.2.3, este método en términos generales, además de separar las igualdades en desigualdades, pone a prueba los límites superiores e inferiores de éstas mediante la variable S_j , convirtiéndose en una restricción umbral si no existe un valor mayor a cero que haga sobrepasar positivamente el límite superior de la restricción, o negativamente el límite inferior. Aparte de esto, para que el valor de la variable $W_{g,j}$ (que vendría siendo el despacho de potencia) sea factible, cada vector $W_{g,j}$, para un j dado, es probado en el método, debiendo cumplir los límites de la configuración de la red (demanda, límites de generación y transmisión).

Lo anterior puede ser entendido de mejor manera mediante el diagrama de flujo de este método mostrado en la Figura 3.3, que es lo que se hace en la simulación. En esta figura, se muestran a la izquierda los datos necesarios para poder correr el programa. El parámetro principal que se considera es el número de restricciones (J), el cual se obtiene analizando el número de restricciones del modelo de despacho original para el sistema en cuestión. Este número permite iterar sobre todas las restricciones (filas) del problema. Además de esto son necesarios los datos del sistema mismo, como límites de capacidad, costos, conexiones, etc., que son extraídos de una planilla en *Excel* previamente formulada dada la red. Además teniendo en cuenta la formulación

del problema mediante los factores PTDF, se deben ingresar una matriz PTDF por estado, dado que al fallar una línea cambia la topología y por ende la matriz PTDF, de esta forma se tendrán un número de matrices igual al número de líneas más uno, que sería el estado sin contingencia, es decir, el sistema intacto. Esta matriz es calculada previamente en *MATLAB*, exportando los resultados a un archivo de datos (*.dat*) para que pueda ser leído por el programa *FICO*.

El método tiene dos principales bloques: el bloque A y el bloque B. El bloque A, es en donde se ve la importancia de la restricción para el problema, determinando si es umbral o no. El segundo bloque se encarga de asegurar que un vector $W_{g,j}$ dado sea factible para todas las restricciones. Este vector es extraído desde el bloque A, desde cada restricción j , ya que es en éste en donde se quiere encontrar un vector $W_{g,j}$ que haga en lo posible que la restricción sea umbral, tal que el valor de S_j sea lo más pequeño posible, asegurando que la restricción es umbral si es igual a 0. Así se tienen entonces J posibles valores para el vector $W_{g,j}$ donde cada uno es probado en el bloque B para ver su factibilidad respecto a todas las restricciones. Se debe notar que por lo tanto el algoritmo tiene $J + J^2$ restricciones. Al terminar de recorrer todas las restricciones, se entregan las que cumplen con que $S(j) = 0$, es decir, las restricciones umbrales.

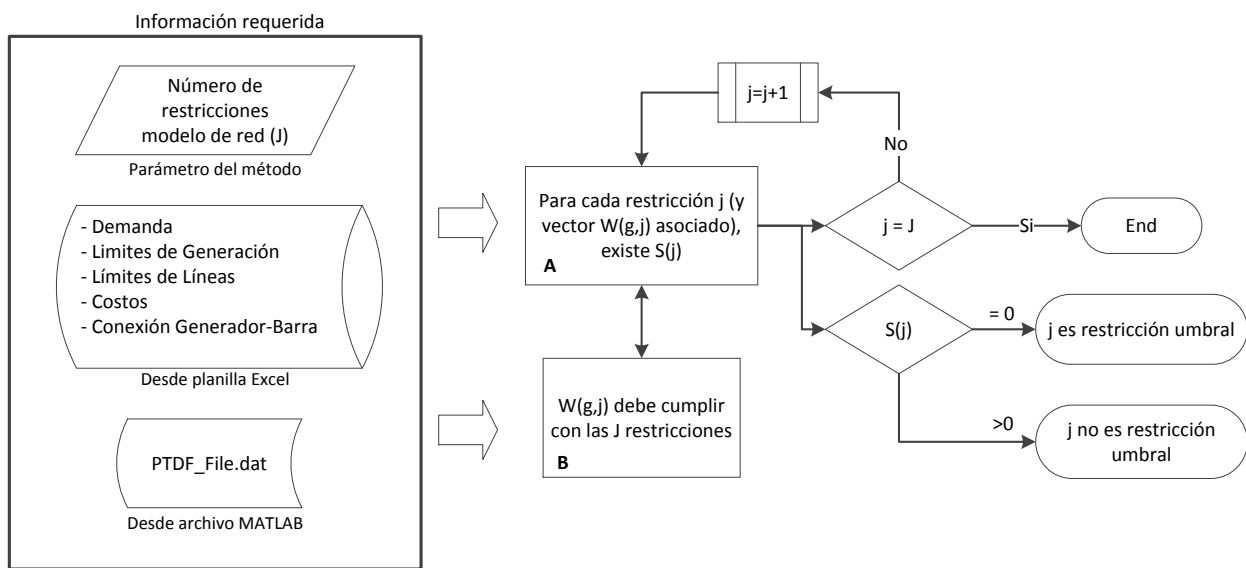


FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DEL MÉTODO DE BOUFFARD.

Desde el modelo de red expuesto al comienzo de esta sección, la formulación del método de Bouffard et al para el caso en cuestión es el siguiente:

$$\min \sum_{j=1, \dots, J} S_j$$

Sujeto a:

- Activación umbral para ecuación de balance:

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,1} \right) + S_1 \geq \sum_{i \in I} D_i$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,2} \right) - S_2 \leq \sum_{i \in I} D_i$$

- Activación umbral para límites de generación:

$$W_{g,j} + S_j \geq P_{\max}(g), \quad \forall g \in G$$

$$W_{g,j+1} - S_{j+1} \leq P_{\min}(g)$$

Donde $j = 3, 5, \dots, 2 \cdot N_{\text{generadores}} + 1$.

- Activación umbral para límites de líneas:

$$\sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j} \right) - D_i \right) + S_j \geq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \forall s \in S$$

$$\sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j+1} \right) - D_i \right) - S_{j+1} \leq -F_{\max}(l)$$

Donde $j = 2 \cdot N_{\text{generadores}} + 3, 2 \cdot N_{\text{generadores}} + 5, \dots, 2 \cdot N_{\text{generadores}} + 2 \cdot N_{\text{estados}} \cdot N_{\text{lineas}} + 1$.

- Factibilidad de vector para toda la red:

$\forall j' = 1, \dots, J$, se tiene que:

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j'} \right) \leq \sum_{i \in I} D_i$$

$$\sum_{i \in I} \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j'} \right) \geq \sum_{i \in I} D_i$$

$$W_{g,j'} \leq P_{\max}(g), \quad \forall g \in G$$

$$W_{g,j'} \geq P_{\min}(g)$$

$$\sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j'} \right) - D_i \right) \leq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \forall s \in S$$

$$\sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot \left(\sum_{g \in G \mid g \text{ está en nodo } i} W_{g,j'} \right) - D_i \right) \geq -F_{\max}(l)$$

J:	Número de restricciones para despacho	$W_{g,j}$:	Variable de potencia generador g en restricción j
I:	Conjunto de barras	D_i :	Demanda en la barra i
G:	Conjunto de generadores	$P_{max}(g)$:	Potencia máxima generador g
L:	Conjunto de líneas	$P_{min}(g)$:	Potencia mínima generador g
S:	Conjunto de estados	$F_{max}(l)$:	Capacidad máxima línea l
S_j :	Variable slack de la restricción j	$h(l,i,s)$:	Factor PTDF

Cabe notar que el número total de restricciones es tal que $J = 2 + 2 \cdot N_{generadores} + 2 \cdot N_{estados} \cdot N_{lineas}$, el factor 2 refleja la separación en desigualdades (límites superiores e inferiores), siendo J el número total de restricciones del modelo de despacho pre-contingencia escrito mediante desigualdades.

Dado que los vectores $W_{g,j}$ representan valores de potencia, se piensa que es posible que, agregando una sola restricción, se puede obtener el despacho óptimo de la red, aprovechando que el problema busca los vectores tal que el valor de S_j sea el mínimo, y que tal vector sea además factible con todas las restricciones, es decir, factible en el sistema. Es por esto que se opta por agregar la restricción mostrada a continuación. Se debe notar que el número de restricción J cambia su valor a $J = 3 + 2 \cdot N_{generadores} + 2 \cdot N_{estados} \cdot N_{lineas}$.

- Activación umbral para despacho óptimo:

$$\sum_{g \in G} (C_g \cdot W_{g,j}) - S_j \leq 0$$

Donde $j = 2 + 2 \cdot N_{generadores} + 2 \cdot N_{estados} \cdot N_{lineas} + 1$

- Factibilidad de vector:

$$\sum_{g \in G} (C_g \cdot W_{g,j'}) \geq 0, \quad \forall j' = 1, \dots, J$$

Luego de esta formulación es posible realizar las simulaciones para un sistema dado, para así obtener como resultado las restricciones umbrales de la red, dada las contingencias en líneas con criterio N-1.

3.4. TRANSFORMACIÓN DEL MÉTODO DE MORENO ET AL (POR ESTADO) PARA SER APLICADO A UN PROBLEMA DETERMINÍSTICO

Basándose en el método de filtrado existente en el PSCOPF explicado en [1], se formula el presente método que filtra los estados de contingencia, es decir, el conjunto de restricciones que representan una contingencia. Para el caso de estudio que se quiere ver, la contingencia es la caída de una línea, mediante criterio N-1, en la red considerada, por tanto el conjunto de restricciones serían todas las restricciones de límites de transmisión bajo la falla respectiva de una

línea. De esta forma se busca el conjunto de estados que aseguren un despacho óptimo pre-contingencia, siendo necesario encontrar los estados más relevantes.

El concepto de la búsqueda de estados relevantes, para el modelo PSCOF desde donde se extrae el método, radica en realizar un ranking de los estados más costos, es decir, el que incurra en un mayor gasto dado la desconexión de consumos entre otros puntos. Es esta idea la que se quiere aplicar en el presente método, considerando que se realizaría un filtro previo a un problema SCOPF determinístico bajo las consideraciones explicadas en la sección 3.4. En este sentido dado que se trabaja sólo con contingencias de líneas, el costo respectivo asociado de la demanda no suministrada sería justamente la cantidad de potencia no suministrada, por lo que un estado que presente una cantidad de potencia no suministrada mayor a otro, equivalente a la potencia no transmitida, será un estado más relevante. En la práctica, para realizar el despacho óptimo pre-contingencia, se deben considerar todos aquellos estados en que existe demanda no suministrada, dejando fuera del conjunto aquellos estados en los que el sistema es capaz de abastecer todos los puntos de consumo, ya que no representan un conjunto importante a considerar para la búsqueda de este despacho.

Con esto el método de filtro de contingencias considera un despacho óptimo pre-contingencia que se encuentra bajo un conjunto de estados (conjunto de un conjunto de restricciones) que representan el riesgo de no abastecer demanda que, en este caso, es el foco principal del problema, teniendo como objetivo lograr un despacho que abastezca la totalidad de la demanda. Éste sería entonces un proceso iterativo donde, a medida que se van agregando estados, se calcula el despacho óptimo para estos estados considerados, y así buscar el próximo más costos fijando el despacho que se tiene hasta el momento, y agregarlo al conjunto de estados relevantes. Todo este proceso hasta encontrar que no existe estado con un costo considerable.

Lo anterior se refleja en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.4, que representa el algoritmo programado para aplicar el método de filtración por estado a una red determinada. Para la primera iteración de este algoritmo, se comienza generando un conjunto inicial de estados en el que sólo se considera el sistema intacto ($s = 1$), es decir, los límites de transmisión de todo el sistema. Dado este conjunto de la primera iteración se calcula el despacho de potencia respectivo. Para el despacho se deben conocer los datos del sistema, al igual que para el método de Bouffard et al, siendo necesario el archivo de datos *.dat* de las matrices PTDF, así como la planilla en *Excel* que describe a la red sobre la cual se quiere trabajar (límites de capacidad, consumos, etc.). Este bloque arrojaría entonces el despacho óptimo dado el conjunto de estados relevantes para la iteración respectiva, el cual sería necesario para calcular la demanda no suministrada de los otros estados, en el bloque de “Costos”, en donde también son requeridos los datos de la red. Este bloque entregaría los costos de todos los estados que se deben considerar para la próxima iteración, donde en el paso siguiente es encontrado el estado con mayor costo y, de ser mayor a cierta tolerancia, es agregado al conjunto de estados relevantes a considerar en la próxima iteración, volviendo al bloque de despacho y realizando todo el proceso nuevamente. En el momento en que se encuentre que para cierto despacho óptimo de potencia no existe un costo

mayor a la tolerancia considerada, el algoritmo finaliza y se entrega el conjunto de estados relevantes considerados hasta esa iteración.

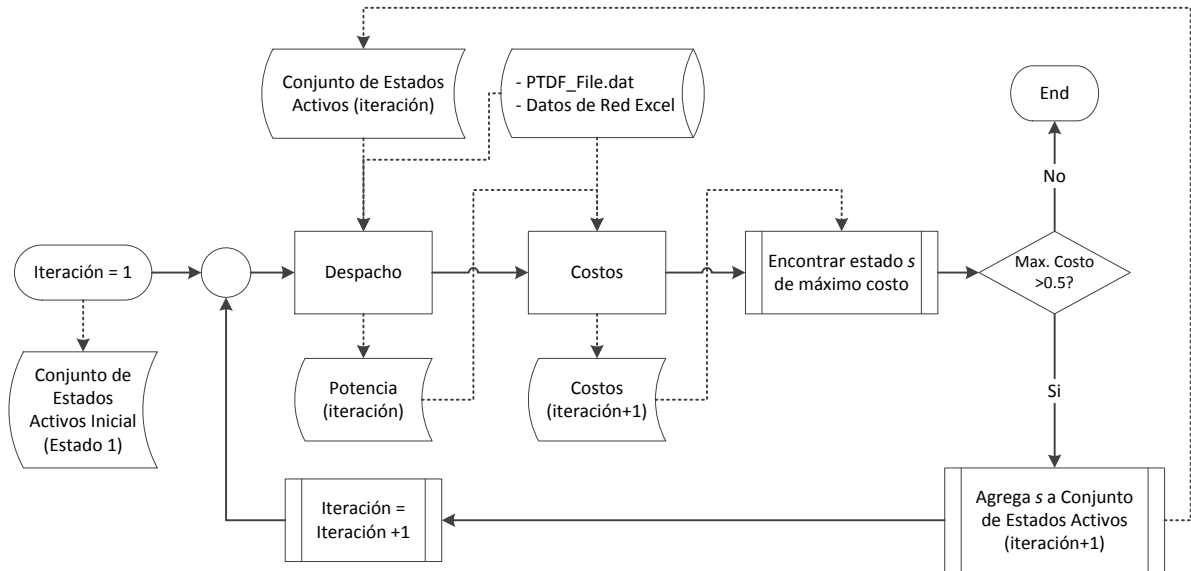


FIGURA 3.4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MORENO POR ESTADO.

La formulación puede ser representada por los dos bloques más importantes que se realizan en el problema, siendo el despacho y la obtención de costos. Estos contienen una optimización como objetivo de tal forma de realizar su tarea. Por un lado el bloque de despacho minimiza los costos por potencia despachada, un problema normal de SCOPF considerando los estados activos en la iteración, tal como se explicó anteriormente. Por otro lado, ya que existe una variable de costo por línea, el costo del estado sería la suma de todas estas variables asociadas a ese estado, de esta forma, el bloque de costos, minimiza la suma de las variables.

Para el despacho se considera la formulación expuesta en 3.1, mediante las expresiones (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) y (3.5). La diferencia existente está en la consideración del conjunto de estados relevantes, por lo que la expresión (3.5) cambiaría a:

$$-F_{\max}(l) \leq \sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i - D_i)) \leq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \quad \forall s \in S \mid s \in C_{\text{iteración}}$$

Donde $C_{\text{iteración}}$ es el conjunto de estados relevantes para la iteración respectiva, dado que en cada una el conjunto varía al agregar estados. Notar que este conjunto sólo va creciendo en cantidad, no existiendo ningún orden, dependiendo sólo del que tenga el mayor costo. Por “estado 1” se hace referencia al sistema intacto (sin fallas), “estado 2” al sistema con falla en la línea 1, “estado 3” falla en la línea 2, etc.

Para este caso del bloque de costos, la obtención de demanda no suministrada, se formula mediante la función objetivo y restricciones siguientes:

$$\min \sum_{l \in L, s \in S} O(l, s)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i)) - O(l, s) &\leq F_{\max}(l) \\ \sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i)) + O(l, s) &\geq -F_{\max}(l) \end{aligned}, \forall l \in L, \forall s \in S$$

Agregando al algoritmo la siguiente instrucción para poder obtener el costo $O'(s)$ de un estado s , con el costo de cada línea $O(l, s)$:

$$O'(s) = \sum_{l \in L} O(l, s), \forall s \in S$$

Desde esta optimización se obtendrían entonces el valor de $O'(s)$ para todos los estados s . Se debe notar que en este paso, el valor de potencia está fijo, siendo obtenido desde el proceso de despacho dado los estados relevantes, quedando como variables sólo los $O(l, s)$ que, en conjunto de todas las líneas mediante la representación de $O'(s)$, reflejando la demanda no suministrada de un estado. Posterior a este bloque, el algoritmo sólo se encarga de buscar el máximo valor de $O'(s)$ dentro del conjunto de costos obtenidos, agregando el estado asociado s al conjunto $C_{iteración+1}$ a ser considerado en la próxima iteración, en particular por el despacho.

El costo máximo es comparado a cierta tolerancia, debido a que el algoritmo contiene valores numéricos decimales y por ende no valores perfectamente precisos, pero en teoría esta tolerancia debiese ser 0. Finalmente el algoritmo se detiene al encontrar que el próximo estado a considerar tiene un costo menor a la tolerancia, saliendo del *loop* y devolviendo el conjunto de estados considerados en el bloque de despacho hasta esa iteración.

3.5. MEJORA AL MÉTODO DE MORENO ET AL (POR RESTRICCIÓN) APLICADO A UN PROBLEMA DETERMINÍSTICO

El tercer método sobre el cual se realizan pruebas es bastante parecido al anterior de la sección 3.4, pero con una pequeña variación en el enfoque de obtención de costos, lo que cambia el concepto en sí del método. Si bien en el método anterior se buscaba conocer un conjunto de estados relevantes, para este caso se quiere lograr conocer un conjunto de restricciones relevantes. Por tanto la idea es encontrar las restricciones para las cuales el costo asociado a estas sea el mayor, y así poder establecer este conjunto. El costo ya no recae en la demanda no suministrada por estado, sino que conceptualmente ahora se refiere más bien al flujo no suministrado por cada una de las líneas, es decir, la diferencia de flujo por sobre la capacidad de

una línea. Si bien la formulación es casi la misma, se logra diferenciar en cuanto a la idea que existe detrás de los costos de las restricciones.

Así, para una red dada, se tendría un conjunto de restricciones referentes a los límites de capacidad superiores o inferiores de una línea, para el flujo en una u otra dirección, y pudiendo no pertenecer necesariamente a restricciones del mismo estado. Éste se encontraría al fijar la potencia óptima despachada en cierta iteración, para luego encontrar la restricción que es más violada, reflejándose en el valor más alto de la variable que representa el sobrepaso de flujo en esa restricción, para todas las restricciones. Esta se agregaría al conjunto y se volvería a encontrar otro despacho, continuando iterativamente el proceso. Se detendría cuando para cierto despacho, los costos de las restricciones no son considerables, entonces se obtendría el conjunto de restricciones relevantes.

El diagrama de flujo de la Figura 3.5, muestra el proceso para obtener este conjunto, siendo casi idéntico al proceso que se sigue para obtener el conjunto de estados relevantes. Se comienza por crear un conjunto vacío de restricciones, por lo que el despacho para la primera iteración no consideraría restricciones de líneas, siendo un despacho uninodal dentro de las capacidades de los transformadores. Es evidente que este despacho necesita los datos de la red para poder encontrar la solución, además de los valores de las matrices PTDF contenidas en el archivo *.dat*, aunque no sean necesarias para la primera iteración. Obtenido este primer despacho uninodal, el siguiente paso es obtener los costos de las restricciones, es decir, los flujos excedentes por las líneas. Estos flujos excedentes pueden ser tanto en una como en otra dirección, por lo que se tiene una variable para cada dirección, línea y estado. En este punto se comparan todos estos excesos de transmisión eligiendo el mayor, que está asociado a esta dirección, línea y estado, agregando esta restricción al conjunto de restricciones relevantes para la próxima iteración, y ahora volviendo a iterar pero con una restricción activa. Igualmente se considera una tolerancia dado los valores numéricos decimales, de tal forma de poder discriminar. Todo el proceso finalizaría al no encontrar más líneas que, para cierto estado y dirección, incurran en un sobrepaso de su capacidad dado el despacho de la iteración en ese momento. Con esto se entregaría las restricciones que fueron activadas hasta esa iteración.

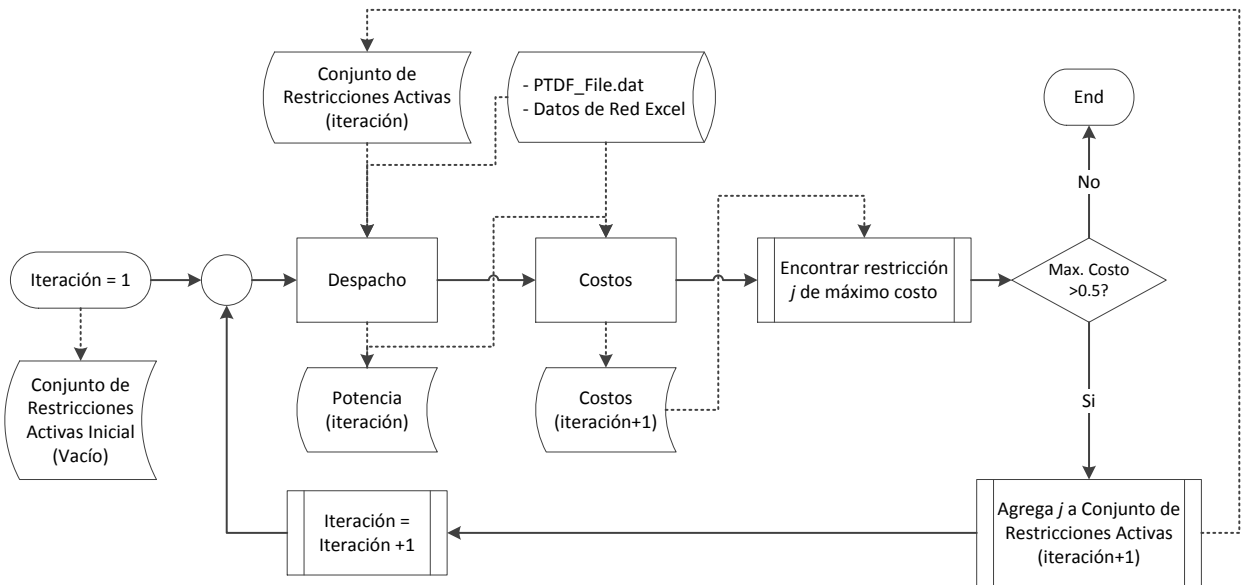


FIGURA 3.5. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MORENO POR RESTRICCIÓN.

En términos de formulación sólo existen dos bloques importantes, tal como se puede ver en la Figura 3.5, el bloque de despacho y el de costos. El bloque de despacho se implementa en el modelo planteado con las expresiones (3.1), (3.2), (3.3) y (3.4). La expresión (3.5) es levemente intervenida para activar sólo la desigualdad que nos interesa de manera que para una línea y estado dado, se tendría lo siguiente:

$$\sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i - D_i)) \leq F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \quad \forall s \in S, \quad \text{tal que } C_{l,s,\max} = 1$$

$$\sum_{i \in I} (h(l, i, s) \cdot (P_i - D_i)) \geq -F_{\max}(l), \quad \forall l \in L, \quad \forall s \in S, \quad \text{tal que } C_{l,s,\min} = 1$$

El conjunto $C_{l,s,\{\max,\min\}}$ es quien refleja la activación (1) o no (0) de la restricción correspondiente, pudiendo así establecer una restricción más para el problema de optimización del despacho económico de la red.

El bloque de costos por otro lado, se encarga de establecer el mínimo flujo excedente posible para cada restricción. Esto lo hace mediante una optimización de las variables asociadas a cada dirección, línea y estado, tal como se muestra en la siguiente formulación:

$$\min \sum_{l \in L, s \in S, \alpha \in \{\min, \max\}} O(l, s, \alpha)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i) \right) - O(l, s, \max) &\leq F_{\max}(l) \\ \sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i) \right) + O(l, s, \min) &\geq -F_{\max}(l) \end{aligned}, \quad \forall l \in L, \forall s \in S$$

Siendo las variables $O(l, s, \alpha)$ únicas para cada restricción, que representan el costo de ella siendo una especie de variable *slack*, se logra tener independencia de las restricciones y por ende ver por separado cual es más relevante que otra de acuerdo al mayor valor de esta variable asociada. Esta optimización considera el despacho encontrado previamente, para las restricciones consideradas hasta esa iteración, siendo las potencias de cada nodo un dato para esta optimización. Lo que conceptualmente se consideraría de esta forma es ver el sistema actual con su generación, y qué problemas está arrojando en cuanto a transmisión, así se “modifica” el tramo, agregando la restricción al problema de despacho. Así se abarca la totalidad de las líneas que generan problemas en transmisión, conteniendo implícitamente al resto de las líneas que no se consideran para el problema de despacho de la red.

3.5.1. MÉTODO POR RESTRICCIÓN EN TRANSMISIÓN Y GENERACIÓN

Por otro lado, para efectos de desarrollo y de comparación de este método con el de Bouffard et al., se generó una derivación de éste considerando sobrepasos de capacidad tanto en líneas como en generación, donde el sistema sigue considerando fallas sólo en transmisión. Es decir que en este nuevo algoritmo también existen variables *slack* (o de holgura) en las restricciones, pero ahora en las de capacidad de generación y en la capacidad de transmisión de las líneas, entregando un conjunto de restricciones relevantes para la totalidad de las restricciones de capacidades del problema (restricciones de desigualdad), que son las que permiten la flexibilidad de las variables de potencia en el problema de despacho. Por lo tanto, al bloque de costos se formularía como sigue:

$$\min \sum_{g \in G, l \in L, s \in S, \alpha \in \{\min, \max\}} (O(l, s, \alpha) + O(g, \alpha))$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} P_g - O(g, \max) &\leq P_{\max}(g) \\ P_g + O(g, \min) &\geq P_{\min}(g) \end{aligned}, \quad \forall g \in G$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i) \right) - O(l, s, \max) &\leq F_{\max}(l) \\ \sum_{i \in I} \left(h(l, i, s) \cdot (P_i^* - D_i) \right) + O(l, s, \min) &\geq -F_{\max}(l) \end{aligned}, \quad \forall l \in L, \forall s \in S$$

De esta forma mediante este método se lograría obtener el problema reducido de despacho con un conjunto de restricciones relevantes en generación (límites de capacidad) y transmisión (límites de capacidad y estados de fallas).

3.5.2. MÉTODO DE DESPACHO ITERATIVO

Finalmente, dentro del marco de la filtración de restricciones, se desarrolló una metodología para el caso de filtrado de restricciones de transmisión dentro de un despacho iterativo único, este método es nombrado Método de Despacho Iterativo y resume las características de todas las metodologías anteriores para encontrar un único algoritmo que tenga por objetivo hacer más eficiente, en términos de tiempo, la búsqueda de las restricciones relevantes y por consiguiente la obtención de la solución del despacho. En particular este se aplica sobre una red de 300 nodos expuesta anteriormente en la sección 3.2.3. La idea principal del funcionamiento puede verse en la Figura 3.6, donde todo el proceso se realiza en sólo un archivo maestro único, evitando la constante exportación e importación de datos entre maestro y esclavo, lo que conlleva a alcanzar menores tiempos de ejecución del algoritmo, introduciendo así una primera mejora a los métodos explicados hasta este punto.

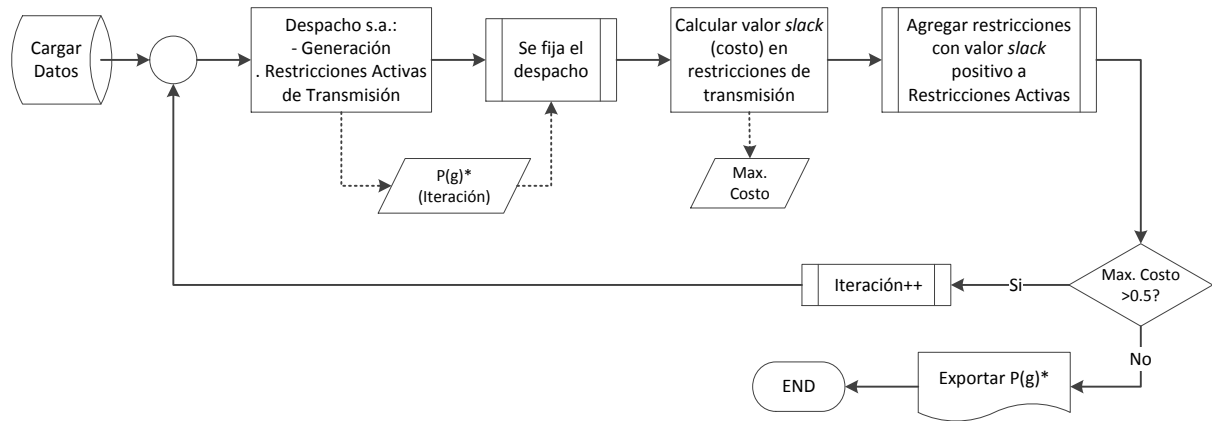


FIGURA 3.6. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO POR RESTRICCIÓN A 300 NODOS.

Se debe mencionar que el cálculo de los valores de las variables $slack O(l,s,max/min)$ se realiza mediante una resta simple entre el valor actual del flujo con la potencia despachada fija y el valor del flujo máximo por dicha línea, tal como muestran la siguiente formulación.

$$\begin{aligned}
 si F(l,s) \geq F_{\max}(l) &\Rightarrow O(l,s,max) = F(l,s) - F_{\max}(l) \\
 si F(l,s) \leq -F_{\max}(l) &\Rightarrow O(l,s,min) = -F(l,s) - F_{\max}(l)
 \end{aligned}$$

Donde

$$F(l,s) = \sum_{i \in I} (h(l,i,s) \cdot (P_i^* - D_i))$$

Esto introduce la segunda y más significativa mejora a los métodos anteriores, ya que de esta forma evita el cálculo del costo de las restricciones mediante la minimización, no siendo necesario un modelo de optimización para ellos. Esto conlleva a poder tener este proceso en un solo modelo (el de despacho iterativo) o archivo, no siendo necesaria la llamada recursiva a los datos.

4. FUNCIONAMIENTO, VALIDACIÓN Y RESULTADOS

Al tener los datos y algoritmos del capítulo anterior, es posible realizar todas las simulaciones necesarias para obtener los resultados que se mostrarán en este capítulo. Como se mencionó esto se realiza mediante el software *FICO Xpress*, y los resultados son tratados para que puedan ser mostrados en el “output screen” de este, así como para ser exportados a Excel o a archivos de datos, dependiendo del caso. Las capacidades del computador utilizado para las redes de 3 y 24 nodos son: CPU de 3,1GHz Intel Core i7, con 16 GB de RAM, 14 GB de ellos disponibles. Por otro lado, para la red de 300 nodos se ocupa un servidor con: CPU de 2.4 GHz Intel Xeon (de 12 procesadores físicos), con 32 GB de RAM, 28 GB de ellos disponibles.

Para exponer estos resultados obtenidos, dado que se cuenta con dos sistemas eléctricos, uno pequeño y otro mediano, se presentarán primero los resultados para el sistema de 3 nodos en una sección, mientras que para el sistema de 24 nodos, los resultados serán expuestos en distintas secciones dado que ameritan una exposición un tanto más profundo, dividiéndose en cada uno de los métodos probados. En particular para el método iterativo de Moreno et al, se separará por un lado en la transformación realizada al método extraído del modelo PSCOPF, representando el filtrado por estados, y por otro lado en el la mejora al método representando el filtrado por iteraciones.

4.1. ILUSTRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MÉTODOS DE FILTRADO A RED DE 3 BARRAS

Para el sistema pequeño de 3 nodos se realizó inicialmente el despacho económico con restricciones de seguridad, en otras palabras, para el sistema completo. En este caso existe un sólo generador por barra, por lo que potencia por generador y por barra son iguales (lo cual no ocurre para el sistema de 24 nodos). Se debe tener en cuenta además que el sistema simulado considera balance total, límites de generación y límites de transmisión. Estos últimos a su vez se repiten por cada estado o contingencia en que se encuentre el sistema, y para el caso de estudio sería cada una de las líneas caídas, por tanto se tendría un conjunto para el sistema intacto (con todas las líneas operando) y cuatro conjuntos de restricciones para cada una de las fallas. Se hace referencia como “estado 1” al sistema intacto, “estado 2” al sistema en que la línea 1 está en falla (inoperativa), “estado 3” al sistema en que la línea 2 está en falla, etc. Los resultados obtenidos para el despacho económico bajo estas consideraciones es el mostrado en la Tabla 4.1.

Generador	Barra	Potencia [MW]
1	1	160,00
2	2	59,99
3	3	30,01

TABLA 4.1. DESPACHO CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD PARA SISTEMA DE 3 BARRAS.

El valor total del despacho es de \$7.100. En la Figura 4.1 es posible ver la dinámica *DC*, que se daría con los flujos existentes, estos resultados son obtenidos directamente del despacho y de los factores PTFDF para el estado 1. Aquí, los flujos muestran que lógicamente su dirección es hacia los centros de consumo de potencia, barra 2 y 3. En la barra 3, que tiene el mayor costo, se genera la potencia necesaria para que se respete principalmente el límite de la línea 3, que es desde donde viene la potencia menos costosa del sistema, al perder la línea 1, debiendo repartir los 60[MW] que ésta transporta entre las líneas 2 y 3, alcanzando su límite de capacidad.

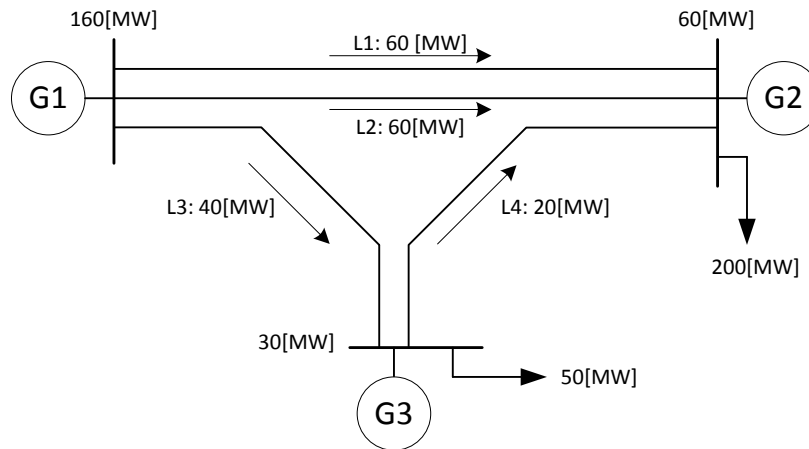


FIGURA 4.1. SISTEMA RESULTANTE DEL DESPACHO PARA 3 BARRAS.

Evidentemente, para este sistema de 3 nodos los tiempos no son necesariamente analizables dado que en general no alcanzan muchas restricciones ni variables a optimizar. Sin embargo, de igual forma se exponen los resultados de tiempo de los métodos para hacer análisis posteriores, referentes a las diferencias entre aplicar estos a modelos pequeños y medianos, extrapolables a modelos grandes.

N° Restricción	Tipo	ID Tipo	Estado	Límite
1	Balance	-	-	Sup
2	Balance	-	-	Inf
4	Generador	1	-	Inf
5	Generador	2	-	Sup
7	Generador	3	-	Sup
13	Línea	3	1	Sup
21	Línea	3	2	Sup
31	Línea	4	3	Sup
33	Línea	1	4	Sup

TABLA 4.2. RESTRICCIONES ACTIVADAS POR EL MÉTODO DE BOUFFARD PARA 3 BARRAS (SUP: LÍMITE DE CAPACIDAD MÁXIMA, INF: LÍMITE DE CAPACIDAD MÍNIMA).

El método de Bouffard et al aplicado al sistema entrega los resultados de la Tabla 4.2. En esta tabla se muestra la restricción umbral, el tipo de restricción (de balance, de generación o de línea), la identificación de este tipo de restricción (número de generador, número de línea,

balance es sólo una ecuación para todo el sistema), el estado en que se encuentra la transmisión (recordar que por estado se entiende conjunto de restricciones en transmisión) y el límite de capacidad. Esta última etiqueta (“Límite”) surge por el hecho de que este método se basa en separar todas las ecuaciones en desigualdades. Es por esto que si bien la ecuación de balance es una igualdad, posee un límite superior y otro inferior. El tiempo de ejecución para Bouffard et al es de 0,031[s]. Los tiempos expuestos en estas secciones son tiempos que se obtuvieron más de una vez por simulación, estableciendo un promedio entre valores.

Por otro lado, dada la implementación de la mejora para que Bouffard et al entregase además el despacho económico de la red, arrojó los resultados mostrados en la Tabla 4.3. Con un valor del elemento $S(49)$, del vector de activación umbral, igual a \$7.100 (con unidad \$ ya que estas eran en la restricción). Se puede ver que los resultados son idénticos a los obtenidos por el despacho con restricciones de seguridad, lo cual indica a priori una mejora al método que será analizada en la sección 5.1.1.

Generador	Barra	Potencia [MW]
1	1	160,00
2	2	59,99
3	3	30,01

TABLA 4.3. DESPACHO ENTREGADO POR MEJORA A MÉTODO DE BOUFFARD.

En el caso de la metodología ocupada por Moreno et al, que filtra su modelo estocástico de flujos de potencia con restricciones de seguridad, y que es tomado como punto de partida de los filtros aquí presentados, es transformado para filtrar el sistema de 3 nodos determinístico obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 4.4. En ésta es posible encontrar la iteración y qué estado se agregó en esa iteración para obtener el despacho de la red, para el cual aparece el respectivo costo. Además se entrega el valor máximo encontrado de demanda no suministrada por estado en cada iteración, por lo que el estado de la próxima iteración es el correspondiente a este costo máximo de la iteración actual. Cabe notar que el conjunto de estados relevantes entregados por el algoritmo es la suma de todos los estados arrojados en cada iteración, así también para una iteración dada, se consideran todos los estados anteriores más la agregada en dicha iteración. La diferencia crucial entre este método y el de Bouffard et al, es que éste ocupa etapas (iteraciones), agregando contingencias en lugar de ir identificándolas en el problema de flujo de potencia óptimo. En esta transformación se estarían agregando estados de contingencia. Cabe destacar que dada la pequeña escala de este modelo, es completamente intuitivo llegar en pocas iteraciones al final del proceso, dado que tiene menos casos que analizar, influyendo además en un menor tiempo de ejecución.

Iteración	Estado	Máxima demanda no suministrada [MW]	Costo Despacho [\$]
1	1	60	5.700
2	2	0	7.100

TABLA 4.4. ESTADOS ACTIVADOS POR MÉTODO DE MORENO PARA 3 NODOS.

En este caso el tiempo de ejecución del problema fue de 0,047[s], levemente superior a Bouffard et al, pero dentro del mismo orden de magnitud. Esto se explicará con mayor profundidad en la comparación de los resultados en los análisis de la sección 5.3.

El tercer método ocupado, siendo éste una variación del método de Moreno, entrega los resultados de la Tabla 4.5. Aquí, dado el enfoque de la metodología del algoritmo, se pueden ver directamente las restricciones que fueron agregadas por el método para el problema de despacho óptimo. Al igual que en el caso de búsqueda de estados, se encuentra el valor máximo de, en este caso, sobre-transmisión, por lo que la restricción de capacidad de línea agregada en la próxima iteración es la asociada a este valor máximo. Además es posible ver el costo del despacho para cada iteración, el cual refleja la potencia óptima (en \$) del conjunto de generadores bajo las restricciones correspondientes.

En este caso también se tiene que para una iteración dada, el conjunto de restricciones relevantes son todas las encontradas anteriormente más la que se agregó en esa iteración, siendo una suma progresiva de restricciones a este conjunto relevante. Para la primera iteración no existen restricciones, generando un despacho uninodal para posteriormente ver la sobre-transmisión que éste produce.

Iteración	Restricción			Sobre-transmisión [MW]	Costo Despacho [\$]
	Línea	Estado	Límite		
1	-	-	-	36,67	5.400
2	2	2	Sup	15,00	6.500
3	3	2	Sup	0,00	7.100

TABLA 4.5. RESTRICCIONES ACTIVADAS POR MÉTODO DE MORENO PARA 3 NODOS.

Como observación, dado que las líneas 1 y 2 son exactamente iguales, tanto en impedancia como en capacidad y conexión a la red, en la iteración 2 la restricción podría ser remplazada por la línea 1, en el estado 3, siendo una contingencia idéntica para el sistema. Esto se analizará en la sección 5.1.2.

El tiempo de ejecución del algoritmo para encontrar todas las restricciones relevantes fue de 0,842[s], el mayor tiempo de entre los métodos probados en este sistema de tres nodos.

4.2. SIMULACIÓN DEL MODELO DE SCOPF DE 24 NODOS SIN FILTRADO

El segundo sistema que se utiliza para probar los métodos considerados es el presentado en la sección 3.2.2, el cual contiene 24 nodos y 38 líneas representando a un sistema mediano. La idea de utilizar este sistema es tener un escenario en el cual los métodos sean más capaces de mostrar su comportamiento de una manera más evidente y así establecer mejores análisis.

El modelo de despacho es equivalente al de 3 nodos, sólo que ahora contiene distintas generaciones por barra, además del mayor número de barras, líneas, y generadores. Esto último implica que se tiene un mayor número de restricciones de límites de capacidad tanto en

generación como en transmisión. En la Figura 4.2 se muestran la generación por barra que resulta del despacho óptimo con restricciones de seguridad. En ésta no todas las barras son mostradas dado que no todas ellas generan, por esto sólo se muestran las 10 barras respectivas en la red. Aquí se puede ver que el grupo de generación del sector sur, correspondiente a las barras 1, 2 y 7, es menor a la del sector norte, lo que es intuitivo producto de la mayor concentración de generación y capacidad de generación en este sector, así como su menor costo.

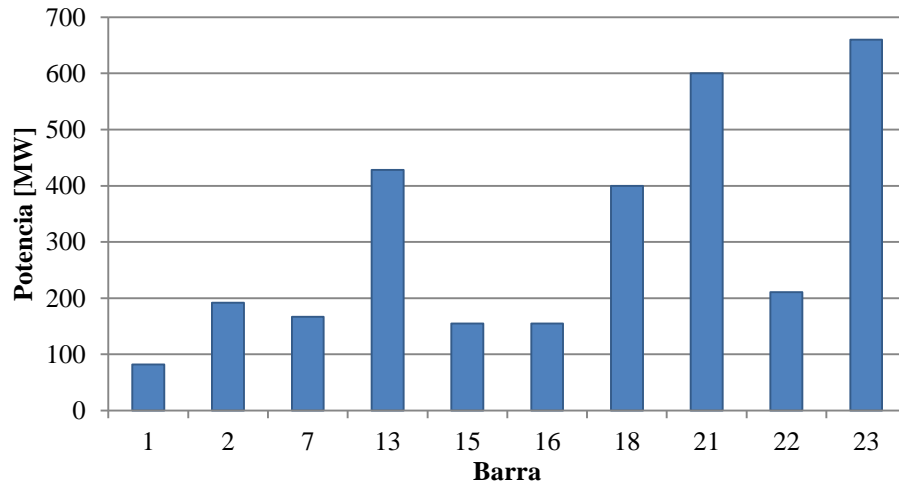


FIGURA 4.2. DESPACHO CON RESTRICCIONES DE SEGURIDAD PARA SISTEMA DE 24 BARRAS.

La Figura 4.3 muestra el despacho en la red, donde en azul están los grupos de generadores que fueron despachados. Aquí se puede tener una idea de la dirección de los flujos por las líneas y posibles problemas de transmisión que pudiesen existir. En particular se muestran los flujos por los transformadores que reflejan el hecho de que el sector norte contenga mayor densidad de generación y el sector sur mayor densidad de demanda, aunque tanto norte como sur tienen relativamente la misma cantidad de demanda, con 1.518[MW] el sector norte y 1.532[MW] el sector sur. De la Figura 4.4 se puede ver más concretamente cuánto está generando cada sector del sistema y la demanda asociada, y con esto, la sobre generación del sector norte es exactamente la falta del sector sur, siendo la suma de los flujos por los transformadores mostrados en la Figura 4.3.

Las restricciones de desigualdad activas al momento de encontrar el punto de operación óptima de este sistema de 24 nodos, son expuestas en la Tabla 4.6. Se logra ver la identificación del elemento del sistema así como el límite de capacidad activo en dicho punto.

El tiempo de solución es de 0,702 [s], mayor al del sistema pequeño, aunque sigue siendo un valor del mismo orden de magnitud. Sin embargo, más que el tiempo de solución del problema de optimización de potencia despachada (bajo restricciones de seguridad), es de mayor interés el tiempo de solución de los métodos que se ocupan sobre esta red, de tal forma de poder establecer cuál es el que tiene mejor desempeño.

Generador	Línea	Estado	Límite
5	-	-	Superior
6	-	-	Superior
7	-	-	Superior
8	-	-	Superior
20	-	-	Superior
21	-	-	Superior
22	-	-	Superior
23	-	-	Superior
30	-	-	Superior
31	-	-	Superior
32	-	-	Superior
-	10	2	Inferior
-	10	10	Inferior
-	23	28	Inferior

TABLA 4.6. RESTRICCIONES ACTIVAS PARA PUNTO ÓPTIMO DEL SISTEMA DE 24 NODOS.

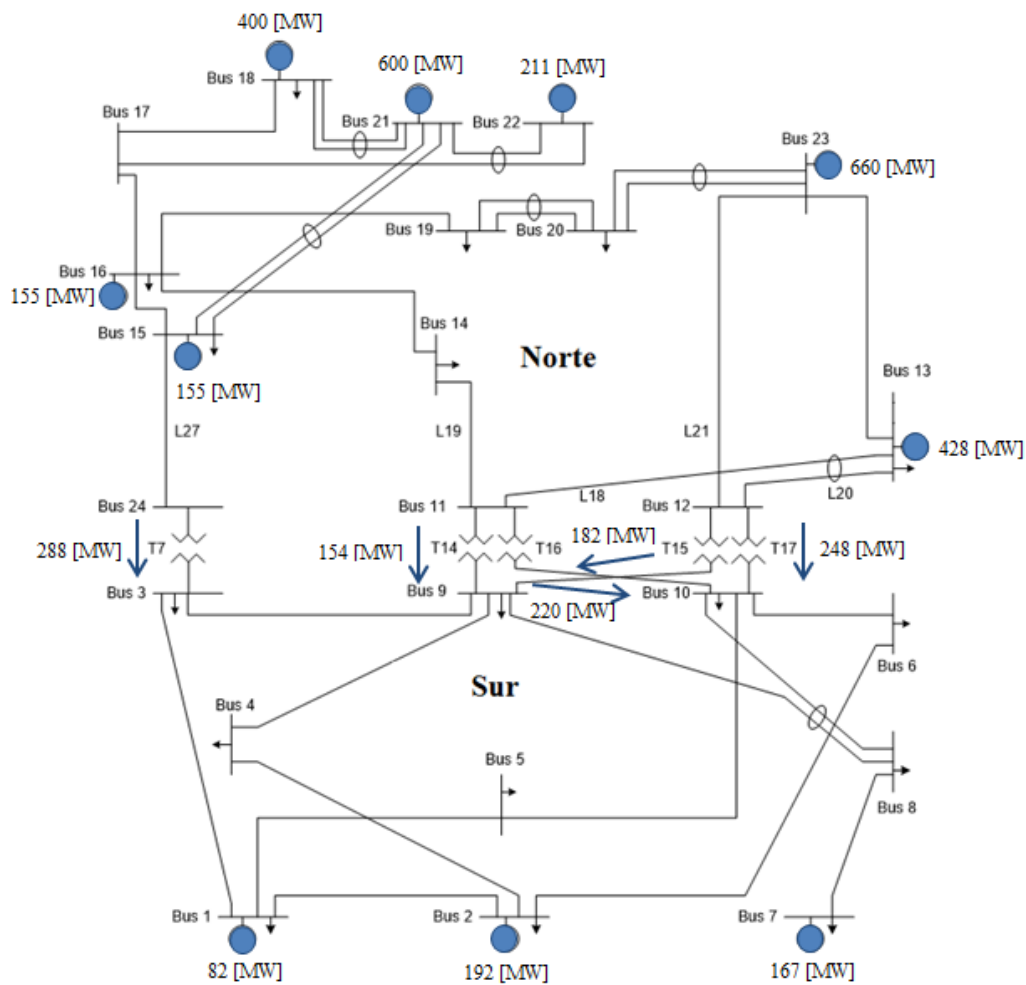


FIGURA 4.3. GENERACIÓN EN SISTEMA DE 24 BARRAS.

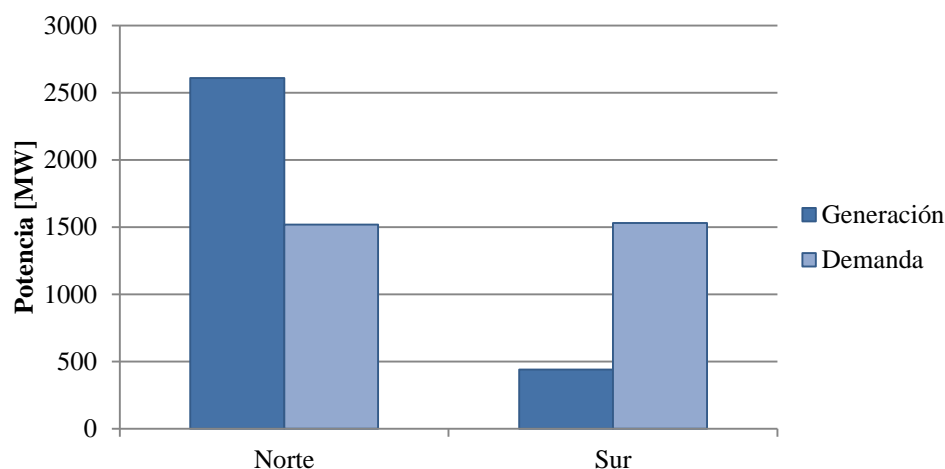


FIGURA 4.4. GENERACIÓN Y CONSUMO POR SECTOR EN SISTEMA DE 24 BARRAS.

4.3. APLICACIÓN DEL FILTRO DE BOUFFARD ET AL MEJORADO A RED DE 24 NODOS

Para este primer método de filtrado en el modelo de despacho, se obtuvieron un total de 68 restricciones umbrales, entre las cuales hay tanto de balance y generación, como de líneas. Para las restricciones de balance se encontraron las 2 restricciones que determinan la ecuación de balance, 55 restricciones para la generación, mientras que para las líneas se obtuvieron 11 restricciones umbrales. Dada la gran cantidad de datos, en la Tabla 4.7 sólo se exponen las restricciones umbrales encontradas para las líneas, ya que es lo que servirá para comparar con los otros métodos que en su caso sólo encuentran las restricciones o estados de contingencia en transmisión, es decir, sólo restricciones de capacidad de las líneas. Si bien será analizado más adelante, aquí está la cualidad más importante del método, no siendo necesariamente para contingencias su información, sino que también para la naturaleza de la red. El resto de las restricciones obtenidas pueden verse en la Tabla 8.6 y Tabla 8.7 de la sección 8.1 de Anexos.

En la Tabla 4.7 se tiene el número de la restricción umbral asociado al problema, el tipo de restricción, así como el número de la línea en el sistema (ID Tipo), el estado en que se encontró esta restricción es umbral, y el límite sobrepasado. En este caso, se puede ver que la mayoría de las restricciones son umbrales en su límite inferior, refiriéndose a la dirección contraria a la que fueron configuradas en la red. Esto ocurre por el hecho de que las líneas fueron nombradas de acuerdo a ir nombrando desde la barra con menor número de identificación a la de mayor número, y debido a que la red posee los sectores anteriormente descritos, en su sector inferior, en el sur, se tienen las barras con menor número de identificación, y como se vio en la sección 4.2, los flujos van hacia el sector sur, por tanto, en general la mayoría de las líneas tienen flujos opuestos al sentido configurado, así el límite inferior, o de dirección contraria, queda como umbral.

N° Restricción	Tipo	ID Tipo	Estado	Límite
582	Línea	7	24	Inferior
772	Línea	10	2	Inferior
788	Línea	10	10	Inferior
952	Línea	12	14	Inferior
1028	Línea	13	13	Inferior
1798	Línea	23	8	Inferior
1838	Línea	23	28	Inferior
1842	Línea	23	30	Inferior
1917	Línea	24	29	Superior
2224	Línea	28	26	Inferior
2226	Línea	28	27	Inferior

TABLA 4.7. RESTRICCIONES DE LÍNEAS ACTIVADAS POR MÉTODO DE BOUFFARD PARA 24 NODOS (INFERIOR O DIRECCION CONTRARIA DE FLUJO, SUPERIOR O DIRECCIÓN CONFIGURADA).

El tiempo en el cual se encontró la solución, para esta red de 24 nodos, fue de 996[s], mucho mayor a los tiempos que se han tenido en las otras simulaciones. Para este método, como se dijo anteriormente, se tienen $J+J^2$ restricciones, donde J es el número de restricciones del problema de despacho, que para los 24 nodos sería de 3.031 restricciones, con lo que para la optimización del método de Bouffard et al se estarían considerando 9.189.992 restricciones, siendo éste el motivo principal del gran tiempo de solución obtenido. Producto de la metodología que este método ocupa, su principal desventaja es justamente el número de restricciones que considera para encontrar las restricciones umbrales, siendo bastante mayor al tiempo en que se tiene la solución del modelo entero de despacho, con todas las restricciones. Sin embargo se debe tomar valor a la cantidad de información que nos entrega una vez obtenida la solución, es más, desde estos resultados fue que se validaron algunas pruebas de los métodos de Moreno et al. Además, escribir el algoritmo en *FICO* en este caso es bastante sencillo, tomando por un lado el planteamiento conceptual, y por otro el hecho que sólo corresponda a un problema de optimización y no una división de un problema maestro en varios otros, evitando tratar con archivos de datos que en algún caso podría ser engorroso.

4.4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MORENO ET AL POR ESTADOS Y POR RESTRICCIONES A RED DE 24 NODOS

4.4.1. POR ESTADOS

Del método para obtener los estados relevantes para el problema de despacho de 24 nodos, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 4.8. En ésta se puede ver que en cada iteración se agregó el estado de la iteración anterior al conjunto relevante, y la máxima demanda no suministrada de esta iteración que corresponde al estado con mayor costo que se agregaría al conjunto relevante en la siguiente iteración. Así también se muestra el comportamiento del costo de despacho a lo largo de estas iteraciones, reflejando el cambio de potencia despachada al considerar los respectivos conjuntos de estados relevantes. De los datos de esta tabla se puede

mencionar del comportamiento que tiene el máximo costo (demanda no suministrada) a medida que se avanzan en las iteraciones, que si bien intuitivamente se deberían ir encontrando las líneas cada vez con menor costo, el dato en la iteración 5 muestra que no necesariamente va a ser así. Esto se discutirá en la sección de análisis, pero a priori se debe a que en la iteración 4 se consideró una restricción que pasó a tomar mayor relevancia que otra.

Iteración	Estado	Máxima demanda no suministrada [MW]	Costo Despacho [£]
1	1	121,00	159.100
2	13	41,59	159.100
3	11	30,38	164.129
4	8	0,74	168.641
5	2	4,90	172.277
6	10	6e-6	172.337

TABLA 4.8. ESTADOS ACTIVADOS POR MÉTODO DE MORENO PARA 24 BARRAS.

Para este método, el tiempo de ejecución fue de 2,01[s], mucho menor al método de Bouffard et al. Al incluirse conjuntos de restricciones para cada estado, hace que la búsqueda de máxima demanda no suministrada sea más rápida. Por otro lado el despacho tiene sólo una leve disminución de eficiencia al tener que agregar estos conjuntos de restricciones (para cada estado) y no restricciones individuales, como sería el caso de agregar por restricción (en la siguiente sección). De esta forma se puede pensar que este método correspondería a una situación media entre el método de Bouffard et al y al método de Moreno et al por restricción, lo cual como se verá en 5.3, en cuanto a tiempo, es cierto.

Si bien el aumento del costo de despacho indica que se está invirtiendo más a cambio de una mayor seguridad frente a las contingencias, este dato por sí sólo no habla mucho sobre la generación en la red misma. Es por esto que en la Figura 4.5 se expone la potencia despachada por sector norte y por sector sur en cada iteración, pudiendo reflejar el balance que se hace entre las dos áreas que, como se dijo, contienen distintas densidades de generación y demanda, siendo la cantidad de demanda casi iguales en ambos sectores. En esta figura se logra comprender que desde el despacho uninodal (iteración 1) a la situación final, la generación del sector sur aumenta en cuanto a su potencia despachada, ya que de esta forma, amortigua la pérdida (falla) de líneas que se podrían tener y por tanto la falta de suministro a sus consumos, debiendo tener un gasto un tanto más grande.

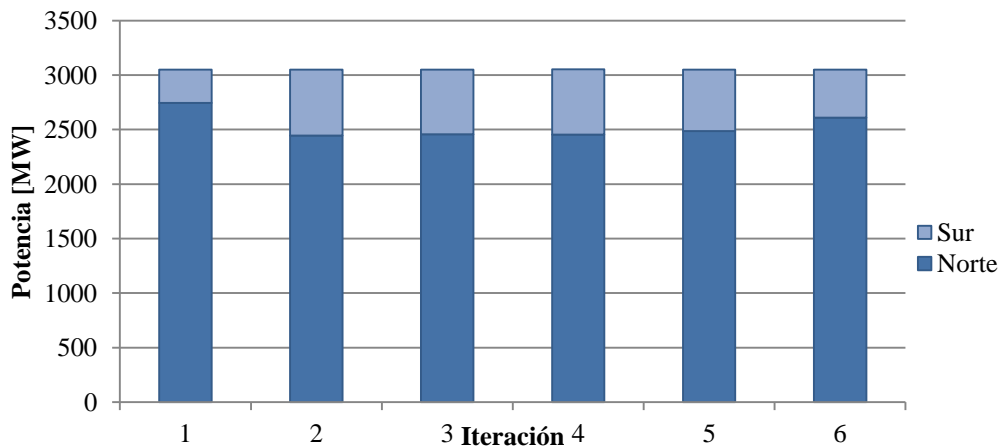


FIGURA 4.5. DESPACHOS SECTORES NORTE Y SUR POR ITERACIÓN EN ACTIVACIÓN DE ESTADOS.

Es interesante ir un poco más profundo y ver específicamente qué barras son las que están variando y en qué medida lo hacen, así se podría establecer un punto crítico de la red desde el cual las contingencias de líneas asociadas a esta barra podrían explicar su variación. Esta información se muestra en la Figura 4.6. Se debe mencionar que en esta figura se muestran sólo las barras que varían su potencia a lo largo de las iteraciones, excluyendo aquellas que mantienen un despacho constante. Esta gráfica permite ver qué barra está aumentando o disminuyendo su potencia, y el balance que se produce entre ellas para mantener el suministro a los consumos. Además esta gráfica nos indica qué barras están siendo afectadas producto de la consideración de las contingencias de las líneas, que no necesariamente van a estar conectadas a la barras, sino que de alguna u otra forma, la falla de una línea, afecta a la potencia que esta barra debiese estar despachando. Así, los resultados arrojados por los métodos pueden ser justificados por el comportamiento que está teniendo la red y como se está acomodando de acuerdo a las contingencias más costosas, es decir, a los estados con demanda no suministrada más grande.

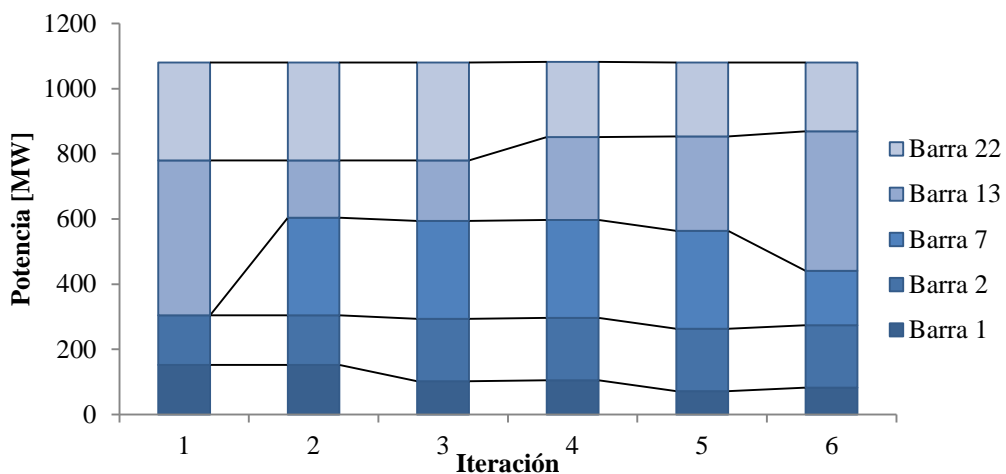


FIGURA 4.6. GENERADORES CON VARIACIONES POR ITERACIÓN EN ACTIVACIÓN DE ESTADOS.

4.4.2. POR RESTRICCIONES

Al implementar las mejoras sobre el método de filtro de estados, y ocupar el método explicado en la sección 3.5, se tienen los principales resultados mostrados en la Tabla 4.9 sobre las restricciones del problema agregadas al conjunto relevante. En ésta se expone la iteración y la restricción que se agregó en esa iteración para obtener la sobre-transmisión, también mostrada. Adicionalmente se presenta el costo de despacho en cada iteración como forma de reflejar el comportamiento de la potencia despachada. Cada restricción muestra tanto la línea como el estado asociados a ella, además de la dirección del flujo bajo la consideración de un límite matemático superior o inferior de las desigualdades, siendo dirección contraria si el límite de la restricción de desigualdad es la inferior. También mencionar que el conjunto de restricciones relevantes para cada iteración considera tanto la restricción mostrada en esa iteración, así como todas las consideradas en las iteraciones anteriores, dado que el método va agregando la restricción más costosa (en este caso referente al mayor flujo de sobre-transmisión) en cada iteración, teniendo ninguna restricción de capacidad de línea para la primera iteración (sistema uninodal).

Iteración	Restricción			Sobre-transmisión [MW]	Costo Despacho [£]
	Línea	Estado	Límite		
1	-	-	-	121,00	159.100
2	13	13	Superior	42,79	159.100
3	1	11	Inferior	30,38	164.129
4	23	8	Inferior	0,74	168.641
5	10	2	Inferior	4,90	172.277
6	10	10	Inferior	6e-6	172.337

TABLA 4.9. RESTRICCIONES ACTIVADAS POR MÉTODO DE MORENO PARA 24 NODOS.

Notar que el valor de sobre-transmisión en la 6ta iteración, corresponde a un valor de 6[W]. Dado que este valor es pequeño para las magnitudes del problema, sumado a que existen aproximaciones numéricas producto de los factores PTDF, se considera que este valor es prácticamente 0[W], deteniendo el proceso del algoritmo, en donde la tolerancia para elegir esta detención fue de 0,5[MW]. Esto se puede corroborar y asegurar su veracidad dado que el costo de despacho para el problema SCOPF entero, es exactamente el mismo.

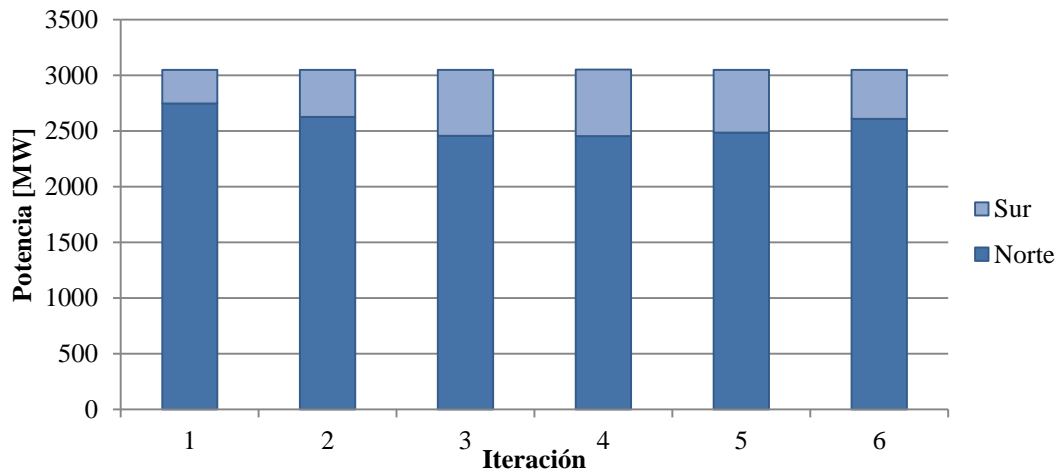


FIGURA 4.7. DESPACHOS SECTORES NORTE Y SUR POR ITERACIÓN EN ACTIVACIÓN DE RESTRICCIONES.

El tiempo en que este método tardó en finalizar todas las iteraciones y entregar el resultado final fue de 1,66[s], siendo a simple vista menor de los tres métodos ocupados. A priori este menor tiempo invertido para encontrar la solución se debe a que el problema de despacho sólo agrega hasta 6 restricciones de capacidad de líneas a su problema, siendo casi idéntico en dimensiones a su problema inicial que tiene la ecuación de balance y 64 restricciones de desigualdad en generación.

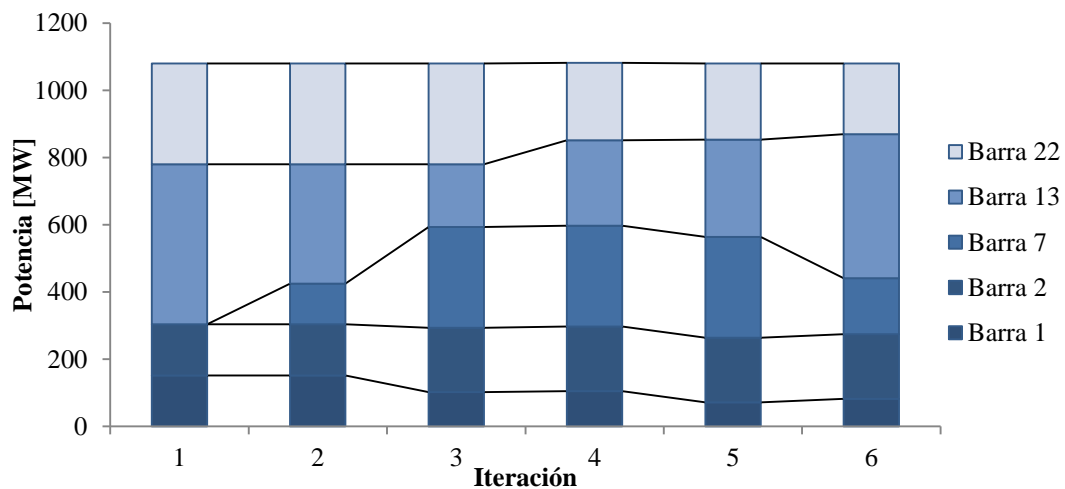


FIGURA 4.8. GENERADORES CON VARIACIONES POR ITERACIÓN EN ACTIVACIÓN DE RESTRICCIONES.

En la Figura 4.7 se muestra, para efectos de la visualización del comportamiento de la potencia, el despacho realizado, tanto en el sector norte del sistema como en el sur, en cada iteración del algoritmo. Aquí se puede ver el balance de los dos sectores para cada iteración, obteniendo una especie de parábola que determina el aumento o disminución de potencia generada por sector, siendo el norte que disminuye para luego aumentar, y el sur quien aumenta para luego disminuir. Esto se debe esencialmente a las capacidades de transmisión que se van agregando por restricción, determinando y restringiendo cuanto flujo puede circular por las líneas más costosas y por tanto reconfigurar las potencias despachadas por barra.

Para mayor detalle, se muestran los resultados de generación por barra en la Figura 4.8. Si bien es bastante parecido a la dinámica obtenida para el filtro por estados, existe una diferencia para la iteración 2, en donde el balance entre la barra 7 y 13 es distinto, sin embargo en la siguiente iteración se logra un permanente en la dinámica entre estos dos métodos. Esto se explicará en la sección 5.2.2 de análisis en mayor profundidad, pero es posible decir que básicamente esta diferencia se debe a la restricción agregada en este caso, que para el método de estados relevantes no es igual.

Por otro lado, al considerar también las restricciones de generación como elementos a agregar al conjunto de restricciones relevantes, se obtiene la información expuesta en la Tabla 4.10 (para ver todas las iteraciones dirigirse a Tabla 8.8 y Tabla 8.9 de la sección 8.1 de Anexos). En ésta se puede ver la restricción agregada en la respectiva iteración, así como la sobre-capacidad de cada elemento, ya sea generación o línea, encontrada en dicha iteración, representando cierta restricción más costosa que es agregada a la próxima iteración. Además se muestra el valor del despacho para cada iteración.

Iteración	Restricción				Sobre-capacidad [MW]	Costo Despacho [£]
	Generador	Línea	Estado	Límite		
24	12	-	-	Superior	279,00	159.100
25	14	-	-	Superior	121,00	159.100
26	-	13	13	Inferior	42,79	159.100
27	-	1	11	Superior	382,19	163.719
28	11	-	-	Superior	382,19	163.719
29	10	-	-	Superior	382,19	163.719
30	9	-	-	Superior	30,38	164.129
31	-	23	8	Inferior	0,74	168.641
32	-	10	2	Inferior	4,90	172.277
33	-	10	10	Inferior	6e-6	172.337

TABLA 4.10. ÚLTIMAS RESTRICCIONES DE LÍNEAS Y GENERACIÓN ACTIVADAS POR MÉTODO DE MORENO PARA 24 NODOS.

El tiempo en que se realizaron las 33 iteraciones fue de 1,92[s], entregando un volumen de 32 restricciones a ser consideradas que, sumadas a las 2 desigualdades de la ecuación de balance, resultarían 34 restricciones en total para el problema reducido de despacho. Este método es quien entrega la menor cantidad de restricciones a ser agregadas y toma 0,26[s] más que el método que no considera la generación dentro del conjunto relevante.

En el caso de la red de 300 nodos, se tienen los resultados tanto del despacho completo como del método de despacho iterativo explicado en la última parte de la sección 3.5. Por un lado los resultados del el despacho (completo) para esta red son los mostrados en la Tabla 4.11, mientras que el método de despacho iterativo obtuvo la información expuesta en Tabla 4.12. Recordar que este método de despacho iterativo fue simulado en el servidor cuyas características fueron expuestas en la introducción de este capítulo.

Costo Despacho [£]	Tiempo [s]
---------------------------	-------------------

1.040.750	95,82
-----------	-------

TABLA 4.11. COSTO Y TIEMPO DESPACHO COMPLETO SISTEMA 300 NODOS.

En la Tabla 4.11 se tiene el costo total del despacho realizado sobre la red de 300 nodos, además del tiempo que tomó para encontrar esta solución. Dado que esta red fue utilizada para ver la eficiencia en tiempo del mejor método de los presentados, no se muestra el despacho por cada generador. Las restricciones con que cuenta este modelo son: 2 de la ecuación de balance, 138 en generación y 338.664 en transmisión considerando todas las contingencias N-1, sumando un total de 338.804.

Iteración	Restricción			Sobre-transmisión máxima [MW]	Costo Despacho [£]
	Línea	Estado	Límite		
1	305	2	Superior	1.191,56	1.039.380
	317	2	Inferior		
2	301	2	Superior	669,57	1.040.030
3	-	-	-	0,00	1.040.750

TABLA 4.12. RESTRICCIONES ACTIVADAS MÉTODO DE DESPACHO ITERATIVO APLICADO EN RED DE 300 NODOS.

Por otro lado en la Tabla 4.12 se muestran los resultados del método de despacho iterativo, exponiendo tanto la restricción agregada como el costo total de despacho en cada iteración. También se muestra la sobre-transmisión máxima en cada una de estas iteraciones. Notar que en la primera iteración se agregan dos restricciones ya que el método agrega todas las restricciones con variable *slack* positiva. De esta forma se tienen las 138 restricciones de generación más las 3 restricciones en transmisión, además de la ecuación de balance, sumando 143 en total. El tiempo en que este método encontró la solución fue de 26,39[s].

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dados los resultados de las pruebas realizadas, que fueron expuestos en el capítulo anterior, es preciso establecer los análisis y comentarios correspondientes a cada una de ellas. Se quiere prestar especial atención a los resultados mostrados por cada uno de los métodos de filtrado, tratando de establecer las comparativas relevantes para así conocer los desempeños de cada uno de estos. De esta forma se tendrán dos secciones en donde se analizan los resultados de los tres métodos en cada sistema, inicialmente para el de 3 nodos, y luego el de 24 nodos. Para el modelo de 3 nodos se tienen principalmente comentarios en cuanto al funcionamiento de los métodos, mientras que el modelo de 24 nodos proporcionó un escenario con el que se pudieron tener resultados con mayor información que explican cómo se comporta cada método, lo cual se quiere reflejar en las páginas de esta sección.

5.1. MÉTODOS EN SISTEMA DE 3 NODOS

Con los resultados de la sección 4.1 es posible establecer algunos análisis básicos de acuerdo al sistema mismo y a los métodos aplicados a este.

En el caso de la red, se puede ver en la Figura 4.1 que si bien los dos primeros generadores pueden abastecer la demanda, se debe activar el tercer generador debido principalmente a que es necesario cumplir con los límites de transmisión en particular de las líneas 2 y 3 ya que, como fue descrito anteriormente, al fallar la línea 1, estas dos líneas deben soportar los deltas de flujo que se suman en sus tramos, quedando ambas a su capacidad completa, agregando 40[MW] para la línea 2 y 20[MW] para la línea 3. El mismo análisis se podría hacer para las fallas en las otras líneas y se afirma que el despacho obtenido cumple con la seguridad exigida a través de las restricciones frente a distintas fallas en transmisión.

5.1.1. MÉTODO DE BOUFFARD ET AL MEJORADO

Las restricciones umbrales del método de Bouffard et al, son las restricciones que física y matemáticamente contienen a las demás, siendo las necesarias y suficientes para poder entregar exactamente la misma solución óptima pero en menor tiempo. Los resultados de este método aplicado al despacho de las 3 barras, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 4.2, discriminan las restricciones agregadas entre límites superiores e inferiores, refiriéndose a la desigualdad que está siendo reconocida como umbral, siendo *Sup* el límite superior para la variable, o *Inf* para su límite inferior. En el caso de las restricciones de flujo de transmisión, estos límites más que a un nivel máximo y mínimo, hacen referencia a la dirección de flujo que es considerada umbral, siendo *Sup* la dirección a la que fue configurada la línea, e *Inf* la dirección contraria a esta. En el caso de las desigualdades de balance, las restricciones umbrales son tanto *Sup* como *Inf* al mismo tiempo, porque es una igualdad, y en teoría para este método todas las igualdades deben marcarse

como umbrales, dado que el valor de S_j debe ser necesariamente 0 para ambos límites, ya que es la única forma de hacer cumplir la igualdad mediante dos desigualdades.

Un análisis importante respecto a este método, es el hecho de que éste entrega restricciones umbrales de todo tipo: balance, generación y/o transmisión. Aunque sólo se están analizando contingencias en transmisión, este método va un poco más allá, entregando información sobre todas las áreas inherentes al sistema. Este hecho es particular del método e incluso en ningún momento se considera el costo de despacho ni el despacho en sí.

Esto último fue exitosamente modificado e implementado en él, permitiendo que entregase aún más información, en este caso, considerando los costos de cada generador. Estos resultados pueden ser corroborados entre el despacho del sistema de 3 nodos y los resultados de la Tabla 4.3, siendo exactamente los mismos valores de potencia para ambos. Además se encontró que el valor del elemento del vector S correspondiente a esta restricción ($S(49)$), es el valor óptimo del costo de despacho, lo cual es bastante lógico al tener en cuenta que en este método se está minimizando la suma del vector S (ver sección 0). Lo importante de esto entonces, es que es posible agregar una restricción al método de Bouffard et al sin aumentar en gran medida sus dimensiones y obteniendo una información considerablemente relevante para efectos de la operación de la red. Justamente relacionado con el costo de despacho, el valor que se obtiene para el vector S en todas las restricciones es otra información interesante que entrega este método. Recordar que este vector es la magnitud de cuán cercana está la restricción respecto a la región factible del problema, región que está limitada por las restricciones umbrales (como se mostró teóricamente en la Figura 2.4). Por tanto entrega un tipo de distancia asociada a la restricción no umbral, pudiendo presentar una idea de cuán importante pudiese llegar a ser si se variase algún parámetro del problema y así pasar a ser restricción umbral del problema.

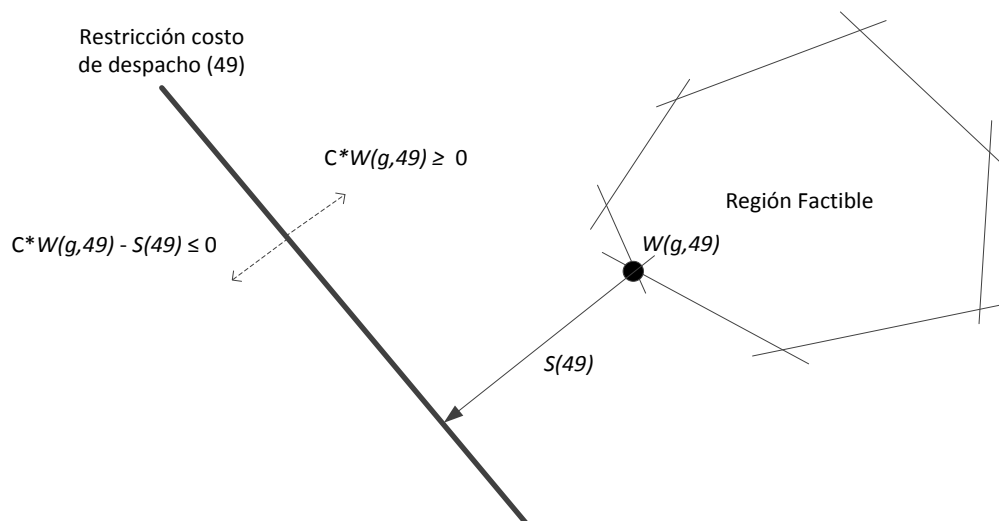


FIGURA 5.1. REPRESENTACIÓN BIDIMENSIONAL DE LA RESTRICCIÓN DE COSTO DE DESPACHO EN EL MÉTODO DE BOUFFARD MEJORADO.

Para esto se va a considerar como ejemplo la restricción de costo de despacho en la Figura 5.1, en la cual se muestra la región factible del problema, limitada por las restricciones umbrales, y la

restricción correspondiente a los costos de generación. Como se puede ver, el valor de $S(49)$ es la magnitud minimizada que representa la menor distancia desde el punto más cercano de la región factible a la región infactible de la restricción, obligando a estar desde el punto de la región factible $W(g,49)$ a la misma restricción. De esta forma $S(49)$ es cuanto tiene que moverse la restricción para alcanzar este punto más cercano de la región factible, definición que es análoga a la de función objetivo. Lo mismo explica los valores de las otras restricciones no umbrales así como umbrales, sólo que en este último caso el valor de los elementos del vector S para esas restricciones es 0. Entonces S es una variable *Slack* que en el óptimo representa la distancia entre la región factible y el plano que describe la restricción. En particular $S(49)$ es la variable *Slack* o de holgura de la restricción que representa la función objetivo.

Este método permite que, aunque no se tenga información sobre los costos de generación, aun así se puede conocer el estado del sistema, reconociendo cuales son las restricciones que pudiesen limitar el problema. Se debe tener en cuenta que para un problema de optimización en teoría sólo se necesitan dos rectas en un caso bidimensional para obtener su solución óptima, este método entrega además las restricciones umbrales que encontraría el problema en la dirección de optimización contraria, es decir, maximizando el costo de despacho, más aún, las restricciones encontradas permiten conocer la solución óptima del problema sea cual fuese la dirección en que la función objetivo del despacho se oriente, abarcando los horizontes de la región en la que esta función objetivo se mueve.

De esta forma, Bouffard et al muestra generar un método robusto de identificación de restricciones frente a variaciones, por ejemplo, de precios de combustibles, al poder variar la función objetivo bajo las mismas restricciones umbrales. Sin embargo, el número de restricciones que soluciona, y por ende el tiempo invertido en el método para tener estas restricciones umbrales, es bastante alto y si bien las aplicaciones podrían ser variadas, no son inmediatas, siendo necesario encontrar primero el despacho económico antes de restricciones que no se tendría certeza de que efectivamente se necesitarán.

5.1.2. MÉTODOS DE MORENO ET AL MEJORADOS

Por otro lado la metodología implementada por Moreno et al en su modelo probabilístico, y probada aquí para un modelo determinístico, permite conocer sólo las restricciones relevantes para el problema de despacho. Para esto sólo toma los conjuntos de restricciones que están asociadas a contingencias, y va iterando hasta que no encuentre ningún conjunto de restricciones relevantes dado que no incurren en algún costo para el sistema, como por ejemplo, límites de capacidad de transmisión violados. Este último caso fue el que se consideró como único tipo de contingencia, simulándose bajo criterio N-1 en transmisión. Según los resultados de la Tabla 4.4, esta metodología arrojó sólo dos iteraciones que bien corresponden a un modelo pequeño de 3 nodos. En esta, el estado que posee una demanda no suministrada de 60[MW] es la que se agrega al modelo de despacho en la siguiente iteración, y se ve que corresponde al estado 2, en donde se tiene una falla en la línea 1. Para entender la selección de esta restricción basta con volver a leer esta situación explicada anteriormente para el despacho de los 3 nodos, donde se menciona por

qué es despachado el generador 3 siendo que es más caro, apoyando la explicación en la falla de la línea 1, la cual es justamente, según los resultados del método, la falla más relevante dentro de todas, produciendo la mayor cantidad de demanda no suministrada. Estos 60[MW] son los que se perderían si la línea 1 desaparece y encontrados en la primera iteración con las potencias fijadas en el despacho del sistema intacto (estado 1). Luego de esto, con la potencia despachada reconfigurada, no encuentra demanda no suministrada, por lo que el algoritmo se detiene, entregando como estados relevantes el estado 1 y 2.

Es importante mencionar que el estado 1 es agregado para que se comience desde un punto más cercano a la solución, pero no es completamente necesario que sea incluido, es más, las simulaciones realizadas sin este estado, convergen al mismo valor final, lo cual es lógico ya que es el estado 2 es el que contiene la contingencia relevante para el sistema (falla en línea 1) y no el estado 1.

Lo anterior puede ser una complicación si se tiene un volumen mucho mayor de restricciones ya que se estarían agregando restricciones que no influirían en encontrar la solución óptima de despacho para esa iteración.

Esto lo resuelve en gran parte, por otro lado, la mejora realizada al método de Moreno et al, donde en lugar de buscar los estados relevantes se da un giro al problema hacia una mirada más detallista y se buscan las restricciones que son relevantes en cada iteración del problema. Los resultados de la Tabla 4.5 muestran que se logra encontrar la solución al problema de despacho, bajo todas las contingencias en transmisión (con criterio N-1), con sólo dos restricciones, ambas del estado 2, es decir, para la caída de la línea 1, resultado equivalente al del método anterior de filtrado por estados. En este caso se tiene que el costo de cada restricción es referente netamente a la sobre-transmisión exigida por cada línea, que sería la particularización a cada tramo de la demanda total no suministrada. Este costo de la restricción debiese ser entonces menor a esta demanda no suministrada por iteración, corroborándose entre esta Tabla 4.5 y la Tabla 4.4. Nuevamente la explicación física de por qué son agregadas estas dos líneas, es la misma que se realizó para el despacho *full*, ya que al quedar inactiva la línea 1 (estado 2), las líneas 2 y 3 son las que deben tomar el flujo faltante. Para llegar a esta solución, en el caso simulado se debe realizar una iteración más, a diferencia del método por estados, debido a que en un estado se encuentran dos restricciones relevantes.

Cabe destacar que en este sistema existen restricciones superpuestas, es decir, que limitan el mismo espacio. Esto es fácil de ver al tener en cuenta que tanto línea 1 como línea 2 son paramétricamente iguales, por lo que la falla de una, es análoga a la falla de la otra, y en los resultados del filtrado las restricciones serían indiferentemente la línea 2 y 3 en el estado 2, a las líneas 1 y 3 en el estado 3. Sin embargo el método sólo se encarga de entregar un conjunto de restricciones relevantes que consideren los casos con mayores sobre-transmisiones (más costosas), abarcando a todo el resto de restricciones, sin importar si este conjunto es único o no.

La idea de este método iterativo por restricción es por tanto realizar una búsqueda más eficiente aunque con algunos contras. Si bien este método considera un conjunto de restricciones

relevantes mucho menor para la obtención del despacho de potencia, es necesario calcular el valor máximo para cada iteración dentro de un mayor número de valores (tantas como restricciones no relevantes), además agrega sólo una restricción por iteración lo que puede hacer que sea un proceso con mayor carga de datos al estar exportando e importando un gran número de ellos.

Es importante recalcar el hecho de que si bien los dos métodos son bastante parecidos, la diferencia entre este método de filtrar por restricciones con el método de filtro de estados, es que existe un cambio conceptual en lo que se quiere filtrar al pasar de un filtro de estados representados mediante un conjunto de restricciones, a una filtración directamente de restricciones, reenfocando la búsqueda de la solución a un problema más matemático que físico.

5.2. MÉTODOS EN SISTEMA DE 24 NODOS

Para profundizar más sobre la capacidad de los métodos, se realizaron las pruebas pertinentes en el sistema de 24 nodos. Los resultados muestran ciertas diferencias frente al modelo más pequeño que serán expuestas en esta sección. De acuerdo a los resultados de la Figura 4.2, es posible ver las generaciones del modelo de despacho bajo las restricciones de seguridad en transmisión con el criterio N-1. Este despacho es comparado en la Tabla 8.4 y en la Tabla 8.5 de la sección 8.1 de Anexos entre el obtenido para el sistema *full* y los obtenidos por los distintos métodos. Si bien estos resultados muestran que la potencia por barra es la misma para todos los casos al igual que el costo del despacho, hay diferencias respecto a los generadores que se despacharon por barra, no existiendo ningún despacho completo idéntico a otro. Estas diferencias se producen entre generadores que poseen las mismas cualidades y que se despache uno o el otro se debe a que los métodos funcionan de distinta forma, en distinto orden, y esta diferencia no es más que producto de las soluciones que va encontrando FICO, ya que no hay ninguna restricción que discierna entre qué unidad es o no despachada, siendo ellas iguales.

Otro tema que abarca tanto al despacho *full* como a los métodos por separado, y que se refleja sobre todo en sistemas más grandes, es el hecho de que el modelo de la red se encuentra implementado mediante la utilización de los factores PTDF. En general los tiempos no son tan altos dado que se ocupan estos valores como parámetros, aprovechando que se está trabajando sobre un flujo *DC*, no siendo necesario encontrar el valor para otras variables como de ángulo o flujo. A pesar de ello, es necesario invertir tiempo previo a los problemas de optimización para encontrar las distintas matrices, tantas como estados tenga, en donde cada obtención de una de estas matrices (para un estado) debe ser invertida, lo que es costoso en términos computacionales. Sin embargo, una vez obtenido el conjunto de factores, sólo sería necesario volver a calcularlos si es que cambia la topología del sistema, ya que se cambiaría la configuración de la red, y por ende estos factores que determinan los flujos.

5.2.1. MÉTODO DE BOUFFARD ET AL MEJORADO

Al obtener los resultados aplicando el método de Bouffard et al sobre el sistema de 24 barras, el conjunto de restricciones umbrales que se obtuvieron fue bastante grande. Por un lado se obtuvieron las 11 restricciones asociadas a las capacidades de transmisión mostradas en la Tabla 4.7, mientras que por otro se obtuvieron las restricciones de generación, con 55 en total, y balance, las 2 restricciones de desigualdad que forman la ecuación de balance, todas las restricciones pueden ser vistas en la Tabla 8.6 y Tabla 8.7 de la sección 8.1 de Anexos. Estas restricciones corresponden al 2% del total del conjunto considerado para el despacho de potencia *full*. Los conjuntos de restricciones de generación y balance, aparecen debido a la característica que posee el método de Bouffard et al para entregar información de la situación o estado en que se encuentra el sistema en sí, previo al despacho de generación. De esta forma, sean incluidas o no las contingencias, de igual forma el método realiza un análisis en cuanto a las características que podría tener la red que se configure. Ésta es la diferencia principal que recae respecto a los métodos de Moreno referente a los resultados que estos entregan, los cuales sólo se basan en las contingencias que ocurren en la red. La mayor cantidad de información que Bouffard et al entrega a través de su método podría ser importante en términos de criterios, antes de empezar a analizar algún tipo de contingencia.

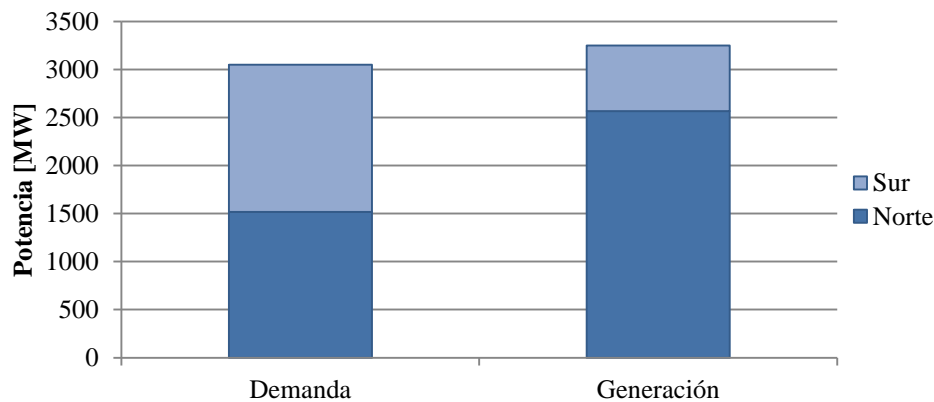


FIGURA 5.2. CAPACIDAD DE GENERACIÓN Y DEMANDA SISTEMA DE 24 NODOS.

Respecto a lo anterior, se puede notar la gran cantidad de restricciones umbrales de generación respecto de las de transmisión, tomando en cuenta que sólo estas últimas representan las contingencias del sistema, no es intuitivo este resultado. Sin embargo, como se dijo, Bouffard et al puede entregar información que puede ser pasada por alto. En este caso, el gran número de restricciones umbrales en generación se debe a la sensibilidad que existe en la red frente a variaciones de generación, ya que la capacidad de generación es bastante cercana a la demanda del sistema tal como se ve en la Figura 5.2, existiendo una diferencia de sólo 200[MW]. Así, si llegase a fallar un generador, el costo para la red sería mucho más grande que si llegase a fallar una línea.

De esta forma se logra ver que la red no posee mucha flexibilidad en generación, a diferencia de la transmisión que sí posee bastante holgura, como para cargar más las líneas con flujos, como se

puede ver en el gráfico de la Figura 5.3. Esto es justamente lo que hace que el número de restricciones umbrales de líneas encontradas sea mucho más reducido. De acuerdo a la línea punteada normalizada que aparece en la figura, la cual indica la diferencia entre las dos curvas de forma normalizada a la capacidad de la línea, es decir la capacidad libre, se puede ver que gran parte de ellas tienen un porcentaje desde el 40% hasta casi el 100% en algunos casos. Sin embargo las de bajo porcentaje corresponden a las que el método de Bouffard et al arroja como umbrales, como lo son las líneas: 7, 10, 23 y 28. Las líneas 12, 13 y 24 que son marcadas como umbrales pero que tiene bastante capacidad libre, lo son de acuerdo a las fallas en las que estas fueron “marcadas”, ya que dependiendo de esas fallas es cuanto flujo pudiese llegar a pasar por ellas. Sumado a esto, las líneas umbrales entregadas por el método y corroboradas por la baja capacidad libre mostrada en el gráfico de la Figura 5.3, en particular líneas 10, 23 y 28 son umbrales en más de un estado como puede verse en la Tabla 4.7 de resultados, lo que indica que el bajo porcentaje libre es causa y efecto (al conocer el flujo óptimo) de que estas líneas sean afectadas en más de una contingencia.

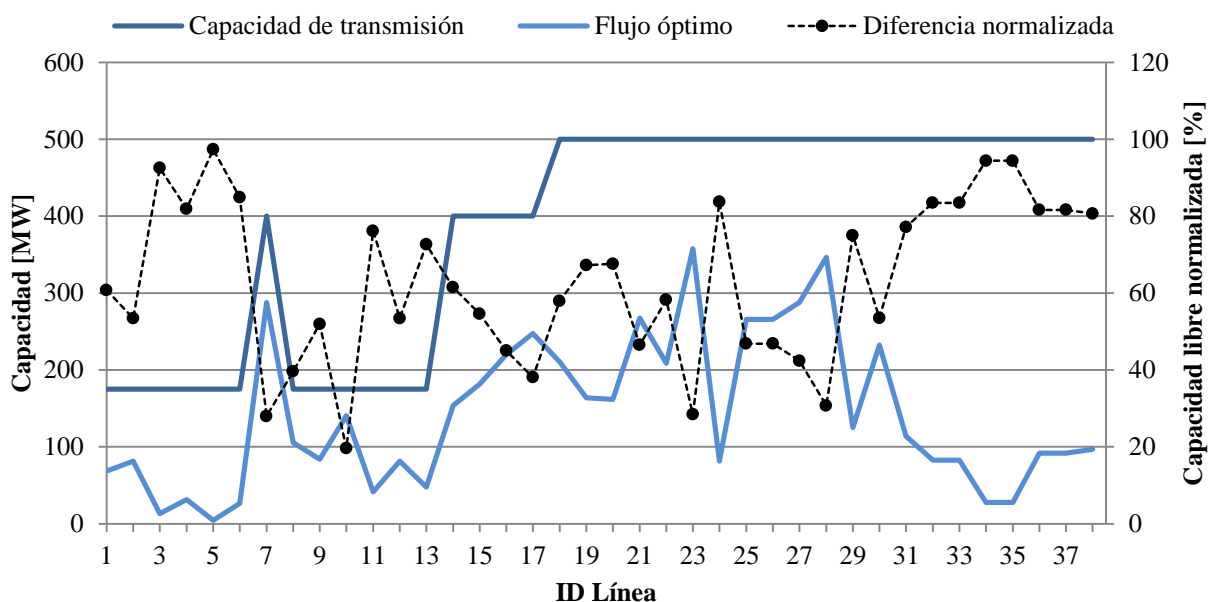


FIGURA 5.3. CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN Y FLUJO ÓPTIMO EN SISTEMA DE 24 BARRAS.

Se debe tener en cuenta que para la resolución de este problema, el método es de orden cuadrático, dadas las J^2+J restricciones, por tanto al agregar más restricciones al modelo, el tiempo de solución debiese aumentar de forma cuadrática también. En relación a esto al agregar la restricción para poder tener el despacho óptimo, se debe cuidar de que la variable de potencia sea por generador y no por barra, ya que los costos están referidos por generador. Esto lleva consigo una serie de adaptaciones al método de Bouffard et al para que la potencia que es necesaria escribir por barra, esté escrita en términos de la potencia por generador, siendo una sumatoria condicional (de si el generador pertenece a la barra) por barra, lo cual sin dudas aumenta en cierta medida el tiempo de solución, pero no en mayor medida.

A pesar del tiempo que toma encontrar la solución, que puede ser un factor determinante a la hora de elegir el método, una cualidad positiva del método de Bouffard et al, además de la cantidad de información que puede entregar de la red a priori, es la simpleza de la programación siendo sólo un problema de optimización, así también como la certeza de los resultados, siendo punto de apoyo para comparar los otros métodos e incluso los resultados de despacho durante las pruebas.

5.2.2. MÉTODOS DE MORENO MEJORADOS

La metodología de Moreno et al presenta dos formas en que se puede aplicar su idea iterativa, la que consiste en ir agregando el estado o restricción más costosa al problema maestro de despacho para así obtener un despacho de potencia, el cual se fija en un segundo problema (subproblema o esclavo) que encuentra, dado ese despacho, los mayores costos; todo esto se itera hasta no encontrar costos relevantes, entendiéndose por costo al sobrepaso de la capacidad total por estado o de la capacidad por restricción. La primera forma se centra en la idea de qué contingencias se deben considerar en el sistema, agregando estos estados o contingencias al problema de despacho. La segunda forma que fue aquí implementada y probada, cambia la búsqueda de la solución desde el enfoque de ver el sistema a ver el problema matemático, agregando restricciones relevantes al problema de despacho.

Se debe tener en cuenta que en ambos métodos de Moreno, a medida que se encuentra el despacho óptimo por iteración, también se obtienen las restricciones que generan ese punto óptimo. Es por esto que las restricciones consideradas en estos métodos, son en teoría distintas a las que se obtienen por parte del método de Bouffard et al. En este caso se les llama restricciones relevantes y no umbrales, dado que, como se mencionó, a partir de ellas no se obtiene el punto óptimo, sino que al encontrar este óptimo, se da aviso de la restricción o estado que es relevante para esa iteración. Esto significa que para los métodos de Moreno realizados, el conjunto de restricciones relevantes es obtenido al mismo tiempo que el despacho óptimo. Esto también se hizo posible para el mejoramiento del método de Bouffard et al, donde su metodología entrega las restricciones que pueden ser utilizadas a posterior, ya sea para realizar análisis de sensibilidad sobre la red u otros, además del despacho óptimo.

Para la elección de estados relevantes los principales resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la Tabla 4.8. En ésta se tienen los estados que se van agregando en cada iteración del método, aumentando en un estado a la vez el conjunto de restricciones relevantes, teniendo así un total de 6 estados, correspondientes a 456 restricciones de capacidad de líneas (desigualdades), de un total de 2.964, equivalente a un 15%, y tomando el total de las restricciones entre balance, generación y transmisión encontradas, para solucionar el problema de despacho reducido, se estarían ocupando el 17% del volumen de restricciones.

Es interesante conocer cómo fue el comportamiento de la red en cada iteración de acuerdo a las potencias despachadas. Para esto se presenta en la Figura 5.4 un gráfico que muestra la dinámica que tiene la suma de las sobre-transmisiones de las líneas (la dinámica de los costos de la red), normalizada a la capacidad de transmisión respectiva (dependiendo de la línea que fue

sobresaturada), para cada estado en cada iteración. De aquí se puede extraer la variabilidad de estos sobrepasos que ocurren en cada uno de los 39 estados. Recordar que por “estado 1” hace referencia a al sistema intacto, “estado 2” a la falla en la línea 1, “estado 3” falla en la línea 2, etc. Notar que para la primera iteración el valor de sobre-transmisión que tienen las líneas es de casi un 70% tanto para el estado 13 como el 14 (para una vista más detallada ver Figura 8.1 y Figura 8.2 en la sección 8.1 de Anexos), donde el algoritmo toma el estado menor para ser considerado en el conjunto de estados relevantes. El hecho de que sea uno o el otro no altera el resultado, ya que ambos muestran el mismo costo para la red, y en caso de ser necesario agregar el otro estado, el mismo algoritmo se encargaría de hacerlo en la iteración siguiente. Luego, para la segunda iteración, el segundo estado con el mayor porcentaje es el 11, siendo quien posee el mayor costo para el sistema dada la suma de sobre-transmisión de dicho estado. De esta figura es posible ver que a pesar de tratarse de un sistema de 38 líneas y 39 estados, no son muchos los casos de costos relevantes que hay que considerar. Sin embargo esto se debe a la particularidad que tiene la red de estar sobre-dimensionada en transmisión permitiendo flexibilidad de los flujos.

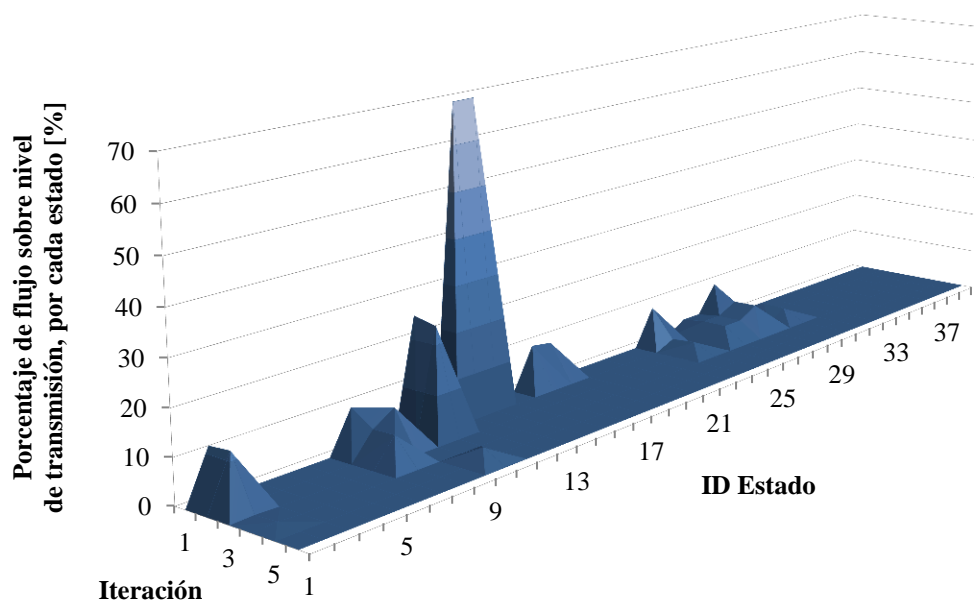


FIGURA 5.4. FLUJOS POR SOBRE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN NORMALIZADOS EN MÉTODO DE MORENO POR ESTADO.

De la Figura 5.5, en el que se ve la evolución del máximo costo por iteración, se puede notar que tras la primera iteración la red se relaja en gran medida al disminuir en cerca de un 45% la sobre-transmisión en las líneas, encontrando que la iteración 2 alcanza aproximadamente un 24%, considerando la suma de todas las líneas que se encuentran por sobre su nivel de capacidad y que reflejan al demanda no suministrada por estado. Esto quiere decir que dado el estado agregado en la iteración 2 (encontrado en 1), permite una disminución del 45%, reflejando la importancia de integrar en un inicio el estado 13 al conjunto relevante.

Por otro lado, la curva punteada en este mismo gráfico muestra el flujo no normalizado, en unidades de potencia (eje derecho), en donde los valores de demanda no suministrada (flujo total

por estado por sobre la capacidad del conjunto de líneas saturadas), indican que desde la iteración 3 a la 4, hay una disminución drástica en cuanto a la sobre-transmisión de la red para todos los estados reflejándose en el costo máximo encontrado en la iteración 4. Apoyándose del gráfico de la Figura 4.5 y del de la Figura 4.6 de la sección 4.4.1, es posible explicar los dos casos anteriores. Para el primero, la disminución 45% de la sobre-transmisión de la red, se debe a la activación del despacho en la barra 7 (Figura 4.6), agregando unos 350[MW] a la red en ese punto, disminuyéndolos de la barra 13, permitiendo que los flujos se reacomoden, con lo que cualquier contingencia (estado) que ocurra, no provoque sobre-transmisiones tan elevadas. Ahora, para el caso la variación de la iteración 3 a la 4, se puede ver en la Figura 4.5 que el despacho del sector norte comienza a subir, lo que quiere decir que el sistema comienza a encontrar las potencias por barras para poder considerar las contingencias de líneas sin necesidad de tener sobre-transmisiones. En particular desde la Figura 4.6, se puede ver que en la iteración 4 en la barra 13 hay un aumento de potencia volviendo a reacomodar los flujos.

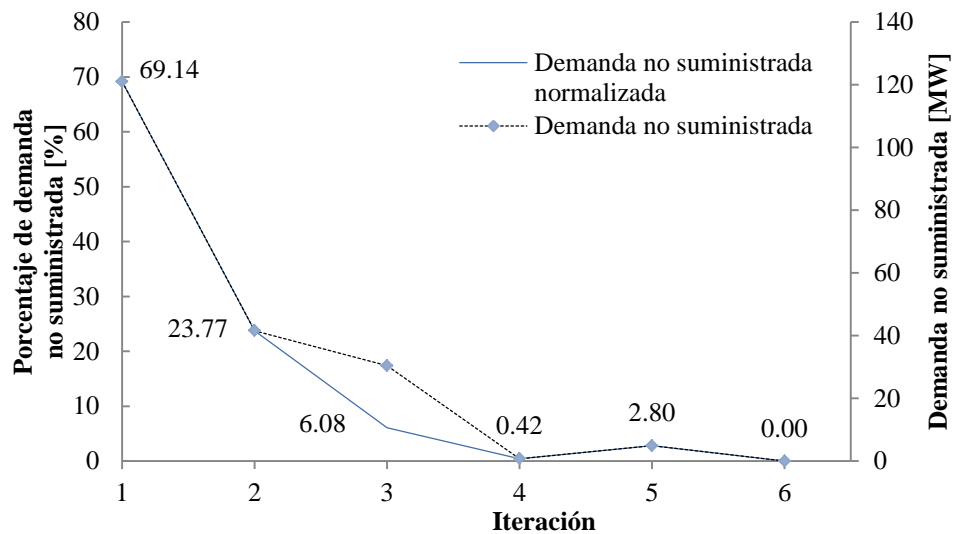


FIGURA 5.5. DESARROLLO DEL MÁXIMO COSTO POR ITERACIÓN PARA MÉTODO DE MORENO POR ESTADO.

Es importante notar que no siempre a medida que se avanza en las iteraciones se obtiene un costo menor al anterior. El ejemplo de esto es el aumento del costo máximo desde la iteración 4 a la 5. Una explicación lógica es que al agregar el estado respectivo en la iteración 5 para obtener el despacho y encontrar el costo máximo siguiente, este estado agregado entre en juego con otros que ya estaban en el conjunto, restringiéndolos mediante alguna línea en particular, haciendo que el costo aumente. Es decir que agrega una restricción, incluida dentro del estado, que es más importante que otra restricción que estaba en algún estado del conjunto relevante.

Para el caso de la metodología de Moreno para filtrar restricciones, los principales resultados se encuentran en la Tabla 4.9, en donde se indican cuales fueron agregadas en cada iteración. En este caso cabe destacar que se trata de un número mucho menor al obtenido en el método por estado, agregando 5 restricciones de capacidad de líneas dentro de un total de 2.964 restricciones

de transmisión, correspondiendo por tanto a sólo el 0,17% de las restricciones de límites de transmisión, y para el problema de despacho se ocuparía un 2% de las restricciones totales del problema *full*. Si bien estos valores llaman la atención al ser bastante bajos, no hay que olvidar que este algoritmo realiza una búsqueda levemente con mayor carga al comparar y buscar el máximo de entre todas las líneas para todos los estados en cada iteración, agregándole carga al computador en este sentido. Por otro lado el modelo de despacho del sistema es bastante más rápido al considerar el ingreso de sólo una restricción, equilibrando el costo computacional.

En cuanto a la dinámica del algoritmo a través de las iteraciones, resulta ser bastante parecido al método de Moreno por estados, llegando a valores de costos casi idénticos, con exactamente los mismos valores de costos de despachos, donde las restricciones encontradas aquí, están contenidas en el filtro por estados. Sin embargo hay una diferencia en cuanto al despacho al despacho en la iteración 2 de ambos métodos. Para este caso, de la Figura 4.8 se generan 121[MW] en la barra 7 y 355[MW] en la barra 13, mientras que para el filtrado por estados, de la Figura 4.6, se tienen 300[MW] y 176[MW] respectivamente, sumando la misma cantidad ambas y, debido a que tienen el mismo costo de generación, el mismo costo de despacho, por lo que sólo es una diferencia en el camino pero no en los resultados mismos del método.

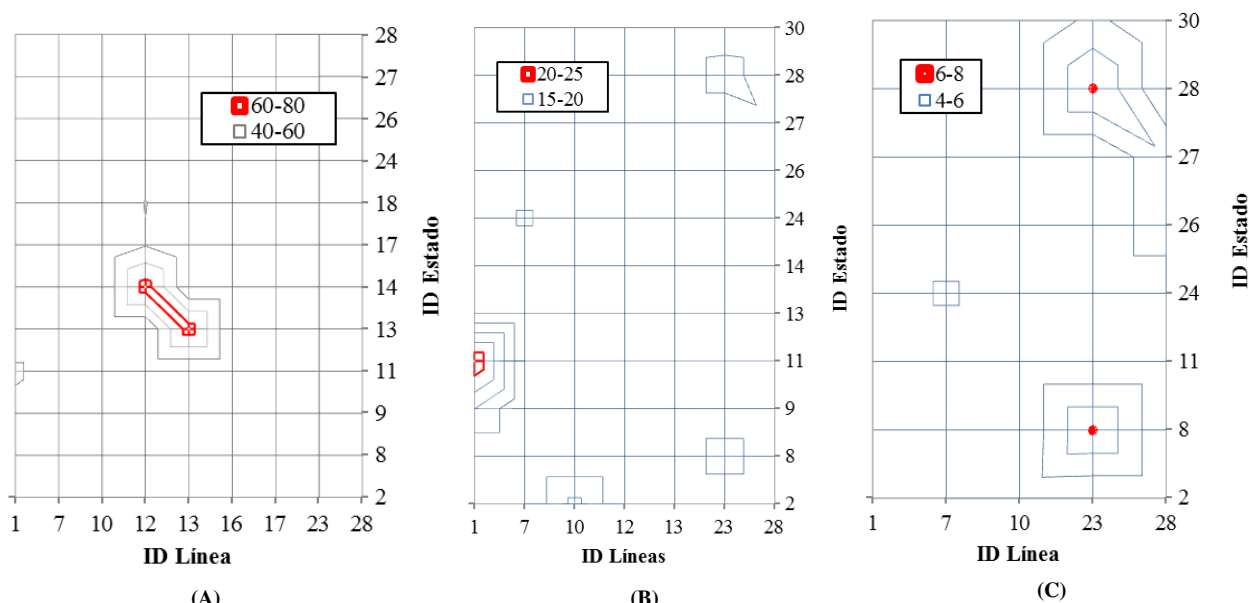


FIGURA 5.6. FLUJOS DE SOBRE-TRANSMISIÓN MÉTODO MORENO POR RESTRICCIÓN. (A) ITERACIÓN 1, (B) ITERACIÓN 2, (C) ITERACIÓN 3.¹ EN ROJO SE REPRESENTA EL NIVEL DE COSTO MÁXIMO, LAS OTRAS CURVAS REPRESENTAN COSTOS MENORES CERCANOS.

Para visualizar las líneas sobrecargadas en cada estado, se presenta una secuencia de gráficos de curvas de nivel en la Figura 5.6, que indican los estados y líneas que se encuentran por sobre su capacidad de transmisión, marcándose en rojo cuales son los máximos en cada iteración. Además se indica el rango porcentual en que estos valores son máximos, es decir, cuán saturadas están dichas líneas en dichos estados. Las iteraciones 4, 5 y 6 no son mostradas ya que sólo se tienen dos opciones para obtener un máximo en cada caso. Cabe destacar que tanto para la iteración 1

¹ Las iteraciones 4, 5 y 6 no son mostradas por ser casos de simple elección.

como para la iteración 3, se tienen dos máximos idénticos. Para la iteración 1 la dualidad es lógica dado que son líneas que tienen la misma capacidad y salen de la misma barra, siendo la línea 12 máximo costo cuando falla la línea 13, y análogamente, 13 máximo costo cuando falla la línea 12. Apoyándose en el esquema de la Figura 3.2, en estos casos en falla, la línea que queda habilitada es responsable de la alimentación de las barras 7 y 8, y si fallaran estas dos al mismo tiempo, el grupo generador de la barra 7 debiese funcionar a su máxima capacidad para abastecer a ellas. Por otro lado, el caso de la iteración 3, la misma línea (23) se ve afectada exactamente igual por dos contingencias distintas, esto se explica al visualizar la red y notar que son líneas continuas sin bifurcaciones, siendo evidente que la falla de una es lo mismo que si fallara la otra.

Con estas 6 iteraciones el método de Moreno logra encontrar las restricciones relevantes utilizadas en la obtención del despacho óptimo, de tal manera que ninguna contingencia en transmisión, bajo criterio N-1, sobrepase los valores de alguna línea de transmisión o deje alguna demanda no abastecida.

En la variación del método anterior, al considerar las restricciones de generación como elementos a analizar para ser agregados al conjunto relevante, se tienen los resultados de la Tabla 4.10 (todas las iteraciones en Tabla 8.8 y Tabla 8.9 de sección 8.1 de Anexos). De estos es posible notar la gran cantidad de iteraciones en que se obtiene este conjunto. Esto ocurre básicamente debido a la gran sensibilidad que tiene la red frente a generación, ya que como se vio, los generadores en su gran mayoría deben operar a su máxima capacidad para poder abastecer la demanda existente, debiendo iterar sobre la mayoría de los generadores hasta suplir esta demanda. En las iteraciones finales comienzan a ser incluidas las restricciones de capacidad líneas, debido a que algunas de ellas producen cuellos de botella (al estar sobre-exigidas por encima de su capacidad) y deben ser incluidas como restricciones relevantes para el sistema.

El número de restricciones obtenidas es de 32 restricciones entre generación y transmisión que, sumado a las dos desigualdades de la ecuación de balance, se tiene un total de 34 restricciones correspondientes al 1% del volumen total, siendo el método que arroja el menor número de restricciones totales para resolver el problema de despacho reducido, asegurando el mismo punto óptimo. El número y porcentaje de restricciones sólo en transmisión es exactamente el mismo que el método en que no se consideran las restricciones en generación.

5.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se exponen los resultados con los que es posible comparar los desempeños de los tres filtros. Por una parte se pueden ver en la Tabla 5.1 la cantidad porcentual de restricciones obtenidas en cada método. Por un lado están los porcentajes sólo de las restricciones referentes a transmisión, reflejando qué cantidad de éstas es ocupada. Por otro, en negrita, se tiene la cantidad total de restricciones que se ocuparían en el problema reducido de despacho, incluyendo balance, transmisión y generación, que son las necesarias para resolver el SCOPF reducido.

Método	Restricciones en transmisión identificadas del filtraje		Restricciones SCOPF reducido	
	Nº restricciones	%	Nº restricciones	%
Bouffard	11	0,37%	68	2,2%
Moreno por estados	456	15,00%	522	17,2%
Moreno por restricciones (T)	5	0,17%	71	2,3%
Moreno por restricciones (T y G)	5	0,17%	34	1,1%

TABLA 5.1. VOLUMEN DE RESTRICCIONES OBTENIDAS PARA CADA MÉTODO APLICADO EN SISTEMA DE 24 NODOS. T: TRANSMISIÓN, G: GENERACIÓN.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 4.7 (Tabla 8.6 y Tabla 8.7), Tabla 4.8 y Tabla 4.9, se puede decir que en cuanto a las restricciones de transmisión, existen 4 restricciones (conjunto de restricciones para el caso del filtro por estados) que están en la intersección de conjuntos entre los métodos Bouffard y Moreno, estas son las resaltadas en la Tabla 5.2.

A través de estos resultados, es posible apreciar que el filtro por estado de Moreno, al ser comparado con el filtro de Bouffard, considera dos estados que no son umbrales, pero si relevantes: el 1 y el 11. El estado 1 es considerado sólo para partir de un punto más cercano a la solución, pero es prescindible. El estado 11 es un estado que en algún punto del método sirvió para determinar el despacho pero luego fue reemplazado por otro estado que lo contenía, es decir, que este segundo estado estaba dentro de su región factible (del estado 11). Lo mismo ocurre con la línea 1 del estado 11 para el caso de filtración de restricciones de Moreno, siendo reemplazada en algún momento por otra que estaba dentro de su región factible, tomando mayor relevancia esta segunda restricción.

Filtro Bouffard		Filtro por estado	Filtro por restricción	
Línea	Estado	Estado	Línea	Estado
7	24	1	13	13
10	2	13	1	11
10	10	11	23	8
12	14	8	10	2
13	13	2	10	10
23	8	10	-	-
23	28	-	-	-
23	30	-	-	-
24	29	-	-	-
28	26	-	-	-
28	27	-	-	-

TABLA 5.2. RESTRICCIONES EN TRANSMISIÓN RESULTANTES DE LOS FILTROS.

Además, que los estados resultantes del filtro de estado sean los mismos estados en que están las líneas resultantes del filtro por restricciones, quiere decir que en el método por estados se ve influido mayormente por una línea en particular más que por la contingencia (conjunto de líneas), donde, si hay una restricción importante para la red dentro de algún estado, este estado es

seleccionado como conjunto (de restricciones) en el filtro por estados de Moreno, lo cual estaría incluyendo restricciones que no son necesarias.

Por otro lado, el filtro de Bouffard además de las restricciones que ayudan a encontrar el despacho óptimo en un sector de la región factible, muestra otras restricciones de un sector distinto, que pueden tomar relevancia si, por ejemplo, se varían los precios de combustibles de la función objetivo, cambiando la dirección geométrica de la optimización, determinando el punto óptimo por un grupo distinto de restricciones.

Uno de los aspectos importantes de estos métodos es su tiempo de ejecución. Estos resultados son expuestos en la Tabla 5.3 de acuerdo al tamaño del sistema en que se utilizaron. La primera observación que se puede hacer sobre estos es que la cantidad de tiempo en ejecución parece invertirse para el método de Moreno por restricción y para el de Bouffard al pasar de un modelo pequeño a uno mediano, donde el filtrado por estados de Moreno tiende a permanecer entre los dos anteriores. Que el método de Moreno por restricciones tenga mayor tiempo comparativo para el modelo pequeño, se debe principalmente a que éste debe realizar varias búsquedas y tratamientos de datos, mientras que Bouffard sólo se ocupa un problema de optimización, por tanto, sólo las restricciones respectivas de este, que además de ser sólo 42 en total para el caso del sistema pequeño, existe una única variable vector de potencia a optimizar, entregando el resultado casi inmediatamente.

Método	Tiempo sistema 3 nodos [s]	Tiempo sistema 24 nodos [s]
Despacho de la red	0,001 ²	0,702
Bouffard	0,031	996,0
Moreno por estados	0,047	2,005
Moreno por restricciones (T)	0,842	1,658
Moreno por restricciones (T y G)	0,880	1,915

TABLA 5.3. TIEMPO DE EJECUCIÓN PARA CADA MÉTODO. T: TRANSMISIÓN, G: GENERACIÓN.

Se puede ver que el tiempo en solucionar el problema de despacho full por si sólo es menor al tiempo de filtrado de cualquiera de los tres métodos. Esto llevaría a pensar que en realidad es mucho mejor no aplicar ningún método y solucionar el problema sin más. Sin embargo no hay que olvidar que la red en que se está trabajando es bastante simplificada, por el uso de flujo *DC* y de los factores *PTDF*, evitando mayores cálculos lo que implica una reducción del tiempo de solución. Aun así, los tiempos de solución, al menos para los métodos de Moreno como se observa en la Tabla 5.3, se acercan bastante al tiempo de solución del despacho de la red (con todas las restricciones) estando entre 1[s] (por restricciones (T)) y 1,3[s] (por estados) sobre este valor. Es llamativo el crecimiento del tiempo de ejecución para el método de Bouffard, pero no sorpresivo tomando en cuenta que su dimensión es cuadráticamente proporcional al número de restricciones, demostrando que el tiempo invertido en encontrar las restricciones umbrales también lo es.

² El tiempo entregado por el software es de 0[s], pero dado que arroja 3 cifras decimales, este valor debiese estar por debajo de la milésima de segundo.

Se debe mencionar que existe una diferencia importante entre el método de Bouffard y los métodos de Moreno. Bouffard se enfoca en solucionar un problema para encontrar las restricciones umbrales previas a la simulación de un sistema dado, así utilizarlas en el problema OPF, asegurando que se encontrará el mismo despacho económico que si se realizara con el conjunto de restricciones completo. Al revisar la factibilidad de todas las restricciones en cada una de ellas, se tiene el orden cuadrático explicado en la sección 5.2.1, es por esto el extenso tiempo que toma llegar a la solución. Por otro lado, los métodos de Moreno en lugar de ir dividiendo las restricciones entre umbrales y no umbrales, e ir revisando todas en cada una de ellas, se centran en ir seleccionando iterativamente el caso más relevante, ya sea el estado o restricción de mayor costo. Esto lo hace a medida que resuelve el problema de despacho, apoyándose en la solución (parcial) de potencia que se tiene por iteración y así encontrar elementos de la red (transmisión y/o generación) que determinan un mayor costo para ella. Así también, no es que se obtenga un conjunto de restricciones relevantes para el posterior despacho, sino que se da aviso de las restricciones ocupadas para encontrar el despacho óptimo. Sin embargo, más allá de la forma en que se obtenga, el resultado es un conjunto de restricciones, que de ocuparse para el problema de despacho del sistema correspondiente, entrega la misma solución factible.

Al simular el modelo de despacho del sistema mediano con las restricciones umbrales y relevantes en cada caso, se obtienen los resultados de la Tabla 5.4.

Restricciones consideradas	Tiempo sistema 24 nodos [s]
Bouffard	0,016
Moreno por estados	0,102
Moreno por restricciones (T)	0,015
Moreno por restricciones (T y G)	0,015

TABLA 5.4. TIEMPOS DE EJECUCIÓN DEL PROBLEMA DE DESPACHO BAJOS LAS RESTRICCIONES ENCONTRADAS. T: TRANSMISIÓN, G: GENERACIÓN.

En cuanto a estos resultados se puede ver que efectivamente los tiempos son menores al tiempo de solución con todas las restricciones (Tabla 5.3), lo que es lógico, y el modelo que menos tarda dada la cantidad de restricciones, es el despacho con pre-filtro mediante el método de búsqueda de restricciones de Moreno. Se debe tener en cuenta que estos tiempos, aunque son pequeños, en teoría no se debe sumar al tiempo invertido en solucionar el método, mostrado en la Tabla 5.3, ya que para los tres métodos está implementada (o se implementó en el caso de Bouffard) la obtención del despacho económico junto a la obtención del conjunto de restricciones.

Por otro lado, para probar la efectividad de las restricciones, estas pueden ser comparadas con las restricciones activas para el despacho completo del sistema, expuestas en la Tabla 4.6. Todos los métodos ocupados contienen a las restricciones respectivas de esta tabla (dependiendo del método, sólo transmisión o transmisión y generación). El método de Bouffard por su parte, contiene las restricciones necesarias y suficientes para determinar la región factible, por lo que en teoría no existe restricción sobrante en este método, aunque sólo algunas de ellas se necesitan para determinar el punto óptimo del despacho.

Para el conjunto de estados relevantes obtenido por el método iterativo de Moreno, se puede ver que el estado 1, el estado 11 y el estado 13 no son umbrales (sí relevantes), ya que estos no aportan al conjunto de restricciones activas. Notar que los estados 8 y 28 son análogos considerando que son fallas en líneas continuas sin bifurcaciones, por lo que el estado 8 entregado por el método es activo para la obtención del punto óptimo.

Por el lado del filtro por restricción de Moreno sería posible no considerar la restricción *línea 1-estado 11* que no es umbral, pero también la restricción *línea 13-estado 13* que sí es umbral (de acuerdo a los resultados del método de Bouffard), dado que no ayudaría a encontrar la solución óptima final. Esto se puede entender gráficamente viendo la Figura 5.7 en la que, dada la geometría del problema (en dos dimensiones para ilustrar), se puede tener una restricción umbral, que fue relevante en alguna iteración anterior pero que ya no lo es.

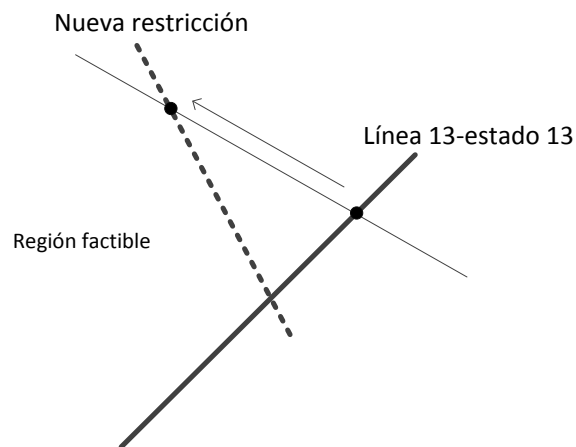


FIGURA 5.7. REPRESENTACIÓN DE RESTRICCIÓN UMBRAL QUE DEJA DE SER RELEVANTE.

Como muestra la Tabla 8.8 y la Tabla 8.9, en el caso del filtrado de restricciones tanto de transmisión como de generación (T y G), se tiene que las restricciones de líneas son idénticas a las del método de Moreno (T), mientras que las restricciones en generación muestran un gran número de generadores relevantes que pueden no ser considerados para el punto óptimo de la red pero que sin embargo ayudan a ir determinando el punto óptimo en cada iteración. Se debe notar que de las restricciones relevantes de este método, en su gran mayoría fueron de generación durante las primeras iteraciones. Esto reside en el hecho de que se quiere despachar los generadores más baratos, sobrecargándolos hasta suplir la demanda, y al agregar este generador al problema maestro de despacho, se fuerza a respetar sus límites de capacidad. Iterativamente se realiza lo mismo con todos los generadores hasta encontrar que las sobrecargas importantes se encuentran en las restricciones de transmisión (iteración 26 y 27 de la Tabla 8.9), lo cual abre la posibilidad a integrar nuevas centrales, así sucesivamente. Respecto al conjunto umbral del método de Bouffard, en particular de la generación umbral, el conjunto relevante de generación que obtiene el método de Moreno es cercano a la mitad. Esto ocurre debido a que en el punto óptimo para esta red, sólo importa la capacidad máxima de los generadores (la mitad del conjunto de generación), aunque es posible que para otra red se encuentre que necesariamente algún(os) generador(es) debe(an) estar apagado(s) o a mínima potencia, es decir, en su límite inferior.

5.3.1. SENSIBILIDAD Y COMPARACIÓN DEL MÉTODO DE DESPACHO ITERATIVO RESPECTO DEL DESPACHO COMPLETO SOBRE RED DE 300 NODOS

De los resultados anteriores es posible ver que el método que presenta mayor eficiencia en cuanto a la relación tiempo/volumen de restricciones es el método de Moreno por restricciones sólo en transmisión (T). Este método, para encontrar el despacho, desde la primera iteración considera todo el conjunto de restricciones de generadores a los cuales va agregando restricciones de líneas. En general el volumen de restricciones en generación es bastante más pequeño que el volumen de las restricciones en transmisión sobre todo considerando las contingencias. Por esto es mejor el tiempo ganado al agregar todas las restricciones de generación, que la información que se entrega sobre los generadores al ir agregándolos de acuerdo al método (generadores que no aportan con restricciones relevantes). Es por esto que se tomó este método y se mejoró en los aspectos explicados al final de la sección 3.5, generando un nuevo método al cual se nombró Método de Despacho Iterativo y que engloba las características de todos los métodos evaluados extrayendo de acuerdo a los análisis realizados las mejores cualidades.

De acuerdo a los resultados expuestos en la última parte de la sección 4.4.2, este método tarda 26,39[s] en encontrar el despacho óptimo, 69,43[s] por debajo de lo que demora el despacho completo, considerando la totalidad de las restricciones. Es evidente que el tiempo de solución es bueno pero no dice mucho acerca de si el método es capaz de realizar esto siempre o depende de las características de la red. Es por esto que para la red de 300 nodos se realizó un análisis de sensibilidad respecto a los valores con que se obtuvo el resultado anterior, variando los siguientes parámetros en la medida expresada variando uno a la vez:

- Costo de Combustible : 10%, 30%, 70%, 130%, 150%, 200%
- Demanda : 10%, 30%, 70%, 130%, 150%
- Capacidad en Transmisión : 10%, 20%, 30%, 50%, 70%, 130%, 150%, 200%
- Capacidad de Generación : 70%, 130%, 150%, 200%

Se debe mencionar que sólo el costo de combustible puede estar en todo el rango de porcentajes, ya que todos los otros parámetros llevan al límite a la red llegando a un punto que es infactible encontrar su solución.

Los resultados del tiempo de ejecución pueden verse en la Figura 5.8 para el despacho completo y en la Figura 5.9 para el Método de Despacho Iterativo. El tiempo expuesto considera desde la carga de los datos hasta la exportación de la potencia despachada por cada modelo, por lo que se considera todo el tiempo invertido en lo que cada modelo realiza. En estos resultados, los costos de los despachos son idénticos entre el método y el despacho en todos los casos de variación de algún parámetro.

Por otro lado las variaciones porcentuales se realizaron de forma general y de a un parámetro a la vez, es decir, a todos los elementos por igual (generadores, líneas de transmisión y puntos de consumo) se les varió sólo un parámetro en la misma medida.

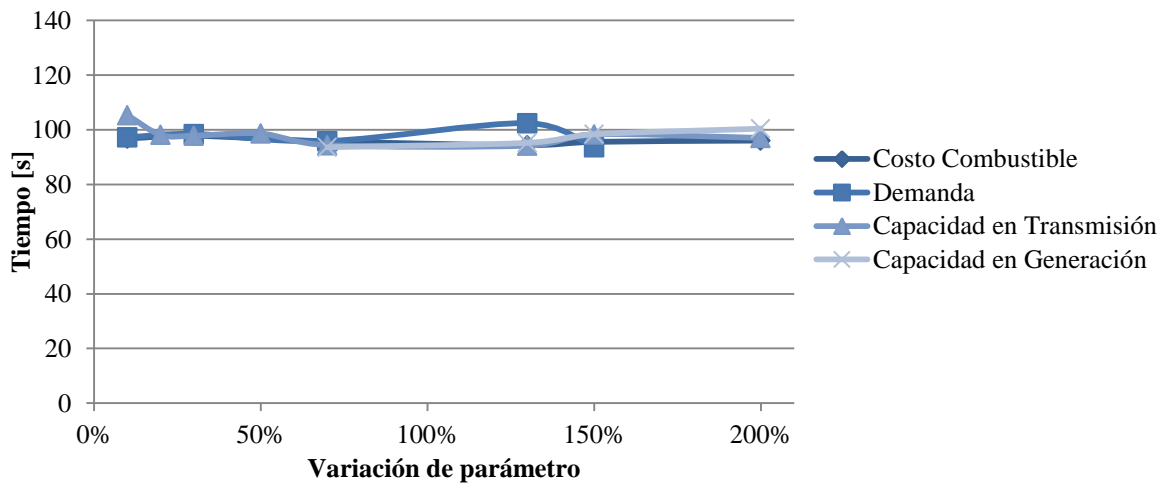


FIGURA 5.8. GRÁFICA DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL DESPACHO COMPLETO EN RED DE 300 NODOS.

El tiempo promedio para el despacho completo es de 97,2[s], mientras que para el Método de Despacho Iterativo se tienen 19,8[s]. De ambas figuras se puede ver inmediatamente que esta diferencia se mantiene constante incluso cuando el problema se torna infactible, esto es: cuando la demanda alcanza el 150%, cuando la generación disminuye a un 70% y cuando la capacidad de transmisión no supera el 10% de la capacidad base de la red. Más aún, en estos casos infactibles, según la Figura 5.9 los tiempos son menores al promedio.

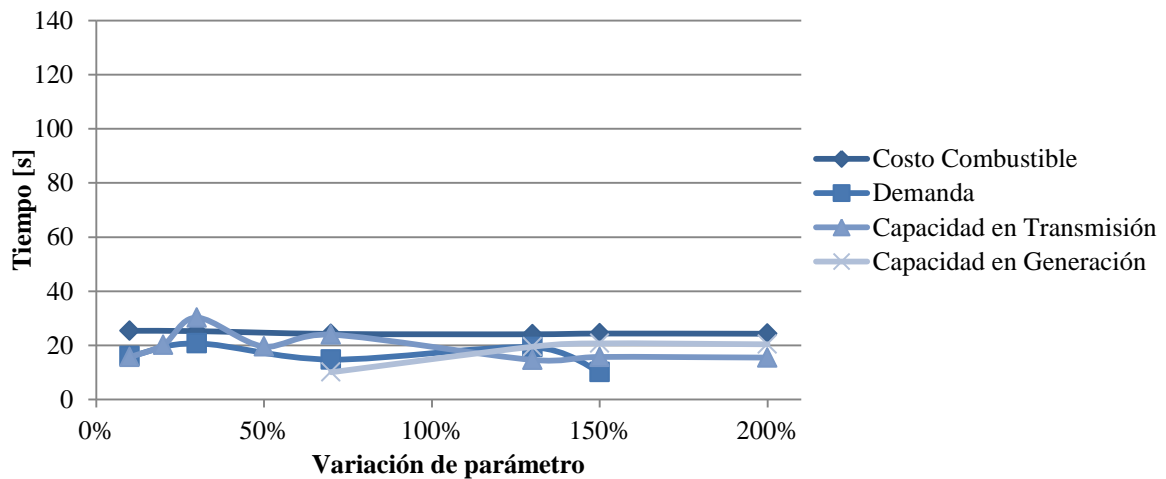


FIGURA 5.9. GRÁFICA DEL TIEMPO DE EJECUCIÓN DEL MÉTODO DE DESPACHO ITERATIVO EN RED DE 300 NODOS.

Hay que mencionar que el Método de Despacho Iterativo varía el número de restricciones agregadas, donde la mayor cantidad se encuentra al tener el 10% de la capacidad de transmisión, tal como se puede ver en la Figura 5.10, alcanzando cerca de 3.000 restricciones en la primera iteración antes de hallar infactible el despacho, y cerca de 400 restricciones para el 20% de la capacidad de transmisión, encontrado la solución óptima en la segunda iteración. Todo el resto de los casos está en el rango de 0 a 11 restricciones agregadas como máximo en el total de las iteraciones. Sumadas a las 138 restricciones en generación, más la ecuación de balance, se tienen

cerca de 540 restricciones relevantes agregadas al despacho iterativo en el peor caso³ factible (20% de capacidad de transmisión), que en contraste con las 338.804 es bastante menor, siendo sólo el 0,16% de este volumen. En este último caso existe una diferencia de tiempo de 77,95[s] entre el método y el despacho completo, correspondiendo a un 20,37% del tiempo que se invertiría sin el Método de Despacho Iterativo. El número de iteraciones que realiza el método en cada caso es bastante variable pero se mantiene siempre entre las 0 iteraciones (no encontrando ninguna restricción a agregar) y las 4 iteraciones.

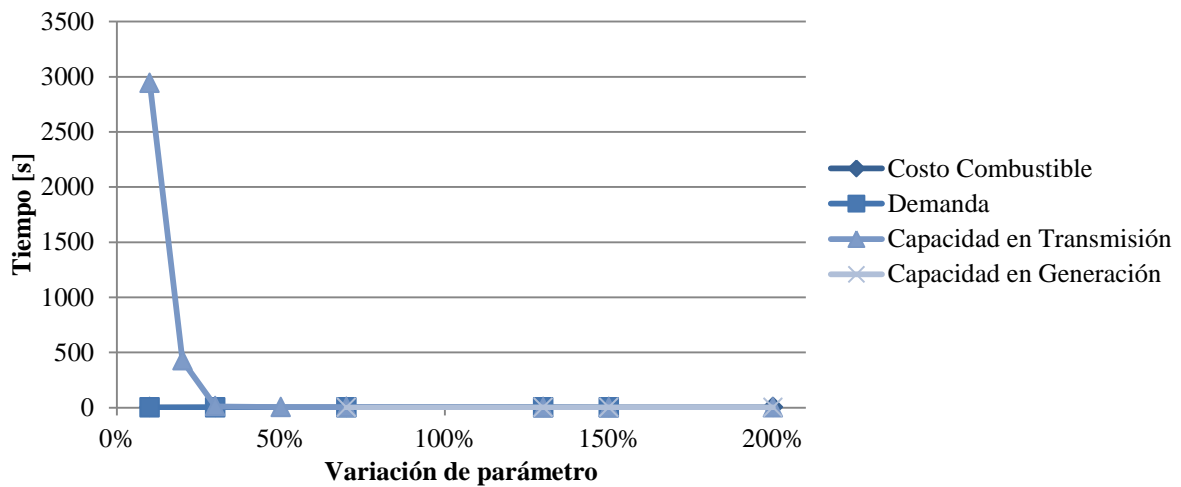


FIGURA 5.10. GRÁFICA DEL TOTAL DE RESTRICCIONES RELEVANTES AGREGADAS POR CADA VARIACIÓN.

³ Se considera que el peor caso es aquél que agrega una mayor cantidad de restricciones, haciendo que el despacho iterativo aumente su volumen de restricciones.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La optimización que se realiza en problemas de flujo de potencia con seguridad, es un proceso de gran carga computacional que para sistemas eléctricos reales, generalmente de gran tamaño con miles de barras, muchas veces no resulta factible solucionarlo debido al tiempo que se invertiría en esta tarea. Por esto se hace necesario realizar manipulaciones al problema inicial para que sea capaz de entregar el despacho óptimo en el menor tiempo posible. Una de estas manipulaciones se realiza mediante la filtración del conjunto de restricciones a las que está sujeta la optimización, ya sea mediante una reducción centrada en los estados de falla (conjuntos de restricciones) o en las restricciones mismas. A causa de lo anterior, entender el estado del arte de métodos y técnicas de reducción para este tipo de problemas, ayudó a establecer una base para el posterior desarrollo que se logró en esta memoria.

Al tener resueltos y analizados los métodos de filtrado en ambas redes, pequeña y mediana escala, es posible realizar un link respecto a lo propuesto para este trabajo de memoria. Se pudo lograr un mejoramiento en métodos de filtrado que permitieron un mayor desempeño de éstos, demostrando su efectividad. Por un lado, al método de Bouffard et al se le agregó mayor información al incluir la función objetivo como restricción dentro de su algoritmo de filtrado, obteniendo además de la información previa el despacho económico de la red, así como el costo asociado a éste. Por el lado del método iterativo estocástico de Moreno et al, se lograron desarrollar dos algoritmos de filtrado. El primer método fue una transformación al caso determinístico de éste tomando el concepto de filtrado, traduciéndolo para problemas OPF con seguridad determinística. El segundo método consta de un cambio conceptual del filtro probabilístico, pudiendo, además de ser determinístico, tomar un punto de vista desde las restricciones en lugar de las contingencias del problema, realizando la filtración a las restricciones mismas del problema y no a los estados de falla en transmisión que se consideran en una red eléctrica.

De los resultados se pudo comparar tanto el volumen de restricciones como el tiempo de ejecución que cada uno de los filtros entregó. Luego de los análisis en cuanto a los resultados y a las cualidades de cada método, fue el método de Moreno iterativo por restricción en transmisión quien resultó más eficiente dentro del grupo de métodos evaluados. Este método fue desarrollado para ser más eficiente, concretándose finalmente en el Método de Despacho Iterativo que fue comparado con el despacho completo en una red de 300 nodos. Considerando un análisis de sensibilidad, se llegó a que este método redujo el tiempo del despacho completo a un 20,4% promedio, equivalentes a 19,8[s], ocupando el 0,16% del volumen de restricciones. Con este resultado se valida un método que logra reducir el tanto el tiempo como el volumen de restricciones del despacho completo sobre una red mediana de 300 nodos, asegurando el mismo punto óptimo y pudiendo ser aplicable al caso de una red de mayor tamaño.

6.1. TRABAJO FUTURO

Una opción bastante interesante a seguir es el encontrar mayor número de restricciones relevantes que limiten la región factible para el método iterativo por restricción. Estas restricciones a agregar serían las cercanas al punto óptimo del problema de despacho, siendo entonces una metodología que a priori sería ocupada después del método de filtrado, pudiendo ser integrado como complemento al método existente. Esto permitiría poder realizar variaciones de los parámetros del problema dentro de cierto rango, encontrando una solución distinta en un tiempo prudente con las restricciones ya relevantes y las nuevas restricciones relevantes cercanas.

El trabajo desarrollado permite ser aplicado a problemas con otros enfoques distintos al que tiene el problema de despacho. Una de estas es el sentido en que se realizan las inversiones para un problema en el que se deba tomar una decisión que a pesar de los posibles escenarios debe ser óptima. En estos términos, esta decisión es una, y tiene que abarcar todos los posibles casos a futuro. Aquí jugaría un rol importante la tolerancia que se considera para incluir o no un elemento al conjunto de elementos relevantes, estableciendo un valor para la aversión al riesgo que se quiere tener en el modelo de inversión, incurriendo en un mayor costo si se tiene mayor aversión al riesgo o en un menor costo en caso contrario. En general, en cualquier problema que se presente este concepto, donde se tiene incertidumbre a causa de la variedad de posibilidades, podría ser aplicado una transformación del Método de Despacho Iterativo, eliminando las opciones redundantes e innecesarias que de alguna forma están consideradas dentro de otras opciones.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Moreno, R.; Pudjianto, D.; Strbac, G., "Transmission Network Investment With Probabilistic Security and Corrective Control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.28, no.4, pp.3935,3944, Noviembre 2013.
- [2] F. Capitanescu, J.L. Martinez Ramos, P. Panciatici, D. Kirschen, A. Marano Marcolini, L. Platbrood, L. Wehenkel, "State-of-the-art, challenges, and future trends in security constrained optimal power flow", *Electric Power Systems Research*, Volume 81, Issue 8, Pages 1731-1741, ISSN 0378-7796, Agosto 2011.
- [3] Dommel, H.W.; Tinney, W.F., "Optimal Power Flow Solutions", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol.PAS-87, no.10, pp.1866,1876, Octubre 1968.
- [4] Moreno, R., "Reliability and Cost-Benefit-Based Standars for Transmission Network Operation and Design," tesis para optar al grado de Doctor, *Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London*, 2012.
- [5] California Independent System Operator's (CAISO), *Market Redesign and Technology Upgrade (MRTU)*, "Shift Factors: Methodology and Example", 2008.
- [6] Ardakani, A.J.; Bouffard, F., "Identification of Umbrella Constraints in DC-Based Security-Constrained Optimal Power Flow," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol.28, no.4, pp.3924,3934, Noviembre 2013.
- [7] Bouffard, François, Francisco D. Galiana, and José M. Arroyo. "Umbrella contingencies in security-constrained optimal power flow." *15th Power Systems Computation Conference, PSCC*. Vol. 5. 2005.
- [8] Binato, Silvio, Mário Veiga F. Pereira, and Sérgio Granville. "A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems." *Power Systems, IEEE Transactions on* 16.2: 235-240, 2001.
- [9] He, J.; Cheng, L.; Kirschen, D.S.; Sun, Y., "Optimising the balance between security and economy on a probabilistic basis," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol.4, no.12, pp.1275,1287, Diciembre 2010.
- [10] Haitao Liu, Yuanzhang Sun, Peng Wang, Lin Cheng, Lalit Goel, "A novel state selection technique for power system reliability evaluation", *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 6, Pages 1019-1027, ISSN 0378-7796, Junio 2008.
- [11] Grigg, C.; Wong, P.; Albrecht, P.; Allan, R.; Bhavaraju, M.; Billinton, R.; Chen, Q.; Fong, C.; Haddad, S.; Kuruganty, S.; Li, W.; Mukerji, R.; Patton, D.; Rau, N.; Reppen, D.; Schneider, A.; Shahidehpour, M.; Singh, C., "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods

Subcommittee," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.14, no.3, pp.1010,1020, Agosto 1999.

[12] Electrical Engineering Department, University of Washington, "www.ee.washington.edu", http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf300/pg_tca300bus.htm, visitada: Enero 2015.

[13] School of Mathematics, University of Edinburgh, "www.maths.ed.ac.uk", http://www.maths.ed.ac.uk/optenergy/LocalOpt/300busnetwork_other.html, visitada: Enero 2015.

8. ANEXOS

8.1. SISTEMA DE 24 NODOS.

En la Tabla 8.1, se muestra la demanda existente en cada nodo de la red IEEE RTS. Notar que esta tabla ya tiene agregados los 200[MW] a la barra 2, tal como se indica en la sección 3.2.2.

Nodo	Demanda [MW]
1	108
2	297
3	180
4	74
5	71
6	136
7	125
8	171
9	175
10	195
11	0
12	0
13	265
14	194
15	317
16	100
17	0
18	333
19	181
20	128
21	0
22	0
23	0
24	0

TABLA 8.1. DATOS DE DEMANDA POR BARRA IEEE RTS.

La Tabla 8.2 y Tabla 8.3 muestran las características de las líneas que componen la red. Se explicitan los nodos a los que se conecta cada una así como la capacidad de transporte de potencia y su reactancia. Todas las líneas poseen reactancias distintas.

Línea	Nodo <i>from</i>	Nodo <i>to</i>	Capacidad [MW]	Reactancia [p.u.]
1	1	2	175	0.014
2	1	3	175	0.211
3	1	5	175	0.085
4	2	4	175	0.127
5	2	6	175	0.192
6	3	9	175	0.119
7	3	24	400	0.084
8	4	9	175	0.104
9	5	10	175	0.088
10	6	10	175	0.061
11	7	8	175	0.061

TABLA 8.2. DATOS DE TRANSMISIÓN IEEE RTS.

12	8	9	175	0.165
13	8	10	175	0.165
14	9	11	400	0.084
15	9	12	400	0.084
16	10	11	400	0.084
17	10	12	400	0.084
18	11	13	500	0.048
19	11	14	500	0.042
20	12	13	500	0.048
21	12	23	500	0.097
22	13	23	500	0.087
23	14	16	500	0.059
24	15	16	500	0.017
25	15	21	500	0.049
26	15	21	500	0.049
27	15	24	500	0.052
28	16	17	500	0.026
29	16	19	500	0.023
30	17	18	500	0.014
31	17	22	500	0.105
32	18	21	500	0.026
33	18	21	500	0.026
34	19	20	500	0.040
35	19	20	500	0.040
36	20	23	500	0.022
37	20	23	500	0.022
38	21	22	500	0.068

TABLA 8.3. DATOS DE TRANSMISIÓN IEEE RTS (CONTINUACIÓN).

La Tabla 8.4 y Tabla 8.5 corresponden a las potencias obtenidas por los despachos de cada método, mostrando el generador, la barra a la que pertenece y el método respectivo. Al final de ésta se muestra el valor del costo del despacho equivalente para todos dado que cambia potencia despachada entre generadores idénticos.

Generador	Barra	Sistema [MW]	Bouffard [MW]	Moreno E [MW]	Moreno R [MW]
1	1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	0.00	0.00	0.00	0.00
3	1	76.00	6.06	76.00	76.00
4	1	6.10	76.00	6.06	6.06
5	2	20.00	20.00	20.00	20.00
6	2	20.00	20.00	20.00	20.00
7	2	76.00	76.00	76.00	76.00
8	2	76.00	76.00	76.00	76.00
9	7	100.00	66.67	0.00	66.67
10	7	66.70	0.00	100.00	0.00
11	7	0.00	100.00	66.67	100.00
12	13	197.00	197.00	34.44	197.00
13	13	197.00	197.00	197.00	34.44
14	13	34.40	34.44	197.00	197.00
15	15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	15	0.00	0.00	0.00	0.00
17	15	0.00	0.00	0.00	0.00
18	15	0.00	0.00	0.00	0.00
19	15	0.00	0.00	0.00	0.00

TABLA 8.4. COMPARACIÓN DE DESPACHOS POR GENERADOR ENTRE EL DESPACHO DEL SISTEMA Y LOS MÉTODOS.

20	15	155.00	155.00	155.00	155.00
21	16	155.00	155.00	155.00	155.00
22	18	400.00	400.00	400.00	400.00
23	21	600.00	600.00	600.00	600.00
24	22	10.80	50.00	0.00	0.00
25	22	50.00	50.00	50.00	50.00
26	22	0.00	50.00	50.00	50.00
27	22	50.00	50.00	10.83	50.00
28	22	50.00	0.00	50.00	50.00
29	22	50.00	10.83	50.00	10.83
30	23	155.00	155.00	155.00	155.00
31	23	155.00	155.00	155.00	155.00
32	23	350.00	350.00	350.00	350.00
Costo Despacho [£]		172,337	172,337	172,337	172,337

TABLA 8.5. COMPARACIÓN DE DESPACHOS POR GENERADOR ENTRE EL DESPACHO DE SISTEMA Y LOS MÉTODOS (CONTINUACIÓN).

La Tabla 8.6 y Tabla 8.7 corresponden a los resultados arrojados por el método de Bouffard para el sistema de 24 nodos. En ella se encuentra el número de la restricción, a que tipo corresponde, la identificación de este tipo, el estado en que se encontró y el límite de desigualdad.

N° Restricción	Tipo	N° Tipo	Estado	Límite
1	Balance	-	1	Superior
2	Balance	-	1	Inferior
3	Generación	1	1	Superior
4	Generación	1	1	Inferior
5	Generación	2	1	Superior
6	Generación	2	1	Inferior
7	Generación	3	1	Superior
8	Generación	3	1	Inferior
9	Generación	4	1	Superior
10	Generación	4	1	Inferior
11	Generación	5	1	Superior
13	Generación	6	1	Superior
15	Generación	7	1	Superior
17	Generación	8	1	Superior
19	Generación	9	1	Superior
20	Generación	9	1	Inferior
21	Generación	10	1	Superior
22	Generación	10	1	Inferior
23	Generación	11	1	Superior
24	Generación	11	1	Inferior
25	Generación	12	1	Superior
26	Generación	12	1	Inferior
27	Generación	13	1	Superior
28	Generación	13	1	Inferior
29	Generación	14	1	Superior
30	Generación	14	1	Inferior
31	Generación	15	1	Superior
32	Generación	15	1	Inferior
33	Generación	16	1	Superior
34	Generación	16	1	Inferior
35	Generación	17	1	Superior
36	Generación	17	1	Inferior

TABLA 8.6. RESTRICCIONES UMBRALES MÉTODO BOUFFARD ET AL PARA SISTEMA DE 24 NODOS IEEE RTS.

37	Generación	18	1	Superior
38	Generación	18	1	Inferior
39	Generación	19	1	Superior
40	Generación	19	1	Inferior
41	Generación	20	1	Superior
43	Generación	21	1	Superior
45	Generación	22	1	Superior
47	Generación	23	1	Superior
49	Generación	24	1	Superior
50	Generación	24	1	Inferior
51	Generación	25	1	Superior
52	Generación	25	1	Inferior
53	Generación	26	1	Superior
54	Generación	26	1	Inferior
55	Generación	27	1	Superior
56	Generación	27	1	Inferior
57	Generación	28	1	Superior
58	Generación	28	1	Inferior
59	Generación	29	1	Superior
60	Generación	29	1	Inferior
61	Generación	30	1	Superior
62	Generación	30	1	Inferior
63	Generación	31	1	Superior
64	Generación	31	1	Inferior
65	Generación	32	1	Superior
582	Línea	7	24	Inferior
772	Línea	10	2	Inferior
788	Línea	10	10	Inferior
952	Línea	12	14	Inferior
1028	Línea	13	13	Inferior
1798	Línea	23	8	Inferior
1838	Línea	23	28	Inferior
1842	Línea	23	30	Inferior
1917	Línea	24	29	Superior
2224	Línea	28	26	Inferior
2226	Línea	28	27	Inferior

TABLA 8.7. RESTRICCIONES UMBRALES MÉTODO BOUFFARD ET AL PARA SISTEMA DE 24 NODOS IEEE RTS (CONTINUACIÓN).

Las Figura 8.1 y Figura 8.2 muestran el nivel de sobre-flujo que existe en las líneas respectivas para las distintas iteraciones. Estas se dividen en dos figuras dado el bajo porcentaje que existe desde la iteración 4 en adelante.

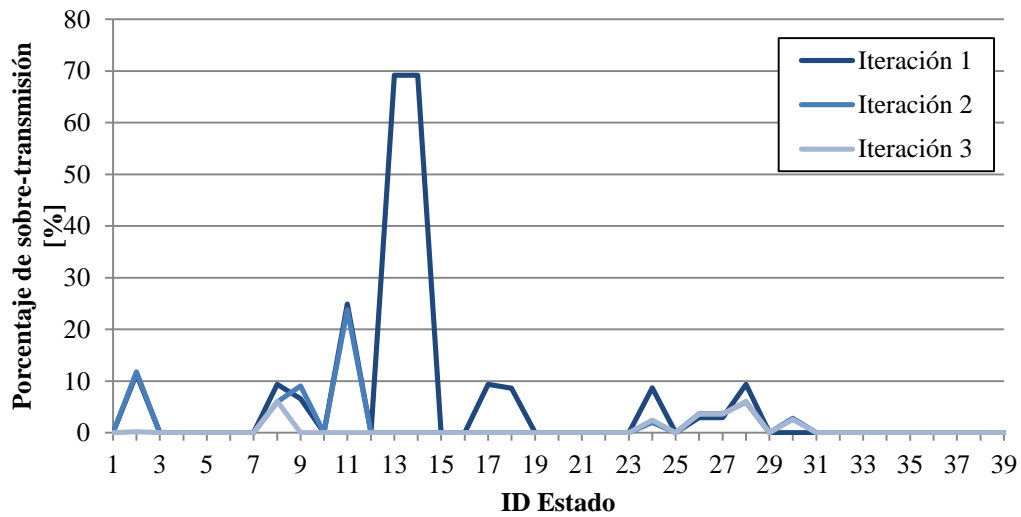


FIGURA 8.1. FLUJOS POR SOBRE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN NORMALIZADOS, METODO DE MORENO POR ESTADOS (ITERACIÓN 1 A 3).

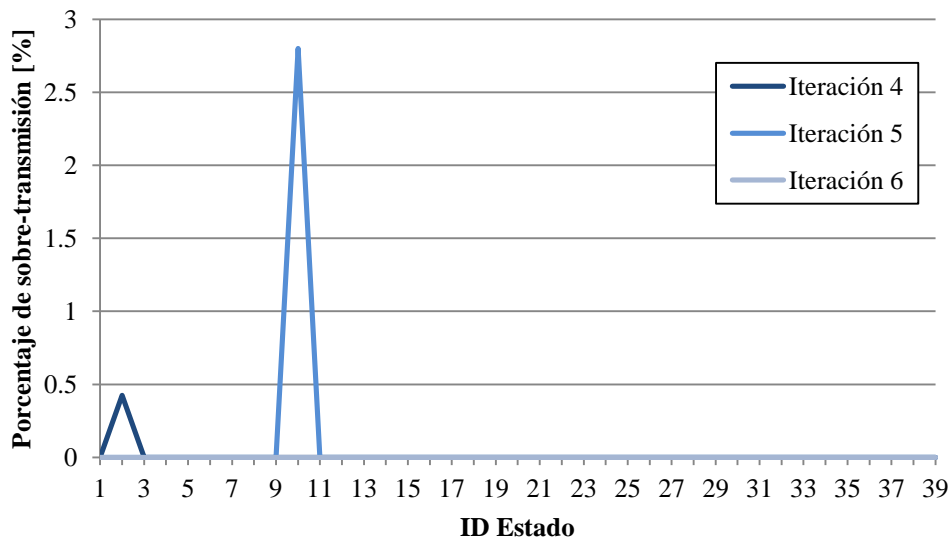


FIGURA 8.2. FLUJOS POR SOBRE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN NORMALIZADOS, METODO DE MORENO POR ESTADO (ITERACIÓN 4 A 6).

Iteración	Restricción				Sobre-capacidad [MW]	Costo Despacho [£]
	Generador	Línea	Estado	Límite		
1	-	-	-	-	2,650.00	0
2	22	-	-	Superior	2,050.00	0
3	23	-	-	Superior	1,974.00	102,500
4	4	-	-	Superior	1,974.00	102,500
5	3	-	-	Superior	1,974.00	102,500
6	8	-	-	Superior	1,974.00	102,500
7	7	-	-	Superior	1,895.00	102,500
8	20	-	-	Superior	1,895.00	102,500

TABLA 8.8. RESTRICCIONES DE LÍNEAS Y GENERACIÓN ACTIVADAS POR MÉTODO DE MORENO PARA 24 NODOS.

9	21	-	-	Superior	1,700.00	102,500
10	32	-	-	Superior	1,895.00	102,500
11	30	-	-	Superior	1,895.00	102,500
12	31	-	-	Superior	726.00	125,780
13	29	-	-	Superior	726.00	125,780
14	28	-	-	Superior	726.00	125,780
15	25	-	-	Superior	726.00	125,780
16	24	-	-	Superior	726.00	125,780
17	27	-	-	Superior	726.00	125,780
18	26	-	-	Superior	456.00	159,100
19	2	-	-	Superior	456.00	159,100
20	1	-	-	Superior	456.00	159,100
21	6	-	-	Superior	456.00	159,100
22	5	-	-	Superior	279.00	159,100
23	13	-	-	Superior	279.00	159,100
24	12	-	-	Superior	279.00	159,100
25	14	-	-	Superior	121.00	159,100
26	-	13	13	Inferior	42.79	159,100
27	-	1	11	Superior	382.19	163,719
28	11	-	-	Superior	382.19	163,719
29	10	-	-	Superior	382.19	163,719
30	9	-	-	Superior	30.38	164,129
31	-	23	8	Inferior	0.74	168,641
32	-	10	2	Inferior	4.90	172,277
33	-	10	10	Inferior	6e-6	172,337

TABLA 8.9. RESTRICCIONES DE LÍNEAS Y GENERACIÓN ACTIVADAS POR MÉTODO DE MORENO PARA 24 NODOS (CONTINUACIÓN).

8.2. SISTEMA DE 300 NODOS

En la Figura 8.3 se muestra el esquema de la red de 300 nodos desarrollada por la IEEE. Este esquema ya cuenta con la eliminación de transformadores, reemplazándolos por líneas para el tratamiento DC de la red.

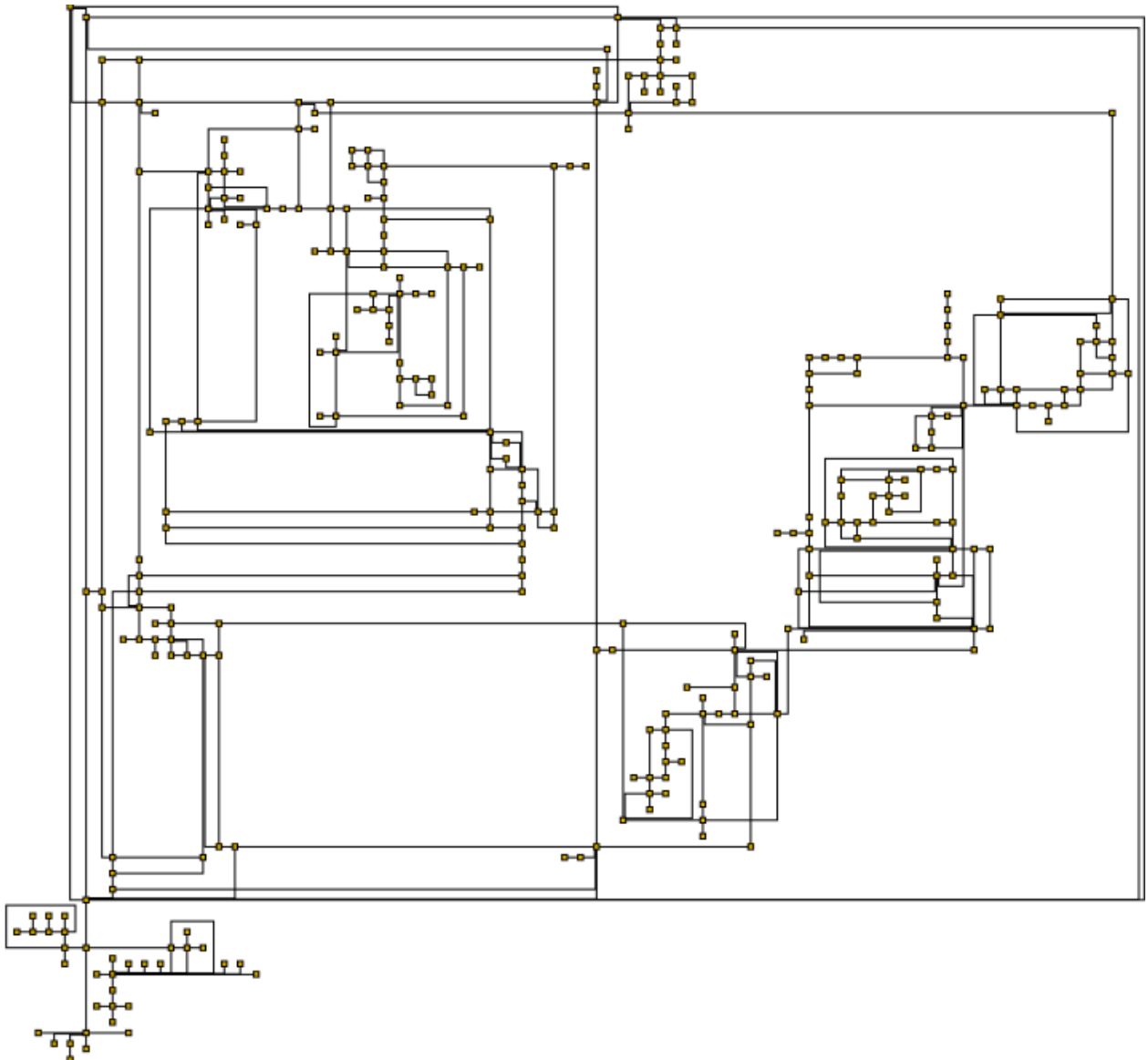


FIGURA 8.3. SISTEMA DE 300 NODOS IEEE.

8.3. OBTENCIÓN DE MATRICES PTDF

La obtención de las matrices de factores PTDF en todos los estados, se realiza mediante tres algoritmos. El primero es el maestro que realiza la mayoría de las operaciones, el segundo es una

función que calcula el número de circuitos entre dos barras en cada estado de falla, el tercero analiza los casos islas, entregando valores tratables para el cálculo de matrices. Se ejecuta secuencialmente *PTDF.m* y *PostPTDF.m*.

- Algoritmo 1: *PTDF.m*

```

% General parameters
archive='Main_Model300.xlsx';
Nb=xlsread(archive,'Parameters','B3');
Nl=xlsread(archive,'Parameters','B4');
Ns=xlsread(archive,'Parameters','B5');

Ret=zeros(Nl,Nb,Ns);
B=zeros(Nb,Nb,Ns);
% Lines parameters
From=xlsread(archive,'Lines',strcat('B2:B',num2str(Nl+1)));
To =xlsread(archive,'Lines',strcat('C2:C',num2str(Nl+1)));
x =xlsread(archive,'Lines',strcat('E2:E',num2str(Nl+1)));

%x=0.1;%Iguar impedancia para todas las lineas

% Connection matrix for intact system
LinesOut(:, :, 1)=zeros(Nl,Nb);
for l=1:Nl
    for i=1:Nb
        if(i==From(l))
            LinesOut(l,i,1)=1;
        elseif(i==To(l))
            LinesOut(l,i,1)=-1;
        else
            LinesOut(l,i,1)=0;
        end
    end
end

% Connection matrix for all states (set to 0 outaged lines)
for s=2:Ns
    for l=1:Nl
        if(l==(s-1))
            LinesOut(l, :, s)=zeros(1,Nb);
        else
            LinesOut(l, :, s)=LinesOut(l, :, 1);
        end
    end
end

% Admitance matrix
for s=1:Ns
    F=LCirc(LinesOut(:, :, s)); % number of circuits per line (matrix of Nb x Nb)
    for i=1:Nb
        for j=i:Nb
            if(i==j)
                suma=0;
                for l=1:Nl
                    suma=suma+abs(LinesOut(l,i,s)./x(l));
                end
                B(i,i,s)=suma;
            else

```

```

                B(i,j,s)=-F(i,j); %already divided by x
            end
            B(j,i,s)=B(i,j,s);
        end
    end
end

% Divide LinesOut matrix per each admittance to form the "H" matrix
(P_l=H*theta')
for l=1:Nl
    for i=1:Nb
        for s=1:Ns
            LinesOut(l,i,s)=LinesOut(l,i,s)./x(l);
        end
    end
end

% Eliminate the node that will be considered as reference (last node)
for s=1:Ns
    Ret(:,1:(Nb-1),s)=LinesOut(:,1:(Nb-1),s)*(B(1:(Nb-1),1:(Nb-1),s))^-1;
end

```

- **Algoritmo 2: *LCirc.m***

```

function B=L Circ(A)

archive='Main_Model300.xlsx';
Nl=xlsread(archive,'Parameters','B4');
[fil,col]=size(A);
B=zeros(col,col);
adm=xlsread(archive,'Lines',strcat('E2:E',num2str(Nl+1)));

for i=1:fil
    aux=1;
    for f=1:fil
        if(sum(abs(A(i,:)-A(f,:)))==0 && i~=f)
            aux=aux+1;
        end
    end
    B(find(A(i,:)==1),find(A(i,:)==-1))=aux./adm(i);
    B(find(A(i,:)==-1),find(A(i,:)==1))=aux./adm(i);
end

end

```

- **Algoritmo 3: *PostPTDF.m***

```

for s=1:Ns
    if isnan(Ret(:,1:(Nb-1),s))
        for l=1:Nl
            if(l==(s-1))
                Ret(l,1:(Nb-1),s)=Ret(l,1:(Nb-1),1);
            else
                Ret(l,1:(Nb-1),s)=zeros(1,Nb-1);
            end
        end
    end
end
end

```

```
% Write in .dat file
fid=fopen('PTDF_File.dat','w');
for l=1:Nl
    for j=1:Nb
        for s=1:Ns
            fprintf(fid,'%i,%i,%i,%2.6f\r\n',l,j,s,Ret(l,j,s));
        end
    end
end
fclose(fid);
```