



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“PROPUESTA DE DESARROLLO DE UNA TÉCNICA DE REDUCCIÓN DE ESPACIO DE BUSQUEDA APLICADA AL ESTUDIO DE LA PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE UNA RED DE SUBTRANSMISIÓN-CNEL MILAGRO”

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

AUTORES

Jocelyne Mabel Touzard Yépez

Richard Andrés Ullauri Contreras

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico de manera especial a mis padres, Carmen y Leónidas, quienes son los pilares principales en mi vida, gracias por haberme forjado como la persona que soy hoy en día, A mis hermanos por su apoyo incondicional en mi vida. A toda mi familia por confiar en mí. Todos estos logros se los debo a ustedes, siempre motivándome a seguir adelante y ser perseverante para alcanzar mis anhelos.

Richard Andrés Ullauri Contreras

DEDICATORIA

En reconocimiento a este proyecto, deseo dedicar mi trabajo a mis padres Liliam Yépez y Giovanni Touzard quienes me dieron una clara perspectiva de las ventajas de convertirse en una profesional. En cuanto a mi inspiración, entrego mi corazón a mi abuelito quien en lo largo de mi vida estudiantil me ayudó en la elaboración de las maquetas de mis proyectos, y de alguna manera sin su esfuerzo, determinación y labor no hubiera alcanzado el éxito.

Jocelyne Mabel Touzard Yépez

AGRADECIMIENTOS

Primero, agradecer a Dios, tu amor y bondad no tienen fin. A mis padres Carmen y Leónidas a mi hermano Henry, mi hermano Francisco, a mis sobrinas Kristel, Aylin y mi cuñada Diana quienes siempre me apoyaron y confiaron en mí para terminar mi carrera universitaria. Gracias a todos mis familiares, quienes siempre me brindaron su apoyo desinteresado. En especial a mi primo Holger y su familia. Adicionalmente gracias a ESPOL y a los docentes que aportaron mi formación académica, particularmente al Doctor Miguel Alberto Torres, mi tutor, quien supo compartir su tiempo y conocimiento durante el desarrollo de la tesis. Al Magíster Fernando Arturo Vaca, profesor de la materia integradora, por sus comentarios, consejos para mejorar y culminar mi trabajo de titulación.

Richard Andrés Ullauri Contreras

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más profundos agradecimientos a Dios por ser mi guía y sin él nada de esto hubiera sido posible. A mis tíos, Javier Yépez y Alexandra Yépez quienes me brindaron un apoyo invaluable tanto en lo emocional y económico durante toda mi etapa universitaria. A mis hermanos Allyson Touzard y Adrian Touzard que mediante sus grandes consejos me impulsaron a alcanzar la culminación de este proyecto. A mis amigos Jefferson Bermeo y Leonardo Romo quienes me brindaron todo su apoyo y estuvieron siempre pendientes de mí. A mi tutor Dr. Miguel Torres quien mediante su exigencia, persistencia y aliento me permitió reforzar cada detalle de mi proyecto. Al Magister Fernando Vaca quien estuvo pendiente de cada avance como parte de la contribución de este proyecto de titulación.

Jocelyne Mabel Touzard Yépez

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Jocelyne Mabel Touzard Yépez y Richard Andres Ullauri Contreras damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jocelyne Mabel
Touzard Yépez




Richard Andrés
Ullauri Contreras

EVALUADORES

MSc. Fernando Vaca

PROFESOR DE LA MATERIA



PhD. Miguel Torres

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este trabajo propone un modelo lineal disyuntivo para resolver el problema estático de planificación de expansión de la red de subtransmisión de la Unidad de Negocios CNEL Milagro, siendo la inversión de expansión de subtransmisión uno de los mayores problemas que enfrentan las empresas de servicios públicos anidado el tiempo y esfuerzo computacional. El modelo propuesto se lo utiliza para garantizar la solución óptima del problema con los métodos clásicos de optimización.

Para problemas a gran escala cuando el número de variables y restricciones aumentan no es posible encontrar soluciones óptimas o incluso de alta calidad en un tiempo estimado, se propuso una técnica de reducción de espacio de búsqueda que consiste en crear un pool de soluciones muy cercanas al óptimo, para identificar las líneas candidatas significantes. Luego con la base de datos actualizada, se resolvió el problema de PLEM con un espacio de búsqueda reducido.

El modelo se implementó usando el lenguaje de programación matemática (AMPL) y se resolvió utilizando el solucionador comercial CPLEX. Los sistemas Garver de 6 barras, IEEE 118 barras y el sistema de subtransmisión de CNEL Milagro se utilizaron para evaluar y mostrar el desempeño del modelo propuesto y la estrategia de reducción de espacio de búsqueda.

Palabras Clave: Planificación de la expansión de la red de subtransmisión. Modelo lineal disyuntivo. Programación lineal entera mixta. Estrategia de reducción de espacio de búsqueda.

ABSTRACT

This work propose a disjunctive linear model to resolve the static problem of planning expansion of the subtransmission network for the business unit CNEL, Milagro, where the inversion of subtransmission expansion is one of the biggest problems that companies with public services face nested time and computational effort. It is used to guarantee the optimal solution for the problem with classical optimization methods.

For big scale problems when the number of variables and constraints increase it's no possible find optimal solutions even of high quality in an estimated time, it was proposed a search space reduction technique that consists of create a pool of solutions close to the optimum to identify the significant candidate lines, then with the updated data the PLEM problem was solved with a reduce search space.

The model was implemented using the mathematical programming and it was resolved using the commercial solver CPLEX. the garver systems of 6 bars, IEEE 118 bars and CNEL Milagro subtransmission system were used to evaluate and show the performance of the propose model and the strategy search space reduction.

Keywords: planning the expansion of the subtransmission network. Disjunctive lineal model. Mixed integer lineal programming. Search space reduction strategy.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1	11
1. Introducción.....	11
1.1 Descripción del problema	12
1.2 Justificación del Problema	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo General.....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 Marco Teórico	14
1.4.1 Técnicas para modelar el sistema de transmisión de potencia	14
1.5 Problemas de optimización	20
1.5.1 Problemas de Optimización Convexo y Cóncavo.....	22
CAPÍTULO 2.....	23
2. Metodología.....	23
2.1 Modelo lineal Disyuntivo.....	24
2.2 Lenguajes algebraicos de modelado	26
2.3 Técnica de reducción de espacio de búsqueda.....	27
2.4 Problema básico de PERT	28
2.4.1 Sistema Garver de 6 barras	28

2.5	Sistema IEEE de 118 barras	30
2.6	Sistema de subtransmisión CNEL- Milagro	31
CAPÍTULO 3.....		33
3.	Resultados y Análisis	33
3.1	Pruebas al sistema Garver 6 barras	33
3.2	Pruebas al sistema IEEE 118 barras	35
3.3	Pruebas al sistema de la red de subtransmisión CNEL- Milagro	35
CAPÍTULO 4.....		37
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	37
4.1	Conclusiones.....	37
4.2	Recomendaciones.....	38
BIBLIOGRAFÍA		39
ANEXOS		41

ABREVIATURAS

AMPL	Lenguaje de programación matemática.
CNEL EP	Corporación Nacional de Electricidad.
PERST	Planificación de la expansión de redes de subtransmisión.
PERT	Planificación de expansión de redes de transmisión.
PNL	Programación no lineal.
PL	Programación lineal.
PC	Programación cuadrática.
PCRC	Programación cuadrática con restricciones cuadráticas.
PQSO	Programación cónica de segundo orden.
PSD	Programación semidefinida.
PNLEM	Problema no lineal entero mixto.
PET	Problema de expansión de transmisión.
SNI	Sistema Nacional Interconectado.
UN	Unidad de Negocio.
MREB	Metodología de reducción del espacio de búsqueda.
STP	Sistema de Transmisión de Potencia.
PLEM	Programación lineal entera mixta.

SIMBOLOGÍA

Índices:

i : Índice bus emisor

j : Índice bus receptor

t : Índice de etapa

y : Índice de líneas candidatas equivalentes

o : Índice de red existente

d : Demanda

g : Generación

l : Línea de transmisión

P : Potencia Activa

Q : Potencia Reactiva

qdr : Cuadrático

v : Voltaje en la barra

θ : Angulo de fase de la barra

Conjuntos:

Ω_b : Conjunto de barras

Ω_l : Conjunto de corredores

Y : Conjunto de equivalentes de circuitos

Funciones:

CE : Costo de expansión

Constantes:

B_i^{sh} : Susceptancia conectada en la barra i .

c_{ij} : Costo de la construcción de la línea ij .

G_i^{sh} : Admitancia conectada en la barra i .

n_{ij}^0 : Número de líneas existentes en el corredor ij .

\bar{n}_{ij} : Número máximo de líneas que pueden ser añadidos en el corredor ij .

$n_{ij,y}$: numero de línea en el corredor equivalente.

P_i^d : Demanda de potencia activa en bus i (modelo disyuntivo)

\bar{P}_i^g : Generación máxima en la barra i .

\bar{P}_{ij} : Limites máximo de potencia activa en corredor ij

P_i^d : Demanda de potencia activa en bus i

$\bar{P}_{i,t}^g, \underline{P}_{i,t}^g$: Limites máximo y mínimos de generación de potencia activa, en bus i , etapa t

$\bar{P}_i^g, \underline{P}_i^g$: Limites máximo y mínimos de generación de potencia activa, en bus i

Q_i^d : Demanda de potencia reactiva en la barra i

$\bar{Q}_{i,t}^g, \underline{Q}_{i,t}^g$: Limites máximo y mínimo de generación de potencia reactiva, en bus i , etapa t

r_{ij} : Resistencia en el corredor ij .

$\bar{\theta}$: Diferencia máxima del ángulo de fase de tensión

r_{ij} : Resistencia de la línea equivalente y en el corredor ij .

$\bar{\theta}$: Diferencia máxima del ángulo de fase de tensión

\bar{V}, \underline{V} : Limites de magnitud de voltaje máximo y mínimo

V_{nom} : Voltaje nominal del sistema

x_{ij} : Reactancia en el tramo ij .

$x_{ij,y}$: Reactancia de línea equivalente y en corredor ij

$z_{ij,y}$: Impedancia de línea equivalente y en corredor ij

Variables:

$I_{ij,y}$: Magnitud del flujo de corriente en equivalente y , corredor ij

P_{ij}^0 : Flujo de potencia activa en las líneas nuevas ij

$P_{ij,y}$: Flujo de potencia activa en la nueva línea, corredor ij

n_{ij} : Número de líneas adicionadas en el corredor ij .

$P_{ij,y}$: Flujo de potencia activa en la línea y , corredor ij

P_i^g : Generación de potencia activa en el bus i

$Q_{ij,y}$: Flujo de potencia reactiva en línea equivalente y , corredor ij .

$Q_{i,ij,y}^{shl}$: Inyección de potencia reactiva debido a la línea paralela equivalente y , corredor ij .

Q_i^g : Generación de potencia reactiva en la barra i

θ_i : Angulo de fase de voltaje en el bus i .

V_i :Magnitud de voltaje en el bus i

V_i^{qdr} : Cuadrado de magnitud de voltaje $V_{i,t}$

Variables Binarias

$w_{ij,y,t}$: Variable de decisión para la construcción de una nueva línea equivalente y en el corredor ij en la etapa t

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta	24
Figura 2.2 Sistema Garver adaptado. Fuente: [8]	29
Figura 2.3 Sistema IEEE 118 barras. Fuente: [8]	30
Figura 2.4 Estructura eléctrica de CNEL EP Unidad de Negocio Milagro. Fuente [19] .	32
Figura 3.1 Sistema Garver adaptado. Fuente: [8]	34
Figura 3.2 Sistema IEEE 118 barras. Fuente: [8]	35
Figura 3.3 Sistema de subtransmisión Milagro. Fuente [Propia]	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Solución óptima de planificación, sistema Garver	29
Tabla 2.2 Solución óptima de planificación, sistema IEEE 118 barras.....	30
Tabla 3.1 Resumen del costo de inversión y tiempo de procesamiento	36

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de la expansión de los sistemas eléctricos a largo plazo corresponde a un complejo selección de variables decisión. Cuando se tiene más variables, en el sistema de análisis, que son no lineales, como lo es el caso de la red de potencia, o binarias, las cuales indican si se decide o no construir, expandir o hacer un mantenimiento en el sistema; el costo computacional requerido para encontrar solución del modelo matemático utilizado se incrementa exponencialmente lo que hace que el solucionador le tome demasiado tiempo o no pueda resolver el problema de una manera plausible y/o factible [1], [2].

En un problema de optimización se proporciona un conjunto de posibles soluciones plausibles “región factible” dentro de la cual se determina la posible solución óptima global, que minimice o maximice la función objetivo, respetando todas las restricciones, de igualdad y desigualdad, que limitan la problemática. Esta región factible aumenta de tamaño y/o de nivel de complejidad a medida que las restricciones aumentan en el modelo matemático propuesto; es decir, el tiempo y el esfuerzo computacional crece de forma exponencial [2].

Considerando estos antecedentes, existe la necesidad de tener una reducción de espacio de búsqueda del problema; es decir, disminuir de forma adecuada la región factible sin perder de foco la solución óptima del problema original planteado. Esta técnica, implementa un nuevo espacio de búsqueda menor, denominándose metodología de reducción del espacio de búsqueda (MREB) [2].

La naturaleza de los sistemas eléctricos de potencia, considerando las ecuaciones AC, es no lineal. A lo largo de la literatura, los modelos matemáticos utilizados generalmente para representar la red eléctrica tienen la característica de ser modelos simplificados del modelo AC. Entre los más conocidos se tiene: El modelo de transporte, el modelo DC y el modelo lineal híbrido [3].

Otra vertiente, dentro de la problemática en el sector eléctrico, es el análisis en las diferentes etapas temporales en las que se pueden realizar las inversiones del caso. Debido a eso, los problemas de planificación de la expansión de redes transmisión y/o subtransmisión (PERT/PERST) pueden dividirse como un problema de una etapa (estático), o puede clasificarse en varias etapas de planificación [4].

1.1 Descripción del problema

En la actualidad existen diferentes paquetes computacionales que nos permiten el desarrollo para obtener la solución del problema de la planificación de la expansión de la red de subtransmisión ecuatoriana, una de las principales dolencias existente es el esfuerzo computacional anidado al tiempo que toma al “solver” obtener la respuesta óptima del problema en un sistema a gran escala. Por tal motivo nace la necesidad de explorar técnicas que permitan reducir el espacio de búsqueda, en el cual se encuentra el mínimo global de nuestra función objetivo, de tal forma minimizar el tiempo y esfuerzo computacional intentando asegurar que la solución sea la mejor posible en el espacio de búsqueda reducido, a pesar de no poder asegurar la optimalidad global del caso.

1.2 Justificación del Problema

Debido a la situación actual que está azotando al país por el covid-19 hubo recortes presupuestarios en diferentes sectores estratégicos como en la educación, electricidad, lo cual no permite hacer grandes inversiones en dichos sectores.

Por lo cual este proyecto tiende a minimizar el impacto del recorte presupuestario entregando al sistema, ministerio o al gobierno una técnica que va a optimizar la expansión reduciendo el valor de la inversión todo en un solo modelo integrado.

La idea principal es tomar los modelos existentes, adaptarlos a la realidad ecuatoriana, verificando una posible reducción en las arcas estatales; permitiendo una reinversión en otros sectores estratégicos del País sin caer en la necesidad de limitar el crecimiento natural, tecnológico y de infraestructura del sector eléctrico ecuatoriano.

Bajo los modelos existentes se crea un espacio de solución donde se incluye soluciones de muy buena calidad, todo esto depende de cuánto tiempo tome el análisis del sistema el cual se encuentra relacionado directamente con el tamaño de este por el gran número de líneas y etapas, el cual crea numerosas combinaciones aumentando el espacio de búsqueda y esfuerzo computacional.

Para un sistema complejo las soluciones podrían tomar largos periodos de tiempo haciendo que su aplicación no sea efectiva por esta razón se llega a la conclusión de buscar una técnica que permita brindar soluciones de forma fácil y rápida obteniendo una solución óptima global o a su vez soluciones de muy buena calidad.

Debido a esto surge la propuesta de implementar un algoritmo mediante el solver CPLEX el cual nos permitirá resolver problemas de gran escala haciendo que el tiempo sea eficiente reduciendo el espacio de búsqueda.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una técnica de reducción de espacio de búsqueda, que permita disminuir el tiempo y el esfuerzo computacional, cuando se realiza la planificación de la expansión del sistema de subtransmisión eléctrico de potencia.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar una red local en la cual se aplique la técnica de reducción del espacio de búsqueda.
- Aplicar el modelo matemático lineal disyuntivo a una red mundialmente conocida para encontrar la solución óptima al problema de la expansión de la transmisión.
- Proponer un modelo integrado que evalúe el problema de expansión de las redes de subtransmisión a gran escala para obtener soluciones de muy alta calidad.

1.4 Marco Teórico

Respecto al modelo matemático de optimización, el cual será llevado a cabo para el planteamiento de expansión de transmisión puede resultar un poco completo debido a su naturaleza combinatoria el cual involucra la programación no lineal entera mixta (PLEM) en donde el sistema de potencia involucrará cambios en su red ya que si su tamaño aumenta, por ende aumentará su número de variables lo que conlleva a que el número de alternativas para la solución aumente [1], [5], [6].

Debido al problema combinatorio que se presenta en la resolución del problema de expansión de transmisión (PET) existe un modelo más preciso para resolverlo el cual se basa en las ecuaciones de flujo de potencia AC, existen modelos los cuales trabajan considerando solo la parte activa de la red de transmisión siendo esta un modelo de implementación más sencilla [3], [5].

Podemos encontrar diferentes modelos los cuales pueden representar el sistema de transmisión considerando que estos se basan en la característica de ser modelos simplificados del modelo AC, entre estos tenemos [3], [4], [7].

- Modelo de Transporte.
- Modelo DC.
- Modelo DC Lineal Disyuntivo.
- Modelo Híbrido Lineal.

1.4.1 Técnicas para modelar el sistema de transmisión de potencia

Modelo de transporte: El modelo de transporte fue propuesto por Garver en 1970, siendo este uno de los primeros modelos matemáticos considerado para la solución de la planificación de expansión de transmisión [3], [8]. Este modelo resulta a partir de un modelo de flujo de

carga AC, ya que este modelo presentaba problemas al ser resuelto por los métodos de optimización que existían en ese entonces.

Este modelo parte de la simplificación lineal del modelo DC, el cual al cumplir solamente con la primera ley de Kirchhoff y no con la segunda ley, considera la conservación de los flujos de potencia en los nodos o barras del sistema sin tener en cuenta las caídas de voltaje que ocurren en las líneas de transmisión debido a la impedancia que estas tienen [1], [3], [5], [8].

Se presenta una gran capacidad de convergencia en modelos de sistemas aislados al no considerar las impedancias de las líneas. No obstante, este modelo lineal no cuenta con las técnicas adecuadas para resolver un modelo de planificación de expansión de transmisión (PET) debido a que esta presenta soluciones no prácticas con respecto al óptimo de un modelo DC.

Este modelo presenta las siguientes ecuaciones partiendo de su función objetivo a minimizar [3], [8].

Ecuación para minimizar:

$$\min v = \sum_{\forall ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1.1)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.2)$$

$$-(n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq (n_{ij}^0 + n_{ij})\bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.3)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.4)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.5)$$

$$n_{ij} \text{ entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.6)$$

La ecuación para minimizar (1.1) tiene como objetivo reducir los costos de inversión debido a la incorporación de nuevas líneas a la red de transmisión a lo largo del horizonte de planeamiento. La ecuación (1.2) radica en la ejecución de la primera ley de Kirchhoff la cual genera

restricciones para cada barra del sistema. La ecuación (1.3) manifiesta los límites de capacidad de transmisión que tienen los transformadores y las líneas en un sistema de potencia. La ecuación (1.4) manifiesta los límites que se tienen en cada nodo de la generación de potencia activa. La ecuación (1.5) manifiesta el límite de cantidad de circuitos que pueden existir en un sistema [3], [5].

Modelo DC: Este modelo se basa en la generalización del flujo de carga DC, es considerado como uno de los métodos más eficientes y por ende viene a ser un modelo ideal para resolver la PET [3], [5], [7].

Este modelo emplea las dos leyes Kirchhoff para todos los circuitos existentes en la red como para los circuitos adicionados en el sistema de transmisión los cuales involucran un aumento de variables debido a la cantidad de líneas adicionadas al sistema. Este modelo es ideal para representar de manera real un problema, pero su complejidad lo convierte en un modelo difícil de resolver, sin embargo, es altamente empleado, este modelo matemático trata de problemas de programación no lineal entera mixta (PNLEM) [3], [5].

Este modelo matemático DC presenta las siguientes ecuaciones partiendo de su función objetivo a minimizar [3], [5], [7].

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1.7)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij} = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.8)$$

$$P_{ij} = (n_{ij}^0 + n_{ij}) \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.9)$$

$$-(n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.10)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.11)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.12)$$

$$n_{ij} \text{ Entero} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.13)$$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid Tb_i = 3 \quad (1.14)$$

En la ecuación (1.7) se representa la función de costo a minimizar mientras que en la ecuación (1.8) se emplea la primera ley de Kirchhoff. La ecuación (1.9) representa la aplicación de la segunda ley de Kirchhoff la cual se da al multiplicar dos variables n y θ . La ecuación (1.10) representa la restricción de los flujos de potencia en las líneas de transmisión. La ecuación (1.11) presenta el límite de líneas que se pueden adicionar a la red como el límite de generación de potencia activa que se presenta en la ecuación (1.12). En la ecuación (1.13) se emplea para asignar el ángulo inicial [3], [8].

Modelo DC Lineal Disyuntivo: Este modelo lineal disyuntivo parte del modelo DC en donde se colocan los flujos de potencia activa de las líneas ya existentes como también de las líneas nuevas que se agregaran al sistema, dando paso para transformar toda variable entera n_{ij} en un conjunto Y de variables binarias $w_{ij,y}$ [3], [8].

Minimizar:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} \sum_{y \in Y} w_{ij,y} \quad (1.14)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{j \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ji,y} + \sum_{y \in Y} P_{ji}^0 - \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ij,y} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij}^0 = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.15)$$

$$P_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.16)$$

$$-M(1 - w_{ij,y}) \leq P_{ij,y} x_{ij} - (\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (1.17)$$

$$-n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.18)$$

$$-w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.19)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.20)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.21)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_1, \forall y \in Y/y > 1 \quad (1.22)$$

$$w_{ij,y} \text{ binario} \quad \forall ij \in \Omega_1 \forall y \in Y \quad (1.23)$$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid Tb_i = 3 \quad (1.24)$$

El objetivo principal de este modelo es decidir si se construye o no nuevas líneas de transmisión, donde la función objetivo a minimizar que se indica en (1.14) representa la inversión total requerida, mientras que el balance de potencia activa se indica en (1.15), en (1.16) indica el inicio del flujo de potencia que depende proporcionalmente al número de líneas existente e inversivamente proporcional a la diferencia de ángulos entre la reactancia de las líneas. Unas de las restricciones se muestran en (1.17) que me indica la diferencia angular entre las barras que no estén conectadas mientras que $w_{ij,y}$ es una variable binaria. La siguiente restricción me indica los rangos permitidos de potencia (1.18) que depende del flujo de potencia y las líneas existentes, en (1.19) $w_{ij,y} \bar{P}_{ij}$, me indica los límites permitidos donde $w_{ij,y}$ será igual a la unidad si se agrega un tramo ij de lo contrario cero, mientras que la variable \bar{P}_{ij} indica el máximo flujo que puede soportar el tramo ij, en (1.20) me indica un máximo o mínimo de potencia generada que puede tomar. En (1.21) indica la suma de las líneas que fueron añadidas y a su vez comprueba que no supere el máximo de líneas por agregar, mientras que en (1.22) asegura que no haya soluciones redundantes en el conjunto "Y". La última ecuación indica los valores iniciales de ángulos que son asignados en cada barra (1.23) [8].

Modelo Híbrido Lineal: El modelo híbrido lineal fue desarrollado por R. Villasana en 1985, como su nombre lo indica utiliza una combinación entre el modelo DC y el modelo de transporte, este modelo utiliza tanto la primera como la segunda ley de Kirchhoff a las líneas existentes con el objetivo de encontrar soluciones muy similares al modelo DC manteniendo la complejidad del sistema [3], [8].

función Objetivo a Minimizar:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1.25)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} + \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji}^0 - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ji} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ji}^0 = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.26)$$

$$P_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.27)$$

$$-n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.28)$$

$$-n_{ij,y} \bar{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq n_{ij} \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.29)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall ij \in \Omega_b \quad (1.30)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.31)$$

$$n_{ij} \text{ Entero} \quad \forall ij \in \Omega_l$$

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid Tb_i = 3 \quad (1.32)$$

La función para minimizar se indica en (1.25), en (1.26) indica el balance de potencia activa, el cálculo para el flujo de potencia activa inicial se indica en (1.27) respetando los límites de potencia los cuales se indican en (1.28) y (1.29). La potencia máxima de los generadores se indica en (1.30), en (1.31) indica el número máximo de líneas que se pueden agregar, el ángulo inicial se indica en (1.32) [8].

Modelo de flujo de carga AC: Uno de los modelos poco utilizados para resolver problemas de expansión de redes de transmisión debido a las restricciones cuando se va a modelar una red. A continuación de procederá a mostrar las ecuaciones del modelo de flujo de carga AC [3], [8].

Función para minimizar

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} I_{ij}^2 r_{ij} \quad (1.33)$$

Sujeto a:

$$P_i^g + \sum_{ji \in \Omega_l} P_{ji} + \sum_{y \in Y} (P_{ji} + I_{ij}^2 r_{ij}) - G_i^{sh} V_i^2 = P_i^d \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.34)$$

$$Q_i^g + \sum_{ji \in \Omega_l} (Q_{ji} + Q_{i,ji}^{shl}) + \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ji} + Q_{i,ji}^{shl} + I_{ij}^2 r_{ij}) - B_i^{sh} V_i^2 = Q_i^d \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.35)$$

$$V_i^2 - V_j^2 = [2(r_{ij}P_{ji} + x_{ij}Q_{ji}) + z_{ij}^2 I_{ij}^2] \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.36)$$

$$V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) = (x_{ij}P_{ij} - r_{ij}Q_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.37)$$

$$V_i^2 I_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.38)$$

La función objetivo a minimizar (1.33) la cual me representa las pérdidas de la energía de la red de transmisión, mientras las restricciones (1.34) y (1.35) indican el balance de potencia activa y reactiva respectivamente. Las ecuaciones siguientes (1.36) y (1.37) corresponden a la magnitud de voltaje y la diferencia de ángulo para cada línea y por último (1.38) representa el flujo de potencia entre barras [5], [8].

1.5 Problemas de optimización

Un problema de optimización consiste en minimizar o maximizar el valor de una variable. En otras palabras, encontrar los valores que deben de tomar las variables de decisión del modelo matemático para hacer optima la función objetivo complaciendo el conjunto de restricciones. Notando que en un problema de optimización tenemos un numero infinito de soluciones, por lo cual el propósito de la optimización es encontrar la mejor solución posible que se encuentra entre todas las soluciones potenciales [9], [10].

El punto que satisface todas las restricciones de un problema se lo conoce como un punto factible, y al conjunto de puntos factibles se lo llama región factible. Existen diferentes métodos capaces de resolver de una manera eficiente un problema de optimización. Dado que hay diferentes tipos de problemas de optimización, se deben clasificar estos de acuerdo a sus características [9], [10]:

- **De la función objetivo:** lineal, cuadrática y no lineal.
- **De las restricciones:** lineales (canalizadas y de forma general), cuadráticas, cónicas de segundo orden, semidefinidas positivas y no lineales.
- **De las variables de decisión:** continuas y discretas (binarias o enteras).

Los problemas de optimización en general pueden ser de [9], [10]:

- **Programación lineal (PL):** que ocurren cuando la función objetivo es lineal o cuando las variables son continuas y el conjunto de restricciones, lineales. En este problema de optimización se obtiene soluciones muy aproximadas de modo rápido y sencillo, pero en la práctica es el que menos se asemeja a los problemas reales.
- **Programación Cuadrática (PC):** ocurren cuando la función objetivo tiene términos cuadráticos (no todos), mientras que las variables son continuas y el conjunto de restricciones lineales.
- **Programación Cuadráticas con restricciones Cuadráticas (PCRC):** sucede cuando la función objetivo tiene términos cuadráticos, variables continuas y el conjunto de restricciones son lineales y cuadráticas. En estos tres problemas mencionados, se puede notar que trabajan aún con variables continuas, que proporcionan un rango de posibilidades de solución.
- **Programación Cónica de Segundo Orden (PQSO):** en este caso la función objetivo tiene términos lineales, variables continuas y el conjunto de restricciones son lineales y cónicas de segundo orden.
- **Programación Semidefinida (PSD):** la función objetivo es una función lineal de una matriz simétrica X , la cual es optimizada sujeta a un conjunto de restricciones lineales de los elementos de la matriz X . La restricción adicional es que la solución tiene que ser Semidefinidas positiva [11].
- **Programación No lineal (PNL):** en este caso la función objetivo o sus restricciones o ambas tienen términos no lineales y las variables son continuas. Este tipo son los que se asemeja a los casos reales.

1.5.1 Problemas de Optimización Convexo y Cóncavo.

En todo problema de optimización podemos encontrar máximos/mínimos locales y un máximo/mínimo global que corresponde a los puntos que satisface a la función objetivo, así como a las restricciones. Se dice que una función es convexa cuando dos puntos, cualesquiera de su gráfica, el segmento que los une queda por encima de la curva de la función caso contrario es una función cóncava [9], [10].

Para problemas de minimización, si la función objetivo y la región factible son convexas, entonces cualquier mínimo local es el mínimo global del problema, por otro lado, si es un problema de maximización si la función objetivo es cóncava y la región factible es convexa entonces cualquier máximo local es el máximo global del problema [9].

En este documento se trabajará con problemas de programación lineal lo cual pueden resolverse por medio del método simplex o el método del punto interior.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

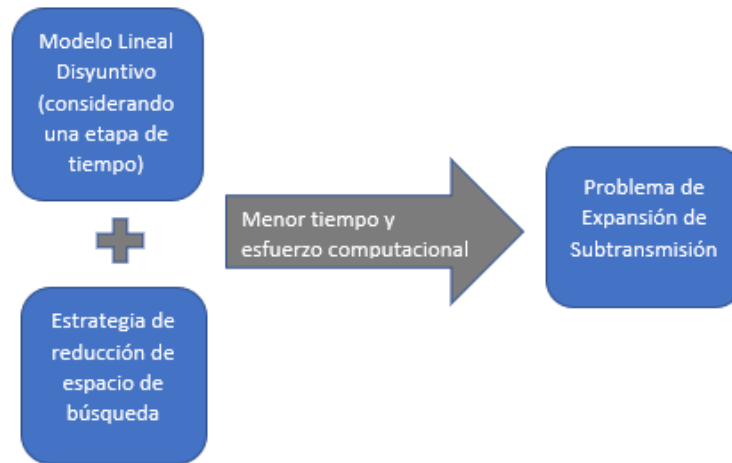
En este capítulo indicaremos los modelos matemáticos simplificados utilizados generalmente para representar la red eléctrica y seleccionaremos un modelo en especial para resolver el problema de la expansión de red de subtransmisión lo cual nos va a servir para poder darnos cuenta de que cuando se trabaja con sistemas a gran escala, o cuando no es posible encontrar soluciones óptimas o incluso de alta calidad del problema PET, se propone una metodología de reducción de espacio de búsqueda mediante el cual podemos obtener soluciones de muy alta calidad o en la mayoría de los casos, la solución óptima del problema PET [2].

La motivación para seguir desarrollando mejores soluciones para un sistema eléctrico brindando resultados en los cuales se incluye la expansión de una red, es desarrollar problemas muchos más complejos lo cual incita a los investigadores trabajar con modelos matemáticos los cuales brindan una solución óptimo global [6].

En [12] se desarrolló el problema de PETM considerando múltiples circunstancias de despacho, el cual propuso un problema de PNLEM y luego se usó una representación disyuntiva para linealizar las restricciones no lineales. Y finalmente, utilizaron los autores un método heurístico para llegar a una solución para el problema PETM con seguridad basada en cada etapa.

La idea de este trabajo (figura 2.1) es realizar un modelo integrado para obtener una solución de alta calidad para problemas de PERST.

Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología propuesta



2.1 Modelo lineal Disyuntivo

Es una modificación del modelo DC el cual fue desarrollado por [13] para poder convertir un problema de programación no lineal entera mixta (PNLEM) en un problema lineal entero con variables binarias, separando los términos cuadráticos en relaciones lineales independientes. La principal característica del modelo PLEM con variables binarias, se puede encontrar la solución óptima como las del modelo DC, a continuación, se muestra las ecuaciones que definen el modelo [8].

La restricción de igualdad no lineal es representada por medio de una desigualdad lineal equivalente.

$$-M(1 - w_{ij,y}) \leq P_{ij,y}x_{ij} - (\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - w_{ij,y}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y$$

$$-w_{ij,y}\bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq w_{ij,y}\bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y$$

Donde, M (Gran M) es un valor positivo, constante y suficientemente grande. Teniendo en cuenta que, si $w_{ij,y} = 1$ entonces $P_{ij,y} = \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}}$ y $-\bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq \bar{P}_{ij}$; caso contrario $P_{ij,y} = 0$ y la diferencia angular $-M \leq \theta_i - \theta_j \leq M$.

Este valor de M debe ser lo suficientemente grande con el fin de representar el grado de libertad de la variación de la diferencia angular entre aquellas barras que no se encuentren conectadas al sistema.

A diferencia del modelo DC, el modelo lineal disyuntivo presentan ciertas ventajas y desventajas, entre ellas tenemos:

- Desventajas:
 - Al introducir variables binarias la dimensión del problema aumenta.
 - Determinación del parámetro Gran M.
- Ventajas:
 - Es un modelo de programación lineal entera mixta.

El parámetro Gran M se basa en la teoría de grafos el cual puede ser calculado al resolverse problemas de rutas mínimas y máximas, tal como lo indica [14] en “Un nuevo enfoque de descomposición de Benders para resolver problemas de diseño de redes de transmisión de energía”.

Minimizar:

$$\min v = \sum_{\forall ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \sum_{\forall ij \in \Omega_l} w_{ij,y} \quad (1.39)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{j \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ji,y} + \sum_{y \in Y} P_{ji}^0 - \sum_{i \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ij,y} - \sum_{i \in \Omega_l} P_{ij}^0 = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.40)$$

$$P_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.41)$$

$$-2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \leq P_{ij,y} x_{ij} - (\theta_i - \theta_j) \leq 2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \quad \forall i \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (1.42)$$

$$-n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.43)$$

$$-w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.44)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall ij \in \Omega_b \quad (1.45)$$

$$-\bar{\theta} \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \quad \forall ij \in \Omega_b \quad (1.46)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.47)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y/y > 1 \quad (1.48)$$

$$\begin{aligned}
w_{ij,y} & \text{binario} & \forall ij \in \Omega_l \forall y \in Y \\
\theta_i & = \theta_i^0 & \forall i \in \Omega_b \mid T b_i = 3
\end{aligned} \tag{1.49}$$

El ángulo de fase para las barras $\bar{\theta}$ se establece un valor máximo con el fin de representar una restricción de estabilidad angular:

$$-\bar{\theta} \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \quad \forall i \in \Omega_b$$

Entonces, $2\bar{\theta}$ lleva a cabo el mismo papel que desempeña M el cual facilita un grado de libertad suficiente para la diferencia angular que existe entre dos barras que no se encuentran conectadas [11].

A partir de:

$$\begin{aligned}
-\bar{\theta} & \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \\
-\bar{\theta} & \leq \theta_j \leq \bar{\theta}
\end{aligned}$$

Se tiene que:

$$\begin{aligned}
-\bar{\theta} & \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \\
\bar{\theta} & \geq -\theta_j \geq -\bar{\theta}
\end{aligned}$$

Donde al reordenarlas:

$$\begin{aligned}
-\bar{\theta} & \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \\
-\bar{\theta} & \leq -\theta_j \leq \bar{\theta}
\end{aligned}$$

Se obtiene:

$$-2\bar{\theta} \leq \theta_i - \theta_j \leq 2\bar{\theta}$$

2.2 Lenguajes algebraicos de modelado

Este tipo de lenguaje es el más completo ya que posibilita el desarrollo de problemas mucho más complejos permitiendo el cambio del dimensionamiento del modelo de forma sencilla, brindando además alternativas potentes para llevar un orden dentro de sus variables y ecuaciones [15], [16]. Otro punto a favor de este tipo de lenguaje esta dado en la fácil detección de errores de consistencia que pueden surgir en la definición y verificación del modelo [16].

Dentro de este lenguaje que minimiza su mantenimiento tenemos los siguientes modelos más conocidos que son: GAMS, AMPL, MPL, AIMMS y XPRESS-MP [15].

Entre los modelos mencionados tenemos el de GAMS el cual es uno de los lenguajes más antiguos y con muchas más limitaciones en sus capacidades de modelado, pero es el más difundido comercialmente. El modelo AMPL en cambio es más nuevo y es mucho más potente para el modelado el cual se lo está aplicando mucho en universidades estadounidenses. El modelo AMPL es mucho más robusto al momento de aplicarlo en la versión estudiantil. El modelo AIMMS y XPRESS-MP son programas de origen europeo, pero no son tan aplicados debido a que este ofrece un ambiente para usuarios que tienen experiencia en modelado [15], [16].

Por lo tanto, para el desarrollo de un problema de expansión de transmisión hemos decidido trabajar con el sistema AMPL el cual nos brinda una fácil interacción con el usuario, además de que ha sido implementada para trabajar grandes problemas de optimización y con gran dificultad de manera más rápida y eficiente, dando como respuesta resultados confiables de alta calidad [16].

2.3 Técnica de reducción de espacio de búsqueda

En [17], [18] se propuso una técnica para reducir el espacio de búsqueda definido por las variables binarias, para disminuir el esfuerzo computacional al momento de resolver un problema PET utilizando un modelo lineal disyuntivo con algunas modificaciones para incluir contingencias. Esta simple estrategia innovadora de reducción de espacio de búsqueda propuesta en este documento se refiere a encontrar un número de posibles soluciones que podrían tener efecto sobre la red, eliminando así las menos importantes. Teniendo en cuenta que la complejidad está relacionada con 2^n , donde n representa el número de variables de decisión.

La metodología que se emplea para reducir el espacio de búsqueda (MREB) en la planificación de la red de subtransmisión puede reducirse como se indica en los siguientes pasos [17].

1. Seleccionar un modelo matemático que puede ser desarrollado por solucionadores comerciales.
2. Encontrar un conjunto con todas las soluciones que podrían causar efectos significativos al resolver el problema de planificación de expansión de etapa simple.
3. Creando un nuevo conjunto con todas las soluciones del ítem anterior. Un conjunto de soluciones "Pool" se crea para la etapa correspondiente y los candidatos que nunca aparecen en el grupo se etiquetan como los insignificantes.
4. Obtener el máximo valor de líneas de transmisión en cada corredor, eliminando así las posibles líneas que no son significativas y establecer un número máximo de líneas paralelas para cada corredor en la base de datos.

Logrando así reducir el esfuerzo computacional al resolver problemas a gran escala y facilitar la convergencia del solucionador comercial utilizado, determinando que soluciones deben permanecer en el espacio de búsqueda y eliminando otras soluciones sin importancia, no obstante, se puede tener una solución de muy alta calidad [17].

2.4 Problema básico de PERT

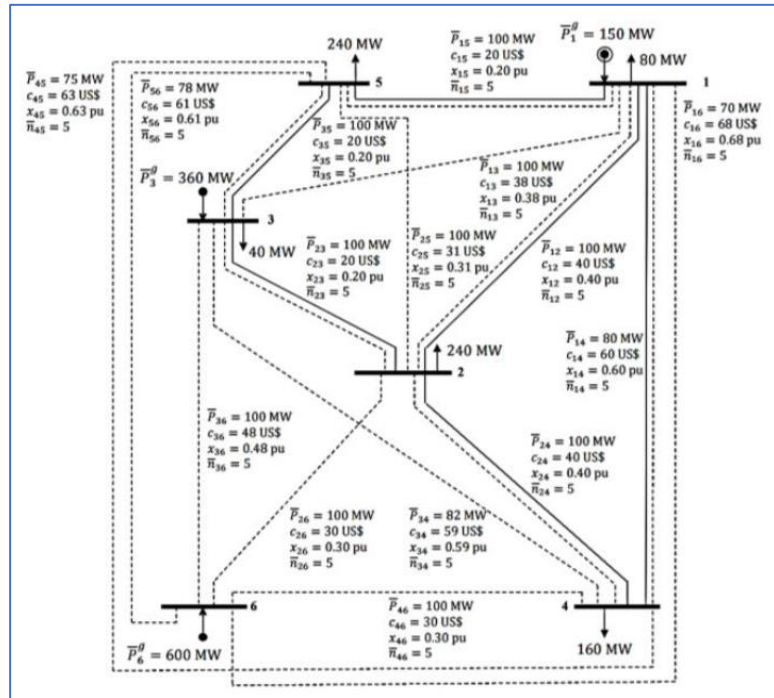
El problema básico de PERT consiste en determinar la cantidad, el lugar y cuando el conjunto de nuevas líneas deben estar instaladas para operar en la red de transmisión con el fin de garantizar una demanda de energía futura a un costo mínimo [6].

2.4.1 Sistema Garver de 6 barras

El reconocido sistema de prueba Garver de 6 barras se lo utiliza para definir el problema clásico de PERT. Los datos del sistema se indican en el Anexo 1.

En la Figura 2.2 se muestra las redes existentes del sistema, el sistema contiene 6 barras, 15 líneas candidatas, 3 generadores y 5 cargas.

Figura 2.2 Sistema Garver adaptado. Fuente: [8]



En la Tabla 2.4-1 indica el plan óptimo (nuevas líneas para instalar) para el sistema Garver. Este plan es el mismo que los resultados encontrados en la literatura, como por ejemplo en [6], [8]. En este sistema podemos considerar un plan de inversión con una sola etapa y tomando en cuenta un solo nivel de carga igual a 760 MW.

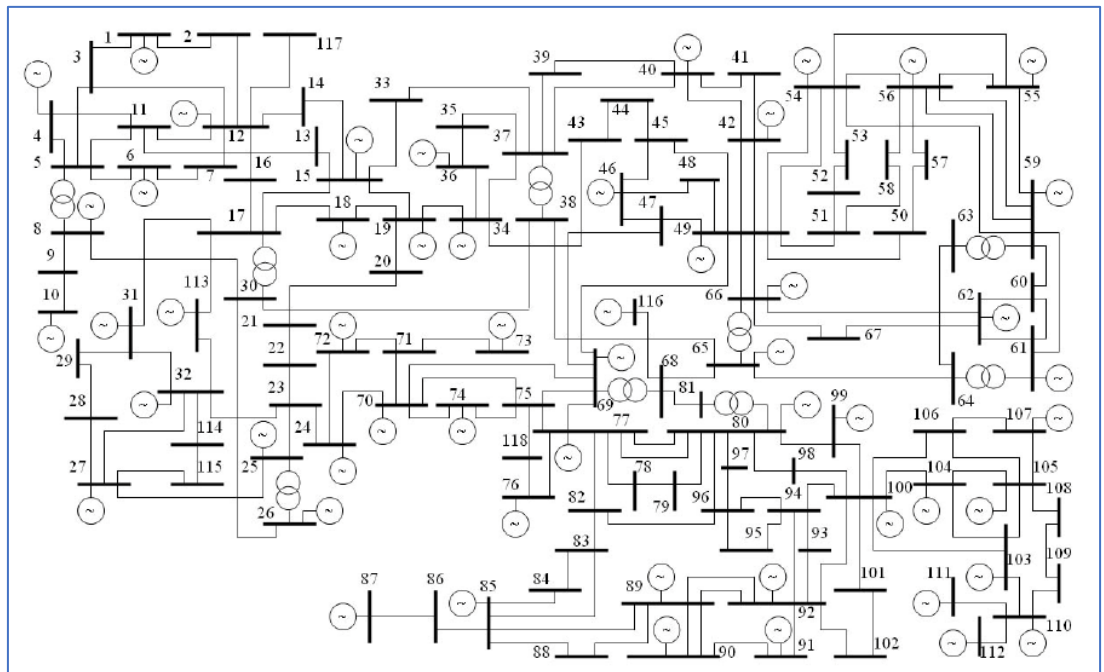
Tabla 2.4-1 Solución óptima de planificación, sistema Garver

Etapa	Corredor		Número de líneas nuevas	Costo de inversión [MUS\$]
	i	j		
1	3	5	1	110
	4	6	3	

2.5 Sistema IEEE de 118 barras

En este sistema prueba como se indica en la Figura 2.3, contiene 186 corredores, 118 barras, 91 cargas y 54 generadores. En el Anexo 2 se muestran los datos para este sistema el cual tiene una demanda de 2617.60 MW.

Figura 2.3 Sistema IEEE 118 barras. Fuente: [8]



En la tabla 2.4-2 indica el plan óptimo de nuevas líneas para instalar al sistema. Este plan es el mismo que los resultados encontrados en la literatura, como por ejemplo en [8].

Tabla 2.5-1 Solución óptima de planificación, sistema IEEE 118 barras

Etapa	Corredor		Número de líneas nuevas	Costo de inversión [MUS\$]
	i	j		
1	8	9	1	25.91
	9	10	1	
	99	100	1	

2.6 Sistema de subtransmisión CNEL- Milagro

EL sistema de subtransmisión de la Unidad de Negocio (UN) Milagro se muestra en la Figura 2.4. El área que presta servicio la UN Milagro es de 5.025,53 km² el cual corresponde el 97% de cobertura. En el anexo 3 se muestran los datos del sistema de la UN Milagro. El sistema actual del sistema eléctrico consta de:

Tabla 2.6-1 UN Milagro, Datos de la subestación- CNEL EP. Fuente: [19]

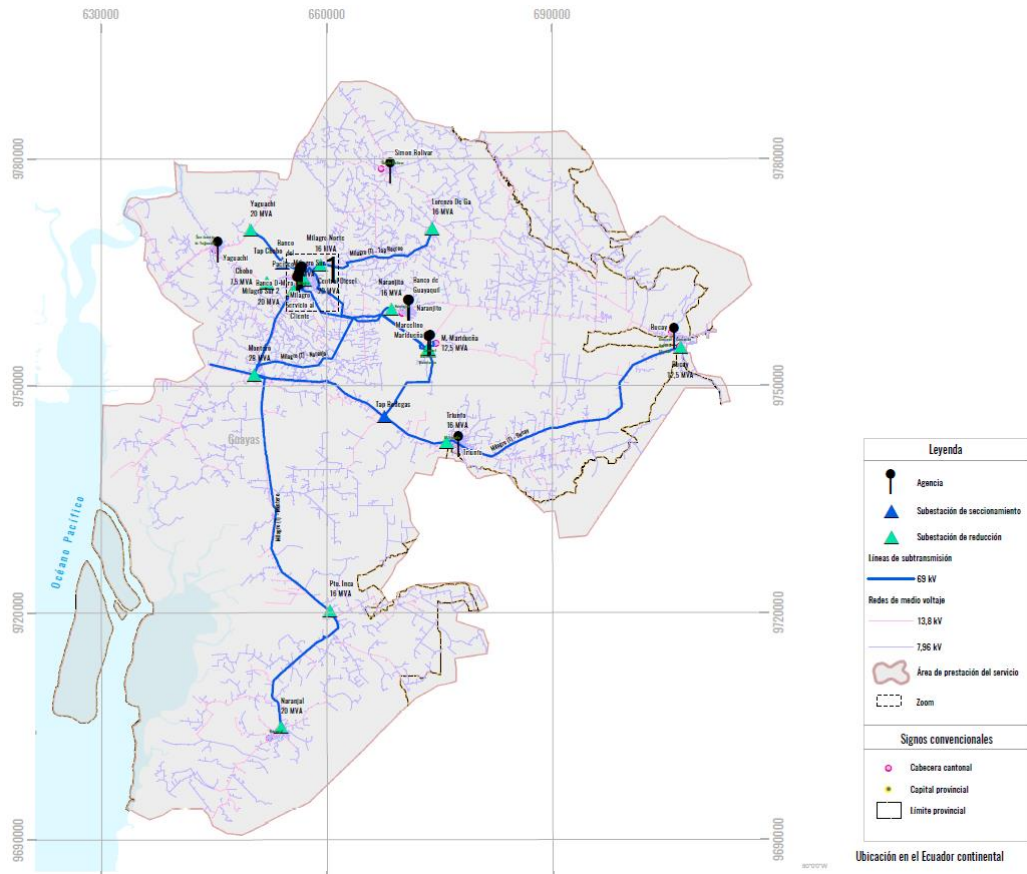
Subestación	Nivel kv.	Capacidad MVA	Potencia Máxima MVA	Cargabilidad Máx. Potencia %
MILAGRO	230/69	167	123.89	74.18%

Tabla 2.6-2 UN Milagro, puntos de entrega y posiciones. Fuente: [19]

Posiciones de Entrega		
Punto de entrega	Posiciones	Cargabilidad
Milagro	Milagro 1	52.8%
	Milagro 2	56.5%
	Milagro 3	26.6%
	Milagro 4	62.5%

El sistema de subtransmisión de la Unidad de Negocio Milagro esta abastecido por 14 subestaciones del sistema de subtransmisión, 1 subestación de seccionamiento, 15 transformadores de potencia y un punto de entrega. El sistema de subtransmisión contiene en su año base, 54 barras y 61 corredores existentes [19].

Figura 2.4 Estructura eléctrica de CNEL EP Unidad de Negocio Milagro. Fuente: [20]



CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se propone la solución para un problema de la planificación de la expansión de redes de subtransmisión utilizando el modelo lineal disyuntivo y la estrategia propuesta el cual asegura una solución de alta calidad o en algunos casos la óptima dando un costo mínimo de inversión reduciendo el tiempo y esfuerzo computacional que demanda los sistemas a gran escala.

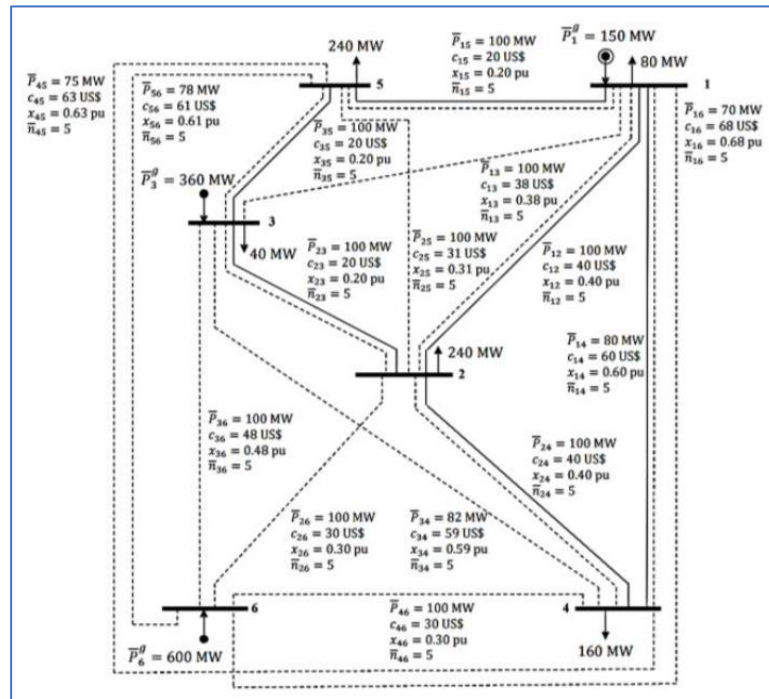
Mediante la estrategia de reducción de espacio de búsqueda se obtendrán soluciones de alta calidad empleado un lenguaje de modelado utilizando el software AMPL [21] y CPLEX [22] como solucionador comercial. Todos los resultados se obtuvieron utilizando una computadora Lenovo legion Y545, procesador Intel (R) Core (TM) i7-9750H CPU 2.60 GHz 2.59 GHz y 16GB de memoria RAM.

A partir de esta estrategia se considera adaptar el sistema Garver de 6 barras, IEEE 118 barras y el sistema de subtransmisión CNEL- Milagro, realizando las pruebas correspondientes las cuales se obtienen los siguientes resultados:

3.1 Pruebas al sistema Garver 6 barras

El sistema Garver de 6 barras se muestra en la Figura 3.1 este sistema es mundialmente utilizado para investigaciones de planificación de expansión. El sistema Garver contiene 6 barras, 6 líneas, 3 generadores, 5 cargas y 15 líneas candidatas de ser adicionadas, con una generación máxima de 1110 MW. Se considera una etapa para la planificación igual a 760 MW, sin considerar la potencia reactiva de los generadores y en las líneas no se considera la capacitancia.

Figura 3.1 Sistema Garver adaptado. Fuente: [8]



Utilizando los datos del Anexo 1 del sistema Garver de 6 barras, tenemos que sin aplicar MREB se obtuvo un costo de inversión de 110 MUS\$ con un tiempo de 0.094 s, mientras que al aplicar MREB se obtuvo el mismo costo de inversión con un tiempo de 0.05 s, donde en su solución óptima se agregaron las líneas $n_{3-5} = 1$, $n_{4-6} = 3$ las cuales indican las líneas a ser instaladas en el sistema demostrando así el buen desempeño del modelo utilizado para la PERT además obteniendo la reducción del espacio de búsqueda y el esfuerzo computacional.

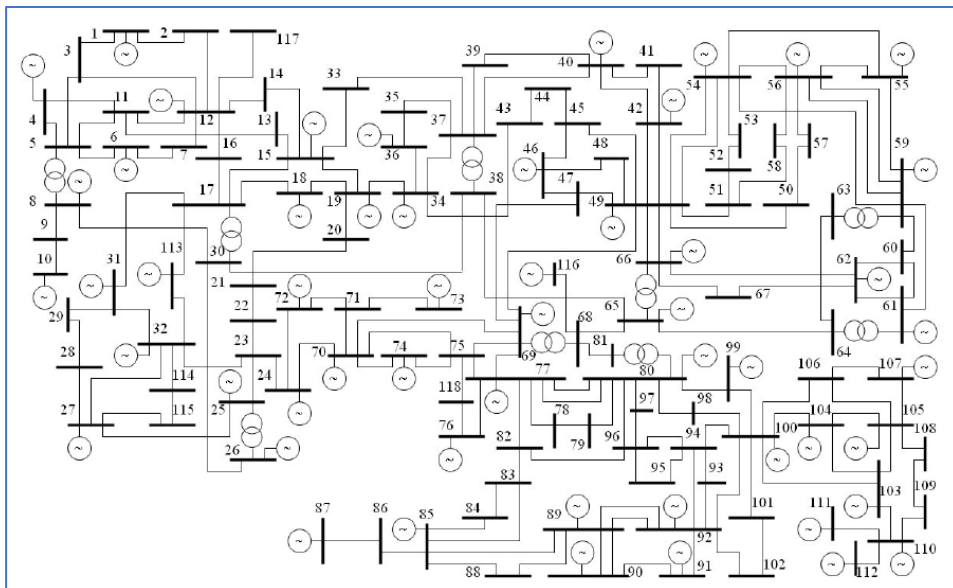
Para obtener las soluciones del ítem 2 de MREB, se utilizaron las directivas de CPLEX [22] para generar y administrar las soluciones “pool” para el problema de programación de enteros mixtos. La directiva “poolstub” se usó para generar y guardar las soluciones en el pool. El “populatelín” fue usada para establecer un límite para el número de soluciones en el pool, para gestionar el criterio de parada en el pool, la directiva “poolgap” ayuda a establecer que la solución esté en un espacio predefinido con respecto a la solución óptima. Las directivas “poolintensity” y “poolreplace” del solucionador CPLEX se utilizaron para

diversificar como se seleccionan las distintas soluciones, otras de las directivas que se utilizó fue “populate” para generar más soluciones [17].

3.2 Pruebas al sistema IEEE 118 barras

Utilizando los datos del Anexo 2 del sistema IEEE 118 barra (Figura 3.2), tenemos que sin aplicar MREB se obtuvo un costo de inversión de 25.91 MUS\$ con un tiempo de 0.55 s, mientras que aplicando MREB se obtuvo el mismo costo de inversión pero con un tiempo de 0.016 s, donde en su solución óptima se agregaron las líneas $n_{8-9} = 1$, $n_{9-10} = 1$, $n_{99-100} = 1$ las cuales indican las líneas a ser instaladas en el sistema.

Figura 3.2 Sistema IEEE 118 barras. Fuente: [8]



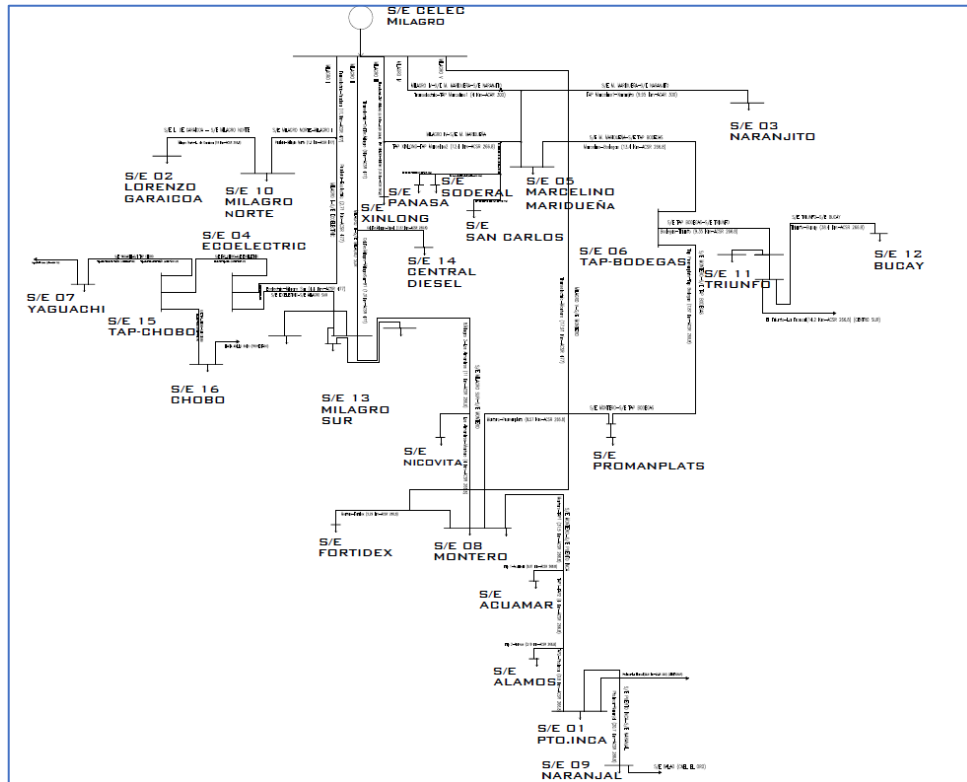
Como pudimos apreciar en los dos casos propuestos que usando el método MREB para reducir el espacio de búsqueda no era necesario ya que el tiempo que obtuvimos es pequeño por lo que queda claro que este método podríamos utilizarlo para resolver problemas con mucha más complejidad, pero lo utilizamos en estos dos casos para demostrar el excelente desempeño del método.

3.3 Pruebas al sistema de la red de subtransmisión CNEL- Milagro

De los datos del Anexo 3 del sistema de subtransmisión Milagro (Figura 3.3), tenemos que sin aplicar MREB se obtuvo un costo de inversión de 2552 MUS\$ con un tiempo de 0.31s, mientras que aplicando MREB se

obtuvo el mismo costo de inversión pero con un tiempo de 0.01s, donde en su solución óptima se agregaron las líneas $n_{36-37} = 1$, $n_{37-38} = 1$, $n_{38-39} = 1$ las cuales indican las líneas a ser instaladas en el sistema actual para un crecimiento de demanda futura.

Figura 3.3 Sistema de subtransmisión Milagro. Fuente [Propia]



La tabla 3.3-1 muestra el tiempo de procesamiento, iteraciones y el costo de inversión de todas las pruebas estudiadas en este capítulo. Usando esta tabla, podemos comparar los resultados de prueba con y sin aplicar la técnica de reducción de espacio de búsqueda. Estos resultados revelan el excelente desempeño de la técnica para reducir el tiempo de procesamiento del algoritmo y obtener soluciones de muy buena calidad para los problemas de PEST.

Tabla 3.3-1 Resumen del costo de inversión y tiempo de procesamiento

Sistemas	Sistema Estático			
	Con MREB	Iteraciones	Sin MREB	Iteraciones
Garver 6 Barras	110 MUS\$ (0.05 S)	25	110 MUS\$ (0.094 S)	176
IEEE 118 Barras	25.91 MUS\$ (0.016 S)	0	25.91 MUS\$ (0.55 S)	1477
CNEL - Milagro	2522 MUS\$ (0.01 S)	0	2522 MUS\$ (0.31 S)	516

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

De acuerdo con el sistema de subtransmisión CNEL Milagro con una demanda proyectada para el 2023, se requiere la instalación de nuevas líneas de subtransmisión en los tramos mencionados en la sección anterior con un costo de US \$ 2.522M obteniendo la solución de manera eficiente utilizando la técnica de reducción del espacio de búsqueda.

Empleando el modelo matemático lineal disyuntivo pudimos constatar que las inversiones para instalar nuevas líneas en el sistema Garver 6 barras e IEEE 118 barras fueron las mismas que cuando se aplicó la técnica de reducción de espacio de búsqueda, respaldando la técnica de reducción de espacio de búsqueda propuesta como candidato a considerar cuando se trabaja con sistemas a gran escala.

Dado que se utilizó el modelo lineal disyuntivo y la técnica de reducción de espacio de búsqueda se obtuvo una solución de alta calidad y un menor esfuerzo computacional a partir de un pool de soluciones para cada sistema donde se eliminan las líneas candidatas insignificantes de dicho pool para la nueva base de datos de los sistemas.

La técnica propuesta no solo refuerza el sistema eléctrico, sino que mejora el rendimiento con muy buenos tiempos de procesamiento. Verificando una posible reducción en las arcas estatales; permitiendo una reinversión en otros sectores estratégicos del País sin caer en la necesidad de limitar el crecimiento natural, tecnológico y de infraestructura del sector eléctrico ecuatoriano.

4.2 Recomendaciones

Con el modelo utilizado en este trabajo y otras propuestas en la literatura, se puede desarrollar una investigación en el cual se incluyan candidatos no convencionales como también múltiples escenarios de generación, demanda y un planeamiento dinámico.

Se podría considerar contingencias N-1 al momento de la expansión de planificación en el modelo matemático empleado para encontrar la solución óptima del problema y garantizar la seguridad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Nuques, "Expansión del Sistema Nacional de Transmisión Ecuatoriano usando algoritmos evolutivos," *Jornadas Ing. Eléctrica y Electrónica*, 2009, [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9969>.
- [2] M. Rahmani, R. Romero, and M. J. Rider, "Strategies to reduce the number of variables and the combinatorial search space of the multistage transmission expansion planning problem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2164–2173, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2223241.
- [3] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, "Test systems and mathematical models for transmission network expansion planning," *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, no. 1, pp. 27–36, 2002, doi: 10.1049/ipgtd:20020026.
- [4] C. Miasaki, "Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Controladores FACTS (Disertación Doctoral)," Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP, Brasil, 2006.
- [5] L. Monica, E. Vargas, A. D. Gomez, J. Nicolas, and A. Hernando, "eléctrica usando AMPL Electric energy transmission systems planning using AMPL," no. 51, pp. 22–27, 2012, doi: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.7139>.
- [6] M. Torres, "A Novel Strategy For The Electric Power Transmission Network Expansion Planning Using a Mixed Integer Linear AC Model. (Disertación Doctoral)," Universidade Estadual De Campinas, SP, Brasil, 2019.
- [7] D. Tejada-Arango, J. M. López-Lezama, and M. J. Rider, "Planeamiento de la expansión de la red de transmisión en sistemas eléctricos de potencia considerando reconfiguraciones de red," *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 1, pp. 85–96, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000100010.
- [8] A. E. Jimenez and F. Fuentes, "Estudio del Impacto del Modelo Linalizado AC en la Planificación de los Sistemas de Transmisión(Proyecto final de pregrado)," Escuela Superior Politécnica Del Litoral (ESPOL). Guayaquil,Ecuador, 2019.
- [9] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Advance Praise for Introduction To Operations Research*, 7th ed. New York, United State: McGraw-Hill.
- [10] W. L. Winston and J. B. Goldberg, *Operations Research Application and Algorithms*, 4th ed., vol. 4. Canada: Thomson Learning Academic Resource Center, 2004.
- [11] C. Helmberg and F. Rendl, "A Spectral Bundle Method for Semide nite Programming," *Informationstechnik*, vol. 10, no. 3, 1997, doi: <https://doi.org/10.1137/S1052623497328987>.
- [12] G. C. Oliveira, S. Binato, M. V. Pereira, and L. M. Thomé, "Multi-stage transmission expansion planning considering multiple dispatches and contingency criterion," in *XV Congresso Brasileiro de Automática*, 2004, pp. 1–5, [Online]. Available: <http://www.psr-inc.com/wp-content/uploads/articles/cba04EXPTRCTG>.

pdf.

- [13] L. Bahiense, G. C. Oliveira, M. Pereira, and S. Granville, "A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 3, pp. 560–565, 2001, doi: 10.1109/59.932295.
- [14] S. Binato, M. V. F. Pereira, and S. Granville, "A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 235–240, 2001, doi: 10.1109/59.918292.
- [15] J. J. Ruz, "Introducción a la programación matemática," *British Journal of Cancer*, 2019. .
- [16] A. Ramos, P. Sanchez, J. M. Ferrer, J. Barquin, and P. Linares, "Modelos Matematicos De Optimizacion," 2001.
- [17] E. F. da Silva, M. Rahmani, and M. J. Rider, "A Search Space Reduction Strategy and a Mathematical Model for Multistage Transmission Expansion Planning with N-1 Security Constrains," *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 57–67, 2016, doi: 10.1007/s40313-014-0154-2.
- [18] M. A. R. Torres, C. A. Castro, and M. J. Rider, "A Search Space Reduction Strategy within the MILP Branch Flow Model for Concurrent AC Multistage Transmission Expansion and Reactive Power Planning," *2018 North Am. Power Symp. NAPS 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/NAPS.2018.8600545.
- [19] M. S. Barcia, "Plan de expansión de la red de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Pública Estratégica CNEL EP . Unidad de Negocio Milagro considerando la repotenciación (tesis de maestría)," Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [20] A. Chiles, C. Junia, C. Tipan, M. Díaz, S. Dávila, and A. López, "Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano," *Arconel*, p. 113, 2019, [Online]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/>.
- [21] R. Fourer, D. M. Gay, and B. W. Kernighan, *A Modeling Language for Mathematical Programming*, 2nd ed. Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003.
- [22] CPLEX Optimization subroutine library, "Guide and reference," 2010. .

ANEXOS

ANEXO 1

DATOS DEL SISTEMA GARVER PARA EL MODELO LINEAL DISYUNTIVO.

```
param thmax = 1.6 ;

param: ob:      nome      Tb      d      gmax:=
      1 "BUS 1"      1      80      150
      2 "BUS 2"      0     240       0
      3 "BUS 3"      3      40     360
      4 "BUS 4"      0     160       0
      5 "BUS 5"      0     240       0
      6 "BUS 6"      3       0     600;

param:      ol: fmax      x      c      n0 nmax :=
      1  2  100     0.40     40     1   0
      1  3  100     0.38     38     0   0
      1  4   80     0.60     60     1   0
      1  5  100     0.20     20     1   0
      1  6   70     0.68     68     0   0
      2  3  100     0.20     20     1   0
      2  4  100     0.40     40     1   0
      2  5  100     0.31     31     0   2
      2  6  100     0.30     30     0   0
      3  4   82     0.59     59     0   0
      3  5  100     0.20     20     1   1
      3  6  100     0.48     48     0   0
      4  5   75     0.63     63     0   0
      4  6  100     0.30     30     0   3
      5  6   78     0.61     61     0   0;

# normalizar
for {i in ob} {
  let gmax[i] := gmax[i] / 100;
  let d[i]    := d[i] / 100;
}
for {(i,j) in ol} {
  let fmax[i,j] := fmax[i,j] / 100;
}
```

Tabla 1.1 Datos de las barras y líneas del sistema de Garver 6
barras

ANEXO 2

DATOS DEL SISTEMA IEEE 118 PARA EL MODELO LINEAL DISYUNTIVO.

```
param thmax = 4.19 ; #240 grados
```

param:	ob:	nome	Tb	d	gmax:=
	1	"Bus 1"	0	37.8	0
	2	"Bus 2"	0	14.8	0
	3	"Bus 3"	0	28.9	0
	4	"Bus 4"	2	22.2	30
	5	"Bus 5"	0	0.0	0
	6	"Bus 6"	2	38.6	30
	7	"Bus 7"	0	14.1	0
	8	"Bus 8"	2	0.0	30
	9	"Bus 9"	0	21.0	0
	10	"Bus 10"	2	28.0	20
	11	"Bus 11"	0	52.0	0
	12	"Bus 12"	2	34.9	300
	13	"Bus 13"	0	25.2	0
	14	"Bus 14"	0	10.4	0
	15	"Bus 15"	2	66.8	30
	16	"Bus 16"	0	18.5	0
	17	"Bus 17"	0	8.1	0
	18	"Bus 18"	2	44.5	100
	19	"Bus 19"	2	33.4	30
	20	"Bus 20"	0	13.3	0
	21	"Bus 21"	0	10.4	0
	22	"Bus 22"	0	7.4	0
	23	"Bus 23"	0	5.2	0
	24	"Bus 24"	2	0.0	30
	25	"Bus 25"	2	0.0	300
	26	"Bus 26"	2	0.0	350
	27	"Bus 27"	2	46.0	30
	28	"Bus 28"	0	12.6	0
	29	"Bus 29"	0	17.8	0
	30	"Bus 30"	0	0.0	0
	31	"Bus 31"	2	31.9	30
	32	"Bus 32"	2	43.8	100
	33	"Bus 33"	0	17.0	0
	34	"Bus 34"	2	43.8	30
	35	"BUS 35"	0	24.5	0
	36	"BUS 36"	2	23.0	100
	37	"BUS 37"	0	0.0	0
	38	"BUS 38"	0	0.0	0
	39	"BUS 39"	0	18.9	0

Tabla 2.1 Datos de las barras del sistema de IEEE 118 barras 1/3

40	"BUS 40"	2	14.0	30
41	"BUS 41"	0	25.9	0
42	"BUS 42"	2	25.9	30
43	"BUS 43"	0	12.6	0
44	"BUS 44"	0	11.2	0
45	"BUS 45"	0	37.1	0
46	"BUS 46"	2	19.6	100
47	"BUS 47"	0	23.8	0
48	"BUS 48"	0	14.0	0
49	"BUS 49"	2	60.9	250
50	"BUS 50"	0	11.9	0
51	"BUS 51"	0	11.9	0
52	"BUS 51"	0	12.6	0
53	"BUS 52"	0	16.1	0
54	"BUS 53"	2	79.1	250
55	"BUS 54"	2	44.1	100
56	"BUS 55"	2	58.8	100
57	"BUS 56"	0	8.4	0
58	"BUS 57"	0	8.4	0
59	"BUS 58"	2	93.9	200
60	"BUS 59"	0	54.6	0
61	"BUS 60"	2	0.0	200
62	"BUS 61"	2	53.9	100
63	"BUS 62"	0	0.0	0
64	"BUS 63"	0	0.0	0
65	"BUS 64"	2	0.0	420
66	"BUS 65"	2	27.3	420
67	"BUS 66"	0	19.6	0
68	"BUS 67"	0	0.0	0
69	"BUS 68"	1	0.0	300
70	"BUS 69"	2	46.2	80
71	"BUS 70"	0	0.0	0
72	"BUS 71"	2	0.0	30
73	"BUS 72"	2	0.0	30
74	"BUS 73"	2	47.6	20
75	"BUS 74"	0	32.9	0
76	"BUS 75"	2	47.6	100
77	"Bus 77"	2	42.7	100
78	"Bus 78"	0	49.7	0

Tabla 2.2 Datos de las barras del sistema de IEEE 118 barras 2/3

77	"Bus 77"	2	42.7	100
78	"Bus 78"	0	49.7	0
79	"Bus 79"	0	27.3	0
80	"Bus 80"	2	91.0	300
81	"Bus 81"	0	0.0	0
82	"Bus 82"	2	37.8	100
83	"Bus 83"	0	14.0	0
84	"Bus 84"	0	7.7	0
85	"Bus 85"	2	16.8	30
86	"Bus 86"	0	14.7	0
87	"Bus 87"	2	0.0	300
88	"Bus 88"	0	33.6	0
89	"Bus 89"	2	0.0	200
90	"Bus 90"	2	54.6	20
91	"Bus 91"	2	0.0	50
92	"Bus 92"	2	45.5	300
93	"Bus 93"	0	30.4	0
94	"Bus 94"	0	21.0	0
95	"Bus 95"	0	29.4	0
96	"Bus 96"	0	26.6	0
97	"Bus 97"	0	10.5	0
98	"Bus 98"	0	23.8	0
99	"Bus 99"	2	35.0	30
100	"Bus 100"	2	25.9	300
101	"Bus 101"	0	15.4	0
102	"Bus 102"	0	3.5	0
103	"Bus 103"	2	16.1	20
104	"Bus 104"	2	26.6	100
105	"Bus 105"	2	21.7	100
106	"Bus 106"	0	30.1	0
107	"Bus 107"	2	19.6	20
108	"Bus 108"	0	1.4	0
109	"Bus 109"	0	5.6	0
110	"Bus 110"	2	27.3	50
111	"Bus 111"	2	0.0	100
112	"Bus 112"	2	17.5	100
113	"Bus 113"	2	0.0	100
114	"Bus 114"	0	5.9	0
115	"Bus 115"	0	16.3	0
116	"Bus 116"	2	0.0	50
117	"Bus 117"	0	14.8	0
118	"Bus 118"	0	23.1	0;

Tabla 2.3 Datos de las barras del sistema de IEEE 118 barras 3/3

param:	o1:	rmax	X	C	n0	nmax	:=
	1	2	87.5	0.099900	17.98	1	0
	1	3	87.5	0.042400	7.63	1	0
	4	5	250.0	0.007980	1.79	1	0
	3	5	87.5	0.108000	16.20	0	0
	5	6	87.5	0.054000	9.72	0	0
	6	7	87.5	0.020800	4.68	1	0
	8	9	250.0	0.030500	5.49	0	1
	8	5	250.0	0.026700	6.00	0	0
	9	10	250.0	0.032200	5.79	0	1
	4	11	87.5	0.068800	12.38	1	0
	5	11	87.5	0.068200	12.27	1	0
	11	12	87.5	0.019600	4.41	1	0
	2	12	87.5	0.061600	11.08	1	0
	3	12	87.5	0.160000	24.00	1	0
	7	12	87.5	0.034000	6.12	1	0
	11	13	87.5	0.073100	13.15	1	0
	12	14	87.5	0.070700	12.72	1	0
	13	15	87.5	0.244400	36.66	1	0
	14	15	87.5	0.195000	29.25	1	0
	12	16	87.5	0.083400	15.01	1	0
	15	17	250.0	0.043700	7.86	2	0
	16	17	87.5	0.180100	27.01	1	0
	17	18	87.5	0.050500	9.09	1	0
	18	19	87.5	0.049300	8.87	1	0
	19	20	87.5	0.117000	17.55	1	0
	15	19	87.5	0.039400	7.09	1	0
	20	21	87.5	0.084900	15.28	1	0
	21	22	87.5	0.097000	17.46	1	0
	22	23	87.5	0.159000	23.85	1	0
	23	24	87.5	0.049200	8.85	1	0
	23	25	250.0	0.080000	14.40	1	0
	26	25	250.0	0.038200	6.87	1	0
	25	27	250.0	0.163000	24.45	1	0
	27	28	87.5	0.085500	15.39	1	0
	28	29	87.5	0.094300	16.97	1	0
	30	17	250.0	0.038800	6.98	1	0
	8	30	87.5	0.050400	9.07	1	0
	26	30	300.0	0.086000	15.48	0	0
	17	31	87.5	0.156300	23.44	1	0
	29	31	87.5	0.033100	5.95	1	0
	23	32	70.0	0.115300	17.29	0	0

Tabla 2.4 Datos de las líneas del sistema de IEEE 118 barras 1/4

31	32	87.5	0.098500	17.73	1	0
27	32	87.5	0.075500	13.59	1	0
15	33	87.5	0.124400	18.66	1	0
19	34	87.5	0.247000	37.05	1	0
35	36	87.5	0.010200	2.29	1	0
35	37	87.5	0.049700	8.94	1	0
33	37	87.5	0.142000	21.30	1	0
34	36	87.5	0.026800	6.03	1	0
34	37	250.0	0.009400	2.11	1	0
38	37	250.0	0.037500	6.75	0	0
37	39	87.5	0.106000	15.90	1	0
37	40	87.5	0.168000	25.20	1	0
30	38	95.0	0.054000	9.72	1	0
39	40	87.5	0.060500	10.89	1	0
40	41	87.5	0.048700	8.76	1	0
40	42	87.5	0.183000	27.45	1	0
41	42	87.5	0.135000	20.25	1	0
43	44	87.5	0.245400	36.81	1	0
34	43	87.5	0.168100	25.21	1	0
44	45	87.5	0.090100	16.21	1	0
45	46	87.5	0.135600	20.34	1	0
46	47	87.5	0.127000	19.05	1	0
46	48	87.5	0.189000	28.35	1	0
47	49	87.5	0.062500	11.25	1	0
42	49	87.5	0.323000	48.45	2	0
45	49	87.5	0.186000	27.90	1	0
48	49	87.5	0.050500	9.09	1	0
49	50	87.5	0.075200	13.53	1	0
49	51	87.5	0.137000	20.55	1	0
51	52	87.5	0.058800	10.58	1	0
52	53	87.5	0.163500	24.52	1	0
53	54	87.5	0.122000	18.30	1	0
49	54	87.5	0.290000	43.50	2	0
54	55	87.5	0.070700	12.72	1	0
54	56	87.5	0.009550	2.14	1	0
55	56	87.5	0.015100	3.39	1	0
56	57	87.5	0.096600	17.38	1	0
50	57	87.5	0.134000	20.10	1	0
56	58	87.5	0.096600	17.38	1	0
51	58	87.5	0.071900	12.94	1	0
54	59	87.5	0.229300	34.39	1	0
56	59	87.5	0.245000	36.75	2	0

Tabla 2.4 Datos de las líneas del sistema de IEEE 118 barras 2/4

55	59	87.5	0.215800	32.37	1	0
59	60	87.5	0.145000	21.75	1	0
59	61	87.5	0.150000	22.50	1	0
60	61	250.0	0.013500	3.03	1	0
60	62	87.5	0.056100	10.09	1	0
61	62	87.5	0.037600	6.76	1	0
63	59	250.0	0.038600	6.94	1	0
63	64	250.0	0.020000	4.50	1	0
64	61	250.0	0.026800	6.03	1	0
38	65	250.0	0.098600	17.74	1	0
64	65	250.0	0.030200	5.43	1	0
49	66	250.0	0.091900	16.54	2	0
62	66	87.5	0.218000	32.70	1	0
62	67	87.5	0.117000	17.55	1	0
65	66	250.0	0.037000	6.66	1	0
66	67	87.5	0.101500	15.22	1	0
65	68	250.0	0.016000	3.60	1	0
47	69	87.5	0.277800	41.67	1	0
49	69	87.5	0.324000	48.60	1	0
68	69	250.0	0.037000	6.66	1	0
69	70	250.0	0.127000	19.05	1	0
24	70	87.5	0.411500	61.72	1	0
70	71	87.5	0.035500	6.39	1	0
24	72	87.5	0.196000	29.40	1	0
71	72	87.5	0.180000	27.00	1	0
71	73	87.5	0.045400	8.17	1	0
70	74	87.5	0.132300	19.84	1	0
70	75	87.5	0.141000	21.15	1	0
69	75	250.0	0.122000	18.30	1	0
74	75	87.5	0.040600	7.30	1	0
76	77	87.5	0.148000	22.20	1	0
69	77	87.5	0.101000	15.15	0	0
75	77	87.5	0.199900	29.98	1	0
77	78	87.5	0.012400	2.79	1	0
78	79	87.5	0.024400	5.49	1	0
77	80	250.0	0.076750	12.24	2	0
79	80	87.5	0.070400	12.67	1	0
68	81	250.0	0.020200	4.54	1	0
81	80	250.0	0.037000	6.66	1	0
77	82	100.0	0.085300	15.35	1	0
82	83	100.0	0.036650	6.59	0	0
83	84	87.5	0.132000	19.80	1	0

Tabla 2.4 Datos de las líneas del sistema de IEEE 118 barras 3/4

83	85	87.5	0.148000	22.20	1	0
84	85	87.5	0.064100	11.53	1	0
85	86	250.0	0.123000	18.45	1	0
86	87	250.0	0.207400	31.11	1	0
85	88	87.5	0.102000	15.30	1	0
85	89	87.5	0.173000	25.95	1	0
88	89	250.0	0.071200	12.81	1	0
89	90	250.0	0.143850	23.07	2	0
90	91	87.0	0.083600	16.40	1	0
89	92	250.0	0.104300	9.09	2	0
91	92	87.5	0.127200	19.08	1	0
92	93	60.0	0.084800	15.26	1	0
92	94	60.0	0.158000	23.07	1	0
93	94	87.5	0.073200	13.17	0	0
94	95	87.5	0.043400	7.81	1	0
80	96	87.5	0.182000	27.30	1	0
82	96	87.5	0.053000	9.54	1	0
94	96	87.5	0.086900	15.64	1	0
80	97	87.5	0.093400	16.81	1	0
80	98	87.5	0.108000	16.20	1	0
80	99	100.0	0.206000	30.90	0	0
92	100	87.5	0.295000	44.25	1	0
94	100	87.5	0.058000	10.44	0	0
95	96	87.5	0.054700	9.84	1	0
96	97	87.5	0.088500	15.93	1	0
98	100	87.5	0.179000	26.85	1	0
99	100	87.5	0.081300	14.63	0	1
100	101	87.5	0.126200	18.93	1	0
92	102	87.5	0.055900	10.06	1	0
101	102	87.5	0.112000	16.80	1	0
100	103	250.0	0.052500	9.45	1	0
100	104	87.5	0.204000	30.60	1	0
103	104	87.5	0.158400	23.76	1	0
103	105	87.5	0.162500	24.37	1	0
100	106	87.5	0.229000	34.35	1	0
104	105	87.5	0.037800	6.80	1	0
105	106	87.5	0.054700	9.84	1	0
105	107	87.5	0.183000	27.45	1	0
105	108	87.5	0.070300	12.65	1	0
106	107	87.5	0.183000	27.45	1	0
108	109	87.5	0.028800	6.48	1	0
103	110	87.5	0.181300	27.19	1	0
109	110	87.5	0.076200	13.71	1	0
110	111	87.5	0.075500	13.59	1	0
110	112	87.5	0.064000	11.52	1	0
17	113	87.5	0.030100	5.41	0	0
32	113	250.0	0.203000	30.45	1	0
32	114	87.5	0.061200	11.01	1	0
27	115	87.5	0.074100	13.33	1	0
114	115	87.5	0.010400	2.34	1	0
68	116	250.0	0.004050	0.91	1	1
12	117	87.5	0.140000	21.00	1	0
75	118	87.5	0.048100	8.65	1	0
76	118	87.5	0.054400	9.79	1	0;

Tabla 2.4 Datos de las líneas del sistema de IEEE 118 barras 4/4

ANEXO 3

DATOS DEL SISTEMA DE UN CNEL MILAGRO PARA EL MODELO LINEAL DISYUNTIVO.

param: ob:	nome	Tb	d	gmax:=
1	"SE CELEC MILAGRO SNT"	1	0.0	160
2	"LST PRADERA"	0	0.0	0
3	"CARGA CONCENTRADA SE NORTE"	0	9.59	0
4	"CARGA CONCENTRADA SE ECOELECTRIC"	0	1.34	0
5	"LST TÉCNICO MILAGRO"	0	0.0	0
6	"CARGA CONCENTRADA SE CENTRAL DIESEL"	0	8.38	0
7	"CARGA CONCENTRADA SE SUR"	0	23.25	0
8	"LST NARANJITO"	0	0.0	0
9	"CARGA CONCENTRADA SE NARAJITO"	0	7.16	0
10	"CARGA CONCENTRADA SE MARCELINO MARIDUEÑA"	0	5.81	0
11	"LST TAP ACERIA XINLONG TAP PAPELERA"	0	0.0	0
12	"CARGAS SAN CARLOS_SODERAL_PAPELESA"	0	14.84	0
13	"CARGA CONCENTRADA SE GARAICOA"	0	6.41	0
14	"LST SE ECOELECTRIC CHOBO"	0	0.0	0
15	"EL CHOBO"	0	3.00	0
16	"LST SE ECOELECTRIC_CHOBO_YAGUACHI"	0	0.0	0
17	"CARGA CONCENTRADA SE YAGUACHI"	0	5.20	0
18	"CARGA CONCENTRADA SE INBALNOR"	0	5.58	0
19	"CARGA CONCENTRADA SE MONTERO"	0	16.36	0
20	"MONTERO_LST ACUAMAR"	0	0.0	0
21	"CARGA CONCENTRADA SE ACUAMAR"	0	3.00	0
22	"LST ACUAMAR_LST ALAMOS"	0	0.0	0
23	"CARGA CONCENTRADA SE ALAMOS"	0	2.01	0
24	"SE PUERTO INCA"	0	6.52	0
25	"CARGA CONCENTRADA SE NARANJAL"	0	8.29	0
26	"TAP BODEGA"	0	0.0	0
27	"CARGA CONCENTRADA SE PROMOPLAST"	0	1.44	0
28	"CARGA CONCENTRADA SE TRIUNFO"	0	10.79	0
29	"CARGA CONCENTRADA SE BUCAY"	0	9.11	0
30	"CARGA CONCENTRADA SE CENTRO SUR"	0	0.0	0
31	"FABRICA ACERIA XINLONG"	0	10.00	0
32	"SE CELEC DURAN SNT"	0	0.0	54
33	"LST DURAN MONTERO TRAMO 1"	0	0.0	0
34	"LST DURAN MONTERO TRAMO 2_3"	0	0.0	0
35	"LST DURAN MONTERO TRAMO 4"	0	0.0	0
36	"LST YAGUACHI-TAP DESEO"	0	0.0	0
37	"CARGA CONCENTRADA SE LOS BANCOS"	0	2.30	0
38	"CENTRO COMERCIAL PIADY"	0	10.00	0
39	"CIERPRONTI"	0	3.11	0
40	"LST TAP CIERPRONTI RECREO"	0	0.0	0
41	"LST CELEC EP-TAP SE SIMÓN BOLIVAR"	0	0.0	0
42	"CARGA CONCENTRADA SE SIMÓN BOLIVAR"	0	0.0	0
43	"LST SUR - INBALNOR - MONTERO "	0	0.0	0
44	"SE CELEC PUERTO INCA SNT"	0	0.0	0
45	"LST TAP TAURA - TAP POCOS PALOS"	0	0.0	0
46	"CARGA CONCENTRADA SE CAMARONERA TAURA"	0	0.0	0
47	"CARGA CONCENTRADA SAN OLMEDO Y SANTA"	0	0.0	0
48	"CARGA CONCENTRADA SE NARANJAL 2"	0	0.0	0
49	"LST TAP PUERTO INCA - TAP PUERTO BAQUERIZO"	0	0.0	0
50	"CARGA CONCENTRADA SE PUERTO BAQUERIZO"	0	0.0	0
51	"CARGA CONCENTRADA SE EL TRIUNFO 2"	0	0.0	0
52	"CARGA CONCENTRADA SE BUCAY"	0	0.0	0
53	"EXPORQUILSA"	0	0.0	0
54	"LST MILAGRO NORTE TAP GARAICOA"	0	0.0	0;

Tabla 3.1 Datos de las barras del sistema UN Milagro

param:	ol:	fmax	x	c	n0	nmax:=	
	1	2	75.00	0.0925	782.95	1	2
	2	3	75.00	0.0129	109.29	1	2
	2	4	75.00	0.0246	208.60	1	2
	1	5	75.00	0.0788	667.01	1	2
	5	6	52.00	0.0163	92.34	1	2
	5	7	75.00	0.0171	144.95	1	2
	1	8	46.00	0.0475	313.78	1	2
	8	9	46.00	0.0177	116.98	1	2
	8	10	46.00	0.0874	579.54	1	2
	1	11	52.00	0.0005	9.18	1	2
	11	10	52.00	0.1317	737.56	1	2
	10	12	52.00	0.0099	56.16	1	2
	54	3	52.00	0.0819	462.36	1	2
	54	13	52.00	0.1097	619.50	1	2
	4	14	70.00	0.0221	217.52	1	2
	14	15	95.00	0.0337	618.32	1	2
	14	16	70.00	0.0384	378.31	1	2
	16	17	70.00	0.0175	172.75	1	2
	4	7	75.00	0.0412	348.85	1	2
	43	7	52.00	0.0764	431.46	1	2
	18	43	52.00	0.0139	78.29	1	2
	19	18	52.00	0.0508	286.69	1	2
	35	19	52.00	0.0161	90.95	1	2
	35	44	52.00	0.2712	1531.54	1	2
	44	20	52.00	0.0425	240.00	1	2
	20	21	52.00	0.0642	362.62	1	2
	20	22	52.00	0.0452	255.38	1	2
	22	23	52.00	0.0021	11.74	1	2
	22	24	52.00	0.0082	46.52	1	2
	24	48	70.00	0.1160	1155.49	0	2
	24	49	52.00	0.1774	1002.01	1	2
	49	25	52.00	0.0402	227.09	1	2
	49	50	70.00	0.0532	529.70	0	2
	10	26	52.00	0.1391	785.39	1	2
	26	27	52.00	0.0947	535.04	1	2
	34	19	52.00	0.0177	100.14	1	2
	34	35	95.00	0.0002	3.34	1	2
	27	34	52.00	0.0905	510.83	1	2
	26	28	52.00	0.0968	546.76	1	2
	28	51	52.00	0.0434	245.34	1	2
	51	29	52.00	0.3642	2056.88	1	2

Tabla 3.2 Datos de las líneas del sistema UN Milagro 1/2

30	28	52.00	0.1513	854.49	1	2
30	24	70.00	0.2742	2702.91	1	2
11	31	52.00	0.0116	65.40	1	2
32	33	95.00	0.0289	529.21	1	2
33	53	95.00	0.0028	51.68	1	2
33	45	95.00	0.1058	1938.18	0	2
45	46	95.00	0.0229	419.92	0	2
46	47	70.00	0.0515	507.78	0	2
53	34	95.00	0.0809	1483.11	1	2
17	36	95.00	0.0815	1494.51	1	2
36	37	95.00	0.0520	952.93	1	2
37	38	95.00	0.0257	470.42	1	2
38	39	95.00	0.0053	96.32	1	2
39	40	95.00	0.0474	868.26	1	2
1	54	42.00	0.0601	693.68	1	2
54	41	42.00	0.0673	775.92	1	2
41	42	70.00	0.0136	135.39	0	2
10	52	95.00	0.2957	5246.00	0	2
52	29	95.00	0.0422	774.00	0	2
43	36	95.00	0.0547	1003.05	0	2;

```

#normalizar
for {i in ob} {
  let gmax[i] := gmax[i] / 100;
  let d[i]    := d[i] / 100;
}
for {(i,j) in ol} {
  let fmax[i,j] := fmax[i,j] / 100;
}

```

Tabla 3.2 Datos de las líneas del sistema UN Milagro 2/2