



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“ESTUDIO DEL IMPACTO DEL MODELO LINEALIZADO AC
EN LA PLANIFICACION DE LOS SISTEMAS DE
TRANSMISIÓN”**

INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

AUTORES

Andrés Eduardo Jiménez Ayón

Fabián Franklin Fuentes Chávez

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2019

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a Dios y mi familia por haberme brindando siempre su apoyo, sabiendo comprender las largas noches de esfuerzo a lo largo de mi etapa universitaria. A mis amigos que siempre tuvieron confianza en mi éxito. Al Ing Miguel Gaybor e Ing Hernán Ullón que estuvieron de una u otra manera pendiente de mí en este último semestre. Al coautor de proyecto de materia integradora Andrés Jiménez.

Adicionalmente, un agradecimiento a nuestro tutor de proyecto Doctor Miguel Torres Rodríguez, por su tiempo dedicado a nosotros sus estudiantes de la materia integradora. Al Magíster Fernando Vaca Urbano por los ánimos brindados para culminar el proyecto.

Fabián Franklin Fuentes Chávez

Agradezco a mis padres Verónica Alexandra Ayón Cedeño y Florencio Agapito Jiménez Ayón que siempre me apoyaron en todo momento para poder culminar la carrera.

A mis profesores de la carrera, a mis amigos y al coautor de la tesis Fabián Fuentes.

Agradezco al tutor del proyecto integrador Doctor Miguel Torres Rodríguez, por brindarnos sus conocimientos acerca del tema de la tesis y por el tiempo dedicado a sus estudiantes de la materia integradora. Al Máster Fernando Vaca Urbano por los ánimos brindados para culminar la materia integradora.

Andrés Eduardo Jiménez Ayón

DEDICATORIA

Como todo triunfo me gustaría dedicar esta victoria a Dios por estar siempre conmigo en los malos y buenos momentos de mi carrera como estudiante. A mi madre y hermanos que a pesar de las altas y bajas siempre salimos adelante. A mi tío José Alfredo Chávez Yunapanta por ser un padre ejemplar conmigo y demás sobrinos.

Fabián Franklin Fuentes Chávez

Dedico este proyecto integrador a mis padres por su amor, trabajo y sacrificio brindados en todos estos años de estudio , gracias a ellos he logrado convertirme en el profesional que soy ahora.

Andrés Eduardo Jiménez Ayón

EVALUADORES

MSc. Fernando Vaca
PROFESOR DE LA
MATERIA

PhD. Miguel Torres
PROFESOR TUTOR

MAE. Marcelo Suárez
EVALUADOR EXTERNO

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y 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"

Fabián Franklin
Fuentes Chávez

Andrés Eduardo
Jiménez Ayón

RESUMEN

Este trabajo presenta modelos matemáticos usados en la planificación de los sistemas de transmisión. El problema por resolver será el de minimizar los costos de inversión al momento de adicionar una nueva línea en un tramo sin descuidar el cumplimiento de la generación y respetando los límites operativos de la red.

El Modelo matemático seleccionado es el modelo AC lineal el cual se comparó mediante sus resultados con el modelo DC lineal disyuntivo. El programa que se utilizó para obtener los resultados fue la herramienta AMPL

Cada modelo consta de dos partes, la primera es la función objetivo, que es la de minimizar los costos al momento de adicionar nuevas líneas; y la segunda parte son las restricciones de cada modelo.

Finalmente, el modelo linealizado AC resultó ser más exacto y preciso en comparación al modelo DC lineal disyuntivo debido a que considera la potencia reactiva de los generados y la parte capacitiva de las líneas dando más confiabilidad al momento de planificar la expansión de los sistemas de transmisión.

Palabras Clave:

modelo linealizado AC, modelo DC lineal disyuntivo, planificación de sistemas eléctricos.

ABSTRACT

This work presents mathematical models used in the planning of transmission systems, the problem to be solved will be to minimize investment costs when adding a new line in a section without neglecting the generation compliance and respecting the operational limits of the net.

The mathematical model that was used is the linear AC model which compared its results with the disjunctive linear DC model, the program that helped us to obtain the results was the AMPL optimizer

Each model consists of two parts, the first is the objective function that is to minimize costs when adding new lines and the second part is the restrictions of each model.

Finally, the more accurate and precise linearized AC model compared to the linear disjunctive DC model because this considers the reactive power of the generated and the capacitive part of the lines giving more reliability when planning the expansion of the systems of transmission.

Keywords:

AC linearized model, disjunctive linear DC model, electrical systems planning.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	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 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo General	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 Marco Teórico.....	13
1.3.1 Modelos matemáticos	13
1.3.2 Modelo de flujo de carga AC	20
CAPÍTULO 2.....	21
2. Metodología	21
2.1 Linealización del modelo de flujo de carga AC	21
2.2 Modelo Linealizado AC para la PET	23
2.3 Sistemas usados para la PET.....	27
2.3.1 Sistema de Garver 6 barras IEEE	27
2.4 Sistema de 118 barras IEEE.....	28
CAPÍTULO 3.....	28

3.	ANÁLISIS DE Resultados	28
3.1	Configuración de las nuevas líneas a ser añadidas usando el modelo DC lineal disyuntivo	28
3.1.1	Sistema de Garver aplicado al MDL	28
3.1.2	Sistema de 118 Barras aplicado al MDL	35
3.2	Configuración de las nuevas líneas a ser añadidas usando el modelo linealizado AC	36
3.2.1	Sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC	36
3.2.2	Sistema de 118 Barras aplicado al modelo linealizado AC	36
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
	Conclusiones	38
	Recomendaciones	39

ABREVIATURAS

SEP: Sistema Eléctrico de potencia
PET: Problema de la Expansión de la Transmisión
PNL: Programación no lineal
PLEM: Programación lineal Entera Mixta
PNLEM: Programación no lineal Entera Mixta
PET: Planificación de expansión de transmisión
AMPL: Lenguaje de programación matemática
MDL: Modelo lineal disyuntivo
d: Demanda
g: Generación
l: Línea de Transmisión
P: Potencia activa
Q: Potencia reactiva
nom: Nominal
qdr: Cuadrático
sh: Elemento de derivación
shl: Derivación de la línea
v: Voltaje en el bus
 θ : Ángulo de fase del bus
i: Índice de escenario de contingencia
j: Índice de envío de bus
r: Índice de candidato de fuente de energía
t: Índice de etapa
y: Índice de líneas candidas equivalente
0: índice de red existente

SIMBOLOGÍA

Conjuntos:

Ω_b : Conjunto de barras.

Ω_l : Conjunto de corredores.

T: Conjunto de etapas.

Y: Conjunto de circuitos equivalentes de las líneas candidatas.

Parámetros:

P_i^d : Demanda activa en la barra i.

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

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

\bar{P}_{ij} : Flujo de potencia máxima en la línea ij.

P_{ij}^0 : Flujo de potencia existente en la barra ij.

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.

x_{ij} : Reactancia del ramo ij.

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

B_i^{sh} : Susceptancia conectada en el bus i.

G_i^{sh} : admitancia conectada en el bus i.

L: Numero de bloques a ser linealizados.

$m_{ij,y,l}^S$: Pendiente del enésimo bloque utilizado para el flujo de potencia linealizado en el corredor ij equivalente “y”.

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

$\bar{\theta}$: Máxima diferencia entre el ángulo de fase del voltaje.

\bar{V} : Magnitud del voltaje máximo.

\underline{V} : Magnitud del voltaje mínimo.

V_{nom} : Magnitud del voltaje del sistema nominal.

Variables:

P_i^d : Demanda en la barra i .

P_i^g : Generación en la barra i .

θ_i : Angulo de fase en la barra ij .

P_{ij} : Flujo de potencia por el corredor ij .

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

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

$\Delta_{ij,y,l}^P$: Valores del l – enesimo bloque asociado con el flujo de energía activa del corredor ij equivalente a la línea “ y ”.

$\Delta_{ij,y,l}^Q$: Valores del l – enesimo bloque asociado con el flujo de energía reactiva del corredor ij equivalente a la línea “ y ”.

f_{ij}^θ : Variable slack del Angulo de fase del voltaje en el corredor ij .

f_{ij}^v : Variable slack de la ecuación de caída de voltaje del corredor ij .

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

$I_{ij,y}^{qdr}$: Cuadrado del flujo de corriente $I_{ij,y}$.

V_i : Magnitud de voltaje del bus i .

V_i^{qdr} : Cuadrado de la magnitud del voltaje V_i .

$P_{ij,y}$: Flujo de potencia activa en la nueva línea equivalente “ y ” del corredor ij .

$P_{ij,y}^+$: Variable auxiliar para la calculación de $P_{ij,y}$.

$P_{ij,y}^-$: Variable auxiliar para la calculación de $P_{ij,y}$.

$Q_{ij,y}$: Flujo de potencia reactiva de la nueva línea equivalente “ y ” en el corredor ij .

$Q_{ij,y}^+$: Variable auxiliar para la calculación de $Q_{ij,y}$.

$Q_{ij,y}^-$: Variable auxiliar para la calculación de $Q_{ij,y}$.

$Q_{i,ij,y}^{shl}$: Inyección de potencia reactiva en el bus i , debido a la derivación de la línea equivalente “ y ”

θ_i : Angulo de fase del bus i (del modelo disyuntivo).

Variables binarias:

$w_{ij,y}$: Variable de decisión para la construcción equivalente de la línea “y” en el corredor ij.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Balance de Flujo de Potencia	14
Figura 1.2 Representación de capacidad de las líneas	15
Figura 2.1 Linealización para P_{ij2} y Q_{ij2}	23
Figura 2.2 Diferentes opciones de instalación de línea.....	24
Figura 2.3 Sistema de Garver 6 barras.....	27
Figura 2.4 Sistema de 118 Barras	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas por tramo..	29
Tabla 3.2 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 2 líneas.	30
Tabla 3.3 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial.....	31
Tabla 3.4 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 2 líneas por tramo a diferentes porcentajes de la demanda inicial.	32
Tabla 3.5 Potencia en los tramos ij añadiendo máximo 2 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial	33
Tabla 3.6 Potencia en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial.....	34
Tabla 3.7 Resultado del MDL aplicado al sistema de 118 barras	35
Tabla 3.8 Resultados del sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC.....	36
Tabla 3.9 Resultado del sistema de 118 barras aplicado al modelo linealizado AC ..	37

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) operan de tal manera que el suministro de energía eléctrica sea garantizado en todo momento, es decir, debe ser capaz de generar, transportar y distribuir tanta potencia como sea requerida para abastecer el crecimiento continuo de la demanda a diferentes tipos de usuarios como: residenciales, comerciales, industriales u otros, asegurando en todo momento la confiabilidad y calidad de energía eléctrica suministrada [1] [2].

En un sistema eléctrico de potencia con una planificación bien desarrollada, no debería de existir un crecimiento desmesurado de la demanda, pero debido al crecimiento poblacional y los avances tecnológicos que ocurren a diario es inevitable que esta aumente y tenga una tendencia al crecimiento en el futuro. Cuando la demandada crece, es lógico pensar que, si los sistemas no evolucionan, no tendrán la capacidad ni de generar ni de transportar tal potencia. Es por esta razón, que es necesario adelantarse a este problema y planificar de manera óptima los sistemas eléctricos de potencia.

Debido a lo mencionado se puede decir que el problema de la expansión de la transmisión (PET) consiste en determinar las líneas y/o transformadores que deben ser adicionadas para satisfacer la demanda futura de manera segura y confiable, con el mínimo costo de inversión. El PET puede ser clasificado como estático o dinámico [3],[4]. En el problema estático se planea un solo horizonte de tiempo, es decir se define inicialmente un horizonte de planificación y se obtiene una proyección de la demanda para este horizonte; la inversión total del proyecto de expansión se efectúa al inicio del periodo de planificación. En el problema dinámico, el periodo de estudio se divide en sub-períodos, en los cuales se resuelve un problema estático, y se determina en qué año se adhieren las líneas de transmisión [3],[4].

1.1 Descripción del problema

El estudio de la planificación de la expansión de la red de transmisión ha sido un problema abordado desde los años 70 y consiste en determinar ¿Dónde? , ¿Cuándo? y ¿Cuántas? líneas nuevas deben ser agregadas al SEP con el fin de mantener el equilibrio entre demanda y generación, Garver fue el primero en presentar una solución mediante un modelo de transporte simple. Al transcurrir el tiempo, se han presentado diferentes modelos aplicados a este tipo de estudio todos con el objetivo de mejorar la precisión de la respuesta comparado con los sistemas reales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudio del modelo lineal AC en la planificación de la expansión de los sistemas de transmisión. Analizando los costos de inversión y factibilidad en la adición de nuevos circuitos

1.2.2 Objetivos Específicos

- Evaluación del modelo lineal disyuntivo.
- Estudio del modelo Ac linealizado.
- Evaluación de costo beneficio entre ambos modelos.
- Comprobación del impacto del modelo seleccionado mediante el optimizador AMPL

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Modelos matemáticos

Con respecto al modelo de optimización, el problema PET puede considerarse como un problema MINLP, que es muy difícil de resolver debido a su naturaleza combinatoria, lo que conduce a un número creciente de alternativas de solución, incluso en el caso de redes de pequeño tamaño [5].

Teniendo en cuenta el problema combinatorio y que un modelo más preciso para resolver el problema de PET se basa en las ecuaciones de flujo de potencia AC, hay algunas propuestas en la literatura que trabajan con este problema a través de modelos relajados que consideran solo la parte de potencia activa de la red de transmisión [6].

Hay diversos modelos para representar el Sistema de Transmisión, estos modelos tienen una característica en particular que son modelos simplificados del modelo AC, entre ellos tenemos [4], [7], [1].

- Modelo de Transporte.
- Modelo DC.
- Modelo Híbrido no Lineal.
- Modelo DC Lineal Disyuntivo

1.3.1.1 Modelo de transporte

El modelo de transporte fue presentado por L. L. Garver en enero de 1970. Es una simplificación lineal del modelo DC, el cual solo cumple la primera ley de Kirchhoff sin considerar la segunda, es decir, considera la conservación de flujos de potencia en los nodos o barras del sistema sin tener en cuenta las caídas de voltaje producidas por la impedancia de las líneas de transmisión [4], [8], [9].

El no considerar las impedancias de las líneas permite que este modelo presente una gran capacidad de convergencia (flexibilidad) en sistemas aislados. Por otra parte, este modelo lineal es una representación poco

adecuada del PET, el cual puede resultar en soluciones poco prácticas respecto al óptimo del modelo DC.

El modelo de Garver se representa en las siguientes ecuaciones junto con la función objetivo a minimizar [4].

Minimizar

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

Sujeto a:

Ecuación de balance de Potencia (Primera Ley de Kirchhoff)

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

Con la ayuda de la Figura 1.1 se obtiene la ecuación (1.2) usando solo la Primera ley de Kirchhoff.

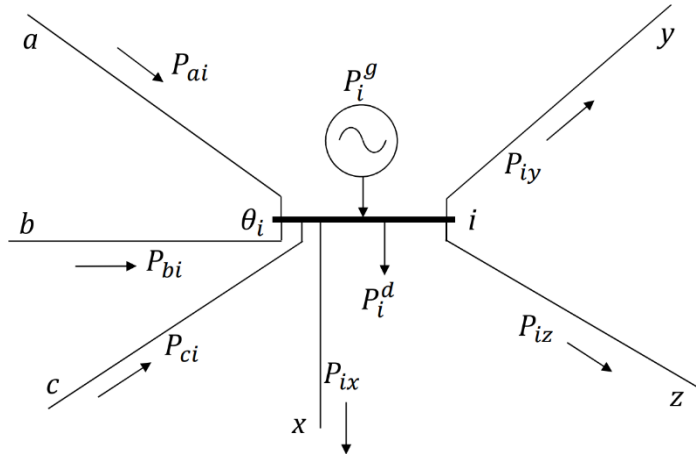


Figura 1.1 Balance de Flujo de Potencia. Fuente: [4].

Ecuación de capacidad de operación de las líneas.

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

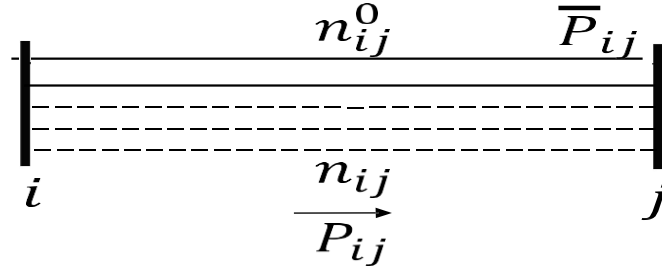


Figura 1.2 Representación de capacidad de las líneas. Fuente: [4].

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

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

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

La ecuación (1.1) representa la función objetivo, que establece la minimización de las inversiones debido a la incorporación de nuevas líneas de transmisión a lo largo del horizonte de planeamiento.

Las restricciones de la ecuación (1.2) corresponden a la primera ley de Kirchhoff, lo que genera una ecuación por cada barra del sistema. Las restricciones de la ecuación (1.3) representan los límites de capacidad de transmisión del flujo de potencia de los circuitos (líneas y transformadores).

Las restricciones en la ecuación (1.4) representan los límites de generación de potencia activa. En la ecuación (1.5) se representan las restricciones de la cantidad de circuitos que puede ser adicionado entre dos barras consecutivas [4].

Esta modelación corresponde a un problema de programación lineal entera mixta (PLEM). Encontrar una solución a este problema no siempre es simple, pues depende del tamaño del sistema bajo análisis. La restricción de tener adición entera de líneas genera una mayor complejidad al problema. Considerar que estas características son aprovechadas para desarrollar varios tipos de algoritmos para resolver el PET cuando se usa el modelo de transportes [3], [4], [9].

La ventaja del modelo de transporte radica en que es capaz de resolver tanto redes conexas como aquellas altamente aisladas, debido a que el

modelo no ocupa las reactancias de los circuitos. Una desventaja radica en el hecho que la solución presentada puede estar muy distante de la solución del modelo DC considerado como el modelo ideal [1], [3], [4].

1.3.1.2 Modelo DC

EL modelo DC (corriente continua) toma en cuenta la generalización del flujo de carga. Todos los circuitos del sistema de transmisión deben cumplir con las dos leyes de Kirchhoff [4]. El número de ecuaciones y variables se incrementa debido a la cantidad de líneas nuevas que podrían adicionarse al sistema. A pesar de su complejidad, es altamente empleado para resolver el PET y es considerado como ideal para representar la red de transmisión a largo plazo, este modelo es un problema de programación no lineal entera mixta (PNLEM), [1], [4], [10], .

El modelo DC se representa en las siguientes ecuaciones junto con la función objetivo a minimizar [4].

Minimizar

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

Sujeto a:

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

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

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

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

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

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

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid Tb_i = 3 \quad (1.13)$$

La ecuación (1.7) es la función de costo a minimizar, la primera ley de Kirchhoff es usada en la ecuación (1.8). En la siguiente restricción no lineal es debido a multiplicar las dos variables n y θ dando como resultado la ecuación (1.9) que es la segunda ley de Kirchhoff. En la ecuación (1.10), se presenta la restricción de los flujos de potencia en las líneas. En las ecuaciones (1.11) y (1.12), se formulan los límites de generación y generación de potencia activa y el número máximo de líneas a adicionar. Por último, la ecuación (1.13) se asigna el ángulo inicial [1], [4].

1.3.1.3 Modelo Híbrido lineal

El modelo híbrido lineal fue presentado por R. Villasana en 1985. Es una combinación entre el modelo de transportes y el modelo DC. En este modelamiento, las líneas ya existentes cumplen las dos leyes de Kirchhoff y las nuevas líneas a ser agregadas al sistema solo cumplen con la primera ley de Kirchhoff. La idea principal siempre fue hallar soluciones que estén cercanas a las del modelo DC pero sin aumentar su complejidad del sistema [4], [11].

El modelo híbrido lineal se representa en las siguientes ecuaciones junto con la función objetivo a minimizar [4].

Minimizar:

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \quad (1.14)$$

Sujeto a:

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

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

$$-n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.17)$$

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

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.19)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.20)$$

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

$$\theta_i = \theta_i^0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid Tb_i = 3 \quad (1.21)$$

La ecuación (1.14) es la función de costo a minimizar, la ecuación (1.15) muestra el balance de potencia activa, la ecuación (1.16) corresponde al cálculo del flujo de potencia activa, las ecuaciones (1.17) y (1.18) corresponden al límite de flujo de potencia activa, la ecuación (1.19) corresponde al límite de la potencia activa de los generadores, la ecuación (1.20) corresponde al límite de líneas a adicionar y por último la ecuación (1.21) se refiere al ángulo inicial [4].

1.3.1.4 Modelo DC lineal Disyuntivo

El modelo lineal disyuntivo fue presentado por L. Bahiense en 2001. Una característica importante de este modelo es que presenta la misma solución del modelo DC [12]. Lo consigue por medio de la inclusión de variables reales y binarias, usando una transformación que permite separar los términos cuadráticos en las relaciones lineales.

El modelo DC lineal disyuntivo representa en las siguientes ecuaciones junto con la función objetivo a minimizar [4], [10], [12].

Minimizar:

$$\min v = \sum_{\forall ij \in \Omega_l} c_{ij} n_{ij} \sum_{\forall y \in \Omega_Y} w_{ij,y} \quad (1.22)$$

Sujeto a:

$$P_i^g - P_i^d + \sum_{j \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ji,y} + \sum_{j \in \Omega_l} P_{ji}^0 - \sum_{i \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ij,y} - \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij}^0 = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.23)$$

$$P_{ij}^0 = n_{ij}^0 \frac{(\theta_i - \theta_j)}{x_{ij}} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.24)$$

$$-2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \leq P_{ij,y}x_{ij} - (\theta_i - \theta_j) \leq 2\bar{\theta}(1 - w_{ij,y}) \quad \forall i \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (1.25)$$

$$-n_{ij}^0 \bar{P}_{ij} \leq P_{ij}^0 \leq \bar{P}_{ij} n_{ij}^0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.26)$$

$$-w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \leq P_{ij,y} \leq w_{ij,y} \bar{P}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.27)$$

$$0 \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.28)$$

$$-\bar{\theta} \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (1.29)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (1.30)$$

$$w_{ij,y} \leq w_{ij,y-1} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y / y > 1 \quad (1.31)$$

$$w_{ij,y} \text{ binario} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y$$

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

La ecuación (1.22) función objetivo a minimizar, la ecuación (1.23) corresponde al balance de potencia activa, la ecuación (1.24) describe el flujo de potencia inicial usando el número de líneas ya existente, multiplicando la diferencia de sus ángulos entre la reactancia de la línea. La siguiente ecuación (1.25) es una restricción de igualdad no lineal donde no debe ser menor ni tampoco puede exceder dichos valores, así teniendo una diferencia angular entre las dos barras que no se encuentran conectadas y por último la variable $w_{ij,y}$ toma valores binarios entre cero y uno. La restricción (1.26) verifica que este entre los rangos, estos rangos se obtienen de multiplicar el número de líneas existentes por el flujo de potencia máximo. La ecuación (1.27) se obtiene de multiplicar $w_{ij,y} \bar{P}_{ij}$, donde $w_{ij,y}$ tomara el valor de uno si la línea y es adicionada en el tramo ij y cero en caso contrario y \bar{P}_{ij} el flujo máximo que puede pasar por la línea en el tramo ij. La ecuación (1.28) de Potencia Generada debe ser mayor a cero y menor o igual a la potencia máxima generada. La ecuación (1.29) nos dice que debe estar entre más, menos del valor máximo del ángulo de fase para todas las barras. La siguiente restricción (1.30) suma las líneas que fueron añadidas y verifica que no sean mayor al número máximo de

líneas que se pueden añadir. La siguiente restricción (1.31) nos garantiza una secuencia de líneas “y” dentro del conjunto “Y” para poder evitar iguales soluciones. Por último la ecuación (1.32) asigna el ángulo inicial [4].

1.3.2 Modelo de flujo de carga AC

Para el modelo de flujo de carga AC se procede a representar la función objetivo con el fin de minimizar las pérdidas que habrá en la red, como se muestra en la ecuación (1.33) la cual se encontraran sujeto al flujo de carga AC , las restricciones se muestran en las ecuaciones (1.34) – (1.38), se puede observar que no habrán variables que sean de toma de decisiones al momento de optimizar el problema de flujo de carga convencional [13], [2].

Función Objetivo:

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

Sujeto a:

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

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

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

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

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

La función objetivo (1.33) está relacionada con las pérdidas de energía de la red de transmisión. Las restricciones (1.34) y (1.35) representan los balances de potencia activa y reactiva, respectivamente. Las ecuaciones (1.36) y (1.37) son las restricciones para la magnitud del voltaje y la diferencia de ángulo de fase para cada línea. Finalmente, (1.38) representa el flujo de corriente a través del corredor [13].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra el proceso de linealizado del modelo de flujo de carga AC descrito en la sección 1.3.2 que para el capítulo 3 nos servirá para comparar sus resultados con el modelo DC lineal disyuntivo [4], descrito en la sección 1.3.1.4, la herramienta usada para obtener los resultados en AMPL .

Se toma como caso de estudio el sistema de Garver de 6 barras de la IEEE y el sistema de 118 barras de la IEEE , se analizan los cambios de cada sistema [13], concluyendo sus análisis en el capítulo 4.

2.1 Linealización del modelo de flujo de carga AC

En las ecuaciones mostradas en el modelo de carga AC (1.33)-(1.38) descritas anteriormente son sujetas a PNL, por sus variables que son cuadráticas y aún más por multiplicaciones entre no lineales. De aquí partimos al modelo linealizado al cual se le harán algunos cambios en la magnitud de la variable de voltaje y corriente por lo que son términos cuadráticos, a continuación, se muestran los cambios a realizar [13].

$$V_i^{sqr} = V_i^2 V_i^{sqr} \geq 0 \quad (2.1)$$

$$I_i^{sqr} = I_i^2 I_i^{sqr} \geq 0 \quad (2.2)$$

Se debe tomar en consideración pequeña la diferencia de ángulo que habrá entre buses vecinos, por lo que se cumple la aproximación en radianes [13].

$$\sin(\theta_i - \theta_j) \cong (-\theta_j) \quad (2.3)$$

También se sabe que la magnitud del voltaje debe estar cerca de 1p.u. al igual que la magnitud del voltaje nominal, por lo tanto, es válido realizar lo siguiente [13], [2].

$$V_i V_j \cong V_j^2 \cong V_{nom}^2 \quad (2.4)$$

Como último requerimiento se debe remplazar la potencia activa como reactivas que se encuentran en términos cuadráticos a una ecuación linealizada [13].

$$V_{nom}^2 I_{ij}^{qdr} = \sum_{l=1}^L m_{ij,l}^S \Delta_{ij,l}^P + \sum_{l=1}^L m_{ij,l}^Q \Delta_{ij,l}^Q \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.5)$$

$$P_{ij}^+ - P_{ij}^- = P_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.6)$$

$$P_{ij}^+ + P_{ij}^- = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij,l}^P \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.7)$$

$$Q_{ij}^+ - Q_{ij}^- = Q_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.8)$$

$$Q_{ij}^+ + Q_{ij}^- = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij,l}^Q \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.9)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,l}^P \leq \Delta_{ij}^{-S} \quad \forall ij \in \Omega_l, l = 1 \dots L \quad (2.10)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,l}^Q \leq \Delta_{ij}^{-S} \quad \forall ij \in \Omega_l, l = 1 \dots L \quad (2.11)$$

$$P_{ij}^+, P_{ij}^-, Q_{ij}^+, Q_{ij}^- \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.12)$$

La restricción (2.5) representa la magnitud de voltaje junto con la magnitud del flujo de corriente a su vez la relación no lineal entre la potencia activa y reactiva, las demás restricciones (2.6) – (2.12) son variables auxiliares internas pero la restricción (2.10) y (2.11) son los pasos para la linealización por partes [13], [2].

Donde:

$$\Delta_{ij}^{-S} = \frac{(\bar{V} \bar{I}_{ij})}{L} \quad , \quad L = \text{numero de pasos a ser linealizado.}$$

$$m_{ij,l}^S = (2L - 1) \Delta_{ij}^{-S}$$

Se presentará un gráfico a continuación donde se encuentra representado P_{ij}^2 y Q_{ij}^2 , [13], [2].

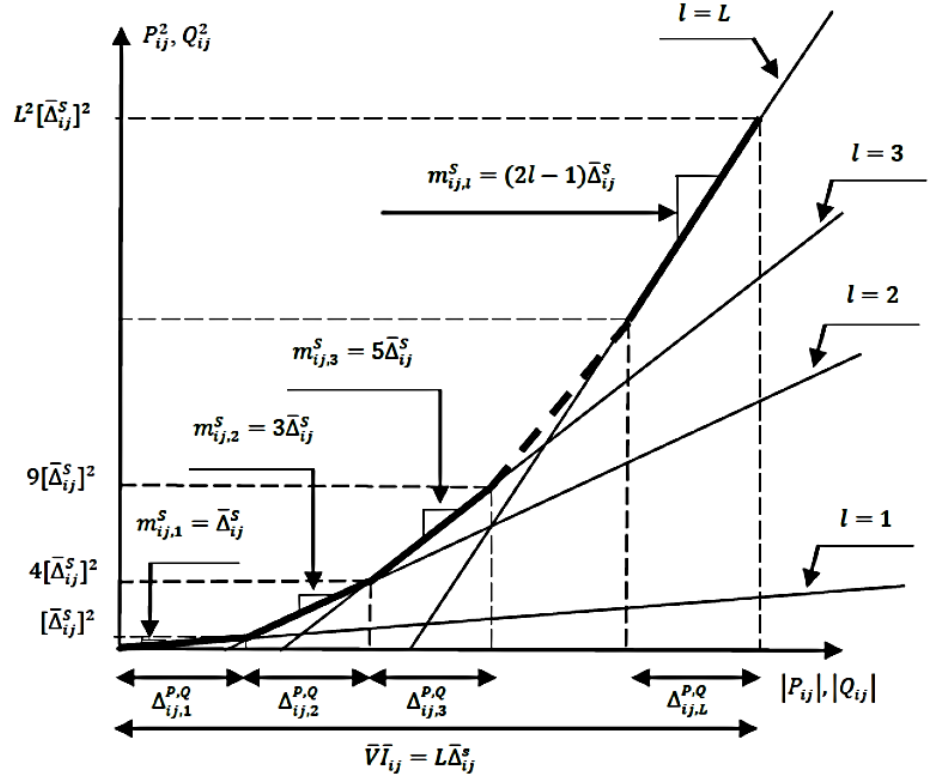


Figura 2.1 Linealización para P_{ij}^2 y Q_{ij}^2 . Fuente: [13].

2.2 Modelo Linealizado AC para la PET

Por medio del modelo ya explicado antes, le será fácil tomar una decisión benéfica al momento de invertir o no en las nuevas líneas candidatas, teniendo en cuenta el problema principal de minimización [13].

$$\min v = \sum_{ij \in \Omega_1} \sum_{y \in \Omega_Y} c_{ij,y}^l w_{ij,y} \quad (2.13)$$

$$c_{ij,y}^l = y c_{ij}^l \quad \forall ij \in \Omega_1, \forall y \in Y \quad (2.14)$$

$$\bar{I}_{ij,y} = n_{ij,y} \bar{I}_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega_1, \forall y \in Y \quad (2.16)$$

La función de minimización (2.13) representa el costo de las nuevas líneas candidatas a ser añadidas, donde “y” es una opción de instalación de una línea (Si y=0 no se agregan líneas, si y=1 solo es posible agregar una línea) y la variable binaria $w_{ij,y}$ indica si la opción está o no seleccionada en la siguiente

figura 2.2 se muestra el funcionamiento de cómo se trabajará en el modelo Linealizado AC [13],[2].

El parámetro $n_{ij,y} = (n_{ij}^0 + y)$ representa el número de líneas para cada Corredor ij, n_{ij}^0 indica las líneas existentes.

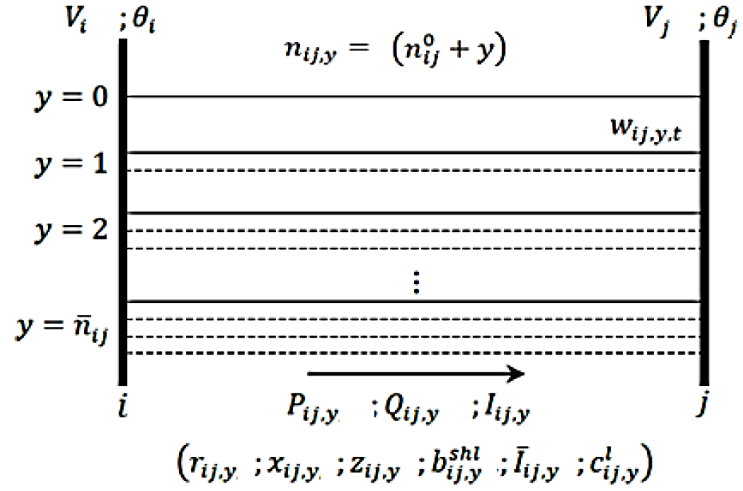


Figura 2.2 Diferentes opciones de instalación de línea. Fuente: [13].

Los parámetros que se muestran a continuación solo son válidos siempre que se cumpla que $n_{ij,y} > 0$.

$$r_{ij,y} = \frac{R_{ij}}{n_{ij,y}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | n_{ij,y} > 0 \quad (2.17)$$

$$X_{ij,y} = \frac{X_{ij}}{n_{ij,y}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y | n_{ij,y} > 0 \quad (2.18)$$

Cuando $n_{ij,y} = 0$ los parámetros serán escogidos por la ecuación (2.19) y (2.20), mientras que las ecuaciones (2.21) – (5.29) define los flujos de potencia activa y potencia reactiva [13].

$$r_{ij,y} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y = 0 \quad (2.19)$$

$$X_{ij,y} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y = 0 \quad (2.20)$$

$$P_{ij,y} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y = 0 \quad (2.21)$$

$$Q_{ij,y} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y = 0 \quad (2.22)$$

$$I_{ij,y}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y = 0 \quad (2.23)$$

Las ecuaciones (2.24) y (2.25) son usadas para el equilibrio de potencia activa y reactiva. Las restricciones (2.26) y (2.27) son variables creadas para la magnitud de voltaje y diferentes ángulos en cada línea ij , $f_{ij,t,c}^v$ y $f_{ij,t,c}^\theta$ respectivamente [13].

$$P_i^g + \sum_{j \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} P_{ji,y} - \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} (P_{ij,y} + I_{ij,y}^{qdr} r_{ij,y}) - G_i^{sh} V_i^{qdr} = P_i^d \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.24)$$

$$Q_i^g + \sum_{j \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} (Q_{ji,y} + Q_{i,j,y}^{shl}) - \sum_{ij \in \Omega_l} \sum_{y \in Y} (Q_{ij,y} - Q_{i,j,y}^{shl} + I_{ij,y}^{qdr} x_{ij,y}) + B_i^{sh} V_i^{qdr} = Q_i^d \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.25)$$

$$|f_{ij}^v| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2) \sum_{y \in Y | n_{ij,y}=0} w_{ji,y} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.26)$$

$$|f_{ij}^\theta| \leq 2\bar{\theta}\bar{V}^2 \sum_{y \in Y | n_{ij,y}=0} w_{ji,y} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (2.27)$$

La siguiente restricción (2.28) es la normalización entre la potencia activa y potencia reactiva para obtener la magnitud del voltaje con el flujo de corriente [13].

$$V_{nom}^2 I_{ij,y}^{qdr} = \sum_{l=1}^L m_{ij,y,l}^S \Delta_{ij,y,l}^P + \sum_{l=1}^L m_{ij,y,l}^Q \Delta_{ij,y,l}^Q \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.28)$$

$$P_{ij,y}^+ - P_{ij,y}^- = P_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.29)$$

$$P_{ij,y}^+ + P_{ij,y}^- = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij,y,l}^P \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.30)$$

$$Q_{ij,y}^+ - Q_{ij,y}^- = Q_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.31)$$

$$Q_{ij,y}^+ + Q_{ij,y}^- = \sum_{l=1}^L \Delta_{ij,y,l}^Q \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.32)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,y,l}^P \leq \Delta_{ij,y}^{-S} \quad \forall ij, y \in \Omega_l, \forall y \in Y, l = 1 \dots L \quad (2.33)$$

$$0 \leq \Delta_{ij,y,l}^Q \leq \Delta_{ij,y}^{-S} \quad \forall ij, y \in \Omega_l, \forall y \in Y, l = 1 \dots L \quad (2.34)$$

$$P_{ij,y}^+, P_{ij,y}^-, Q_{ij,y}^+, Q_{ij,y}^- \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y, \forall t \in T \quad (2.35)$$

Para las siguientes dos restricciones (2.36) y (2.37) que incluyen el efecto de nuevas líneas en la topología que describe los elementos en paralelo de cada línea.

$$-\bar{V}^2(1 - w_{ij,y})b_{ij,y}^{shl} \leq Q_{ij,y}^{shl} - V_u^{qdr}b_{u,ij,y}^{shl} \leq -\underline{V}^2(1 - w_{ij,y})b_{ij,y}^{shl} \\ \forall u \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \mid u = i \text{ o } u = j \quad (2.36)$$

$$w_{ij,y}\underline{V}^2b_{ij,y}^{shl} \leq Q_{ij,y}^{shl} \leq w_{ij,y}\bar{V}^2b_{ij,y}^{shl} \\ \forall u \in \Omega_b, \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \mid u = i \text{ o } u = j \quad (2.37)$$

Para la siguiente restricción (2.38) solo puede seleccionar una configuración de líneas “y”, la siguiente ecuación (2.39) muestra el número máximo de líneas que se podrían agregar.

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} = 1 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall t \in T \quad (2.38)$$

$$\sum_{y \in Y} w_{ij,y} \leq \bar{n}_{ij,y} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall t \in T \quad (2.39)$$

La siguiente restricción (2.40) establece la magnitud del flujo de corriente en el corredor ij, mientras que la restricción (2.41) representa el mínimo y el máximo de la magnitud del voltaje.

$$0 \leq I_{ij,y}^{qdr} \leq w_{ij,y}\bar{I}_{ij,y}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.40)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_i^{qdr} \leq \bar{V}^2 \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.41)$$

Las próximas dos ecuaciones (2.42) y (2.43) muestra los límites de potencia activa y reactiva del generador, por último la restricción (2.44) establece la variación máxima de diferencia de voltaje para cada bus[13].

$$\underline{P}_i^g \leq P_i^g \leq \bar{P}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.42)$$

$$\underline{Q}_i^g \leq Q_i^g \leq \bar{Q}_i^g \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.43)$$

$$-\bar{\theta} \leq \theta_i \leq \bar{\theta} \quad \forall i \in \Omega_b \quad (2.44)$$

Las dos últimas restricciones restantes (2.45) representa el ángulo de fase de referencia y la ecuación (2.46) es un valor binario entre uno y cero.

$$\theta_i = 0 \quad \forall i \in \Omega_b \mid i = slack \quad (2.45)$$

$$w_{ij,y} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall y \in Y \quad (2.46)$$

A continuación se muestra el resumen del modelo linealizado AC que solo permite inversiones en nuevas líneas [13].

$$\text{Función Objetivo} \quad (2.13)$$

$$\text{Restricciones} \quad (2.24)-(2.46)$$

2.3 Sistemas usados para la PET

2.3.1 Sistema de Garver 6 barras IEEE

El sistema de Garver, que se muestra en la Figura 2.3, es muy utilizado para presentar los resultados sobre la PET. Los datos para este sistema de prueba se muestran en el Anexo 1. Este sistema consiste de 6 barras y una demanda prevista de 760MW. El número máximo posible de líneas adicionales por camino es igual a 3.

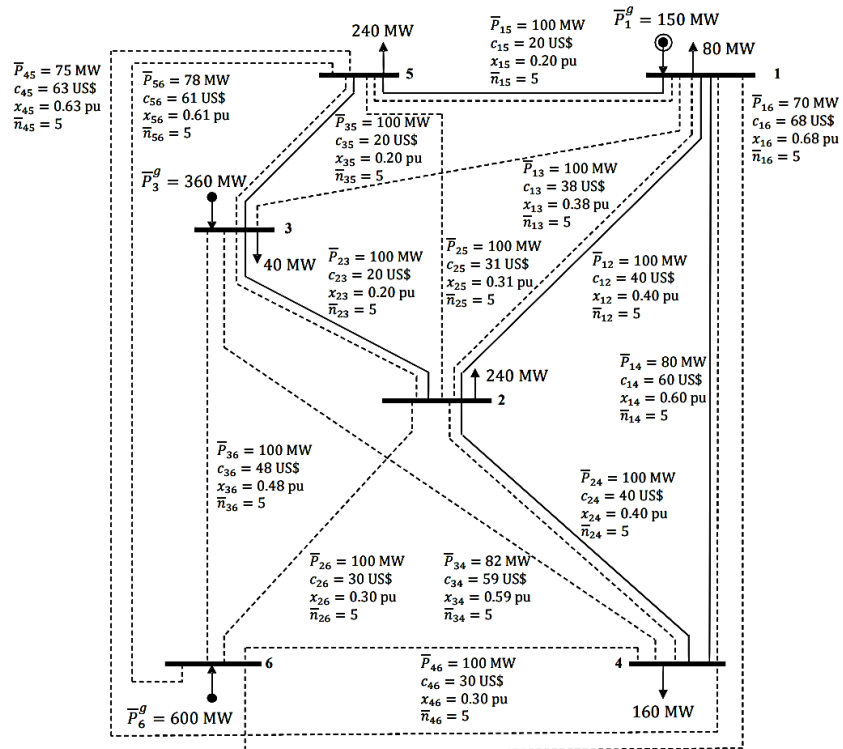


Figura 2.3 Sistema de Garver 6 barras. Fuente: [4].

2.4 Sistema de 118 barras IEEE

El sistema de 118 barras se encuentra en la figura 2.4. Los datos para este sistema de prueba de prueba se encuentran en el Anexo 2. Este sistema consta de 118 barras y una demanda prevista de 2617.60 MW. El número máximo posible de líneas adicionales por camino es igual a 3.

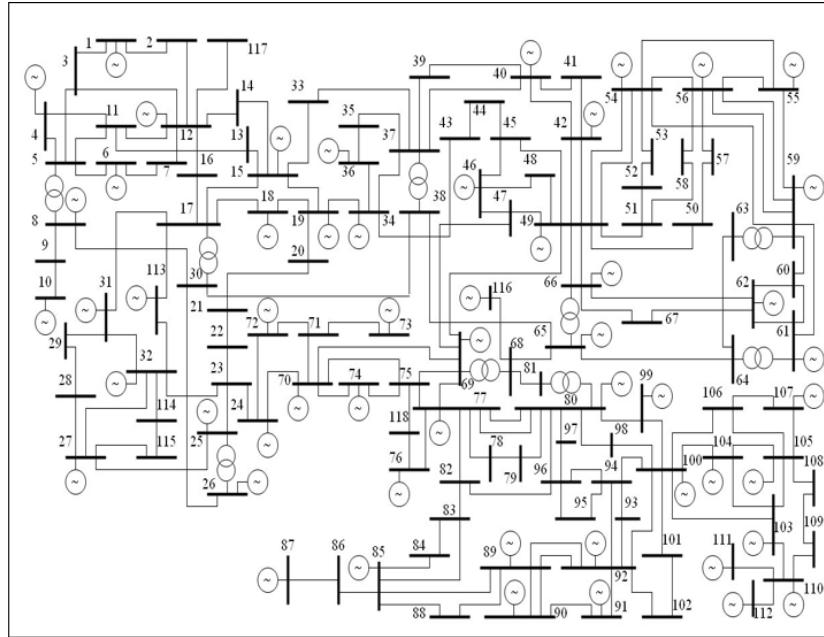


Figura 2.4 Sistema de 118 Barras. Fuente: [13].

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Configuración de las nuevas líneas a ser añadidas usando el modelo DC lineal disyuntivo

3.1.1 Sistema de Garver aplicado al MDL

Para el sistema de Garver se usó los datos propuestos en la parte de ANEXO 1, la Tabla A 1.1 y la Tabla A 1.2 sin tomar en consideración la potencia reactiva de los generadores y la parte capacitiva de las líneas, estos datos nos ayudaran a nuestro análisis usando como máximo dos y tres líneas a ser añadidas como máximo en cada barra. La Tabla 3.1 junto

con la Tabla 3.2 corresponde a los análisis considerados como caso base para un número máximo de 3 líneas y 2 líneas respectivamente.

Caso, 3 Líneas Máximos Por Tramo				
Conjunto de Circuitos ij		Numero Circuitos Añadidos (nij)	Potencia (MW)	Potencia Máxima (MW)
1	2	0	40.00	100
1	3	0		
1	4	0	-40,00	80
1	5	0	66,67	100
1	6	0		
2	3	0	-100	100
2	4	0	-100	100
2	5	0		
2	6	0		
3	4	0		
3	5	1	173,33	200
3	6	0		
4	5	0		
4	6	3	-300,00	300
5	6	0		
TOTAL		4		
COSTO [MUS \$]		110		

Tabla 3.1 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas por tramo.

Como se observa en la Tabla 3.1, se añaden 4 circuitos nuevos, 1 línea en el tramo 3-5 y 3 líneas en el tramo 4-6 por lo que su costo será de 110 millones de dólares por añadir 4 circuitos nuevos.

Caso 2 Líneas Máximos Por Tramo				
Conjunto de Circuitos ij		Numero Circuitos Añadidos (nij)	Potencia (MW)	Potencia Máxima (MW)
1	2	0	29.52	100
1	3	0		
1	4	0	11.19	80
1	5	0	29.28	100
1	6	0		
2	3	0	-100.00	100
2	4	0	-12.73	100
2	5	0		
2	6	1	-97.75	100
3	4	0		
3	5	2	210.72	300
3	6	0		
4	5	0		
4	6	2	-161.54	200
5	6	0		
TOTAL		5		
COSTO [MUS \$]		130		

Tabla 3.2 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 2 líneas.

La Tabla 3.2 se añaden 5 circuitos nuevos de la siguiente manera, para el tramo 2-6 solo se necesitará 1 línea nueva, a su vez el tramo 3-5 y el tramo 4-6 requiere de 2 líneas nuevas cada tramo mencionado, el costo de añadir los 5 circuitos es de 130 millones de dólares

Caso 3 Líneas Máximos Por Tramo a diferentes demandas								
Conjunto de Circuitos ij		Numero Circuitos Añadidos (nij)						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1	2	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0	0	0	0
1	6	0	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0	0	0
2	6	0	0	2	2	2	3	3
3	4	0	0	0	0	0	0	0
3	5	1	1	2	2	2	2	2
3	6	0	0	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0	0	0
4	6	3	3	2	2	3	2	2
5	6	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		4	4	6	6	7	7	7
COSTO [MUS \$]		110	130	160	160	190	190	190

Tabla 3.3 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial.

En la Tabla 3.3 se presentan los circuitos añadidos al momento de aumentar la demanda en un 5% sucesivamente hasta llegar al 30%. Como era de esperar el número de circuitos debe aumentar debido a la carga que empieza a crecer. Añadiendo como máximo 7 circuitos cuando la demanda está en el 30%,

Se observa los diferentes costos a diferentes porcentajes de demandas con un máximo número de 3 líneas a añadir por tramo teniendo como costo mayor de 190 millones al añadir un total de 7 líneas.

Caso 2 Líneas Máximos Por Tramo a diferentes demandas								
Conjunto de Circuitos ij		Numero Circuitos Añadidos (nij)						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1	2	0	0	0	0	0	0	0
1	3	0	0	0	0	0	0	0
1	4	0	0	0	0	0	0	0
1	5	0	0	0	0	0	0	0
1	6	0	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	1	0	0	0
2	4	0	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	0	0	0	0	0
2	6	1	2	2	2	2	2	2
3	4	0	0	0	0	0	0	0
3	5	2	1	2	1	1	2	1
3	6	0	0	0	0	0	0	0
4	5	0	0	0	0	0	0	0
4	6	2	2	2	2	2	2	2
5	6	0	0	0	0	1	1	2
TOTAL		5	5	6	6	6	7	7
COSTO [MUS \$]		130	140	160	160	201	221	262

Tabla 3.4 Líneas añadidas en los tramos ij, añadiendo máximo 2 líneas por tramo a diferentes porcentajes de la demanda inicial.

En la Tabla 3.4 se muestra los circuitos añadidos, tomando en consideración que solo se podrán añadir 2 circuitos como máximo. Al aumentar la carga cada 5% hasta llegar a 30% se observa que el número de circuitos aumentara y a su vez el costo, cuando la demanda se encuentra al 30% se añade 7 circuitos por lo que el costo es de 262 millones de dólares.

Caso 2 Líneas Máximos Por Tramo a diferentes demandas								
Conjunto de Circuitos ij		Potencia (nij)						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1	2	29.52	-1.07	-4.46	5.55	11,01	15.79	13.47
1	3							
1	4	11.19	-5.53	-6.21	0.67	6,49	8.97	9.04
1	5	29.28	52	11.61	27.90	36,49	25.24	23.49
1	6							
2	3	-100	-45.85	-63.61	-65.90	-85,54	-82.25	-100
2	4	-12.73	-7.22	-4.85	-4.55	-1,27	-2.34	0.09
2	5							
2	6	-97.75	-200	-200	-200	-190,18	-199.62	-198.62
3	4							
3	5	210.72	200	252.39	248.10	200	227.75	193.09
3	6							
4	5							
4	6	- 161.54	-180.75	-187.06	-187.88	-186,78	-193.37	-198.87
5	6					-51,51	-47.01	-95.42

Tabla 3.5 Potencia en los tramos ij añadiendo máximo 2 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial

Como se visualizó en la Tabla 3.4 , en los únicos tramos que se añadieron líneas fueron en los tramos 2-3, 2-6, 3-5, 4-6 y por último el tramo 5-6, ahora cuando la generación aumenta cada 5% hasta llegar al 30% como se muestra en la Tabla 3.5, esto afecta en el número de líneas añadidas y a su vez la potencia a ser suplida debido a que en esos tramos se supera la capacidad de transmisión inicial en cada línea por lo que se añaden nuevas líneas para mantener balanceado el flujo de potencia y debido a eso el costo aumentará.

La barra número 6 tiene una generación máxima de 600MW, en la barra 1 hay una generación de 150 MW y la barra 3 una generación máxima de 360MW. En el tramo 2-3 como demanda máxima será de 100MW, en el tramo 2-6 cuando la demanda se encuentre al 10% y 15% la demanda máxima será de 200MW, en el tramo 3-5 cuando se encuentre al 15% la máxima demanda será de 252.39MW, en el tramo 4-6 la demanda crecerá (161.54MW, 198.87MW) tomando en cuenta desde el 0% hasta un 30% de la demanda y por último el tramo 5-6 solo se añadirán líneas cuando la carga aumente en un 20% y la demanda respectivamente será (51.51MW, 47.01MW, 95.42MW) hasta llegar a un 30%.

Caso 3 Líneas Máximos Por Tramo a diferentes demandas								
Conjunto de Circuitos ij		Potencia (nij)						
		0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
1	2	40.00	22.15	-4.46	11,63	11,82	-4.85	-1.59
1	3							
1	4	-40,00	-42.75	-6.21	4,10	-575	-1.94	2.56
1	5	66,67	71.63	11.61	42,27	47,93	56.80	45.03
1	6							
2	3	-100	-137.62	-63.61	-58,89	-55,73	-14.56	-40.78
2	4	-100	-89.25	-4.85	-5,48	-20,45	1.94	5.44
2	5							
2	6			-200	-200	-200	-292.23	-278.25
3	4							
3	5	173.33	180.37	252.39	233,73	240,07	243.20	266.97
3	6							
4	5							
4	6	-300,00	-300	-187.06	-185,38	-218,20	-200	-200
5	6							

Tabla 3.6 Potencia en los tramos ij, añadiendo máximo 3 líneas a diferentes porcentajes de la demanda inicial.

Como se visualizó en la Tabla 3.3, en los únicos tramos que se añadieron líneas fueron en los tramos 2-6, 3-5 y por último el tramo 4-6, ahora cuando la generación aumenta cada 5% hasta llegar al 30% como se muestra en la Tabla 6, esto afecta a la potencia que debe ser suplida y el número de líneas añadidas ya que en esos tramos se supera la capacidad de transmisión inicial en cada línea por lo que se añaden nuevas líneas para mantener balanceado el flujo de potencia por lo consiguiente el costo aumentará. La barra numero 6 tiene una generación máxima de 600MW, en la barra 1 hay una generación de 150 MW y la barra 3 una generación máxima de 360MW. Dado esto en el tramo 4-6 visualizamos que la demanda está en el rango de (200 MW, 300 MW). Para los tramos 3-5 la demanda aumenta en un rango de (173.33 MW, 266.97 MW). Por último, en el tramo 2-6 la demanda aumenta en el rango de (200 MW, 27825 MW).

3.1.2 Sistema de 118 Barras aplicado al MDL

Para el sistema de 118 Barras se usó los datos propuestos en la parte de ANEXO 2, la Tabla A 2.1. y la Tabla A 2.2 sin considerar la potencia reactiva de los generadores y la parte capacitiva de las líneas, estos datos nos ayudaran nuestro análisis usando como máximo tres líneas a ser añadidas como máximo en cada barra.

Conjunto de circuitos ij		Número de circuitos añadidos (nij)	Potencia (MW)	Potencia Máxima (MW)
8	9	1	29.00	250.00
9	10	1	8.00	250.00
99	100	1	-35.00	87.50
Total		3		
Costo [MUS \$]		25.91		

Tabla 3.7 Resultado del MDL aplicado al sistema de 118 barras

En la tabla 3.7 se puede observar que solo se añaden líneas en los tramos 8-9, 9-10 y 99-100 ; esto se debe a que en esos tramos se supera la capacidad de operación inicial en cada línea y por consiguiente se añaden nuevas líneas para mantener balanceado el flujo de potencia.

3.2 Configuración de las nuevas líneas a ser añadidas usando el modelo linealizado AC

3.2.1 Sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC

Para el sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC se usó los datos propuestos en la parte de ANEXO 1, la Tabla A 1.1 y la Tabla A 1.2

Conjunto de circuitos ij		Número de circuitos añadidos (nij)
3	5	1
2	6	1
4	6	2
Total		4
Costo [MUS \$]		110

Tabla 3.8 Resultados del sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC.

En la Tabla 3.8 se observa que al aplicar el modelo linealizado AC al sistema de Garver se añaden líneas en los tramos 3-5, 2-6 y 4-6, esto se debe a que el flujo de potencia permito en cada una de esas líneas supera el flujo máximo permitido inicial por lo que se añaden esas líneas para mantener balanceado el flujo de potencia.

3.2.2 Sistema de 118 Barras aplicado al modelo linealizado AC

Para el sistema de Garver aplicado al modelo linealizado AC se usó los datos propuestos en la parte de ANEXO 2, la Tabla A 2.1 y la Tabla A 2.2

Conjunto de circuitos ij		Número de circuitos añadidos (nij)
8	9	1
9	10	1
99	100	1
Total		3
Costo [MUS \$]		25.91

Tabla 3.9 Resultado del sistema de 118 barras aplicado al modelo linealizado AC

En la Tabla 3.9 se observa que al aplicar el modelo linealizado AC al sistema de 18 barras se añaden líneas en los tramos 8-9, 9-10 y 99-100, esto se debe a que el flujo de potencia permitido en cada una de esas líneas supera el flujo máximo permitido inicial por lo que se añaden esas líneas para mantener balanceado el flujo de potencia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Dado los resultados del capítulo 3 tanto para el modelo dc lineal disyuntivo y el modelo linealizado AC se observó que la adición de una línea nueva depende que tanto flujo va a pasar por dicha línea para cubrir la demanda en una barra.

Debido a que tanto el modelo linealizado AC como el modelo DC lineal disyuntivo minimizan el costo de inversión al añadir nuevas líneas de transmisión dada las restricciones de flujo de carga. Se verifica que el resultado para cada modelo tanto para el sistema de 6 barras y de 118 barras es el óptimo posible al menor costo.

Dado los resultados del sistema de 6 barras se observa que en el modelo linealizado AC se añade una línea en el tramo 2-6 mientras que en el modelo dc lineal disyuntivo no ocurre, y esto es debido a que el modelo linealizado AC toma en cuenta los reactivos de los generadores y la parte capacitiva de las líneas por lo que el modelo linealizado AC es un modelo más exacto que el modelo DC lineal disyuntivo.

Como el modelo linealizado AC es más completo que el modelo DC lineal disyuntivo se verifica que es más confiable al momento de planificar la expansión de los sistemas de transmisión.

Recomendaciones

Para los estudios de planificación a largo plazo, se podría considerar el modelo linealizado AC a diferentes niveles de carga.

Al momento de llevar el modelo linealizado AC al programa AMPL hay que asegurar poner todas las restricciones del modelo para que la solución sea la más exacto posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Peñaherrera Wilches, "Planeamiento de la expansión de los sistemas eléctricos de transmisión utilizando el modelo AC resuelto mediante algoritmos evolutivos," *Univ. Cuenca*, p. 136, 2015.
- [2] L. H. Macedo, C. V. Montes, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, "MILP branch flow model for concurrent AC multistage transmission expansion and reactive power planning with security constraints," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 12, pp. 3023–3032, 2016.
- [3] N. González, "Planeación de la Expansión de la Transmisión con Reforzamiento de la red a partir de la evaluación de la confiabilidad," *Sci. Tech. Año XX*, vol. 20, no. 2, p. 10, 2015.
- [4] M. Rider, "PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA," 2017. [Online]. Available: www.dsee.fee.unicamp.br/~mjrider.
- [5] R. Palacios, "Optimización Multiobjetivo de la Red de Distribución de Energía Eléctrica," 2016.
- [6] E. Morquecho, "PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN USANDO EL MODELO AC Y ALGORITMOS DE ESTIMACIÓN DE DISTRIBUCIÓN.," 2017.
- [7] J. Chillogalli, "COMPARACIÓN DE ALGORITMOS BASADOS EN BIO-GEOGRAFÍA APLICADOS AL PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE TRANSMISIÓN USANDO EL MODELO AC," 2016.
- [8] M. Rider, "REVISÃO DOS CONCEITOS DE MODELAGEM E PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA," *UNICAMP*, no. 19, p. 277, 2017. [Online]. Available: www.dsee.fee.unicamp.br/~mjrider.
- [9] Garver, L.L., "Transmission Network Estimation Using Linear Programming," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1688–1697, 1970.
- [10] C. Zambrano, "Modelo en GAMS para el planeamiento de la red de transmisión con inclusión eólica a largo plazo Modelo en GAMS para el planeamiento de la red de transmisión con inclusión eólica a largo plazo," *Univ. LA SALLE*, p. 18, 2017.
- [11] R. Villasana, N. York, and L. L. Garver, "TRANSMISSION NETWORK PLANNING USING LINEAR PROGRAMMING," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104,

no. 2, pp. 349–356, 1985.

- [12] 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.
- [13] M. Torres, “A NOVEL STRATEGY FOR THE ELECTRIC POWER TRANSMISSION NETWORK EXPANSION PLANNING USING A MIXED INTEGER LINEAR AC MODEL,” *Univ. ESTADUAL CAMPINAS*, vol. 8, no. 5, p. 55, 2019.

ANEXOS

ANEXO A1

DATOS DEL SISTEMA DE GARVER DE 6 BARRAS

param:	ob:	nome	Tb	Pd	Qd	Pgmax	Qgmax	Pgmin	Qgmin	Gsh	Bsh:=
	1	"BUS 1"	1	80	20	160	65	50	-10	0	0
	2	"BUS 2"	0	240	0	0	0	0	0	0	0
	3	"BUS 3"	1	40	10	360	150	37.5	-10	0	0
	4	"BUS 4"	0	160	40	0	0	0	0	0	0
	5	"BUS 5"	0	240	0	0	0	0	0	0	0
	6	"BUS 6"	1	0	0	610	200	45	-10	0	0;

Tabla A1.1 Datos de las barras para el sistema de Garver

param:	ol:	smax	r	x	bshl	c	n0	nmax	:=
	1	2	100	0.10	0.40	0.018	40	1	3
	1	3	100	0.09	0.38	0.018	38	0	3
	1	4	80	0.15	0.60	0.062	60	1	3
	1	5	100	0.05	0.20	0.050	20	1	3
	1	6	70	0.17	0.68	0.021	68	0	3
	2	3	100	0.05	0.20	0.044	20	1	3
	2	4	100	0.10	0.40	0.046	40	1	3
	2	5	100	0.08	0.31	0.012	31	0	3
	2	6	100	0.08	0.30	0.011	30	0	3
	3	4	82	0.15	0.59	0.029	59	0	3
	3	5	100	0.05	0.20	0.010	20	1	3
	3	6	100	0.12	0.48	0.021	48	0	3
	4	5	75	0.16	0.63	0.024	63	0	3
	4	6	100	0.08	0.30	0.090	30	0	3
	5	6	78	0.15	0.61	0.049	61	0	3;

Tabla A1.2 Datos de las líneas para el sistema de Garver

ANEXO A2

DATOS DEL SISTEMA DE 118 BARRAS

param:	ob:	nome	Tb	Pd	Qd	Pgmax	Qgmax	Qgmin	Gsh	Bsh:=
	1	"BUS 1"	0	37.8	6.0	0	0	0.0	0.00	0.00
	2	"BUS 2"	0	14.8	6.6	0	0	0.0	0.00	0.00
	3	"BUS 3"	0	28.9	7.4	0	0	0.0	0.00	0.20
	4	"BUS 4"	2	22.2	8.9	30	300	-300.0	0.00	0.00
	5	"BUS 5"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
	6	"BUS 6"	2	38.6	16.3	30	50	-13.0	0.00	0.00
	7	"BUS 7"	0	14.1	1.4	0	0	0.0	0.00	0.00
	8	"BUS 8"	2	0.0	0.0	30	300	-300.0	0.00	0.00
	9	"BUS 9"	0	21.0	2.2	0	0	0.0	0.00	0.00
	10	"BUS 10"	2	28.0	3.7	20	10	-147.0	0.00	0.00
	11	"BUS 11"	0	52.0	17.0	0	0	0.0	0.00	0.00
	12	"BUS 12"	2	34.9	7.4	300	120	-35.0	0.00	0.00
	13	"BUS 13"	0	25.2	11.8	0	0	0.0	0.00	0.20
	14	"BUS 14"	0	10.4	0.7	0	0	0.0	0.00	0.00
	15	"BUS 15"	2	66.8	22.2	30	30	-10.0	0.00	0.00
	16	"BUS 16"	0	18.5	7.4	0	0	0.0	0.00	0.00
	17	"BUS 17"	0	8.1	2.2	0	0	0.0	0.00	0.00
	18	"BUS 18"	2	44.5	25.2	100	50	-16.0	0.00	0.00
	19	"BUS 19"	2	33.4	18.5	30	24	-8.0	0.00	0.00
	20	"BUS 20"	0	13.3	2.2	0	0	0.0	0.00	0.00
	21	"BUS 21"	0	10.4	5.9	0	0	0.0	0.00	0.20
	22	"BUS 22"	0	7.4	3.7	0	0	0.0	0.00	0.00
	23	"BUS 23"	0	5.2	2.2	0	0	0.0	0.00	0.00
	24	"BUS 24"	2	0.0	0.0	30	300	-300.0	0.00	0.00
	25	"BUS 25"	2	0.0	0.0	300	140	-47.0	0.00	0.00
	26	"BUS 26"	2	0.0	0.0	350	1000	-1000.0	0.00	0.00
	27	"BUS 27"	2	46.0	9.6	30	300	-300.0	0.00	0.00
	28	"BUS 28"	0	12.6	5.2	0	0	0.0	0.00	0.00
	29	"BUS 39"	0	17.8	2.9	0	0	0.0	0.00	0.00
	30	"BUS 30"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
	31	"BUS 31"	2	31.9	20.0	30	300	-300.0	0.00	0.00
	32	"BUS 32"	2	43.8	17.0	100	42	-14.0	0.00	0.00
	33	"BUS 33"	0	17.0	6.6	0	0	0.0	0.00	0.00
	34	"BUS 34"	2	43.8	19.3	30	24	-8.0	0.00	0.00

Tabla A2.1 Datos de las barras para el sistema de 118 barras (1/3)

35	"BUS 35"	0	24.5	6.6	0	0	0.0	0.00	0.00
36	"BUS 36"	2	23.0	12.6	100	24	-8.0	0.00	0.00
37	"BUS 37"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
38	"BUS 38"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
39	"BUS 39"	0	18.9	7.7	0	0	0.0	0.00	0.00
40	"BUS 40"	2	14.0	16.1	30	300	-300.0	0.00	0.00
41	"BUS 41"	0	25.9	7.0	0	0	0.0	0.00	0.00
42	"BUS 42"	2	25.9	16.1	30	300	-300.0	0.00	0.00
43	"BUS 43"	0	12.6	4.9	0	0	0.0	0.00	0.00
44	"BUS 44"	0	11.2	5.6	0	0	0.0	0.00	0.00
45	"BUS 45"	0	37.1	15.4	0	0	0.0	0.00	0.00
46	"BUS 46"	2	19.6	7.0	100	100	-100.0	0.00	0.00
47	"BUS 47"	0	23.8	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
48	"BUS 48"	0	14.0	7.7	0	0	0.0	0.00	0.00
49	"BUS 49"	2	60.9	21.0	250	210	-85.0	0.00	0.00
50	"BUS 50"	0	11.9	2.8	0	0	0.0	0.00	0.00
51	"BUS 51"	0	11.9	5.6	0	0	0.0	0.00	0.00
52	"BUS 52"	0	12.6	3.5	0	0	0.0	0.00	0.00
53	"BUS 53"	0	16.1	7.7	0	0	0.0	0.00	0.00
54	"BUS 54"	2	79.1	22.4	250	300	-300.0	0.00	0.00
55	"BUS 55"	2	44.1	15.4	100	23	-8.0	0.00	0.00
56	"BUS 56"	2	58.8	12.6	100	15	-8.0	0.00	0.00
57	"BUS 57"	0	8.4	2.1	0	0	0.0	0.00	0.00
58	"BUS 58"	0	8.4	2.1	0	0	0.0	0.00	0.00
59	"BUS 59"	2	93.9	79.1	200	180	-60.0	0.00	0.00
60	"BUS 60"	0	54.6	2.1	0	0	0.0	0.00	0.00
61	"BUS 61"	2	0.0	0.0	200	300	-100.0	0.00	0.00
62	"BUS 62"	2	53.9	9.8	100	20	-20.0	0.00	0.00
63	"BUS 63"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
64	"BUS 64"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
65	"BUS 65"	2	0.0	0.0	420	200	-67.0	0.00	0.00
66	"BUS 66"	2	27.3	12.6	420	200	-67.0	0.00	0.00
67	"BUS 67"	0	19.6	4.9	0	0	0.0	0.00	0.00
68	"BUS 68"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
69	"BUS 69"	1	0.0	0.0	300	100	-100.0	0.00	0.00
70	"BUS 70"	2	46.2	14.0	80	32	-10.0	0.00	0.00
71	"BUS 71"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
72	"BUS 72"	2	0.0	0.0	30	100	-100.0	0.00	0.00
73	"BUS 73"	2	0.0	0.0	30	100	-100.0	0.00	0.00
74	"BUS 74"	2	47.6	18.9	20	9	-6.0	0.00	0.00
75	"BUS 75"	0	32.9	7.7	0	0	0.0	0.00	0.00
76	"BUS 76"	2	47.6	25.2	100	23	-8.0	0.00	0.00

Tabla A2.1 Datos de las barras para el sistema de 118 barras (2/3)

77	"BUS 77"	2	42.7	19.6	100	70	-20.0	0.00	0.00
78	"BUS 78"	0	49.7	18.2	0	0	0.0	0.00	0.00
79	"BUS 79"	0	27.3	22.4	0	0	0.0	0.00	0.00
80	"BUS 80"	2	91.0	18.2	300	280	-165.0	0.00	0.00
81	"BUS 81"	0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.00	0.00
82	"BUS 82"	2	37.8	18.9	100	100	-100.0	0.00	0.00
83	"BUS 83"	0	14.0	7.0	0	0	0.0	0.00	0.00
84	"BUS 84"	0	7.7	4.9	0	0	0.0	0.00	0.00
85	"BUS 85"	2	16.8	10.5	30	23	-8.0	0.00	0.00
86	"BUS 86"	0	14.7	7.0	0	0	0.0	0.00	0.00
87	"BUS 87"	2	0.0	0.0	300	1000	-100.0	0.00	0.00
88	"BUS 88"	0	33.6	7.0	0	0	0.0	0.00	0.00
89	"BUS 89"	2	0.0	0.0	200	300	-210.0	0.00	0.00
90	"BUS 90"	2	54.6	29.4	20	300	-300.0	0.00	0.00
91	"BUS 91"	2	0.0	0.0	50	100	-100.0	0.00	0.00
92	"BUS 92"	2	45.5	7.0	300	9	-3.0	0.00	0.00
93	"BUS 93"	0	30.4	23.9	0	0	0.0	0.00	0.00
94	"BUS 94"	0	21.0	11.2	0	0	0.0	0.00	0.00
95	"BUS 95"	0	29.4	21.7	0	0	0.0	0.00	0.00
96	"BUS 96"	0	26.6	10.5	0	0	0.0	0.00	0.00
97	"BUS 97"	0	10.5	6.3	0	0	0.0	0.00	0.00
98	"BUS 98"	0	23.8	5.6	0	0	0.0	0.00	0.00
99	"BUS 99"	2	35.0	6.3	30	100	-100.0	0.00	0.00
100	"BUS 100"	2	25.9	12.6	300	155	-50.0	0.00	0.00
101	"BUS 101"	0	15.4	10.5	0	0	0.0	0.00	0.00
102	"BUS 102"	0	3.5	2.1	0	0	0.0	0.00	0.00
103	"BUS 103"	2	16.1	11.2	20	40	-15.0	0.00	0.00
104	"BUS 104"	2	26.6	17.5	100	23	-8.0	0.00	0.00
105	"BUS 105"	2	21.7	18.2	100	23	-8.0	0.00	0.00
106	"BUS 106"	0	30.1	11.2	0	0	0.0	0.00	0.00
107	"BUS 107"	2	19.6	8.4	20	200	-200.0	0.00	0.00
108	"BUS 108"	0	1.4	0.7	0	0	0.0	0.00	0.00
109	"BUS 109"	0	5.6	2.1	0	0	0.0	0.00	0.00
110	"BUS 110"	2	27.3	21.0	50	23	-8.0	0.00	0.00
111	"BUS 111"	2	0.0	0.0	100	1000	-100.0	0.00	0.00
112	"BUS 112"	2	17.5	9.1	100	1000	-100.0	0.00	0.00
113	"BUS 113"	2	0.0	0.0	100	200	-100.0	0.00	0.00
114	"BUS 114"	0	5.9	2.2	0	0	0.0	0.00	0.00
115	"BUS 115"	0	16.3	5.2	0	0	0.0	0.00	0.00
116	"BUS 116"	2	0.0	0.0	50	1000	-1000.0	0.00	0.00
117	"BUS 117"	0	14.8	5.9	0	0	0.0	0.00	0.00
118	"BUS 118"	0	23.1	10.5	0	0	0.0	0.00	0.20;

Tabla A2.1 Datos de las barras para el sistema de 118 barras (3/3)

param :	ol:	Smax1	r	x	bsh1	c	n0	nmax	:=
1	2	87.5	0.030300	0.099900	0.025400	17.98	1	0	
1	3	87.5	0.012900	0.042400	0.010820	7.63	1	2	
4	5	250.0	0.001760	0.007980	0.002100	1.79	1	0	
3	5	87.5	0.024100	0.108000	0.028400	16.20	0	2	
5	6	87.5	0.011900	0.054000	0.014260	9.72	0	2	
6	7	87.5	0.004590	0.020800	0.005500	4.68	1	0	
8	9	250.0	0.002440	0.030500	1.162000	5.49	0	2	
8	5	250.0	0.000000	0.026700	0.000000	6.00	0	2	
9	10	250.0	0.002580	0.032200	1.230000	5.79	0	2	
4	11	87.5	0.020900	0.068800	0.017480	12.38	1	0	
5	11	87.5	0.020300	0.068200	0.017380	12.27	1	0	
11	12	87.5	0.005950	0.019600	0.005020	4.41	1	0	
2	12	87.5	0.018700	0.061600	0.015720	11.08	1	0	
3	12	87.5	0.048400	0.160000	0.040600	24.00	1	0	
7	12	87.5	0.008620	0.034000	0.008740	6.12	1	0	
11	13	87.5	0.022250	0.073100	0.018760	13.15	1	0	
12	14	87.5	0.021500	0.070700	0.018160	12.72	1	0	
13	15	87.5	0.074400	0.244400	0.062680	36.66	1	0	
14	15	87.5	0.059500	0.195000	0.050200	29.25	1	0	
12	16	87.5	0.021200	0.083400	0.021400	15.01	1	0	
15	17	250.0	0.033200	0.043700	0.044400	7.86	2	2	
16	17	87.5	0.045400	0.180100	0.046600	27.01	1	0	
17	18	87.5	0.042300	0.050500	0.012980	9.09	1	0	
18	19	87.5	0.041190	0.049300	0.011420	8.87	1	0	
19	20	87.5	0.055200	0.117000	0.029800	17.55	1	0	
15	19	87.5	0.032000	0.039400	0.010100	7.09	1	0	
20	21	87.5	0.048300	0.084900	0.021600	15.28	1	0	
21	22	87.5	0.050900	0.097000	0.024600	17.46	1	0	
22	23	87.5	0.064200	0.159000	0.040400	23.85	1	0	
23	24	87.5	0.033500	0.049200	0.049800	8.85	1	0	
23	25	250.0	0.015600	0.080000	0.086400	14.40	1	0	
26	25	250.0	0.020000	0.038200	0.000000	6.87	1	0	
25	27	250.0	0.031800	0.163000	0.176400	24.45	1	2	
27	28	87.5	0.019130	0.085500	0.021600	15.39	1	0	
28	29	87.5	0.023700	0.094300	0.023800	16.97	1	0	
30	17	250.0	0.020000	0.038800	0.000000	6.98	1	0	
8	30	87.5	0.008310	0.050400	0.514000	9.07	1	0	
26	30	300.0	0.027990	0.086000	0.908000	15.48	0	2	
17	31	87.5	0.067400	0.156300	0.039900	23.44	1	0	
29	31	87.5	0.010800	0.033100	0.008300	5.95	1	0	
23	32	70.0	0.031700	0.115300	0.117300	17.29	0	2	

Tabla A2.2 Datos de las líneas para el sistema de 118 barras (1/4)

31	32	87.5	0.029800	0.098500	0.025100	17.73	1	0
27	32	87.5	0.022900	0.075500	0.019260	13.59	1	0
15	33	87.5	0.038000	0.124400	0.031940	18.66	1	0
19	34	87.5	0.075200	0.247000	0.063200	37.05	1	0
35	36	87.5	0.022240	0.010200	0.002680	2.29	1	0
35	37	87.5	0.031000	0.049700	0.013180	8.94	1	0
33	37	87.5	0.041500	0.142000	0.036600	21.30	1	0
34	36	87.5	0.008710	0.026800	0.005680	6.03	1	0
34	37	250.0	0.022560	0.009400	0.009840	2.11	1	0
38	37	250.0	0.020000	0.037500	0.000000	6.75	0	2
37	39	87.5	0.032100	0.106000	0.027000	15.90	1	0
37	40	87.5	0.059300	0.168000	0.042000	25.20	1	0
30	38	95.0	0.024640	0.054000	0.422000	9.72	1	0
39	40	87.5	0.018400	0.060500	0.015520	10.89	1	0
40	41	87.5	0.014500	0.048700	0.012220	8.76	1	0
40	42	87.5	0.055500	0.183000	0.046600	27.45	1	0
41	42	87.5	0.041000	0.135000	0.034400	20.25	1	0
43	44	87.5	0.060800	0.245400	0.060680	36.81	1	0
34	43	87.5	0.041300	0.168100	0.042260	25.21	1	0
44	45	87.5	0.022400	0.090100	0.022400	16.21	1	0
45	46	87.5	0.040000	0.135600	0.033200	20.34	1	0
46	47	87.5	0.038000	0.127000	0.031600	19.05	1	0
46	48	87.5	0.060100	0.189000	0.047200	28.35	1	0
47	49	87.5	0.019100	0.062500	0.016040	11.25	1	0
42	49	87.5	0.071500	0.323000	0.086000	48.45	2	0
45	49	87.5	0.068400	0.186000	0.044400	27.90	1	0
48	49	87.5	0.017900	0.050500	0.012580	9.09	1	0
49	50	87.5	0.026700	0.075200	0.018740	13.53	1	0
49	51	87.5	0.048600	0.137000	0.034200	20.55	1	0
51	52	87.5	0.020300	0.058800	0.013960	10.58	1	0
52	53	87.5	0.040500	0.163500	0.040580	24.52	1	0
53	54	87.5	0.026300	0.122000	0.031000	18.30	1	0
49	54	87.5	0.079950	0.290000	0.073400	43.50	2	0
54	55	87.5	0.016900	0.070700	0.020200	12.72	1	0
54	56	87.5	0.002750	0.009550	0.007320	2.14	1	0
55	56	87.5	0.004880	0.015100	0.003740	3.39	1	0
56	57	87.5	0.034300	0.096600	0.024200	17.38	1	0
50	57	87.5	0.047400	0.134000	0.033200	20.10	1	0
56	58	87.5	0.034300	0.096600	0.024200	17.38	1	0
51	58	87.5	0.025500	0.071900	0.017880	12.94	1	0
54	59	87.5	0.050300	0.229300	0.059800	34.39	1	0
56	59	87.5	0.081400	0.245000	0.055250	36.75	2	0

Tabla A2.2 Datos de las líneas para el sistema de 118 barras (2/4)

55	59	87.5	0.047390	0.215800	0.056460	32.37	1	0
59	60	87.5	0.031700	0.145000	0.037600	21.75	1	0
59	61	87.5	0.032800	0.150000	0.038800	22.50	1	0
60	61	250.0	0.002640	0.013500	0.014560	3.03	1	2
60	62	87.5	0.012300	0.056100	0.014680	10.09	1	0
61	62	87.5	0.008240	0.037600	0.009800	6.76	1	0
63	59	250.0	0.020000	0.038600	0.000000	6.94	1	0
63	64	250.0	0.021720	0.020000	0.216000	4.50	1	0
64	61	250.0	0.020000	0.026800	0.000000	6.03	1	0
38	65	250.0	0.009010	0.098600	1.046000	17.74	1	2
64	65	250.0	0.022690	0.030200	0.380000	5.43	1	2
49	66	250.0	0.018000	0.091900	0.024800	16.54	2	0
62	66	87.5	0.048200	0.218000	0.057800	32.70	1	0
62	67	87.5	0.025800	0.117000	0.031000	17.55	1	0
65	66	250.0	0.020000	0.037000	0.000000	6.66	1	0
66	67	87.5	0.022400	0.101500	0.026820	15.22	1	0
65	68	250.0	0.001380	0.016000	0.638000	3.60	1	0
47	69	87.5	0.084400	0.277800	0.070920	41.67	1	0
49	69	87.5	0.098500	0.324000	0.082800	48.60	1	0
68	69	250.0	0.020000	0.037000	0.000000	6.66	1	0
69	70	250.0	0.030000	0.127000	0.122000	19.05	1	0
24	70	87.5	0.002210	0.411500	0.101980	61.72	1	0
70	71	87.5	0.008820	0.035500	0.008780	6.39	1	0
24	72	87.5	0.048800	0.196000	0.048800	29.40	1	0
71	72	87.5	0.044600	0.180000	0.044440	27.00	1	0
71	73	87.5	0.008660	0.045400	0.011780	8.17	1	0
70	74	87.5	0.040100	0.132300	0.033680	19.84	1	0
70	75	87.5	0.042800	0.141000	0.036000	21.15	1	0
69	75	250.0	0.040500	0.122000	0.124000	18.30	1	0
74	75	87.5	0.012300	0.040600	0.010340	7.30	1	0
76	77	87.5	0.044400	0.148000	0.036800	22.20	1	0
69	77	87.5	0.030900	0.101000	0.103800	15.15	0	2
75	77	87.5	0.060100	0.199900	0.049780	29.98	1	0
77	78	87.5	0.003760	0.012400	0.012640	2.79	1	2
78	79	87.5	0.005460	0.024400	0.006480	5.49	1	0
77	80	250.0	0.023200	0.076750	0.035000	12.24	2	0
79	80	87.5	0.015600	0.070400	0.018700	12.67	1	0
68	81	250.0	0.021750	0.020200	0.808000	4.54	1	0
81	80	250.0	0.020000	0.037000	0.000000	6.66	1	0
77	82	100.0	0.029800	0.085300	0.081740	15.35	1	0
82	83	100.0	0.011200	0.036650	0.037960	6.59	0	2
83	84	87.5	0.062500	0.132000	0.025800	19.80	1	0

Tabla A2.2 Datos de las líneas para el sistema de 118 barras (3/4)

83	85	87.5	0.043000	0.148000	0.034800	22.20	1	0
84	85	87.5	0.030200	0.064100	0.012340	11.53	1	0
85	86	250.0	0.035000	0.123000	0.027600	18.45	1	0
86	87	250.0	0.028280	0.207400	0.044500	31.11	1	2
85	88	87.5	0.020000	0.102000	0.027600	15.30	1	0
85	89	87.5	0.023900	0.173000	0.047000	25.95	1	0
88	89	250.0	0.013900	0.071200	0.019340	12.81	1	0
89	90	250.0	0.037800	0.143850	0.079400	23.07	2	0
90	91	87.5	0.025400	0.083600	0.021400	16.40	1	0
89	92	250.0	0.024600	0.104300	0.048100	9.09	2	0
91	92	87.5	0.038700	0.127200	0.032680	19.08	1	0
92	93	60.0	0.025800	0.084800	0.021800	15.26	1	2
92	94	60.0	0.048100	0.158000	0.040600	23.70	1	0
93	94	87.5	0.022300	0.073200	0.018760	13.17	0	2
94	95	87.5	0.013200	0.043400	0.011100	7.81	1	0
80	96	87.5	0.035600	0.182000	0.049400	27.30	1	0
82	96	87.5	0.016200	0.053000	0.054400	9.54	1	0
94	96	87.5	0.026900	0.086900	0.023000	15.64	1	0
80	97	87.5	0.018300	0.093400	0.025400	16.81	1	0
80	98	87.5	0.023800	0.108000	0.028600	16.20	1	0
80	99	100.0	0.045400	0.206000	0.054600	30.90	0	2
92	100	87.5	0.064800	0.295000	0.047200	44.25	1	0
94	100	87.5	0.017800	0.058000	0.060400	10.44	0	2
95	96	87.5	0.017100	0.054700	0.014740	9.84	1	0
96	97	87.5	0.017300	0.088500	0.024000	15.93	1	0
98	100	87.5	0.039700	0.179000	0.047600	26.85	1	0
99	100	87.5	0.018000	0.081300	0.021600	14.63	0	2
100	101	87.5	0.027700	0.126200	0.032800	18.93	1	0
92	102	87.5	0.012300	0.055900	0.014640	10.06	1	0
101	102	87.5	0.024600	0.112000	0.029400	16.80	1	0
100	103	250.0	0.016000	0.052500	0.053600	9.45	1	0
100	104	87.5	0.045100	0.204000	0.054100	30.60	1	0
103	104	87.5	0.046600	0.158400	0.040700	23.76	1	0
103	105	87.5	0.053500	0.162500	0.040800	24.37	1	0
100	106	87.5	0.060500	0.229000	0.062000	34.35	1	0
104	105	87.5	0.009940	0.037800	0.009860	6.80	1	0
105	106	87.5	0.014000	0.054700	0.014340	9.84	1	0
105	107	87.5	0.053000	0.183000	0.047200	27.45	1	0
105	108	87.5	0.026100	0.070300	0.018440	12.65	1	0
106	107	87.5	0.053000	0.183000	0.047200	27.45	1	0
108	109	87.5	0.010500	0.028800	0.007600	6.48	1	0
103	110	87.5	0.039060	0.181300	0.046100	27.19	1	0
109	110	87.5	0.027800	0.076200	0.020200	13.71	1	0
110	111	87.5	0.022000	0.075500	0.020000	13.59	1	0
110	112	87.5	0.024700	0.064000	0.062000	11.52	1	0
17	113	87.5	0.009130	0.030100	0.007680	5.41	0	2
32	113	250.0	0.061500	0.203000	0.051800	30.45	1	0
32	114	87.5	0.013500	0.061200	0.016280	11.01	1	0
27	115	87.5	0.016400	0.074100	0.019720	13.33	1	0
114	115	87.5	0.002300	0.010400	0.002760	2.34	1	0
68	116	250.0	0.020340	0.004050	0.164000	0.91	1	0
12	117	87.5	0.032900	0.140000	0.035800	21.00	1	2
75	118	87.5	0.014500	0.048100	0.011980	8.65	1	0
76	118	87.5	0.016400	0.054400	0.013560	9.79	1	0;

Tabla A2.2 Datos de las líneas para el sistema de 118 barras (4/4)

