

# **ANÁLISIS DE UN ASPECTO CRÍTICO DEL PLANEAMIENTO DE LA EXPANSIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.**

Presentado por:  
Juan David Herrera Jaramillo

Trabajo de grado presentado como requisito  
para optar al título de  
Ingeniero electricista

**Director:**  
Antonio Hernando Escobar Zuluaga, Ph.D.



**Programa de ingeniería eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
Pereira, Risaralda  
2019**

# Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Antonio H. Escobar Zuluaga, Ph.D.

---

Jurado

Pereira, 18 de julio de 2019

# Agradecimientos

Principalmente agradezco a Dios por fortalecer mi corazón, por brindarme la sabiduría y por haber puesto en mi camino a todas las personas que han sido mi soporte y compañía durante todo este proceso.

A mi tía Adriana Correa M. por haberme apoyado en los momentos más difíciles de mi vida, por sus consejos, por la motivación constante que me permitió seguir adelante en cada paso que avanzaba, por su constancia y disposición de querer apoyarme desde el momento que decidí optar por mi formación académica profesional.

A mi esposa luz M. por brindarme todo su amor, dedicación y cariño, por depositar en mi toda la confianza, por creer en mis capacidades para lograr y hacer posible un nuevo reto más.

A mi hermano Sebastián V. y Mauricio Andrés V. ellos me enseñaron que es posible alcanzar las metas propuestas con esfuerzo, dedicación y constancia, sin importar las dificultades presentes.

Por ultimo agradezco al director de grado Antonio H. Escobar, por su enorme colaboración para cumplir a cabalidad este proyecto de grado. En general a todas las personas que de una u otra manera me apoyaron en el transcurso de este proceso académico.

# ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras .....	5
Índice de tablas .....	6
Resumen .....	7
<b>1. Introducción .....</b>	<b>8</b>
1.1. Planteamiento del Problema .....	8
1.2. Justificación .....	10
1.3. Objetivos .....	11
1.3.1. Objetivo general.....	11
1.3.2. Objetivos específicos .....	11
1.4. Estado del arte .....	11
<b>2. Modelo matemático utilizado en el análisis del problema. ....</b>	<b>13</b>
2.1. Modelo DC .....	13
<b>3. Metodología de solución .....</b>	<b>14</b>
3.1. Fase 1 .....	14
3.2. Fase 2.....	16
3.3. Fase 3.....	17
3.4. Fase 4.....	18
3.4.1. Modelo DC:.....	18
3.4.2. Opciones de inversión: .....	19
3.4.3. Primera ley de Kirchhoff: .....	21
3.4.4. Segunda ley de Kirchhoff: .....	22
<b>4. Pruebas y resultados .....</b>	<b>24</b>
4.1. Fase 1 .....	24
4.2. Fase 2 .....	27
4.3. Fase 3.....	29
4.4. Fase 4.....	31
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>38</b>
5.1. Bibliografía .....	39
5.2. Apéndice .....	40
5.2.1. Datos del sistema de potencia sur Brasil.....	40

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de potencia sur de Brasil. ....	14
<b>Figura 2.</b> Trayectoria cerrada del corredor (8 - 13). ....	16
<b>Figura 3.</b> Trayectoria cerrada del corredor (5 – 8 - 13). ....	17
<b>Figura 4.</b> Ciclo mínimo del corredor (9 – 4). ....	17
<b>Figura 5.</b> Flujo de potencia DC. ....	19
<b>Figura 6.</b> Opciones de inversión del sistema de potencia sur de Brasil. ....	20
<b>Figura 7.</b> Opciones de inversión en un sistema de potencia. ....	21
<b>Figura 8.</b> Flujo que circula entre el nodo 1 y el nodo 2. ....	22
<b>Figura 9.</b> Flujo total que circula entre el nodo 1 y el nodo 2. ....	23
<b>Figura 10.</b> Corredor (18 – 13). ....	25
<b>Figura 11.</b> Corredor (5 – 8). ....	25
<b>Figura 12.</b> Corredor (9 – 14). ....	26
<b>Figura 13.</b> Corredor (27 – 38). ....	26
<b>Figura 14.</b> Corredor (27 - 38 - 42). ....	27
<b>Figura 15.</b> Corredor (5 - 8 - 13). ....	28
<b>Figura 16.</b> Corredor (19 – 21 - 20). ....	28
<b>Figura 17.</b> Opciones de inversión. ....	31
<b>Figura 18.</b> Opciones de inversión y flujos reales asociados a cada circuito. ....	32
<b>Figura 19.</b> Corredor (8 – 13). ....	33
<b>Figura 20.</b> Corredor (5 – 8). ....	34
<b>Figura 21.</b> Corredor (9 – 14). ....	34
<b>Figura 22.</b> Corredor (27 – 38). ....	35

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Sumatoria de ciclo mínimo entre flujo máximo multiplicado por la reactancia de cada corredor.....	29
<b>Tabla 2.</b> Sumatoria de ciclo mínimo entre flujo máximo multiplicado por la reactancia de cada corredor, incluyendo corredores proyectados.....	30
<b>Tabla 3.</b> Ciclo mínimo para cada corredor del sistema.....	36
<b>Tabla 4.</b> Base de datos del esquema de potencia sur de Brasil. ....	40

# RESUMEN

Esta tesis de grado propone desarrollar una metodología de solución para resolver el problema de planeamiento de la expansión de las líneas de transmisión de energía eléctrica, utilizando información basada en las rutas críticas que se presentan los corredores de un sistema eléctrico de potencia.

El objetivo de esta tesis de grado se centra en identificar las rutas críticas asociadas a la *segunda ley de Kirchhoff* que complican la búsqueda de la solución del problema. En este trabajo se analiza y se determinan rutas críticas y ciclos críticos que limitan la operación del sistema.

Este análisis juega un papel muy importante en la optimización del sistema de transmisión, ya que al hallar elementos que presentan dificultades en el sistema, es posible determinar si es viable seguir usando estos elementos que comprometen la operación normal del sistema generando dificultades, o proceder a eliminar estas rutas críticas y transmitir por nuevas rutas que mejoren la operación del sistema de transmisión.

El planeamiento de la expansión también denominado planeamiento de largo plazo, tradicionalmente tiene como función objetivo minimizar el costo de inversión en la instalación de nuevos elementos, a causa de los altos costos asociados a los elementos, a niveles altos de tensión y la dificultad que existe de remover líneas de transmisión o subestaciones ya existentes. El problema de planeamiento de la expansión pertenece a la categoría de problemas no lineales entero-mixtos (PNLEM) que adicionalmente pueden ser del tipo NP-completo cuando se analizan sistemas de gran tamaño y complejidad. El problema de planeamiento analizado ha mostrado ser un problema multimodal, no convexo, que no logra resolverse utilizando técnicas de optimización para problemas de PNLEM en sistemas de gran tamaño. Este tipo de problemas se solucionan utilizando el modelo lineal disyuntivo, el cual transforma el modelo DC no lineal en un problema matemático equivalente correspondiente a un modelo lineal entero.

# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación inicia en el capítulo 1 con una breve introducción sobre el planeamiento de la expansión de la transmisión de energía eléctrica, el cual consiste en determinar las inversiones que deben ser realizadas en un sistema de potencia de tal forma que la red existente se adecue para satisfacer los requerimientos de la generación y la demanda futura. En complemento se muestran trabajos desarrollados en el planeamiento de la expansión y se explica su importancia ya que a lo largo del tiempo este ha sido objeto de estudio debido al rápido crecimiento de la demanda, a las nuevas tecnologías y a la necesidad de que los sistemas operen de una forma más eficiente con una aproximación más cercana a la realidad.

El capítulo 2 presenta una breve introducción del modelo empleado en el desarrollo del análisis para el problema de planeamiento de la expansión de la transmisión que ha sido usado a lo largo del tiempo, y sus características principales.

El capítulo 3 presenta la metodología de solución de planeamiento en la expansión de redes de transmisión, empleando la búsqueda de rutas y ciclos críticos en el sistema de potencia sur de Brasil.

El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos al aplicar la metodología mencionada en los capítulos anteriores.

El capítulo 5 presenta las conclusiones generales de acuerdo a los resultados del análisis realizado.

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El planeamiento de expansión de sistemas de transmisión de energía eléctrica, tiene como propósito determinar la red de transmisión óptima para un escenario futuro de forma que minimice los costos de operación y de inversión. Las inversiones consideran la adición de nuevas subestaciones, el refuerzo de las existentes o la construcción de nuevas líneas de transmisión en los corredores

nuevos o existentes, además, se caracterizan por sus altos costos, los largos periodos de construcción y largos tiempos de recuperación de las inversiones. Los estudios de planeamiento toman como referencia la red actual y consideran el incremento de la demanda existente en los nodos del sistema y el surgimiento de nuevos puntos de demanda, las nuevas alternativas de generación y el incremento de la capacidad de generación en un horizonte de tiempo de 10 o más años.

Si el planeamiento de largo plazo no se realiza convenientemente, es decir, si las decisiones que se toman hoy para la red futura son inadecuadas, en el futuro se requerirán mayores esfuerzos técnicos y económicos para obtener los mismos o menores beneficios. Un planeamiento bien direccionado del sector eléctrico, es de vital importancia para proporcionar un servicio de abastecimiento de energía con buena calidad, bajo costo, mayor seguridad y menores impactos económicos y ambientales para la sociedad.

El planeamiento de expansión o también denominado planeamiento de largo plazo, tiene como objetivo minimizar el costo de inversión en la instalación de nuevos elementos. El problema del planeamiento de expansión de redes de transmisión de energía eléctrica es un problema no lineal entero-mixto (PNLEM), y adicionalmente puede ser del tipo NP-completo. Este problema ha mostrado ser un problema multimodal, no convexo, que no logra resolverse exitosamente utilizando técnicas de optimización exactas cuando el sistema es de gran tamaño y tiene una cantidad importante de nodos aislados.

El problema de planeamiento es un problema matemático en su totalidad, cuando este problema no presenta ninguna dificultad como en este estudio realizado de la búsqueda de rutas críticas, el problema podría ser resultado de manera sencilla, es decir, se obtendría de forma rápida y eficiente la solución del problema a optimizar, cuando el sistema contiene demasiadas rutas críticas el análisis se vuelve mucho más difícil de resolver y en algunas ocasiones se podrían encontrar sistemas en los que nunca se hallaría la solución.

El problema de planeamiento de sistemas de transmisión es difícil de resolver a causa del tamaño en sistemas de la vida real, por la existencia de las restricciones que relacionan las aberturas angulares con los flujos de potencia activa y las reactancias. Estas aberturas angulares definen lo que se denomina *segunda ley de Kirchhoff* de los sistemas de potencia cuando se resuelven, usando el método de flujo de carga DC.

El problema puede ser solucionado en primer lugar identificando las rutas críticas asociadas a la *segunda ley de Kirchhoff* que complican la búsqueda de la solución

del problema. En este trabajo se analiza y se determinan rutas críticas y ciclos críticos que limitan la operación del sistema.

Este análisis juega un papel muy importante en la optimización del sistema de transmisión, debido a que al hallar elementos que presentan dificultades en el sistema, es posible determinar si es viable seguir usando estos elementos que comprometen la operación normal, generando dificultades, o proceder a eliminar estas rutas críticas y transmitir por nuevas rutas que mejoren la operación del sistema de transmisión.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

Debido a que el funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia tiene un comportamiento dinámico, las condiciones de funcionamiento deben ser establecidas aplicando criterios de funcionamiento muy estrictos para evitar problemas operativos que pueden llevar el sistema a un colapso total. En estos estados de emergencia se podría producir cortes en el suministro de energía eléctrica, estos cortes dejarían una gran cantidad de consumidores sin el suministro de energía eléctrica debido a un mal planeamiento en los sistemas de transmisión.

Los ingenieros electricistas son los profesionales encargados del funcionamiento de los Sistemas eléctricos de potencia, realizando tareas de planificación y operación, en los cuales no sólo se tienen en cuenta aspectos técnicos y funcionales, sino también aspectos económicos, tratando en todo momento de minimizar los costos de operación de estos sistemas, y logrando que el crecimiento de la demanda de energía eléctrica sea satisfecha convenientemente.

Es por ello que este trabajo de grado cuenta con un estudio realizado en el análisis de un aspecto crítico del planeamiento de la expansión de las líneas de transmisión, donde el objetivo principal es encontrar las rutas críticas y ciclos críticos que generan elementos que complican el sistema de transmisión de energía eléctrica, estos casos estudiados son de vital importancia para la expansión de las redes de transmisión del sistema eléctrico de potencia, debido a que facilitan en primer lugar el análisis a otras investigaciones, y permite con base en los resultados encontrados tomar decisiones que mejoran a futuro las funciones operativas del sistema.

Las soluciones encontradas son de gran ayuda en el estudio de la planeación de los sistemas de transmisión, con esta información se puede planificar a futuro las

condiciones de las redes de transmisión tomando las mejores decisiones para el sistema, evitando fallas operativas, sobrecarga en las líneas y pérdidas económicas.

En análisis posteriores a esta investigación se tomarán decisiones de vital importancia para el sistema, puesto que determinarán las decisiones que se deben tomar con respecto a los resultados encontrados, ya sea, construcción de nuevas líneas de transmisión o creación de nuevos caminos para la transmisión de energía eléctrica.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la relación que existe entre el congestionamiento que aparece en el problema de planeamiento de redes de transmisión y la segunda ley de Kirchhoff.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Determinar en qué lugares del sistema, aparecen rutas críticas que generan congestionamiento en la red de transmisión.
2. Verificar los resultados mediante el uso del software AMPL y CPLEX sobre un sistema de prueba de la vida real.

## **1.4. ESTADO DEL ARTE**

El planeamiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP) es un proceso a través del cual se determinan y seleccionan las mejores alternativas para la combinación generación-transmisión, que permitan satisfacer las exigencias de la demanda del flujo de energía eléctrica a máximo beneficio y mínimo costo. El sistema de transmisión es uno de los ejes principales del sistema eléctrico y sus funciones pueden clasificarse como técnicas y económicas. En las funciones técnicas se encuentran: el transporte de energía desde los grandes centros de

generación hasta los centros de demanda y la interconexión de zonas de un mismo sistema o de sistemas alejados geográficamente.

De esta forma, la red de transmisión contribuye a dar seguridad al conjunto completo del sistema, incrementando la confiabilidad de la prestación del servicio. Desde el punto de vista económico, el problema de planeamiento permite elegir las mejores opciones de suministro de energía en el largo plazo y, como soporte a la expansión, en el corto plazo, permite elegir las mejores opciones en el despacho diario de las plantas de generación (Escobar A, Romero R, Gallego R, 2010), (Latorre, Dario Cruz, Areiza, & Villegas, 2003).

Un planeamiento inadecuado del SEP no sólo pone en riesgo el abastecimiento de energía eléctrica, también afecta la calidad, la seguridad y tiene serios impactos económicos y ambientales para la sociedad. Por esta razón, el planeamiento de un sistema de transmisión debe replantearse periódicamente, para ajustarlo periódicamente a los cambios que se ve sometido un SEP ya sea por la entrada de proyectos nuevos o por cambios de las predicciones de generación y demanda. La principal consecuencia de un planeamiento inadecuado es un sistema ineficiente operando durante muchos años, ya que una vez construida una línea de transmisión o una subestación, su retiro o traslado es inviable (Duque, Escobar, & Gallego, 2014).

Con el paso de los años, la demanda de usuarios finales ha aumentado considerablemente y la incursión de nuevas tecnologías como son las energías renovables que promueven el cuidado del medio ambiente pone en competencia cuál es la mejor forma para hacer el planeamiento a largo plazo, si considerando líneas de transmisión para abrir nuevos corredores, o usar otro tipo de dispositivos óptimamente localizados que respondan de igual forma a la predicción de la demanda. De ahí surge la importancia de desarrollar metodologías que mejoren la forma en que se realiza la búsqueda por el espacio de solución. Se busca suministrar mecanismos que le permitan a la técnica de solución encontrar la solución óptima global.

## Capítulo 2

### 2. MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO EN EL ANÁLISIS DEL PROBLEMA.

El modelo mencionado a continuación es utilizado en la literatura a lo largo del tiempo, esta metodología es la base para cualquier estudio de planeamiento en los sistemas de transmisión de potencia eléctrica. El modelo planteado a continuación es demostrado matemáticamente en (Escobar Zuluaga, Romero Lázaro, & Gallego Rendón, 2010).

#### 2.1. MODELO DC

El modelo DC es considerado ideal en el planeamiento de sistemas de transmisión, es una generalización del modelo de flujo de carga DC. Este modelo ha sido ampliamente usado a través del tiempo para resolver el problema de planeamiento. Se ha combinado con técnicas metaheurísticas como el algoritmo genético y el algoritmo de colonia de hormigas, donde se propone una opción de solución a ser evaluada en un proceso iterativo; de esta forma, con la propuesta de líneas en el interior del modelo, el modelo en sí mismo se convierte en lineal. Caso contrario, si no se tiene una propuesta de solución, el modelo es no lineal. En este modelo todos los nodos del sistema deben satisfacer la primera ley de Kirchhoff y todos los lazos deben satisfacer la segunda ley de Kirchhoff.

Actualmente, el modelo DC y la técnica de solución propuesta por Garver (donde aplica de forma iterativa el modelo de transporte) son utilizados tanto en algoritmos principales como en algoritmos de construcción de configuraciones iniciales en el proceso de búsqueda de la solución del problema de planeamiento de la expansión de sistemas de transmisión.

# Capítulo 3

## 3. METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Este capítulo describe la metodología en la solución de planeamiento en la expansión de redes de transmisión, empleando rutas críticas.

### 3.1. FASE 1

El sistema sur de Brasil cuenta con 46 nodos y 79 corredores, de los cuales 47 corredores son existentes y 32 proyectados. Los corredores existentes operan diariamente en el funcionamiento del sistema, los corredores proyectados normalmente son empleados en lugares estratégicos, de tal modo que mejoren las condiciones del sistema para el cual fue diseñado, en el menor costo posible. El esquema de potencia sur de Brasil se puede observar en la figura 1.

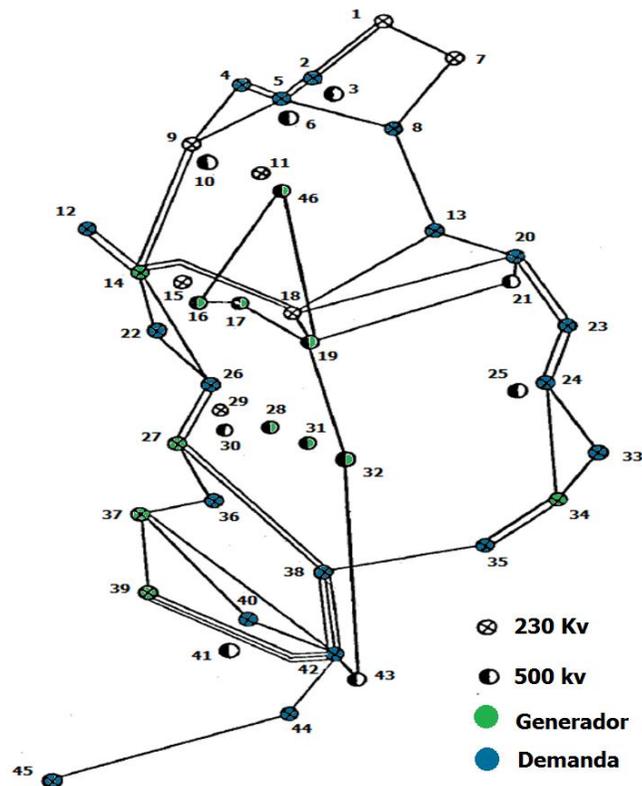


Figura 1. Esquema de potencia sur de Brasil.

Se procede a analizar la información de la base de datos sur de Brasil. La base de datos contiene información necesaria entre cada conexión del sistema, de corredores existentes y proyectados, contiene el flujo máximo de potencia de cada corredor y su respectiva reactancia. Se anexa una columna que muestra el valor del flujo máximo multiplicado por su reactancia en cada uno de los corredores del sistema. La base de datos se encuentra al final, en el apartado de apéndice.

Se da inicio al análisis asumiendo las siguientes condiciones:

- Se utiliza el flujo máximo de cada corredor.
- No se resuelve el flujo de potencia.
- Se desprecia el flujo real que circula en cada uno de los corredores del sistema.
- Se desprecia el sentido de los flujos que circula en cada corredor.
- Se analizan todos los corredores del sistema, tanto proyectados como existentes.

El objetivo prima en Identificar las rutas críticas que complican el análisis del sistema, sin haber resuelto el problema de flujo de carga. Una ruta crítica es hallada cuando la sumatoria del flujo máximo por reactancia en una trayectoria cerrada, obtiene como resultado un valor inferior al valor del flujo máximo por reactancia del propio corredor.

En la fase 1 se toma como referencia un solo corredor, y se analizan los corredores que contengan en cada nodo un grado igual o superior a tres corredores.

El grado del corredor debe de ser superior o igual a tres corredores, entre más corredores contenga el nodo, más importante y críticos es para el sistema, por este motivo se analizan los nodos con mayor grado de corredores, por el impacto que genera en la operación.

La figura 2 muestra una de las posibles trayectorias cerradas del corredor (8 -13), se puede observar que el nodo 8 y el nodo 13, contienen un grado mínimo de tres corredores, por lo tanto el corredor cumple con las condiciones adecuadas para realizar la sumatoria del flujo máximo multiplicado por su reactancia en toda la trayectoria cerrada.





### **3.4. FASE 4**

El análisis realizado anteriormente contenía en cada trayectoria cerrada la sumatoria entre flujo máximo multiplicado por su reactancia en cada corredor, el producto entre flujo máximo por reactancia es el resultado de la capacidad máxima del circuito, el valor obtenido es un valor teórico, mas no el valor real del flujo que circula en ese instante por cada trayectoria cerrada.

Se resuelve el flujo de carga, con el objetivo de encontrar el valor exacto del flujo que circula por cada uno de los corredores del sistema, el método utilizado es el modelo DC, este método es una técnica de optimización similar al flujo de carga. El modelo DC, solo trabaja con potencia activa y desprecia la potencia reactiva, facilitando la solución del análisis.

En planeamiento la potencia reactiva no es importante a largo plazo, a largo plazo lo que prima es la potencia activa. La potencia reactiva es importante en el futuro, pero es resuelta en intervalos de corto tiempo. La potencia activa implica la implementación de nuevas plantas de generación, o la construcción de nuevas líneas de transmisión de alta tensión, los altos costos de inversión y largos periodos de construcción, son uno de los mayores inconvenientes en la planeación, una planta de generación puede tardar más de 10 años de construcción, y una nueva línea de transmisión puede tardar hasta 5 años de construcción, es por ello que los problemas grandes deben ser resueltos con anticipación.

Los problemas de potencia reactiva son resueltos de manera más rápida y económica. En la mayoría de los casos el problema es resuelto moviendo uno de los tap's del transformador, o simplemente añadiendo un condensador en una subestación. El trabajo podría realizarse en meses, la inversión realizada es baja y los periodos de implementación son cortos.

#### **3.4.1. Modelo DC:**

En el circuito de la figura 5 se encuentra un ejemplo del modelo a utilizar, el circuito cuenta con 4 nodos, un elemento de generación, tres elementos de carga, dos líneas existentes de transmisión y tres líneas en proyección.

Las líneas L1-2 y L1-3, son elementos de proyección, entre ellas se encuentra un circuito existente, y se proyecta un circuito en paralelo, el elemento se encuentra en trazos punteados y se designa como refuerzo, las líneas L2-3 y L3-4 son elementos nuevos por lo tanto se designan corredores nuevos.

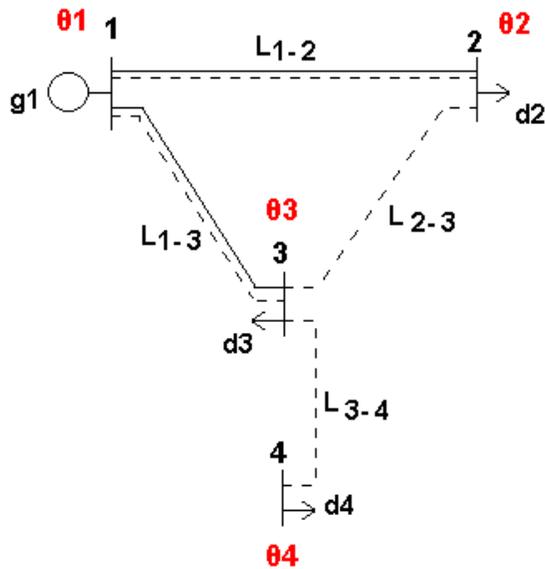


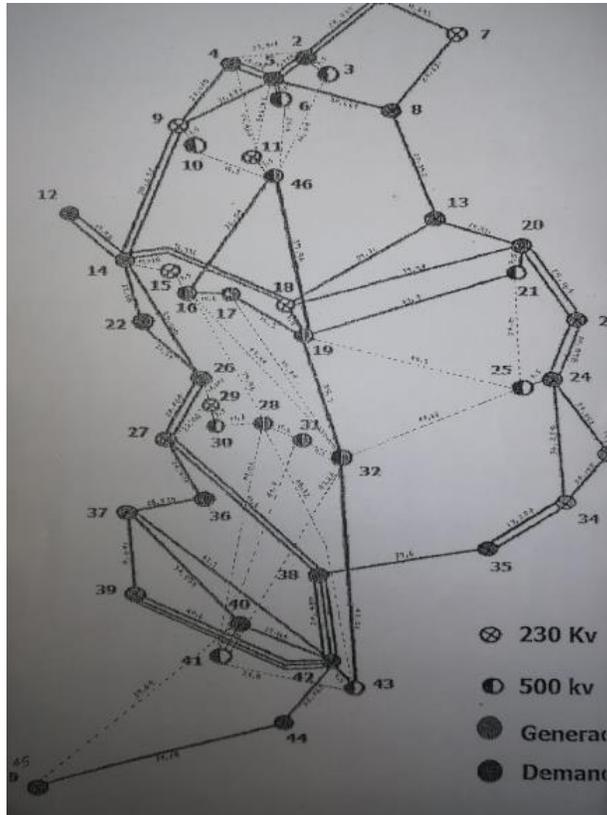
Figura 5. Flujo de potencia DC.

### 3.4.2. Opciones de inversión:

Las opciones de inversión son elementos o circuitos nuevos que pueden ser implementados en lugares estratégicos con el objetivo de mejorar las condiciones del sistema. Las opciones de inversión son transformadores o líneas de transmisión, los nodos proyectados que contienen cortas distancias entre sí, normalmente el elemento a implementar es un transformador, y los nodos proyectados que contienen largas distancias entre sí, el elemento a implementar es una líneas de transmisión.

En el esquema sur brasilero los nodos de color azul son elementos de demanda y los nodos de color verde son elementos de generación, un caso a considerar, es el corredor (29 – 30), el nodo 29 funciona a 230kV y el nodo 30 funciona a 500kV, debido a los diferentes niveles de tensión es necesario implementar un transformador. Realizando la misma analogía con el corredor (28 – 31), se observa que ambos nodos trabajan al mismo nivel de tensión, por lo tanto el elemento a implementar es una línea de transmisión.

La construcción de cualquier línea de transmisión es demasiado costosa, el costo asociado a una línea nueva de transmisión es el mismo costo asociado a una línea de transmisión existente, siempre y cuando, cuente con las mismas condiciones y se implemente en paralelo con la línea existente. Las opciones de inversión del esquema sur de Brasil se encuentran en la figura 6.



**Figura 6.** Opciones de inversión del sistema de potencia sur de Brasil.

En opciones de inversión las variables asociadas a los flujos se analizan de forma independiente. En el circuito de la figura 7 se pueden observar los circuitos asociados a las variables de inversión, mediante el software de programación se logra identificar el número de interruptores asociados a cada línea, que deben conmutar para ingresar en la operación sistema.

Las variables asociadas a los interruptores son variables binarias, el estado (1) significa cerrado, y el estado (0) abierto. Al implementar un circuito entre el nodo 1 y 2 es necesario cerrar el interruptor asociado  $y_{12,1}$  como se muestra en la figura 7, de la misma manera conmutarían los  $n$  interruptores requeridos para las  $n$  líneas necesarias a implementar.

El flujo que circula por los corredores existentes se designan con la variable  $f_0$  y el flujo que circula por los corredores proyectados se designa  $f_{12-n}$ , para determinar el flujo total del corredor, es necesario sumar los flujos que circulan por los circuitos asociados al corredor.

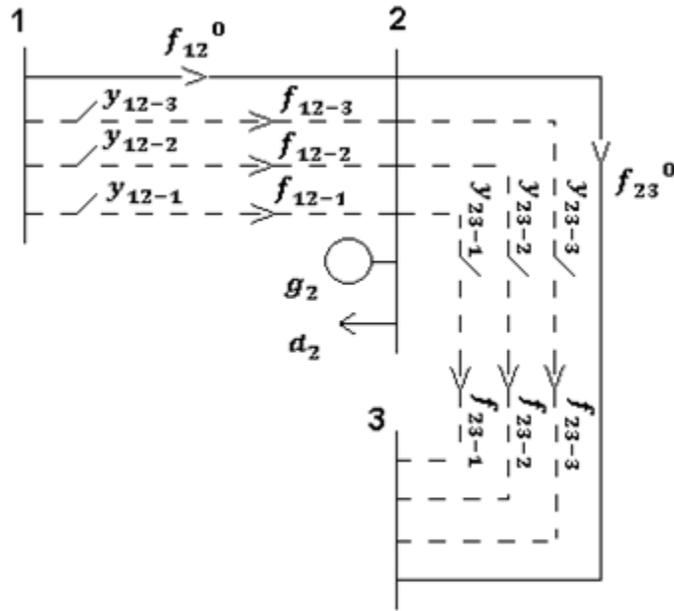


Figura 7. Opciones de inversión en un sistema de potencia.

### 3.4.3. Primera ley de Kirchhoff:

Debido a que el problema es de optimización, es posible aplicar la primera ley de *Kirchhoff* en cada uno de los nodos del sistema.

Se deben tener en cuenta las siguientes condiciones para aplicar la primera ley de *Kirchhoff* en los nodos del sistema:

- La sumatoria debe cumplir el balance entre generación y demanda.
- Los flujos positivos ingresan al nodo y los negativos salen del nodo.

Aplicando la primera ley de *Kirchhoff* en el nodo 2 del circuito de la figura 7 se obtiene la siguiente ecuación:

$$f_{12}^0 + f_{12-1} + f_{12-2} + f_{12-3} - f_{23}^0 - f_{23-1} - f_{23-2} - f_{23-3} + Gen = d_2 \quad (1)$$

La primera ley de *Kirchhoff* está asociada al costo de inversión en los problemas de optimización, mediante la ecuación (2) se obtiene el costo total de inversión.

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_l} cij \cdot \left\{ \sum_{k=1}^{n_{max}} y_{ij-k} \right\} \quad (2)$$

**Dónde:**

$cij$  : Costo asociado a cada línea

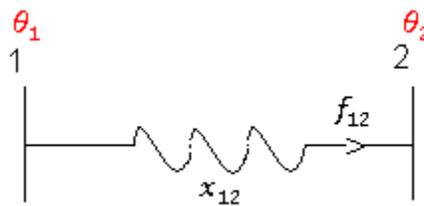
$y_{ij-k}$ : Línea del nodo a implementar

### 3.4.4. Segunda ley de Kirchhoff:

La segunda ley de Kirchhoff, está asociada a la reactancia del corredor y a los ángulos en los extremos de los nodos. Se cuenta con un modelo matemático basado en la segunda ley de *Kirchhoff* para corredores existentes, y un modelo matemático para los corredores proyectados, que no demostraremos en esta tesis de grado.

Las ecuaciones aplicadas a los corredores nuevos generan más restricciones con respecto a los corredores existentes, estas ecuaciones se plantean de forma diferente usando el modelo disyuntivo. El modelo disyuntivo activa o desactiva las restricciones en cada uno de los corredores, está tesis de grado no se centra en demostrar matemáticamente el modelo matemático disyuntivo, pero se basa en el mismo concepto de la segunda ley de *Kirchhoff*.

En la figura 8 se observa el flujo que circula entre el nodo 1 y el nodo 2.



**Figura 8.** Flujo que circula entre el nodo 1 y el nodo 2.

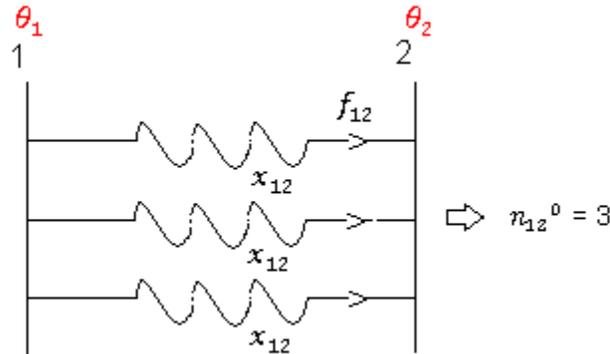
$$f_{12} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_{12}} \quad (3)$$

$$(f_{12}) \cdot (x_{12}) = (\theta_1 - \theta_2) \quad (4)$$

$$(f_{12}) \cdot (x_{12}) - (\theta_1 - \theta_2) = 0 \quad (5)$$

Las ecuaciones 3, 4 y 5 son aplicables en un solo corredor, para n circuitos en paralelo se realiza de forma diferente. Partiendo de la ecuación (3), se determinan las ecuaciones para n circuitos en paralelo.

En la figura 9 se observa el flujo que circula entre el nodo 1 y el nodo 2 con tres circuitos en paralelo.



**Figura 9.** Flujo total que circula entre el nodo 1 y el nodo 2.

Partiendo del hecho que todos los circuitos contienen los mismos parámetros entonces:

$$f_{12}^0 = \frac{\theta_1 - \theta_2}{x_{12} \cdot Eq.} \quad (6)$$

La reactancia equivalente en paralelo para n circuitos es equivalente a dividir la reactancia de un circuito entre la cantidad de circuitos en paralelo.

$$x_{12 Eq.} = \frac{x_{12}}{n_{12}^0} \quad (7)$$

$$f_{12}^0 = \frac{(n_{12}^0) \cdot (\theta_1 - \theta_2)}{x_{12}} \quad (8)$$

$$(f_{12}^0) \cdot (x_{12}) = (n_{12}^0) \cdot (\theta_1 - \theta_2) \quad (9)$$

$$(f_{12}^0) \cdot (x_{12}) - (n_{12}^0) \cdot (\theta_1 - \theta_2) = 0 \quad (10)$$

Para que el sistema opere en la región de estabilidad, los ángulos no deben sobrepasar un valor límite (Límite de abertura angular). El valor del ángulo es un

parámetro controlado por el usuario, en la práctica, el valor de abertura angular debe ser inferior a  $30^\circ$ , y en teoría puede tomar valores inferiores a  $45^\circ$ .

Las ecuaciones demostradas anteriormente son implementadas en el código para que el programa optimice el sistema de potencia sur de Brasil, el código está diseñado para que implemente la menor cantidad de circuitos que resuelvan el problema de flujo de carga minimizando los costos de inversión.

## Capítulo 4

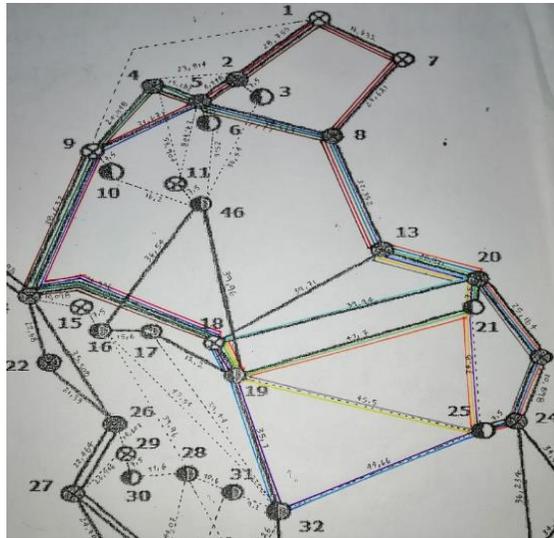
### 4. PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. FASE 1

Utilizando como referencia un solo corredor, se analizaron 16 trayectorias cerradas que cumplen la primera ley de *Kirchhoff* en el sistema de potencia.

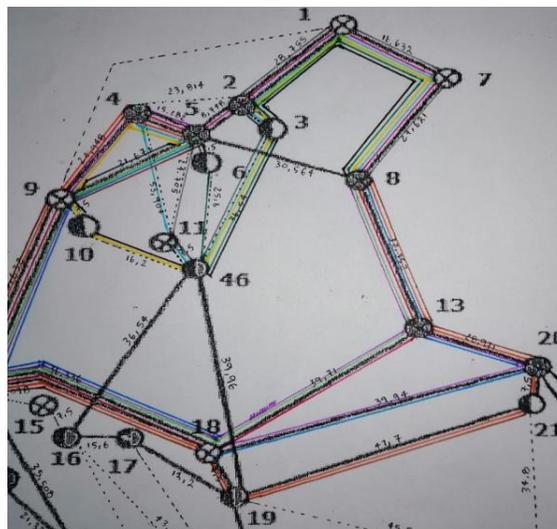
En ningún caso analizado se encontró un valor crítico, en todos los casos se obtuvo como resultado un valor superior al flujo máximo por reactancia de cada corredor analizado. Algunos resultados se encuentran en las siguientes imágenes.

El corredor (18 - 13) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (39,71), en las rutas alternas del corredor analizado, no se encontró un valor inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (68,91), en la figura 10, la ruta se encuentra en color azul claro con el recorrido entre los nodos existentes (18-20-13).



**Figura 10.** Corredor (18 – 13).

El corredor (5 - 8) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (30,56), en las rutas alternas del corredor analizado, no se encontró un valor inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (81,75), en la figura 11, la ruta se encuentra en color fucsia con el recorrido entre los nodos existentes (5-2-1-7-8).



**Figura 11.** Corredor (5 – 8).

El corredor (9 - 14) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (38,63), en las rutas alternas del corredor analizado, no se encontró un valor inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (77,84),

en la figura 12, la ruta se encuentra en color naranja con el recorrido entre los nodos existentes y proyectados (9-10-46-16-15-14).

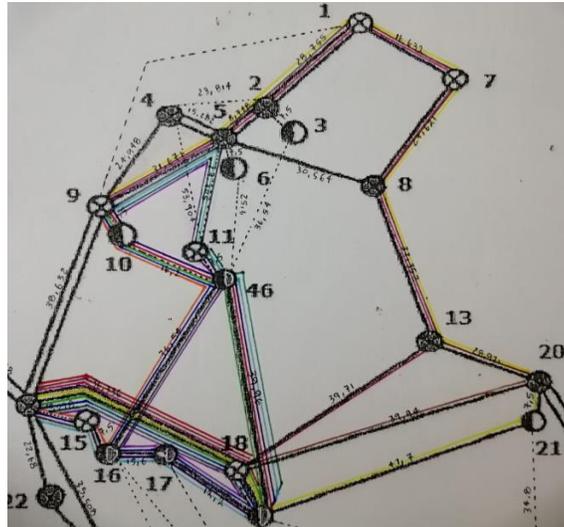


Figura 12. Corredor (9 – 14).

El corredor (27 - 38) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (41,60), en las rutas alternas del corredor analizado, no se encontró un valor inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (119,83), en la figura 13, la ruta se encuentra en color verde con el recorrido entre los nodos existentes (27-36-37-42-38).

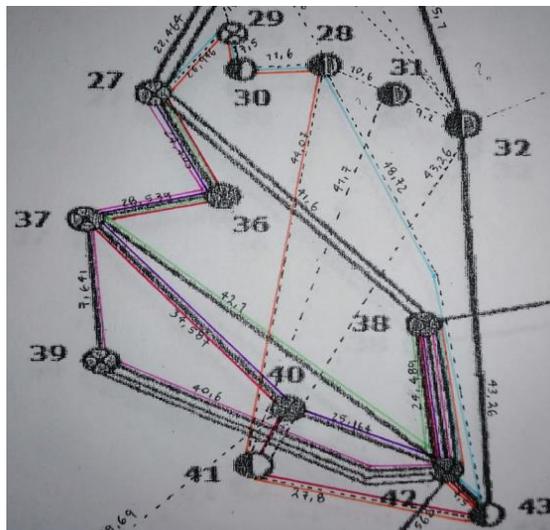
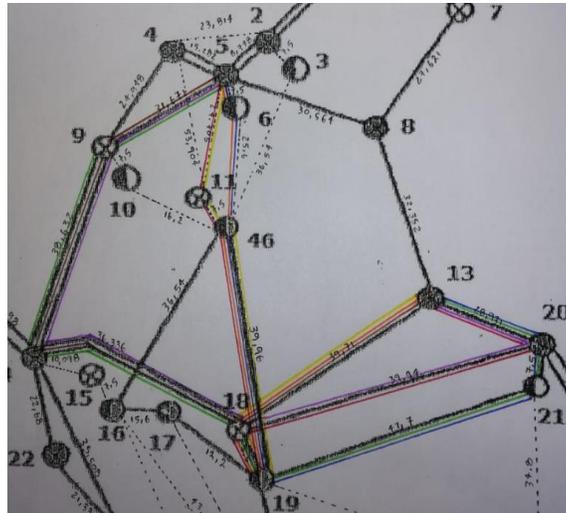


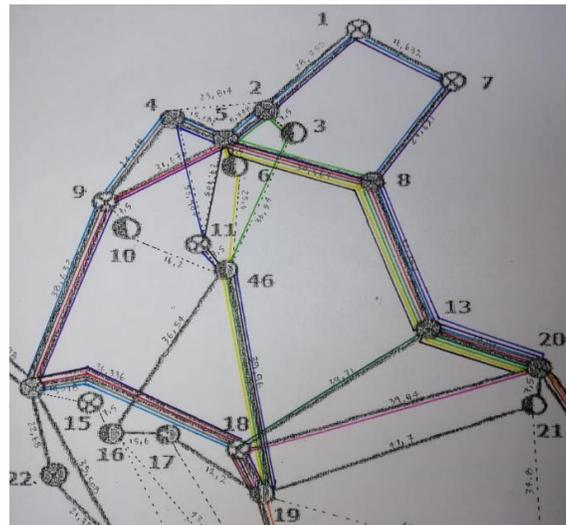
Figura 13. Corredor (27 – 38).





**Figura 15.** Corredor (5 - 8 - 13).

En la fase 2 se encontró una ruta crítica en el análisis del corredor (19 – 21 - 20), el valor del flujo máximo por reactancia es de (49,20), la ruta crítica se puede observar en la trayectoria de color fucsia entre los nodos existentes (19-18-20) en la figura 16, el valor obtenido es de (47,44), un valor inferior al del flujo máximo por reactancia del propio corredor, debido a esto la trayectoria es una ruta crítica para dicho corredor.



**Figura 16.** Corredor (19 – 21 - 20).

### 4.3. FASE 3

Se realizó la identificación del ciclo mínimo en cada uno de los corredores del sistema que contienen rutas existentes, sin incluir corredores nuevos en el análisis, los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Sumatoria de ciclo mínimo entre flujo máximo multiplicado por la reactancia de cada corredor.

Nodo 1	Nodo 2	Ciclo Mínimo de cada Corredor, Sin Incluir Corredores Proyectados	$\sum_{k=1}^n (f_{max} * x)$
1	2	1-7-8-5-2	83,56
1	7	1-2-5-8-7	95,69
2	5	2-1-7-8-5	103,57
4	5	4-9-5	56,62
4	9	4-5-9	46,95
5	9	5-4-9	40,23
5	8	5-2-1-7-8	81,76
7	8	7-1-2-5-8	84,70
8	13	8-5-9-14-18-13	176,91
9	14	9-5-8-13-18-14	170,63
13	18	13-20-18	68,91
13	20	13-18-20	79,65
14	18	14-9-5-8-13-18	172,93
14	22	14-26-22	56,84
14	26	14-22-26	44,01
16	17	16-46-19-17	88,70
16	46	16-17-19-46	67,76
17	19	17-16-46-19	92,10
18	19	18-20-21-19	89,14
19	21	19-18-20-21	54,94
19	32	19-18-14-26-27-38-42-43-32	218,65
20	21	20-18-19-21	89,14
18	20	18-19-21-20	56,70
20	23	20-18-19-32-43-42-38-35-34-24-23	267,78
22	26	22-14-26	58,19
23	24	23-20-18-19-32-43-42-38-35-34-24	272,04
24	33	24-34-33	70,39

24	34	24-33-34	68,91
26	27	26-14-18-19-32-43-42-38-27	231,29
27	36	27-38-42-37-36	136,73
27	38	27-36-37-42-38	119,83
32	43	32-19-18-14-26-27-38-42-43	210,49
33	34	33-24-34	70,98
34	35	34-24-23-20-18-19-32-43-42-38-35	279,68
35	38	35-34-24-23-20-18-19-32-43-42-38	253,34
36	37	36-27-38-42-37	132,89
37	39	37-42-39	82,70
37	40	37-42-40	67,26
37	42	37-39-42	48,24
38	42	38-27-36-37-42	136,94
39	42	39-37-42	49,74
40	42	40-37-42	76,69
42	44	-----	-----
42	43	42-38-27-26-14-18-19-32-43	246,26
44	45	-----	-----
46	19	46-16-17-19	64,34
12	14	-----	-----

La acción de no utilizar corredores proyectados, compromete al corredor a realizar recorridos por rutas alternas de mayor recorrido, el valor entre el flujo máximo por reactancia aumenta de manera considerable, con respecto a los valores hallados en la tabla 2.

Se realizó la identificación del ciclo mínimo en cada uno de los corredores del sistema, esta vez usando corredores existentes y proyectados, los resultados se obtenidos encuentran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Sumatoria de ciclo mínimo entre flujo máximo multiplicado por la reactancia de cada corredor, incluyendo corredores proyectados.

Nodo 1	Nodo 2	Ciclo Mínimo de cada Corredor, Incluyendo Corredores Proyectados.	$\sum_{k=1}^n (fmax * x)$
2	5	2-3-46-6-5	77,14
4	5	4-2-5	32,56
8	13	8-5-11-46-19-18-13	149,94

9	14	9-5-11-46-16-15-14	118,01
14	18	14-15-16-17-19-18	52,90
16	17	16-15-14-18-19-17	73,63
17	19	17-32-19	74,54
18	19	18-14-15-16-17-19	81,73
19	32	19-25-32	90,16
20	21	20-23-24-25-21	88,36
20	23	20-21-25-24-23	70,70
23	24	23-20-21-25-24	74,96
26	27	26-29-27	41,55
32	43	32-31-28-43	68,52
34	35	34-24-25-32-43-42-38-35	203,24
35	38	35-34-24-25-32-43-42-38	176,90
40	42	40-41-43-42	42,8
42	44	42-40-45-44	102,13
42	43	42-40-41-43	60,46
44	45	44-42-40-45	97,42

Al incluir los corredores proyectados en la búsqueda del ciclo mínimo en cada corredor del sistema, se observa en varios resultados una disminución del valor del ciclo mínimo, con respecto a los valores encontrados en la tabla 1.

#### 4.4. FASE 4

En la solución del flujo de carga mediante el software de programación AMPL, se obtuvieron los resultados que se encuentran en la figura 17:

```

Lineas instaladas :

linea  2 - 5 : 1
linea 13 - 20 : 1
linea 20 - 23 : 1
linea 20 - 21 : 2
linea 42 - 43 : 1
linea  6 - 46 : 1
linea  5 - 6 : 2

```

**Figura 17.** Opciones de inversión.

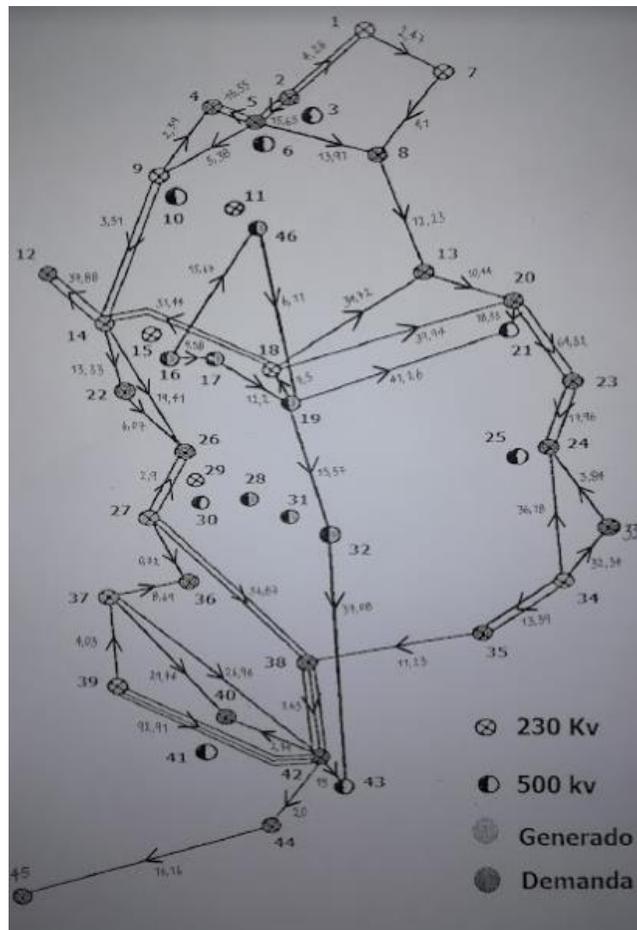
Para mejorar las condiciones del sistema, el código nos sugiere instalar 9 líneas de transmisión, 3 líneas nuevas y 6 líneas como refuerzo en algunos corredores, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

El costo asociado a la inversión es:

**Inversión Total = 72870.00**

**Nota:** El valor de inversión se encuentra en miles de dólares.

Además de mostrar las opciones de inversión y el costo total asociado, nos enseña el valor exacto y el sentido de los flujos que circulan por cada uno de los corredores del sistema, con estos valores procedemos a realizar de nuevo el análisis en la búsqueda de rutas críticas con el objetivo de obtener la solución con valores reales. Los flujos reales y el sentido se observa en la figura 18.



**Figura 18.** Opciones de inversión y flujos reales asociados a cada circuito.

El análisis se resuelve de nuevo como se realizó en las primeras 3 fases anteriores, los resultados obtenidos contienen valores reales en los que funciona el sistema.

El corredor (8 - 13) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (12,23), en las rutas alternas del corredor analizado, se encontraron 5 rutas críticas que contienen valores inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (0,67), en la figura 19 se observa el recorrido entre los nodos (13-20-18-19-46-6-5-8) de color marrón.

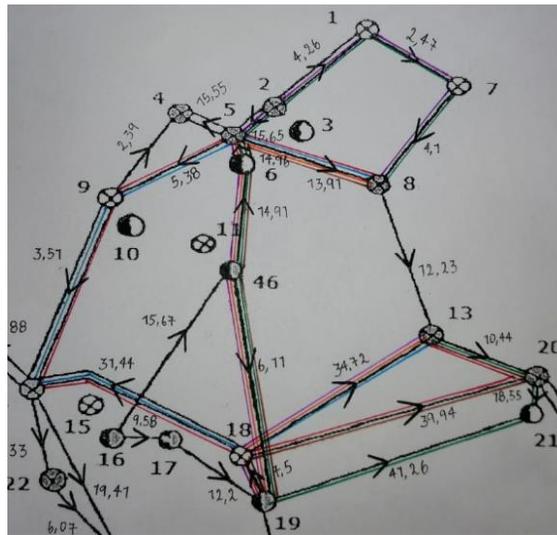
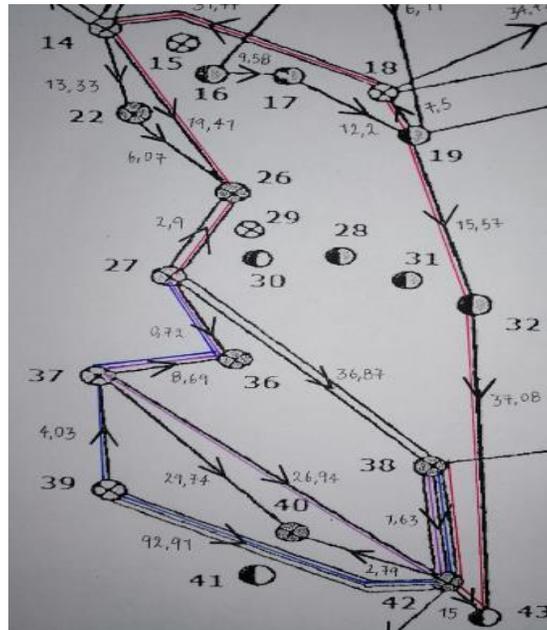


Figura 19. Corredor (8 – 13).

El corredor (5 - 8) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (13,91), en las rutas alternas del corredor analizado, se encontraron 4 rutas críticas que contienen valores inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor más crítico del análisis fue de (0,06), en la figura 20 se observa el recorrido entre los nodos (8-13-18-14-9-5) de color azul.



El corredor (27 - 38) contiene un valor de flujo máximo por reactancia de (36,87), en las rutas alternas del corredor analizado, se encontró 1 ruta crítica que contienen un valor inferior al flujo máximo por reactancia del corredor, el valor crítico de la ruta es (19,43), en la figura 22 se observa el recorrido entre los nodos (38-42-43-32-19-18-14-26-27) de color rojo.



**Figura 22.** Corredor (27 – 38).

En el corredor analizado de la figura 22 se puede observar que la ruta crítica se encuentra en el recorrido más largo, esto se debe al sentido de los flujos que puede ser positivo para un corredor y negativo para otro, este suceso permite que los valores entre los flujos se cancelen alcanzando un valor inferior al de la trayectoria más corta.

En los 16 casos analizados se encontraron varias rutas críticas para cada corredor analizado, estas rutas críticas hacen que el sistema sea más complicado de analizar y hacen que la líneas se sobrecarguen creando un cuello de botella para el sistema.

Se identificaron los ciclos mínimo en cada uno de los corredores del sistema, los resultados se obtenidos encuentran en la tabla 3.

**Tabla 3.** Ciclo mínimo para cada corredor del sistema.

Nodo 1	Nodo 2	Ciclo Mínimo de cada Corredor	$\sum_{k=1}^n ( fmax * x )$
1	2	1-7-8-13-20-18-19-46-6-5-2	10,09
1	7	7-8-13-20-18-19-46-6-5-2-1	8,30
2	5	5-8-7-1-2	3,08
4	5	4-9-14-18-13-8-7-1-2-5	3,01
4	9	4-5-2-1-7-8-13-20-18-14-9	9,71
5	9	9-14-18-13-8-7-1-2-5	0,62
5	8	8-13-18-14-9-5	0,06
7	8	8-13-18-19-46-6-5-2-1-7	8,86
8	13	13-20-18-19-46-6-5-8	0,67
9	14	14-18-13-8-7-1-2-5-9	1,25
13	18	13-20-21-19-18	4,77
13	20	20-18-14-9-4-5-8-13	0,97
14	18	14-9-4-5-8-13-20-21-19-18	4,70
14	22	22-26-14	13,34
14	26	26-27-36-37-42-43-32-19-18-14	17,36
16	17	17-19-18-13-8-7-1-2-5-6-46-16	1,47
16	46	46-6-5-2-1-7-8-13-20-21-19-17-16	3,23
17	19	19-18-13-8-7-1-2-5-6-46-16-17	1,15
18	19	18-14-9-5-6-46-19	1,21
19	21	21-20-23-24-34-35-38-42-43-32-19	16,15
19	32	32-43-42-37-36-27-26-14-18-19	52,34
20	21	21-19-18-20	6,18
18	20	20-21-19-46-6-5-8-13-18	7,53
20	23	23-24-34-35-38-42-43-32-19-21-20	6,91
22	26	26-14-22	6,08
23	24	24-34-35-38-42-43-32-19-21-20-23	39,45
24	33	24-34-33	3,84
24	34	24-33-34	36,18
26	27	26-14-18-19-32-43-42-37-36-27	39,67
27	36	36-37-42-38-27	20,25
27	38	38-42-37-36-27	17,34
32	43	43-42-37-36-27-26-14-18-19-32	73,85
33	34	33-24-34	32,34
34	35	35-38-42-43-32-19-21-20-23-24-34	44,02
35	38	38-27-26-14-18-19-21-20-23-24-34-35	10,12
36	37	36-27-38-42-37	10,84

37	39	37-36-27-38-42-39	46,44
37	40	40-42-43-32-19-18-14-26-27-36-37	7,04
37	42	42-43-32-19-18-14-26-27-36-37	9,83
38	42	42-37-36-27-38	17,90
39	42	42-37-39	30,97
40	42	42-37-40	2,80
42	44	-----	-----
42	43	43-32-19-18-14-26-27-36-37-42	21,77
44	45	-----	-----
46	19	19-18-14-9-5-6-46	0,18
12	14	-----	-----
5	6	5-2-1-7-8-13-20-21-19-46-6	3,94
6	46	6-5-2-1-7-8-13-20-21-19-46	3,99

Al comparando los resultados de los ciclos mínimos hallados en la primera fase con respecto a los ciclos mínimos hallados en la fase final, se observa una diferencia demasiado grande entre los dos análisis, por lo tanto se concluye que es necesario resolver el problema del flujo de carga antes de realizar la búsqueda de los ciclos mínimos en cualquier sistema de potencia.

# Capítulo 5

## 5. CONCLUSIONES

En la fase 1 se analizan las rutas críticas que complican el análisis del sistema de potencia utilizando información general de la capacidad máxima de los flujos de potencia que circula por las líneas, el resultado del análisis genera valores incoherentes, debido a que no se utiliza el valor exacto del flujo de potencia activa ni el sentido de los flujos reales que circulan por los corredores.

Comparando los resultados de los ciclos mínimos en la primera fase con respecto a los ciclos mínimos de la fase final, se observa una diferencia demasiado grande entre los dos análisis, por lo tanto se concluye que es necesario resolver el problema del flujo de carga antes de realizar la búsqueda de los ciclos mínimos.

Después de haber resuelto el flujo de carga en la fase final, se logró identificar que más del 90% de los corredores analizados contenían rutas críticas. Estos resultados juegan un papel muy importante en la optimización del sistema de transmisión sur de Brasil, con estos resultados es posible determinar si es viable seguir usando estos elementos que comprometen la operación normal del sistema generando dificultades, o proceder a eliminar estas rutas críticas y transmitir por nuevas rutas que mejoren la operación del sistema de transmisión.

Las rutas críticas en el futuro tienden a ser las líneas que se sobrecarguen presentando congestión en el sistema, por este motivo es necesario identificarlas y operarlas de la mejor forma, para que no generen limitaciones de operación al sistema.

Mediante el análisis observamos que una ruta crítica no siempre se encuentra en las trayectorias más cercanas al corredor, estas pueden presentarse en trayectorias demasiado largas, el resultado depende del sentido de los flujos que circulan en el corredor, el mismo flujo puede ser positivo para un corredor y negativo para otro.

## 5.1. BIBLIOGRAFÍA

[Antonio H. Escobar Zuluaga, 2010] Antonio H. Escobar Zuluaga, Rubén A. Romero Lázaro, R. A. G. R. (Pereira, Julio de 2010). Modelos usados en el planeamiento de la expansión a largo plazo de sistemas de transmisión de energía eléctrica. Taller de Publicaciones de la Universidad Tecnológica de Pereira.

[Baringo and Baringo, 2018] Baringo, L. and Baringo, A. (2018). A stochastic adaptive robust optimization approach for the generation and transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1):792–802.

[Bustos et al., 2018] Bustos, C., Sauma, E., de la Torre, S., Aguado, J. A., Contreras, J., and Pozo, D. (2018). Energy storage and transmission expansion planning: substitutes or complements? *IET Generation, Transmission Distribution*, 12(8):1738–1746.

[del Socorro Gómez Pérez, 2018] del Socorro Gómez Pérez, M. (2018). Planeamiento de la expansión usando sistemas de almacenamiento de energía bess. Master's thesis, Universidad Tecnológica de Pereira.

[Domínguez et al., 2017] Domínguez, A. H., Escobar, A. H., and Gallego, R. A. (2017). An milp model for the static transmission expansion planning problem including hvac/hvdc links, security constraints and power losses with a reduced search space. *Electric Power Systems Research*, 143:611–623.

[Escobar, 2018] Escobar, L. M. (2018). Specialized Models for the Long-Term Transmission Network Expansion Planning Problem. PhD thesis, Faculty of Engineering, Campus of Ilha Solteira – UNESP.

[González Cabrera et al., 2018] González Cabrera, N., Gutiérrez Alcaraz, G., and Gil, E. (2018). Transmission expansion planning considering an hourly demand curve. *IEEE Latin America Transactions*, 16(3):869–875.

[Haghighat and Zeng, 2018] Haghighat, H. and Zeng, B. (2018). Bilevel conic transmission expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4):4640–4642.

[Shen et al., 2017] Shen, W., Dong, Z. Y., Meng, K., and Qiu, J. (2017). Transmission expansion planning with wind generation considering tcsc. In *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, pages 1–6.

[Zhang and Conejo, 2018] Zhang, X. and Conejo, A. J. (2018). Candidate line selection for transmission expansion planning considering long- and short-term uncertainty. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 100:320 – 330.

## 5.2. APÉNDICE

### 5.2.1. Datos del sistema de potencia sur Brasil

Tabla 4. Base de datos del esquema de potencia sur de Brasil.

Nodo 1	Nodo 2	Reactancia (x)	Flujo máximo (fmax)	(fmax)*(X)
1	7	0,0616	270	16,632
1	2	0,1065	270	28,755
4	9	0,0924	270	24,948
5	9	0,1173	270	31,671
5	8	0,1132	270	30,564
7	8	0,1023	270	27,621
4	5	0,0566	270	15,282
2	5	0,0324	270	8,748
8	13	0,1348	240	32,352
9	14	0,1756	220	38,632
12	14	0,0740	270	19,980
14	18	0,1514	240	36,336
13	18	0,1805	220	39,710
13	20	0,1073	270	28,971
18	20	0,1997	200	39,940
19	21	0,0278	1500	41,700
16	17	0,0078	2000	15,600
17	19	0,0061	2000	12,200
14	26	0,1614	220	35,508
14	22	0,0840	270	22,680
22	26	0,0790	270	21,330
20	23	0,0932	270	25,164
23	24	0,0774	270	20,898
26	27	0,0832	270	22,464
24	34	0,1647	220	36,234
24	33	0,1448	240	34,752
33	34	0,1265	270	34,155

27	36	0,0915	270	24,705
27	38	0,2080	200	41,600
36	37	0,1057	270	28,539
34	35	0,0491	270	13,257
35	38	0,1980	200	39,600
37	39	0,0283	270	7,641
37	40	0,1281	270	34,587
37	42	0,2105	200	42,100
39	42	0,2030	200	40,600
40	42	0,0932	270	25,164
38	42	0,0907	270	24,489
32	43	0,0309	1400	43,260
42	44	0,1206	270	32,562
44	45	0,1864	200	37,280
19	32	0,0195	1800	35,100
19	46	0,0222	1800	39,960
16	46	0,0203	1800	36,540
18	19	0,0125	600	7,500
20	21	0,0125	600	7,500
42	43	0,0125	600	7,500
2	4	0,0882	270	23,814
14	15	0,0374	270	10,098
10	46	0,0081	2000	16,200
4	11	0,2246	240	53,904
5	11	0,0915	270	24,705
6	46	0,0128	2000	25,600
3	46	0,0203	1800	36,540
16	28	0,0222	1800	39,960
16	32	0,0311	1400	43,540
17	32	0,0232	1700	39,440
19	25	0,0325	1400	45,500
21	25	0,0174	2000	34,800
25	32	0,0319	1400	44,660
31	32	0,0046	2000	9,200
28	31	0,0053	2000	10,600
28	30	0,0058	2000	11,600
27	29	0,0998	270	26,946
26	29	0,0541	270	14,607

28	41	0,0339	1300	44,070
28	43	0,0406	1200	48,720
31	41	0,0278	1500	41,700
32	41	0,0309	1400	43,260
41	43	0,0139	2000	27,800
40	45	0,2205	180	39,690
15	16	0,0125	600	7,500
11	46	0,0125	600	7,500
24	25	0,0125	600	7,500
29	30	0,0125	600	7,500
40	41	0,0125	600	7,500
2	3	0,0125	600	7,500
5	6	0,0125	600	7,500
9	10	0,0125	600	7,500

**Tabla 4.** Parámetros de flujo, reactancia y nodos del sistema de potencia sur de Brasil.

En la tabla 4, se encuentran las conexiones realizadas entre corredores existentes y corredores proyectados, el valor del flujo máximo, la reactancia y el producto entre flujo máximo por reactancia de cada corredor.