



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES A TRAVÉS DE  
TÉCNICAS DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.**

**Br. Joan R. Terán Delgado.**

**Mérida, Mayo 2018**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

## **UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero  
Electricista

**Br. Joan R. Terán Delgado.  
Tutor: Prof. Ricardo I. Stephens**

**Mérida, Mayo 2018**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE  
BÚSQUEDA EXHAUSTIVA.**

**Br. Joan Ramón Terán Delgado.**

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de los Andes por el siguiente jurado:

---

Prof. Ricardo I. Stephens

---

Prof. Marisol Dávila

---

Prof. María A. Salazar

## DEDICATORIA

*A Dios todo poderoso; A mis Padres Paula Delgado y Ramón Terán; A mis Hermanos Yaritza Terán y Jean Carlos Terán, A mis Sobrinos Sarah, Keiner, Ashly, Moisés y Aarón; a toda mi Familia; a mis amigos y todas las personas que de una u otra forma contribuyeron con esta meta; este triunfo es de Ustedes.*

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios todopoderoso, por concederme salud, la luz del conocimiento, entendimiento y sabiduría, para así culminar con éxito una de mis metas propuestas.*

*A la Ilustre Universidad de Los Andes, principalmente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica por permitirme cumplir una de mis metas de formarme como un profesional, ya que gracias a ella pude obtener todos los conocimientos necesarios para este logro.*

*A mis padres Paula Delgado y Ramón Terán, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me ha infundado siempre, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. Los Amo.*

*A mis hermanos, Yaritza y Jean Carlos, que siempre han estado a mi lado, por todo el apoyo que me han brindado durante mi carrera y a lo largo de nuestra vida, ejemplos de perseverancia, constancia y amor. Los Amo.*

*A mi Familia, gracias a todos por sus sabios consejos, por estar siempre a mi lado y apoyarme en todas mis metas, mis éxitos también son de ustedes. Los Quiero.*

*A mis Compañeros y Amigos incondicionales, de manera muy especial a Mariany Carrasquero y Ronal Asuaje quienes más que amigos han sido un punto de apoyo incondicional tanto en lo académico como en lo personal, sin estimar esfuerzo, tiempo y espacio para ayudarnos unos con otros, siempre compartimos momentos tristes y alegres. Gracias por su apoyo y motivación.*

*A mi Tutor, Prof. Ricardo Stephens, al Prof. Juan Carlos Muñoz y la Prof. Ana Arraiz quienes me han prestado mucho apoyo en estas últimas etapas de mi carrera y siempre he conseguido en ellos una respuesta positiva para todo.*

**Br. Joan R. Terán D. Ubicación Óptima De Reguladores A Través De Técnicas De Búsqueda Exhaustiva.** Universidad de Los Andes. **Tutor:** Prof. Ricardo Stephens. Mayo 2018.

## RESUMEN

El trabajo de grado tiene como principal finalidad establecer una teoría para realizar la ubicación óptima de un banco de reguladores en un sistema de potencia, para esto se utilizó un circuito de potencia cargado en el programa de simulación como un ejemplo de trabajo, este circuito presenta caída de tensión en diferentes barras y por lo tanto se debe diseñar una solución para recuperar el voltaje. Para la ubicación del banco de reguladores se va a usar el software Power System Análisis Toolbox (PSAT) el cual permite simular el circuito y establecer comparaciones ubicando el banco de reguladores en diferentes puntos y observando la respuesta del circuito con el fin de establecer el punto óptimo donde se obtenga la menor caída de voltaje y que presente la mejor solución al problema.

**Descriptores:** Estabilidad de tensión, control y seguridad de voltaje, ubicación óptimo

# ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
RESUMEN.....	V
INTRODUCCION .....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CAPÍTULO	p.p
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS .....	4
1.3.1 Objetivo General .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
1.4 METODOLOGÍA .....	5
1.5 LIMITACIONES .....	5
1.6 ALCANCE.....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA .....	6
2.1.1 Formulación básica del problema del flujo de carga.....	6
2.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE.....	7
2.3 COLAPSO DE VOLTAJE.....	9
2.4 MÉTODOS DE ESTUDIO DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE .....	9
2.4.1 Análisis de Sensibilidad Q-V .....	10

2.4.2 Curvas P-V .....	11
2.4.3 Curvas Q-V .....	12
2.4.4. Indicador de estabilidad de tensión lineal (LVSI) basado en la reducción del sistema (Equivalente de dos barras). .....	13
2.4.5 Indicador de estabilidad de tensión integrada (IVSI) .....	15
2.4.6 Modelo equivalente de Thévenin de dos Barras .....	18
2.5 REGULACIÓN DE VOLTAJE .....	20
2.5.1 Regulación del Alimentador de Distribución .....	21
2.5.2 Reguladores De Voltaje .....	22
2.5.3 Tipos De Reguladores De Voltaje .....	24
2.6 METODO PARA LA UBICACIÓN DEL REGULADOR .....	28
<b>3. ANÁLISIS DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN A TRAVES DEL USO DEL PROGRAMA PSAT/MATLAB® .....</b>	<b>29</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO. ....	29
3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PSAT® .....	34
3.2 ANÁLISIS DEL CIRCUITO. ....	37
3.3 SIMULACIONES Y RESULTADOS. ....	40
3.4 ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS. ....	79
CONCLUSIONES .....	80
RECOMENDACIONES .....	81
REFERENCIAS. ....	82

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla.	pág.
3.1 Bases del sistema. ....	29
3.2 Descripción de barras del sistema. ....	31
3.3 Líneas de transmisión. ....	32
3.4 Cargas conectadas. ....	33
3.5 Tensión en las barras del circuito. ....	37
3.6 Tensiones en barras para la primera ubicación. ....	40
3.7 Tensiones en barras para la segunda ubicación. ....	42
3.8 Tensiones en barras para la tercera ubicación. ....	43
3.9 Tensiones en barras para la cuarta ubicación. ....	45
3.10 Tensiones en barras para la quinta ubicación. ....	47
3.11 Tensiones en barras para la sexta ubicación. ....	48
3.12 Tensiones en barras para la séptima ubicación. ....	50
3.13 Tensiones en barras para la octava ubicación. ....	51
3.14 Tensiones en barras para la novena ubicación. ....	53
3.15 Promedio de volteje general del circuito ....	55
3.16 Promedio de volteje en el lado de 13.8kV. ....	56
3.17 Tensiones en barras para la décima ubicación. ....	57
3.18 Tensiones en barras para la décima primera ubicación. ....	59
3.19 Tensiones en barras para la décima segunda ubicación. ....	60
3.20 Tensiones en barras para la décima tercera ubicación ....	62
3.21 Tensiones en barras para la décima cuarta ubicación. ....	64
3.22 Tensiones en barras para la décima quinta ubicación. ....	65
3.23 Tensiones en barras para la décima sexta ubicación. ....	67
3.24 Tensiones en barras para la décima séptima ubicación. ....	68
3.25 Tensiones en barras para la décima octava ubicación. ....	70

3.26 Tensiones en barras para la décima novena ubicación.....	72
3.27 Tensiones en barras para la vigésima ubicación. ....	73
3.28 Tensiones en barras para la vigésima primera ubicación. ....	75
3.29 Tensiones en barras para la vigésima segunda ubicación.....	76

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pág.
2.1. Curva P-V(rodriguez, 2014) .....	11
2.2. Curva Q-V(Boza, 2012) .....	13
2.3. Equivalente del Sistema de dos barras(Vu, 1997) .....	13
2.4. Línea de Transmisión modelo con su parámetro. (chakraborty, 2015).....	15
2.5. Sistema Original(Nguyen, 2012) .....	18
2.6. Sistema equivalente de Thévenin visto de la barra más débil (barra k)(Nguyen, 2012)19	
3.1: Circuito de distribución primaria. ....	30
3.2 Interfaz de inicio de PSAT. ....	35
3.3 Interfaz de librería de PSAT. ....	36
3.4 Interfaz reportes estáticos de PSAT. ....	36
3.5 Tensión en barras. ....	38
3.6 Tensiones para la primera ubicación. ....	41
3.7 Tensiones para la segunda ubicación. ....	43
3.8 Tensiones para la tercera ubicación. ....	45
3.9 Tensiones para la cuarta ubicación. ....	46
3.10 Tensiones para la quinta ubicación. ....	48
3.11 Tensiones para la sexta ubicación. ....	49
3.12 Tensiones para la séptima ubicación. ....	51
3.13 Tensiones para la octava ubicación. ....	52
3.14 Tensiones para la novena ubicación. ....	54
3.15 Tensiones para la décima ubicación. ....	58
3.16 Tensiones para la décima primera ubicación. ....	60
3.17 Tensiones para la décima segunda ubicación. ....	61
3.18 Tensiones para la décima tercera ubicación. ....	63
3.19 Tensiones para la décima cuarta ubicación. ....	65

3.20 Tensiones para la décima quinta ubicación. ....	66
3.21 Tensiones para la décima sexta ubicación. ....	68
3.22 Tensiones para la décima séptima ubicación. ....	69
3.23 Tensiones para la décima octava ubicación. ....	71
3.24 Tensiones para la décima novena ubicación. ....	73
3.25 Tensiones para la vigésima ubicación. ....	74
3.26 Tensiones para la vigésima primera ubicación. ....	76
3.27 Tensiones para la vigésima segunda ubicación. ....	78

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico nacional, en los últimos años, con el crecimiento de la demanda a nivel nacional y con la deficiencia en la generación de energía eléctrica, se ha visto gravemente afectado, y como consecuencia se ha producido inestabilidad en los niveles de tensión, los cuales causan racionamientos del servicio o cortes inesperados de energía.

Por tal motivo el presente trabajo está basado en la recopilación, análisis y simulaciones de datos, los cuales arrojarán valores cercanos a las tensiones que se presentan en la actualidad en cada punto de un circuito de potencia, además, mediante los métodos de análisis de estabilidad de voltaje se facilitarán los estudios de análisis de sensibilidad  $Q-V$ , curvas  $Q-V$  y curvas  $P-V$ , estos análisis proporcionarán un conocimiento sobre las barras más débiles del sistema que se encuentren fuera del rango de tensiones permitido por la empresa CORPOELEC (90%-110%); además, se han implementado nuevos métodos para la seguridad y estabilidad en los sistemas de potencia, algunos de estos métodos son los índices de seguridad de voltaje LVSI (Indicador de estabilidad de tensión lineal) y el IVSI (Indicador de estabilidad de tensión integrada), los cuales nos permiten conocer el punto de colapso de voltaje de cualquier sistema de potencia.

Es importante mencionar que a medida que el circuito se extiende en cuanto a su longitud es más frecuente que esté presente caída de tensión, ya que, a mayor longitud, mayor será la resistencia del mismo y por ende el circuito presentara una caída de voltaje más alta, esta caída de voltaje se observará con mayor incidencia en las barras donde presente la mayor carga conectada del circuito, ya que es el punto con mayor consumo.

Gracias a los avances de la tecnología se han inventado algunos elementos que se pueden incorporar a un sistema de potencia con el fin de eliminar la caída de tensión o al menos llevar

los niveles de voltaje a los rangos permitidos por la empresa CORPOELEC (90%-110%). Entre estos elementos se encuentran los reguladores de tensión, los cuales permiten elevar los niveles de voltaje en cualquier punto de un sistema de potencia. Las simulaciones fueron realizadas en el software PSAT® y el circuito usado para este trabajo se extrajo del software PSAT® como uno de los ejemplos descritos en este programa.

El presente trabajo se desarrollará en cuatro capítulos, donde el primero de ellos es el planteamiento del problema, en el segundo capítulo se da una reseña teórica sobre los estudios en los cuales estará basado el trabajo y una breve explicación sobre los índices de seguridad de voltaje y los tipos de regulación que existen. En el tercer capítulo se dará una descripción del circuito usado para este trabajo, además de una descripción del software utilizado para simular. También las simulaciones y resultados obtenidos durante el trabajo, así como el análisis de los mismos. Por último, se presentan las conclusiones obtenidas de los análisis de resultados y las recomendaciones necesarias.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# **CAPITULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y**

### **OBJETIVOS**

Este proyecto se enfoca en la ubicación de un banco de reguladores para un circuito de potencia mediante el uso de técnicas exhaustivas. Por consiguiente, en este capítulo se explicarán las problemáticas de tensión que puede presentar un circuito, además de presentar los objetivos que se buscan conseguir y limitaciones que se puedan encontrar en la realización del mismo.

#### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En Venezuela, en los últimos años se ha presentado un fuerte crecimiento en la población a nivel nacional, esto por ende trae como consecuencia un crecimiento de la demanda de energía eléctrica en la mayoría de los circuitos del sistema eléctrico nacional, el aumento de la demanda ha traído una problemática para todos los circuitos de potencia, la cual se traduce en que los niveles de tensión disminuyan en cada una de las subestaciones de transmisión y distribución de todo el sistema. Debido a la poca inversión en cuanto a generación a nivel nacional, es cada vez más común que se presenten estas situaciones en distintas zonas del país.

En vista de la problemática que se presenta en estos circuitos, es necesario realizar la ubicación de un banco de reguladores para llevar los niveles de tensión a valores óptimos, además, efectuar el análisis de seguridad de voltaje.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

La regulación del voltaje es un tema importante en los sistemas de distribución de energía eléctrica. La caída de tensión a lo largo de los sistemas de distribución primaria ha sido un problema crucial para la operación correcta de dichos sistemas, especialmente para los sistemas tipo alimentador largos con una concentración de carga considerable hacia sus extremos. Es responsabilidad de las compañías de suministro eléctrico mantener los niveles de voltaje del cliente dentro de las normativas establecidas para garantizar un funcionamiento adecuado de los equipos. Por ende, las compañías deben tener medios para regular el voltaje, la tecnología para lograr este fin existe y se aplica a través del uso de reguladores de tensión; sin embargo, para cada caso en particular existe la duda de la ubicación óptima de los reguladores. Por lo tanto, en el presente trabajo de grado se propone realizar un estudio de ubicación óptima de reguladores de tensión en sistemas primarios de distribución utilizando técnicas de búsqueda exhaustiva, en las cuales todas las posibles ubicaciones de los reguladores son evaluadas y disentidas unas con las otras; y en consecuencia llegando a encontrar las ubicaciones óptimas globales. Para las ubicaciones óptimas, se tomarán en cuenta las mejoras en el perfil de tensión, pérdidas de potencia activa y el consumo de reactivos como criterios de optimización

## 1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

### 1.3.1 Objetivo General

- Aplicar las técnicas de búsqueda exhaustiva para determinar la ubicación óptima de reguladores en sistemas primarios de distribución.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Entender los conceptos fundamentales.
- Realizar la revisión bibliográfica.
- Establecer modelos y casos de estudio.
- Realizar simulaciones y experimentos

- Evaluar casos de estudio.
- Analizar los resultados y establecer conclusiones y recomendaciones.

## **1.4 METODOLOGÍA**

El presente trabajo de grado se basa en la metodología relacionada con un proyecto factible que consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos necesidades de organizaciones o grupos sociales que pueden referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos, o procesos. El trabajo de grado tiene el apoyo de una investigación de tipo documental y de campo con aplicación del método científico empírico-analítico que se basa en la experimentación y la lógica empírica, que conjuntamente con la observación de fenómenos y su ulterior análisis permiten la solución de los problemas planteados.

## **1.5 LIMITACIONES**

- El tiempo de espera para poder obtener en el despacho de carga todos los datos necesarios para la realización de este trabajo.

## **1.6 ALCANCE**

En este proyecto se realizará la ubicación óptima de un banco de reguladores para un circuito de potencia mediante el uso de técnicas exhaustivas, buscando obtener la estabilidad de dicho circuito en cuanto a su caída de tensión, y realizando un estudio de análisis de seguridad de voltaje.

# CAPITULO II

## MARCO TEÓRICO

Al fin de comprender de manera más sencilla el análisis aplicado al Sistema de potencia, es conveniente estudiar previamente algunos conceptos y fundamentos teóricos acerca de los sistemas de potencia, estabilidad y seguridad de voltaje, regulación de voltaje, así como también algunas de las técnicas utilizadas para el análisis del sistema.

### 2.1 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA

Generalmente, la información que se obtiene en un estudio de flujo de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y la potencia activa y reactiva que fluye en cada línea. En general, estos métodos están fuera de línea y las ecuaciones de flujo de carga se resuelven usando las computadoras modernas (Grainger, 1996).

#### 2.1.1 Formulación básica del problema del flujo de carga

En cualquier problema de flujo de potencia, se requiere tener cuatro variables en cada barra del sistema,  $P_i$  (la potencia activa inyectada al sistema),  $Q_i$  (la potencia reactiva inyectada al sistema),  $V_i$  (la magnitud del voltaje inyectado a la barra), y  $\delta_i$  (el ángulo de fase del voltaje inyectado). Sólo dos de estas cuatro variables se conocen, y la solución del flujo de carga proporciona la solución de las dos variables restantes en cualquier barra. La potencia compleja inyectado a la barra  $i$  está dada por (Grainger, 1996), (Mora, 2017), (chakraborty, 2015):

$$S_i^* = V_i^* I_i \quad (2.1)$$

Reescribiendo la ecuación compleja de flujo de potencia se tiene:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^N |Y_{ij} V_i V_j| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (2.2)$$

Separando la ecuación (2.2) en partes real e imaginaria se tiene:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^N |Y_{ij} V_i V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \\ Q_i &= - \sum_{j=1}^N |Y_{ij} V_i V_j| \sen(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) representa la forma polar del flujo de potencia y es conocida como la ecuación de flujo de carga en estado estacionario, la cual proporciona los valores de la potencia activa y reactiva inyectados en cualquier barra  $i$ . (Mora, 2017), (chakraborty, 2015). La ecuación (2.3) representa un conjunto de ecuaciones simultáneas, algebraicas, no lineales, las cuales, solo pueden ser resueltas por medio de métodos iterativos. Entre los métodos utilizados con mayor éxito, en la solución de las ecuaciones obtenidas en términos de la matriz de admitancia (Mora, 2017). Se tienen:

- Método de Gauss Seidel.
- Método de Newton Raphson.

El método que usan los programas computacionales usados para resolver un flujo de carga en los sistemas de potencia es el Método de Newton Raphson.

## 2.2 ESTABILIDAD DE VOLTAJE

El Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) es un sistema dinámico en el cual los valores de las variables principales (voltajes, corrientes, potencias activa y reactiva, y frecuencia) varían en el tiempo. Estas variaciones son conocidas comúnmente como disturbios (un cambio repentino

o una secuencia de cambios en uno o más de los parámetros del sistema, o bien, en una o más de las variables de operación). En este sentido, la mayor parte de los disturbios que ocurren en él se deben a cambios por variaciones normales de la carga y/o acciones programadas por los ingenieros encargados de la operación del SEP para realizar el mantenimiento de elementos de la red de transmisión y plantas generadoras. Usualmente, el SEP también está sujeto a disturbios repentinos e impredecibles debidos a fallas en el mismo que pueden ser provocadas por descargas atmosféricas en las líneas de transmisión y subestaciones, cortocircuitos causados por el roce de las ramas de un árbol con las líneas de transmisión, vandalismo, una mala operación humana, fenómenos catastróficos como los terremotos y otras causas. Aunque siempre estén ocurriendo cambios en el sistema, es conveniente considerar que en ciertos períodos de tiempo éste funciona en estado estacionario o estable, es decir, que para propósitos de análisis tanto los parámetros como las variables son considerados constantes(Dominguez, 2006).

De esta manera es importante definir la estabilidad de un sistema de potencia como la capacidad que el sistema tiene de mantener un punto de equilibrio sobre condiciones normales de operación y permanecer en un estado aceptable de operación después de haber sufrido una perturbación, en pocas palabras se puede decir que estabilidad de voltaje es la habilidad de un sistema eléctrico para mantener los voltajes estables en todas las barras del sistema, luego de haber sido sometido a una perturbación, desde una condición inicial dada. Es conveniente resaltar que el problema de estabilidad en los SEP es muy concreto y excluyente; por lo que se dice que el sistema es estable o inestable. A pesar de que la estabilidad de este sistema comprende un solo problema, tratarlo como tal, conduce a un planteamiento intratable debido a la complejidad y dimensiones del modelo resultante. La importancia de la clasificación de los diferentes tipos de estabilidad en los SEP radica en la facilidad que otorga una organización adecuada de las manifestaciones de inestabilidad en un SEP para analizar un problema de estabilidad en particular, identificar los factores clave que causan la inestabilidad e implementar y desarrollar métodos para incrementar los límites de estabilidad(Lopez, 2008).

## 2.3 COLAPSO DE VOLTAJE

El colapso de voltaje es un tipo de inestabilidad del sistema que incluye diferentes componentes de la red de energía y sus variables en un momento.

Hay diversos factores que intervienen en el fenómeno de caída de tensión, pero es posible entender la naturaleza de la ruptura de tensión simplemente mediante el análisis de la generación, transmisión y utilización (incluidos los excedentes y déficit) de la potencia reactiva. El principal factor que pone restricciones en la transferencia de energía a través de la línea de transmisión de un largo sistema es la alta pérdida de potencia reactiva. También puede haber interrupciones y reducción de la capacidad de transmisión.

El Colapso de voltaje es definido por el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) como: *“El proceso por el cual la inestabilidad de voltaje conduce a un muy bajo perfil de voltaje en una parte del sistema”*. ) (Sunita, 2018).

También, se define el colapso de voltaje como el evento donde: *“Los voltajes alcanzan alrededor del 85% y un motor se bloquea, llevando el voltaje más abajo y se inicia un bloqueo en cascada de otros motores”* (Zapata, 1996).

Así como se encuentran diversas maneras en las que se puede iniciar un colapso de voltaje, también existen medidas preventivas para reducir la probabilidad de que ocurra dicha anomalía como son logrando una correcta aplicación de los sistemas de protección o esquemas de control además de también mantener reservas de potencia reactiva que ayuden a mantener niveles de tensión óptimos.

## 2.4 MÉTODOS DE ESTUDIO DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

La seguridad del sistema depende principalmente del estado de la energía reactiva de la barra de carga junto con algunos otros parámetros, por ejemplo, la reactancia del sistema o

tipo de carga; por lo tanto, es necesario incluir una discusión sobre indicadores de la estabilidad de la tensión.

#### 2.4.1 Análisis de Sensibilidad Q-V

El análisis de sensibilidad Q-V calcula la relación entre el cambio de voltaje y el cambio de potencia reactiva. (Lopez, 2008).

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.10)$$

Dónde:

- $\Delta V$ = Cambio en el incremento de la magnitud del voltaje en un nodo (Vector)
- $\Delta Q$ = Cambio en el incremento de la inyección de potencia reactiva (Vector)
- $J_R$ = Matriz Jacobiana reducida

Los elementos de la matriz Jacobiana reducida inversa ( $J_R^{-1}$ ) representa las sensibilidades Q-V. Por lo tanto, es la matriz que relaciona directamente la magnitud de voltaje y la inyección de potencia reactiva en el nodo. (Dominguez, 2006).

Adicionalmente, en una barra, la sensibilidad Q-V representa la pendiente de la curva Q-V en un punto de operación. Si la sensibilidad es positiva, es indicio de que el sistema es estable, un valor pequeño de sensibilidad indica que el sistema es más estable, lo que conlleva a que a medida que la estabilidad disminuye, la sensibilidad aumenta (barras de gran tamaño). Si, por el contrario, la sensibilidad es negativa, el sistema es inestable, debido a que ante aumentos en la inyección de potencia reactiva los niveles de voltaje caen en el sistema. Se dice que el sistema no es controlable porque los dispositivos de control están diseñados para reaccionar con un incremento en V después de realizarse un incremento en Q. En el límite de estabilidad la sensibilidad es infinita (Lopez, 2008), (Chimborazo, 2010).

## 2.4.2 Curvas P-V

Existen diferentes métodos gráficos que son útiles en el análisis de la estabilidad de voltaje. Uno de los métodos más conocido es el método de las curvas P-V. Este método, grafica la variación de la magnitud del voltaje en el nodo crítico con respecto a cambios de potencia activa de la carga del sistema(Dominguez, 2006).

De esta manera, las curvas P-V, son entonces, la relación existente entre la transferencia de potencia activa y el comportamiento del voltaje, se generan corriendo una serie de casos de flujos de carga y relacionan el voltaje de los nodos con la carga. La ventaja de esta metodología es que proporciona una indicación de la proximidad al colapso de voltaje del sistema a través de un rango de niveles de carga.

En la figura 2.1, se muestra una típica curva P-V, donde P, es un parámetro que varía lentamente, y V es la tensión en la barra de la carga. También se puede observar que existen dos regiones una es la de la tensión estable y la otra es de la tensión inestable. Los sistemas de potencia se operan en la parte superior de la curva, donde es estáticamente y dinámicamente estable. La punta de la curva (también conocida como codo o nariz de la curva) se denomina el punto de máxima carga, que es el punto de colapso de la tensión cuando las cargas se modelan como potencia constante, cuando la carga se modela en función de la tensión se afecta el punto de colapso de la tensión. El sistema de potencia es de tensión inestable en el punto de colapso de tensión(Boza, 2012), (rodriguez, 2014).

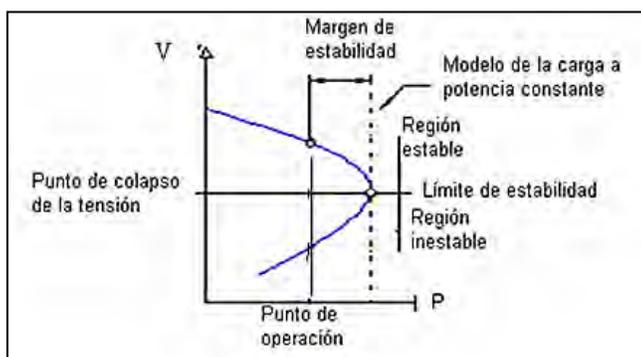


Figura 2.1. Curva P-V(rodriguez, 2014).

### 2.4.3 Curvas Q-V

Una forma alternativa de realizar el análisis de estabilidad de voltaje es mediante el uso de las curvas Q-V. Bajo esta metodología, se busca la compensación reactiva (hipotética) necesaria para mantener un nivel predeterminado de voltaje en una barra. Estas curvas se construyen para ciertos nodos críticos del sistema y se grafican como la cantidad de potencia reactiva que debe ser inyectada a un nodo para mantener un nivel de voltaje deseado. Se debe tener en cuenta que estas curvas se construyen manteniendo constante la transferencia de potencia activa (Lopez, 2008).

Las curvas Q-V son obtenidas por una serie de simulaciones de flujos de potencia. El voltaje es la variable independiente, la potencia reactiva capacitiva es graficada en la dirección vertical positiva (Dominguez, 2006).

De este modo, el estudio de estas curvas se fundamenta en interpretar el colapso de tensión como un indicador de que existe un inadecuado balance de potencia reactiva en uno o más nodos de un sistema. La curva se obtiene aumentando el consumo del reactivo en cada una de las barras del sistema o al menos aquellas consideradas más débiles hasta llegar al colapso. Las curvas Q-V que se obtienen tienen forma de "U", en la que el punto más bajo representa el punto de colapso y el margen de potencia reactiva en esa barra, la cual indica la cantidad de potencia de compensación (capacitor) necesaria para restablecer un punto de operación u obtener un valor de tensión deseado. Por otro lado, el colapso de voltaje comienza en la barra más débil del sistema y entonces se extiende hacia otras barras débiles. La barra más débil es la más importante en el análisis del colapso de voltaje.

Asimismo, en la figura 2.2, se observa que el sistema es estable con la carga más ligera,  $P_1$ . Para esta carga, hay una reserva de potencia reactiva que puede usarse para mantener la estabilidad aun cuando la carga aumenta. El sistema es marginalmente estable con la carga  $P_2$ . El sistema no es estable con la carga más grande  $P_3$ , una cantidad de potencia reactiva debe inyectarse en la barra para causar una intersección con el eje X y evitar un colapso de la tensión. Por consiguiente, la medida de la cantidad de potencia reactiva de reserva podría proporcionar una indicación del margen entre la estabilidad e inestabilidad (Boza, 2012).

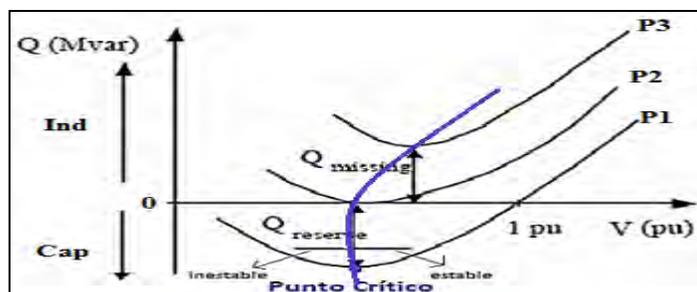


Figura 2.2. Curva Q-V (Boza, 2012)

#### 2.4.4. Indicador de estabilidad de tensión lineal (LVSI) basado en la reducción del sistema (Equivalente de dos barras).

El LVSI se utiliza para la evaluación de la seguridad de tensión, basado en el modelo del sistema reducido.

*Equivalente de Red de 2 Barra:* Supongamos un equivalente de red de dos barras, donde la barra extrema, emisor, se asume como una barra generadora y el extremo receptor como una barra de carga conectada por una impedancia de línea, lo que representa el equivalente de toda la red de multibarras como se muestra en la figura 2.3 (Chakraborty, 2011).

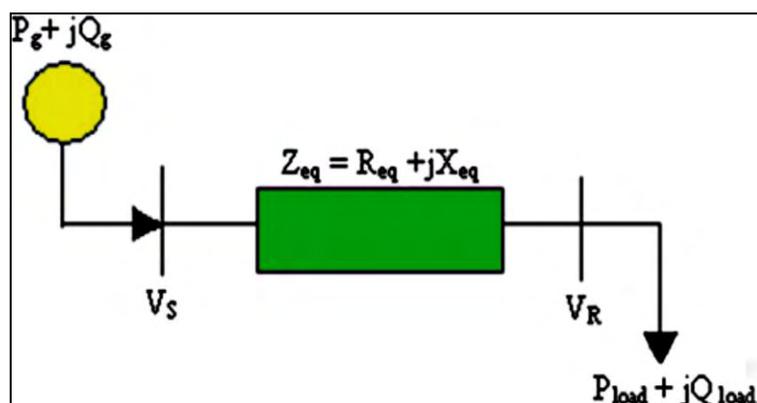


Figura 2.3. Equivalente del Sistema de dos barras (Vu, 1997)

Las pérdidas de potencia activa y pérdidas de potencia reactiva del equivalente de red de 2 barras se pueden expresar como(Chakraborty, 2011):

$$P_{\text{Perdidas}} = \frac{R_{\text{eq}}(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2} \quad (2.11)$$

$$Q_{\text{Perdidas}} = \frac{X_{\text{eq}}(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2} \quad (2.12)$$

Desde el principio básico de la conversión de energía, Pérdida = Generación-Consumo; por lo tanto, se puede decir:

$$\sum P_{\text{Perdidas}} = \sum P_g - \sum P_{\text{carga}} \quad (2.13)$$

$$\sum Q_{\text{Perdidas}} = \sum Q_g - \sum Q_{\text{carga}} \quad (2.14)$$

Si una red multibarrasse convierte en un sistema equivalente de 2 barras, se debe cumplir:

$$\sum P_{\text{carga}}(\text{para un sistema de multibarras}) = P_{\text{carga}}(\text{para un sistema equiv. de dos barras})(2.15)$$

$$\sum Q_{\text{carga}}(\text{para un sistema de multibarras}) = Q_{\text{carga}}(\text{para un sistema equiv. de dos barras})(2.16)$$

Para la red equivalente de 2 barras, se tiene:

$$R_{\text{eq}} = \frac{P_g - P_{\text{carga}}}{\frac{(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2}} = \frac{P_g - P_{\text{carga}}}{(P_g^2 + Q_g^2)} \quad (2.17)$$

$$X_{\text{eq}} = \frac{Q_g - Q_{\text{carga}}}{\frac{(P_g^2 + Q_g^2)}{V_s^2}} = \frac{Q_g - Q_{\text{carga}}}{(P_g^2 + Q_g^2)} \quad (2.18)$$

(En este caso, la magnitud de la tensión de la barra extremo emisor  $V_S$  se supone que es el valor nominal de 1,0 p.u.). La  $Z_{eq}$ , impedancia de línea equivalente está dada por:

$$Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.19)$$

Por lo tanto:

$$V_R = V_S - \frac{Z_{eq}(P_g - jQ_g)}{V_S} \quad (2.20)$$

La expresión anterior permite el cálculo de la tensión de barra del extremo receptor en la base de datos equivalentes del sistema de dos barras. Así, el sistema de dos barras, desarrollado anteriormente, se convierte en el modelo equivalente a una red de múltiples barras en cualquier configuración de red particular y de carga (Chakraborty, 2015), (Sunita, 2018), (Chakraborty, 2011).

#### 2.4.5 Indicador de estabilidad de tensión integrada (IVSI)

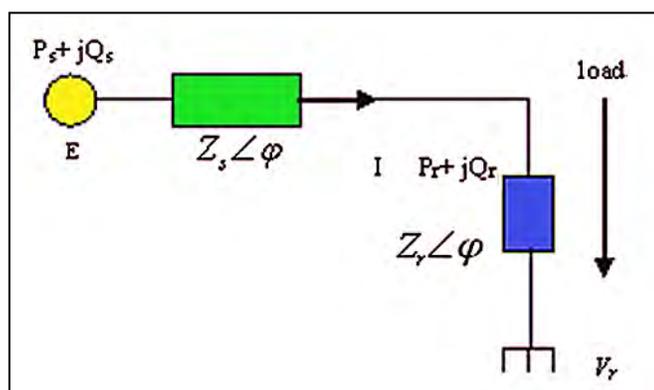


Figura 2.4. Línea de Transmisión modelo con su parámetro (Chakraborty, 2015).

El modelo de dos barras de la figura 2.4 se ha desarrollado con la carga en la línea siendo tratada como la potencia que se transfiere en el extremo receptor y así poner fin a través de esa única línea. En la figura 2.4 se aprecia que  $Z_S \angle \theta$  es la impedancia de la línea,  $Z_r \angle \varphi$  es la impedancia de carga y  $\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{Q_r}{P_r} \right)$ . Además,  $E$  es la tensión del extremo emisor y  $V_r$  es la tensión del extremo receptor (chakraborty, 2015).

Con el aumento en la demanda de carga, el voltaje del extremo receptor cae. Por lo tanto:

$$V_r = Z_r I = \frac{E}{\sqrt[n]{1 + (1/n)^2 + 2/n \cos(\theta + \varphi)}} \quad (2.26)$$

Dónde:  $n = Z_S / Z_r$ . Además, se tiene:

$$I = \frac{E}{\sqrt{[(Z_S \cos \theta + Z_r \cos \varphi)]^2 + (Z_S \sin \theta + Z_r \sin \varphi)^2}} \quad (2.27)$$

Para el extremo receptor, entonces se tiene:

$$P_r = \frac{E^2 / Z_S}{n \left[ 1 + (1/n)^2 + 2(1/n) \cos(\theta - \varphi) \right]} \cos \varphi \quad (2.28)$$

$$Q_r = \frac{E^2 / Z_S}{n \left[ 1 + (1/n)^2 + 2(1/n) \cos(\theta - \varphi) \right]} \sin \varphi \quad (2.29)$$

Teniendo las pérdidas en la línea como:

$$P_l = I^2 Z_S \cos \theta \quad (2.30)$$

$$Q_l = I^2 Z_S \sen \theta \quad (2.31)$$

Además, puede ser escrito como:

$$P_l = \frac{E^2 / Z_S}{\left[1 + (1/n)^2 + 2(1/n) \cos(\theta - \varphi)\right]} \cos \varphi \quad (2.32)$$

$$Q_l = \frac{E^2 / Z_S}{\left[1 + (1/n)^2 + 2(1/n) \cos(\theta - \varphi)\right]} \sen \varphi \quad (2.33)$$

La potencia máxima real transferida al extremo receptor se puede obtener usando la condición

límite  $dP_R/dQ_R = 0$  que conduce a  $\eta = 1$ . Sustituyendo esto en la ecuación (2.28), se obtiene:

$$P_{r(MAX)} = \frac{E^2}{Z_S} \frac{\cos \varphi}{4 \cos^2 \frac{(\theta - \varphi)}{2}} \quad (2.34)$$

La potencia reactiva máxima transferible, la máxima pérdida de potencia activa y la máxima pérdida de potencia reactiva en la línea, se pueden obtener de manera similar como:

$$Q_{r(MAX)} = \frac{E^2}{Z_S} \frac{\sen \varphi}{4 \cos^2 \frac{(\theta - \varphi)}{2}} \quad (2.35)$$

$$P_{l(MAX)} = \frac{E^2}{Z_S} \frac{\cos \theta}{4 \cos^2 \frac{(\theta - \varphi)}{2}} \quad (2.36)$$

$$Q_{l(MAX)} = \frac{E^2}{Z_S} \frac{\text{sen } \theta}{4 \cos^2 \frac{(\theta - \varphi)}{2}} \quad (2.37)$$

En base a estas cantidades máximas permisibles, se propuso la expresión del indicador IVSI como:

$$\text{IVSI (P)} = \frac{P_R}{P_{R(MAX)}} = \frac{Q_R}{Q_{R(MAX)}} \quad (2.38)$$

$$\text{IVSI (L)} = \frac{P_l}{P_{l(MAX)}} = \frac{Q_l}{Q_{l(MAX)}} \quad (2.39)$$

Por consiguiente, los valores de  $P_R$ ,  $Q_R$ ,  $P_l$  y  $Q_l$  se obtienen a partir del cálculo del flujo de potencia convencional. Es evidente que a partir de las ecuaciones (2.38) y (2.39) el indicador IVSI integra las potencias y las pérdidas para así calcular un indicador de estabilidad de voltaje único (Sunita, 2018), (Chakraborty, 2011), (chakraborty, 2015), (Zabaiou, 2013).

#### 2.4.6 Modelo equivalente de Thévenin de dos Barras

Hay muchos métodos para calcular los parámetros del equivalente de Thévenin. El método que se va a utilizar permite definir los parámetros del equivalente de Thévenin basados en el modelo de potencia y la información del flujo de carga en dos casos base, uno sin carga y el otro con carga normal en la barra más débil (Zabaiou, 2013).

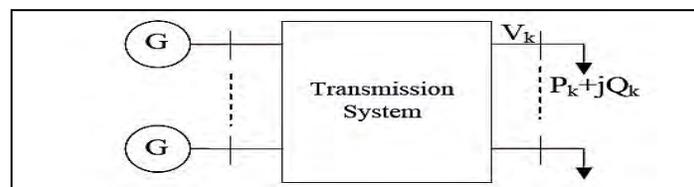
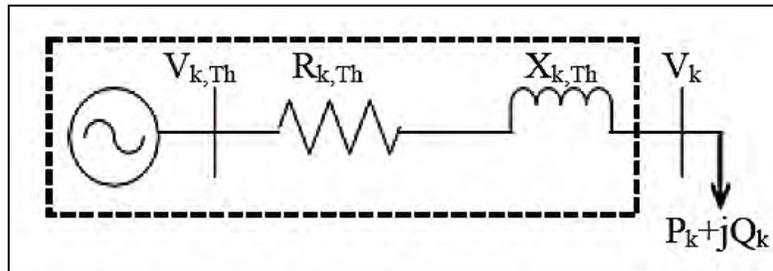


Figura 2.5. Sistema Original (Nguyen, 2012)



**Figura 2.6. Sistema equivalente de Thévenin visto de la barra más débil (barra k)(Nguyen, 2012)**

El sistema de dos barras equivalente se muestra en la figura 2.6, la barra más crítica del sistema original se mantiene intacta, pero el resto del sistema se sustituye por el equivalente de Thévenin. En este modelo se debe utilizar los parámetros del flujo de carga para el cálculo del equivalente de Thévenin. Como la definición de voltaje de Thévenin es a circuito abierto, por lo tanto, el voltaje de Thévenin es la tensión en la barra más débil obtenido por la solución del flujo de potencia en el caso sin carga en esa barra.(Nguyen, 2012). Por lo tanto:

$$V_{K,Th} = V_K^0 \quad (2.40)$$

Para mejorar la precisión del cálculo de la impedancia de Thévenin, su valor debe ser transformado tras el cambio de las condiciones del sistema y la carga en esa barra. Por tanto, la impedancia de Thévenin se calculará de la siguiente manera.

$$R_{K,Th} = \frac{V_K \cdot V_K^0 \cdot S_K \cdot \cos(\delta^0 - \delta + \phi) - V_K^2 \cdot P_K}{P_K^2 + Q_K^2} \quad (2.41)$$

$$X_{K,Th} = \frac{V_K \cdot V_K^0 \cdot S_K \cdot \sin(\delta^0 - \delta + \phi) - V_K^2 \cdot Q_K}{P_K^2 + Q_K^2} \quad (2.42)$$

Dónde:

$S_K \angle \phi = P_K + jQ_K$  es la carga en la barra k

$V_K^0 \angle \delta^0$  es la tensión en circuito abierto en la barra k

$V_K \angle \delta$  es la tensión en la barra k cuando se conecta la carga  $P_K + jQ_K$

$V_K \angle \delta$  Es obtenido mediante el cálculo del flujo de carga en el caso de que la carga  $P_K + jQ_K$  este conectada a la barra k. Por lo tanto, en la impedancia Thevenin en general es una función de las condiciones de carga y del sistema (Zabaiou, 2013), (Nguyen, 2012).

## 2.5 REGULACIÓN DE VOLTAJE

En la ingeniería eléctrica, particularmente en la ingeniería de potencia, la regulación de voltaje es una medida de cambio en la magnitud de voltaje entre el extremo emisor y receptor de un componente, tal como una línea de transmisión o distribución. La regulación de voltaje describe la capacidad de un sistema para proporcionar una tensión casi constante en una amplia gama de condiciones de carga. El término puede referirse a una propiedad pasiva que da como resultado una caída de voltaje más o menos bajo diversas condiciones de carga, o a la intervención activa con dispositivos para el propósito específico de ajustar voltaje.

En sistemas de energía eléctrica es una cantidad adimensional definida en el extremo receptor de una línea de transmisión como (Grainger, 1996):

$$\%VR = ((V_{nl} - V_{fl}) / V_{fl}) * 100 \quad (2.43)$$

Donde  $V_{nl}$  es tensión en vacío y  $V_{fl}$  es tensión a plena carga. El porcentaje de regulación de voltaje de una línea de transmisión ideal, definida por una línea de transmisión con resistencia cero y reactancia, sería igual a cero debido a  $V_{nl}$  igual a  $V_{fl}$  como resultado de que no hay caída de tensión a lo largo de la línea. Esta es la razón por la cual un valor menor de regulación de voltaje suele ser beneficioso, lo que indica que la línea está más cerca de ideal.

La fórmula de regulación de voltaje se puede visualizar con lo siguiente: "Considere la potencia suministrada a una carga tal que la tensión en la carga sea la tensión nominal de la

carga  $V_{nominal}$ , si entonces la carga desaparece, la tensión en el punto de la carga aumentará a  $V_{nl}$ . "

La regulación del voltaje en las líneas de transmisión se produce debido a la impedancia de la línea entre sus extremos de envío y recepción. Las líneas de transmisión tienen intrínsecamente alguna cantidad de resistencia, inductancia y capacitancia que cambian todo el voltaje continuamente a lo largo de la línea. Tanto la magnitud como el ángulo de fase del voltaje cambian a lo largo de una línea de transmisión real. Los efectos de la impedancia de línea se pueden modelar con circuitos simplificados, como la aproximación de línea corta (menos precisa), la aproximación de línea media (más precisa) y la aproximación de línea larga (la más precisa).

### **2.5.1 Regulación del Alimentador de Distribución**

Las utilidades eléctricas tienen como objetivo proporcionar servicio a los clientes a un nivel de voltaje específico, por ejemplo, 220V o 240V. Sin embargo, debido a las Leyes de Kirchhoff, la magnitud del voltaje y, por lo tanto, el voltaje de servicio a los clientes variarán de hecho a lo largo de un conductor como un alimentador de distribución. Dependiendo de la ley y la práctica local, el voltaje real de servicio dentro de una banda de tolerancia tal como  $\pm 5\%$  o  $\pm 10\%$  puede ser considerado aceptable. Con el fin de mantener la tensión dentro de la tolerancia bajo condiciones de carga cambiantes, se utilizan tradicionalmente diversos tipos de dispositivos:

- Un cambiador de tomas de carga (LTC) en el transformador de subestación, que cambia la relación de vueltas en respuesta a la corriente de carga y, de este modo, ajusta la tensión suministrada en el extremo de envío del alimentador;
- Reguladores de tensión, que son esencialmente transformadores con cambiadores de toma para ajustar el voltaje a lo largo del alimentador, para compensar la caída de tensión sobre la distancia; y

- Condensadores que reducen la caída de tensión a lo largo del alimentador reduciendo el flujo de corriente a cargas que consumen potencia reactiva.

Una nueva generación de dispositivos para la regulación de tensión basada en la tecnología de estado sólido se encuentra en las primeras etapas de comercialización.

La regulación de la distribución implica un "punto de regulación": el punto en el cual el equipo intenta mantener un voltaje constante. Los clientes más allá de este punto observan un efecto esperado: mayor voltaje a carga ligera y menor voltaje a carga alta. Los clientes más cercanos a este punto experimentan el efecto opuesto: mayor voltaje a alta carga y menor voltaje a carga ligera.

### **2.5.2 Reguladores De Voltaje**

Un regulador de voltaje está diseñado para mantener automáticamente un nivel de voltaje constante. Un regulador de voltaje puede usar un diseño de avance simple o puede incluir retroalimentación negativa. Puede utilizar un mecanismo electromecánico, o componentes electrónicos. Dependiendo del diseño, se puede usar para regular uno o más voltajes de CA o CC.

Los reguladores electrónicos de voltaje se encuentran en dispositivos tales como fuentes de alimentación de computadoras donde estabilizan las tensiones de corriente continua usadas por el procesador y otros elementos. En los alternadores de automóviles y centrales eléctricas centrales, los reguladores de tensión controlan la salida de la planta. En un sistema de distribución de energía eléctrica, se pueden instalar reguladores de tensión en una subestación o a lo largo de líneas de distribución para que todos los clientes reciban un voltaje constante independientemente de cuánta energía se extrae de la línea.

A medida que la tecnología ha avanzado, se han creado diferentes formas de realizar un regulador de voltaje, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

*Reguladores Electromecánicos:* En reguladores electromecánicos, la regulación de voltaje se logra fácilmente enrollando el cable de detección para hacer un electroimán. El campo magnético producido por la corriente atrae un núcleo ferroso en movimiento retenido bajo tensión de resorte o tracción gravitacional. A medida que aumenta el voltaje, también lo hace la corriente, fortaleciendo el campo magnético producido por la bobina y tirando del núcleo hacia el campo. El imán está físicamente conectado a un interruptor mecánico de energía, que se abre cuando el imán se mueve en el campo. A medida que disminuye el voltaje, también lo hace la corriente, liberando la tensión del resorte o el peso del núcleo y haciendo que se retraiga. Esto cierra el interruptor y permite que la energía fluya una vez más.

Si el diseño del regulador mecánico es sensible a pequeñas fluctuaciones de voltaje, el movimiento del núcleo del solenoide puede utilizarse para mover un selector a través de un rango de resistencias o devanados del transformador para subir gradualmente la tensión de salida hacia arriba o hacia abajo o para girar la posición de un regulador AC de bobina móvil.

Los primeros generadores de automóviles y alternadores tenían un regulador de voltaje mecánico que usaba uno, dos o tres relés y varias resistencias para estabilizar la salida del generador a un poco más de 6 o 12 V, independientemente de las rpm del motor o de la carga variable en el sistema eléctrico del vehículo. Esencialmente, los relés emplearon modulación de anchura de impulso para regular la salida del generador, controlando la corriente de campo que llega al generador (o alternador) y de esta manera controlando la tensión de salida que produce de vuelta al generador e intentando ejecutarla como un generador motor. Los diodos rectificadores de un alternador realizan automáticamente esta función para que no se requiera un relé específico; esto simplificó apreciablemente el diseño del regulador.

Los diseños más modernos utilizan ahora la tecnología de estado sólido (transistores) para realizar la misma función que los relés en los reguladores electromecánicos.

Los reguladores electromecánicos se utilizan para la estabilización de la tensión de la red.

*Regulador De Voltaje Automático:* Un generador, tal como se utiliza en las centrales eléctricas o en los sistemas de energía de reserva, tendrá regulador de voltaje automático (AVR) para estabilizar su voltaje a medida que cambia la carga en el generador. Los primeros reguladores de tensión automáticos para generadores fueron los sistemas electromecánicos, pero un AVR moderno utiliza dispositivos de estado sólido. Un AVR es un sistema de control de realimentación, que mide el voltaje de salida del generador, compara esa salida con un punto de consigna y genera una señal de error que se usa para ajustar la excitación del generador. A medida que la corriente de excitación en el bobinado de campo del generador aumenta, su voltaje de terminal aumentará. El AVR controlará la corriente utilizando dispositivos electrónicos de potencia; generalmente una pequeña parte de la salida del generador se utiliza para proporcionar corriente para el bobinado de campo. Cuando un generador está conectado en paralelo con otras fuentes tales como una red de transmisión eléctrica, el cambio de la excitación tiene más efecto sobre la potencia reactiva producida por el generador que sobre su voltaje terminal, que es fijado en su mayor parte por el sistema de potencia conectado. Cuando se conectan varios generadores en paralelo, el sistema AVR tendrá circuitos para asegurar que todos los generadores funcionen con el mismo factor de potencia. Los AVR en los generadores de las centrales eléctricas conectados a la red pueden tener funciones de control adicionales para ayudar a estabilizar la red eléctrica contra los problemas debido a una pérdida repentina de carga o fallos.

### **2.5.3 Tipos De Reguladores De Voltaje**

Existen principalmente dos tipos de reguladores de tensión: Reguladores lineales de tensión y reguladores de voltaje de conmutación; estos se utilizan en aplicaciones más amplias.

El regulador de voltaje lineal es el tipo más fácil de reguladores de voltaje. Está disponible en dos tipos, son compactos y se utilizan en baja potencia, es decir, en sistemas de baja tensión.

Existen dos tipos de reguladores lineales de tensión: Serie y Shunt.

Hay tres tipos de reguladores de voltaje de conmutación: Step up, Step down y reguladores de voltaje del inversor.

*Regulador Lineal:* El regulador lineal actúa como un divisor de voltaje. En la región de Ohmic, utiliza FET. La resistencia del regulador de tensión varía con la carga, lo que resulta en una tensión de salida constante.

#### *Ventajas Del Regulador De Voltaje Lineal*

- Proporciona un voltaje de rizado de salida bajo
- Tiempo de respuesta rápido para cargar o cambiar la línea
- Baja interferencia electromagnética y menos ruido

#### *Desventajas Del Regulador De Voltaje Lineal*

- La eficiencia es muy baja
- Requiere espacio grande - se necesita disipador de calor
- No se puede aumentar el voltaje por encima de la entrada

*Regulador de Voltaje Serie:* Un regulador de voltaje en serie utiliza un elemento variable colocado en serie con la carga. Cambiando la resistencia de ese elemento en serie, el voltaje caído a través de él se puede cambiar. Y, el voltaje a través de la carga permanece constante.

La cantidad de corriente extraída es utilizada efectivamente por la carga; esta es la principal ventaja del regulador de voltaje en serie. Incluso cuando la carga no requiere ninguna corriente, el regulador en serie no extrae la corriente completa. Por lo tanto, un regulador en serie es considerablemente más eficiente que el regulador de voltaje de derivación.

*Regulador de Voltaje de Derivación:* Un regulador de voltaje de derivación funciona proporcionando una trayectoria desde la tensión de alimentación a tierra a través de una

resistencia variable. La corriente a través del regulador de derivación se desvía de la carga y fluye inútilmente al suelo, haciendo que esta forma sea generalmente menos eficiente que el regulador en serie. Sin embargo, es más simple, a veces consistente sólo en un diodo de referencia de tensión, y se utiliza en circuitos de muy poca potencia en los que la corriente desperdiciada es demasiado pequeña para ser de interés. Esta forma es muy común para los circuitos de referencia de voltaje. Un regulador de derivación generalmente sólo puede absorber la corriente.

*Regulador de Voltaje de Conmutación:* Un regulador de conmutación activa y desactiva rápidamente un dispositivo serie. El ciclo de trabajo del interruptor fija la cantidad de carga transferida a la carga. Esto es controlado por un mecanismo de realimentación similar al de un regulador lineal. Los reguladores de conmutación son eficientes porque el elemento de la serie es totalmente conductor o desconectado porque disipa casi ninguna energía. Los reguladores de conmutación son capaces de generar tensiones de salida que son más altas que la tensión de entrada, el regulador de voltaje de conmutación se conecta y desconecta rápidamente para alterar la salida. Requiere un oscilador de control y también carga componentes de almacenamiento.

En un regulador de conmutación con modulación de frecuencia de pulso variando la frecuencia, el ciclo de trabajo constante y el espectro de ruido impuesto por PRM varían; es más difícil filtrar ese ruido.

Un regulador de conmutación con modulación de ancho de pulso, frecuencia constante, ciclo de trabajo variable, es eficiente y fácil de filtrar el ruido.

En un regulador de conmutación, la corriente en modo continuo a través de un inductor nunca cae a cero. Permite mayor potencia de salida. Ofrece un mejor rendimiento.

En un regulador de conmutación, la corriente en modo discontinuo a través del inductor cae a cero. Ofrece un mejor rendimiento cuando la corriente de salida es baja u opuesta, a diferencia de los reguladores lineales.

*Ventajas de Topologías de Conmutación:* Las principales ventajas de una fuente de alimentación conmutada son la eficiencia, el tamaño y el peso. También es un diseño más complejo, que es capaz de manejar una mayor eficiencia energética. El regulador de voltaje de conmutación puede proporcionar salida, que es mayor o menor que o que invierte la tensión de entrada.

#### *Desventajas De Las Topologías De Conmutación*

- Mayor tensión de ondulación de salida
- Tiempo de recuperación transitorio más lento
- Produce una salida muy ruidosa
- Mas costoso

*Regulador de Voltaje Step Up:* Los convertidores de conmutación escalonados, también llamados reguladores de conmutación de refuerzo, proporcionan una salida de voltaje más alto aumentando la tensión de entrada. El voltaje de salida está regulado, siempre y cuando la potencia extraída esté dentro de la especificación de potencia de salida del circuito. Para la conducción de cuerdas de LED, se utiliza el regulador de voltaje de conmutación.

*Regulador de Voltaje Step Down:* Reduce la tensión de entrada. Si la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, entonces El convertidor descendente es equivalente al transformador de corriente continua, en el que la relación de vueltas está en el intervalo de 0-1.

*Regulador de Voltaje del Inversor:* También se llama inversor de voltaje. Mediante el uso de esta configuración, es posible subir, bajar o invertir la tensión según el requisito.

El voltaje de salida es de polaridad opuesta de la entrada. Esto se logra mediante un diodo polarizado de polarización inversa de polarización inversa durante los tiempos de desconexión, produciendo corriente y cargando el condensador para la producción de voltaje durante los tiempos de apagado. Mediante el uso de este tipo de regulador de conmutación, el 90% de eficiencia se puede lograr.

*Regulador de Voltaje del Alternador:* Los alternadores producen la corriente que se requiere para satisfacer las demandas eléctricas de un vehículo cuando el motor funciona. También repone la energía que se utiliza para arrancar el vehículo. Un alternador tiene la capacidad de producir más corriente a velocidades más bajas que los generadores de CC que una vez fueron utilizados por la mayoría de los vehículos. El alternador tiene dos partes:

Estator - Es un componente estacionario, que no se mueve. Contiene un conjunto de conductores eléctricos enrollados en bobinas sobre un núcleo de hierro.

Rotor - Este es el componente móvil que produce un campo magnético giratorio por cualquiera de las tres formas siguientes: (i) inducción (ii) imanes permanentes (iii) usando un excitador.

## **2.6 Metodo para la ubicación del regulador**

El método utilizado para la ubicación del banco de reguladores fue la técnica de búsqueda exhaustiva, este método consiste en buscar todas las posibles ubicaciones que se le puedan dar al banco de reguladores probar cada una de ellas para comparar los resultados y de esta manera encontrar el punto óptimo para la ubicación del regulador.

# **CAPITULO III**

## **ANÁLISIS DEL CIRCUITO DE DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DEL USO DEL PROGRAMA PSAT/MATLAB®**

El circuito utilizado para este trabajo está conformado por dos niveles de tensión (34.5 y 13.8) KV, lo cual indica que se está trabajando a niveles de distribución primaria, presenta cargas en los dos niveles de tensión.

### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO.**

En la tabla 3.1 se especifican las bases en las cuales se trabajó el sistema para las simulaciones y para todos los cálculos necesarios.

**Tabla 3.1 Bases del sistema.**

<b>Potencia (MVA)</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Frecuencia (HZ)</b>
100	13.8	60

En la figura 3.1 se puede observar el circuito el cual fue extraído de los ejemplos cargados en la librería del software PSAT, se pueden ver todas las conexiones y los elementos que lo conforman. Como se puede observar en la figura 3.1 el circuito está compuesto por mallas, tanto en el lado de 13.8kV como en el lado de 34.5kV, esto se debe a que podría estar referido a un circuito de una zona céntrica en cualquier parte donde tenga múltiples conexiones y diferentes cargas conectadas.

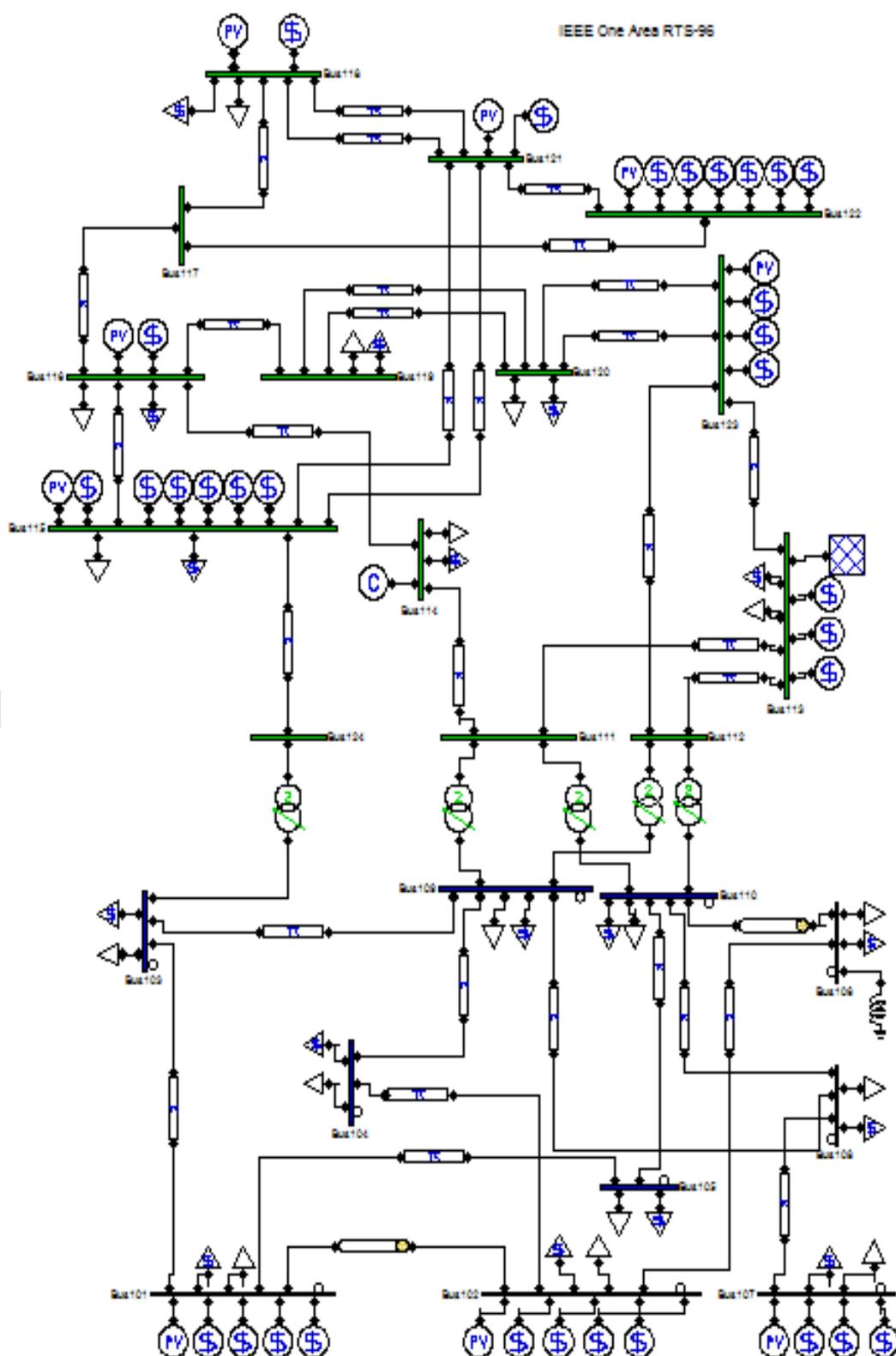


Figura3.1: Circuito de distribución primaria.

Las barras del circuito se pueden observar en la tabla 3.2, la cual contiene de forma detallada toda la información en cuanto a estos elementos.

**Tabla 3.2 Descripción de barras del sistema.**

<b>Barra</b>	<b>Tensión (kV)</b>
101	13.8
102	13.8
103	13.8
104	13.8
105	13.8
106	13.8
107	13.8
108	13.8
109	13.8
110	13.8
111	34.5
112	34.5
113	34.5
114	34.5
115	34.5
116	34.5
117	34.5
118	34.5
119	34.5
120	34.5
121	34.5
122	34.5
123	34.5
124	34.5

La tabla 3.3 contiene la información de las líneas de transmisión y todos sus parámetros.

**Tabla 3.3 Líneas de transmisión.**

<b>Barra origen</b>	<b>Barra destino</b>	<b>Potencia (MVA)</b>	<b>Voltaje (kV)</b>	<b>Frecuencia (HZ)</b>	<b>Resistencia (p.u. <math>\Omega</math>/Km)</b>	<b>Reactancia (p.u. H/Km)</b>	<b>Suceptancia (p.u. F/Km)</b>
1	2	100	13.8	60	0.0026	0.0139	0.4611
1	3	100	13.8	60	0.0546	0.2112	0.0572
1	5	100	13.8	60	0.0218	0.0845	0.0229
2	4	100	13.8	60	0.0328	0.1267	0.0343
2	6	100	13.8	60	0.0497	0.192	0.052
9	3	100	13.8	60	0.0308	0.119	0.0322
10	5	100	13.8	60	0.0228	0.0883	0.0239
3	24	100	13.8	60	0.0023	0.0839	0
10	6	100	13.8	60	0.0139	0.0605	2.459
7	8	100	13.8	60	0.0159	0.0614	0.0166
9	8	100	13.8	60	0.0427	0.1651	0.0447
9	4	100	13.8	60	0.0427	0.1651	0.0447
10	8	100	13.8	60	0.0427	0.1651	0.0447
13	11	100	34.5	60	0.0006	0.048	0.1
14	11	100	34.5	60	0.0054	0.0418	0.0879
9	11	100	13.8	60	0.0023	0.0839	0
13	12	100	34.5	60	0.0006	0.048	0.1
23	12	100	34.5	60	0.0124	0.0966	0.203
13	23	100	34.5	60	0.00116	0.0865	0.1818
16	14	100	34.5	60	0.005	0.0589	0.0818
16	15	100	34.5	60	0.0022	0.0173	0.0364
21	15	100	34.5	60	0.0063	0.049	0.103
21	15	100	34.5	60	0.0063	0.049	0.103
15	24	100	34.5	60	0.0067	0.0519	0.1091

Barra origen	Barra destino	Potencia (MVA)	Voltaje (kV)	Frecuencia (HZ)	Resistencia (p.u. $\Omega$ /Km)	Reactancia (p.u. H/Km)	Suceptancia (p.u. F/Km)
17	16	100	34.5	60	0.003	0.0259	0.0545
19	16	100	34.5	60	0.003	0.0231	0.0485
18	17	100	34.5	60	0.0018	0.0144	0.0303
9	12	100	13.8	60	0.0023	0.0839	0
22	17	100	34.5	60	0.0135	0.1053	0.2212
18	21	100	34.5	60	0.0033	0.0269	0.0545
18	21	100	34.5	60	0.0033	0.0269	0.0545
19	20	100	34.5	60	0.0051	0.0396	0.0833
19	20	100	34.5	60	0.0051	0.0396	0.0833
23	20	100	34.5	60	0.0028	0.0216	0.0455
23	20	100	34.5	60	0.0028	0.0216	0.0455
21	22	100	34.5	60	0.0087	0.0678	0.1424
10	12	100	13.8	60	0.0023	0.0839	0
10	11	100	13.8	60	0.0023	0.0839	0

En la tabla 3.4 se observan las cargas que se encuentran conectadas en el circuito, se especifica cuáles de ellas están en cada nivel de tensión y los parámetros de mayor importancia de ellas.

**Tabla 3.4 Cargas conectadas.**

Carga #	Potencia (MVA)	Voltaje (KV)	Potencia activa (p.u.)	Potencia reactiva (p.u.)
1	100	13.8	1.08	0.22
2	100	13.8	0.97	0.2
3	100	13.8	3.6	0.37

Carga #	Potencia (MVA)	Voltaje (kV)	Potencia activa (p.u.)	Potencia reactiva (p.u.)
4	100	13.8	1.48	0.15
5	100	13.8	0.71	0.14
6	100	13.8	2.72	0.28
7	100	13.8	1.5	0.25
8	100	13.8	3.42	0.35
9	100	13.8	3.5	0.36
10	100	13.8	3.9	0.4
13	100	34.5	5.3	0.54
14	100	34.5	3.88	0.39
15	100	34.5	6.34	0.64
16	100	34.5	2	0.2
18	100	34.5	6.66	0.68
19	100	34.5	3.62	0.37
20	100	34.5	2.56	0.26

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA PSAT®.

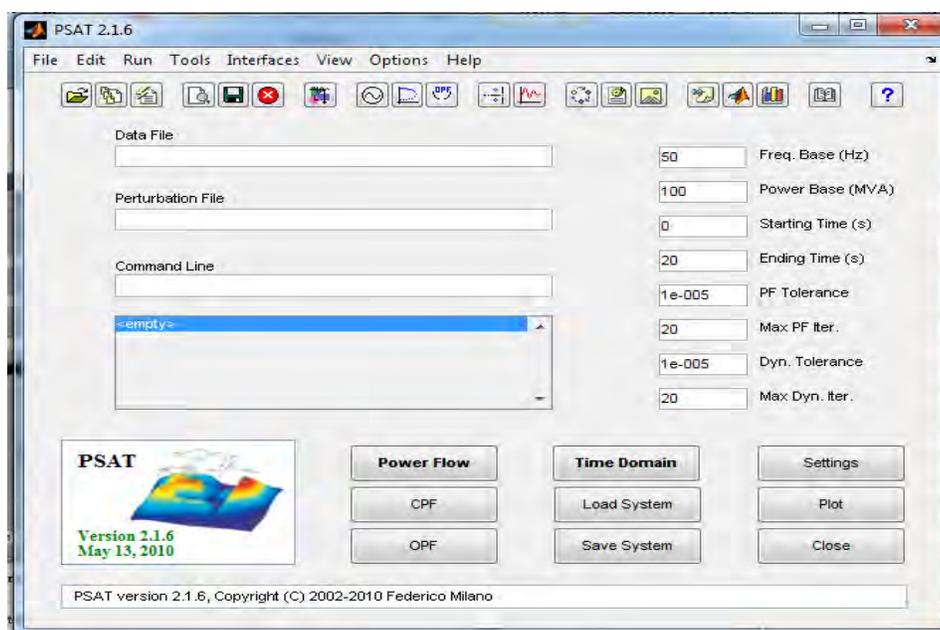
Los sistemas eléctricos de potencia contienen una gran cantidad de nodos eléctricos o barras. Es por ello que cada vez se desarrollan más programas, con la finalidad de presentar los resultados de forma que el usuario pueda evaluar el estado del sistema de una forma rápida, a través de la adecuada visualización de la información, sobre todo cuando se intentan análisis de los flujos de carga reales de la red, la potencia programada y la capacidad de transmisión del sistema.

Con el avance de la tecnología se ha permitido incorporar una gran cantidad de software a los estudios de estabilidad para un determinado sistema de potencia. Por esta razón, este trabajo no escapará de la implementación de un programa que permita simular el circuito con

el que se trabajó, con la finalidad de que los resultados arrojados sean más precisos y de esta manera, poder conocer más fácilmente los nodos más débiles y los perfiles de tensión que se obtendrán al momento de efectuar las soluciones planteadas. El modelado de todo el sistema de potencia se realizó con la ayuda del programa PSAT® *Power System Análisis Toolbox*.

PSAT® es una herramienta de MATLAB® que permite realizar flujos de carga además de un sin fin de análisis a los circuitos de potencia, también permite una mayor facilidad al momento de trabajar con circuitos de proporciones mayores que se consiguen en cualquier parte del mundo.

Esta herramienta cuenta con una interfaz gráfica muy amigable para trabajar, tanto para acceder a su librería como para dibujar circuitos en el programa. Para acceder a este programa se debe hacer desde MATLAB® usando el comando `psat` luego de cargar la carpeta que contiene el programa. En la figura 3.2 se observa la interfaz que se consigue el usuario una vez que entra al programa. En esta ventana el usuario también puede modificar algunos parámetros con los cuales trabaja por defecto el programa, como la frecuencia, la base de potencia, la tolerancia del factor de potencia, entre otros.



**Figura 3.2 Interfaz de inicio de PSAT.**

La librería se muestra en una interfaz muy amigable para el usuario, también permite abrir los archivos cargados en el programa o crear nuevos archivos, esta se muestra en la figura 3.3.

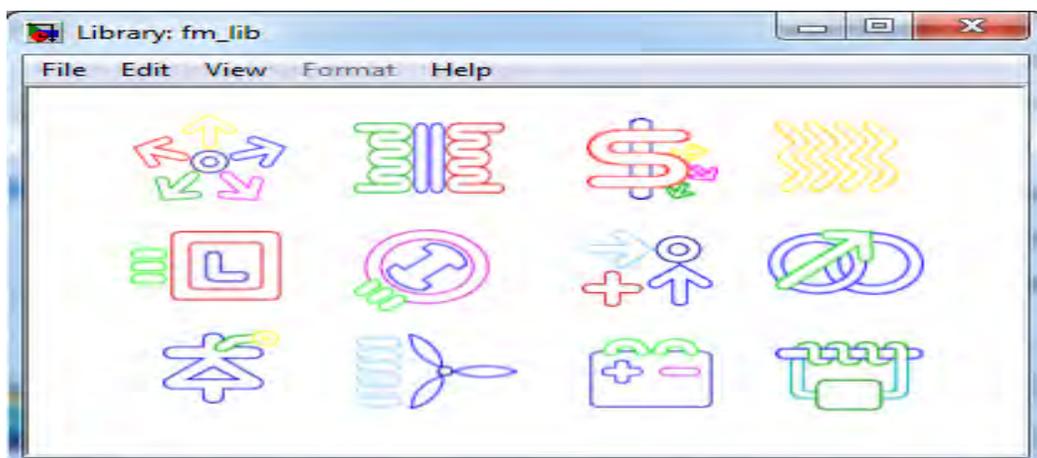


Figura 3.3 Interfaz de librería de PSAT.

Luego de buscar el archivo en el cual se va a trabajar, se procede a la interfaz de inicio del programa para realizar el flujo de carga, se debe cargar el circuito de estudio y al realizar el flujo de carga se pueden observar los resultados en otra interfaz la cual se muestra en la figura 3.4.

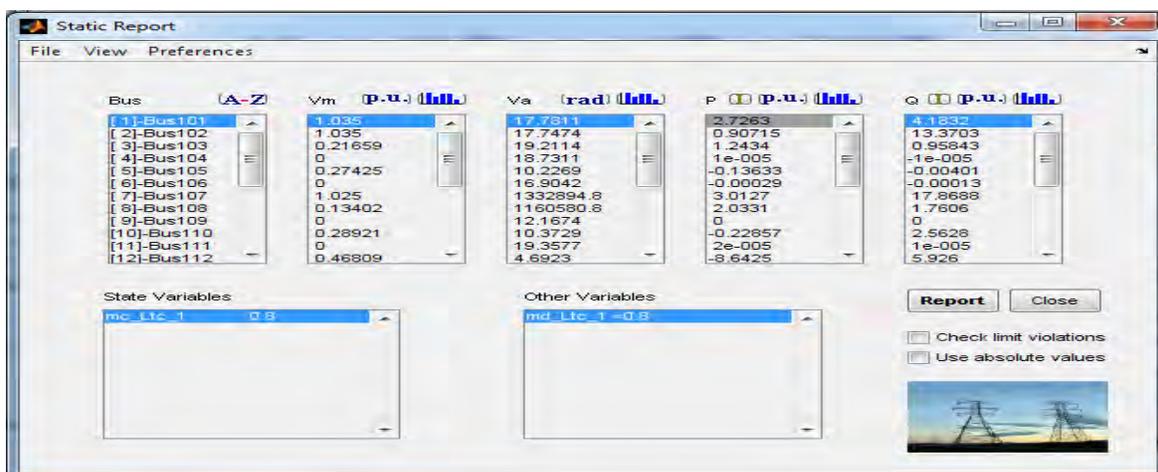


Figura 3.4 Interfaz reportes estáticos de PSAT.

Existen muchas otras funciones que se pueden realizar con este programa, en este trabajo se resaltan las anteriormente mencionadas ya que fueron las más utilizadas para realizar las simulaciones correspondientes al circuito estudiado.

### 3.2 ANÁLISIS DEL CIRCUITO.

Con la ayuda del software PSAT® se realizaron las respectivas simulaciones con el fin de obtener los resultados en cuanto al valor de las tensiones en cada barra del circuito de potencia, para de esta manera, verificar la existencia de algún problema de este tipo en el circuito estudiado. Se realizó un flujo de carga al circuito, usando los valores bases que se definen en la tabla 3.1 y los resultados se presentan a continuación en la tabla 3.5.

En la tabla 3.5 se muestran los voltajes en cada barra del sistema, los cuales deberán estar por encima de 0.9 en p.u. para que permanezcan dentro de la norma.

**Tabla 3.5 Tensión en las barras del circuito.**

<b>Barra</b>	<b>Voltaje (p.u.)</b>
101	1.035
102	1.035
103	0.91227
104	0.92939
105	0.85986
106	0.88317
107	1.025
108	0.91183
109	0.89495
110	0.88777
111	0.90726
112	0.90291

Barra	Voltaje (p.u.)
113	1.02
114	0.98
115	1.014
116	1.017
117	1.0397
118	1.05
119	1.0081
120	1.0259
121	1.05
122	1.05
123	1.05
124	0.95512

En la figura 3.2 se puede observar un gráfico de barras en el cual se muestran los voltajes en cada barra del circuito.

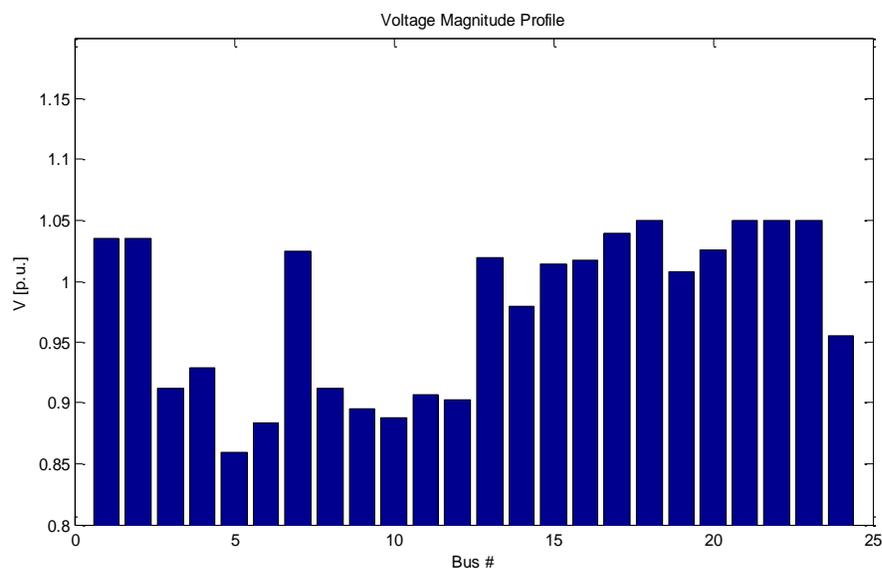


Figura 3.5 Tensión en barras.

Observando la tabla 3.5 y la figura 3.2, se puede notar que efectivamente existe un número de barras del sistema que presentan caída de tensión, como era de esperarse, esto nos indica la necesidad de aplicar una solución a este problema. Las barras con caída de tensión mayor al 10% son las 105, 106, 109 y 110.

La solución que se plantea en este trabajo es la implementación de un banco de reguladores y la ubicación del punto óptimo mediante el uso de técnicas de búsqueda exhaustiva, para esto se van a correr flujos de carga variando la ubicación del banco de reguladores y observando su comportamiento para cada ubicación, dando al final el punto con el mejor resultado para el circuito.

En la tabla 3.5 se observa que las barras con mayor tensión fueron la 101 y la 102, esto en el lado de 13.8kV, es por esta razón que la ubicación del banco de reguladores puede tener como barra de origen cualquiera de estas dos barras, en este trabajo se usará la barra 101 como barra de origen y se probará colocando como barra destino todas las demás barras del lado de 13.8kV.

Para el lado de 34.5kV, las barras con mayor tensión según la tabla 3.5 fueron la 118, 121, 122, 123. Por esta razón para el lado de 34.5kV se puede usar cualquiera de estas barras origen, en este trabajo se usará la barra 118 como origen y todas las demás como barra destino para la ubicación del banco de reguladores.

Los resultados de las simulaciones se mostrarán en tablas, las cuales van a indicar la barra de origen, la barra destino y las tensiones de cada barra del circuito tanto sin el banco de reguladores como con el banco, esto con el fin de establecer una comparación directa entre ambos casos. También se complementarán los resultados con un gráfico de barras de tensión.

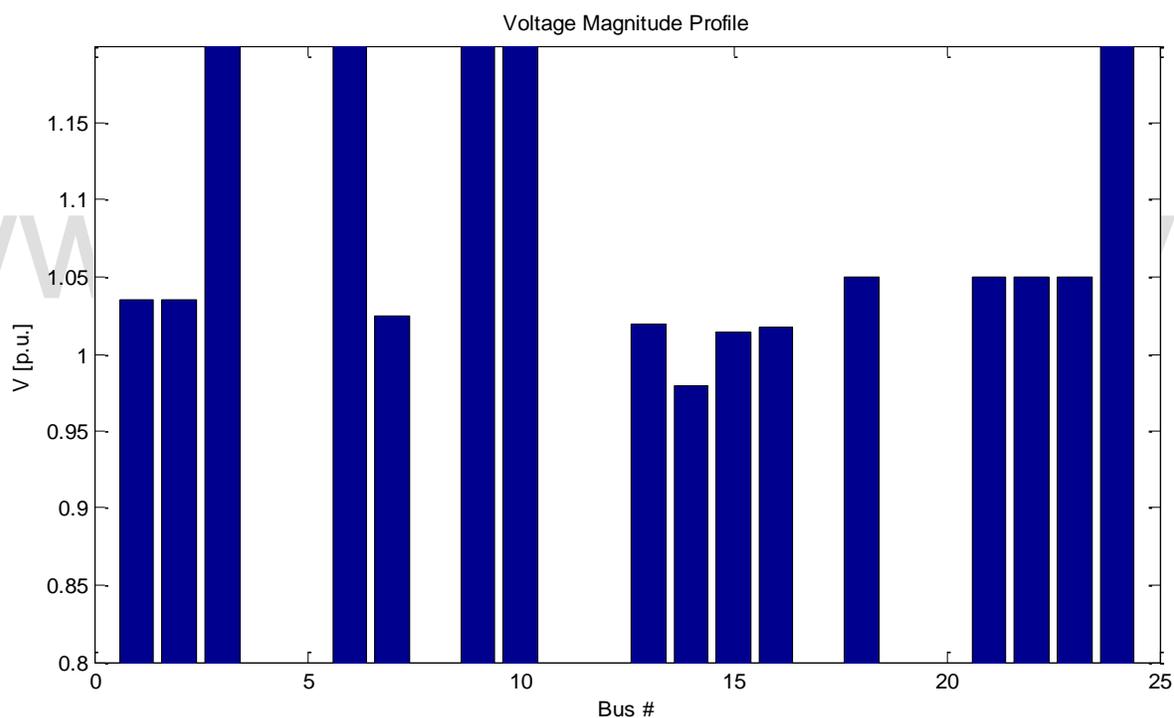
### 3.3 SIMULACIONES Y RESULTADOS.

En la tabla 3.6 se observan los resultados para el banco de reguladores ubicado en el lado de 13.8kV usando como barra origen la 101 y como barra destino la 102.

**Tabla 3.6 Tensiones en barras para la primera ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	14.2951
104	0.92939	104	0
105	0.85986	105	0
106	0.88317	106	3.3322
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0
109	0.89495	109	110738.5
110	0.88777	110	1047092.5
111	0.90726	111	0
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	0.5104

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	3.345



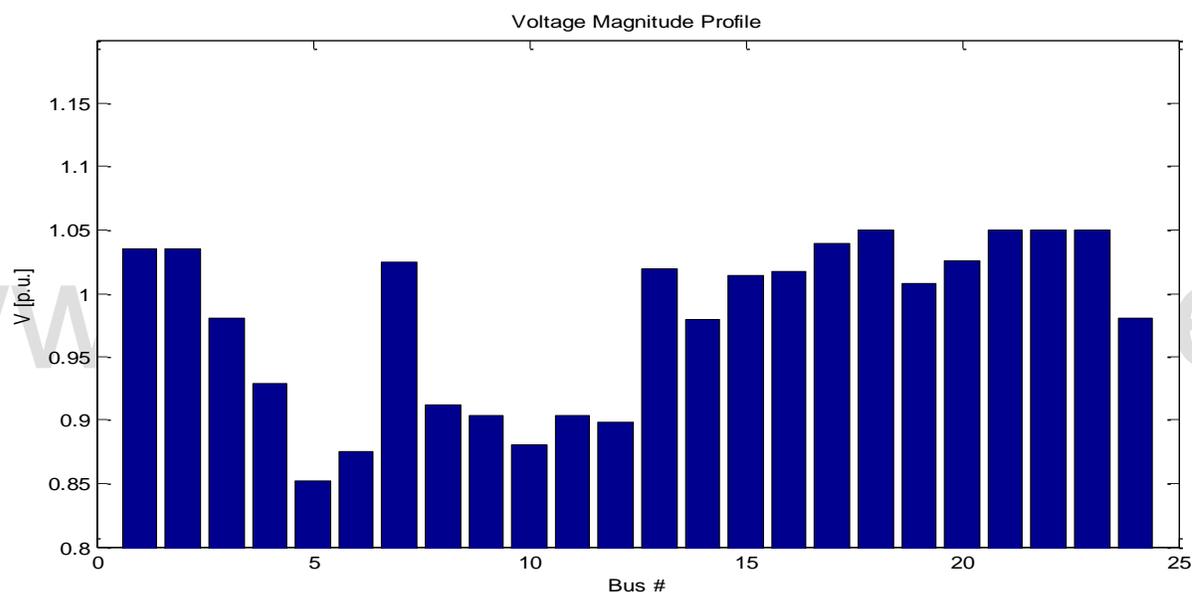
**Figura 3.6 Tensiones para la primera ubicación.**

La tabla 3.7 contiene los resultados de los voltajes en cada barra del circuito ubicando el regulador entre la barra 101 y la 103.

**Tabla 3.7 Tensiones en barras para la segunda ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.98031
104	0.92939	104	0.9286
105	0.85986	105	0.85255
106	0.88317	106	0.87565
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91205
109	0.89495	109	0.90356
110	0.88777	110	0.88027
111	0.90726	111	0.90397
112	0.90291	112	0.8987
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0078
120	1.0259	120	1.0257

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.98095



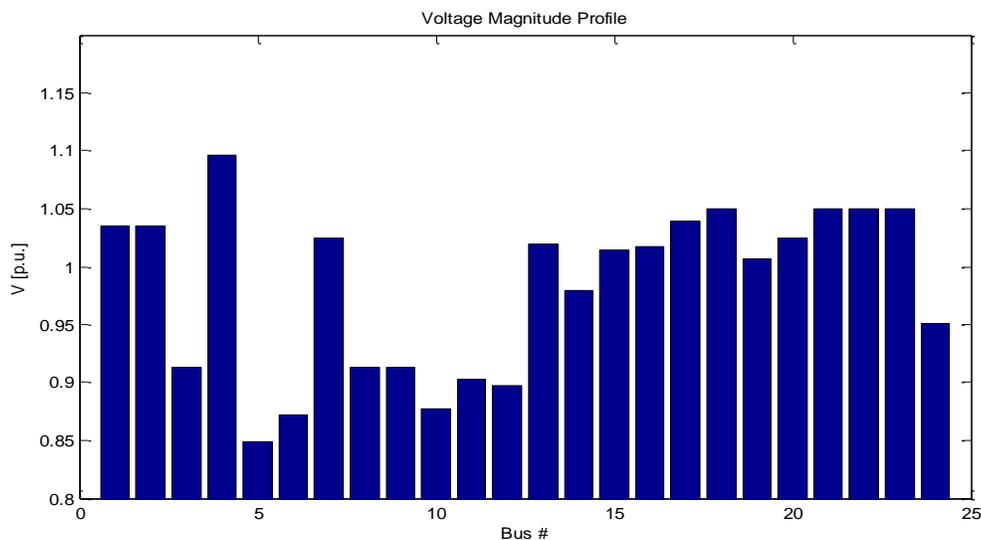
**Figura 3.7 Tensiones para la segunda ubicación.**

La tabla 3.8 tiene los resultados para el regulador ubicado entre la barra 101 y la 104.

**Tabla 3.8 Tensiones en barras para la tercera ubicación.**

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035

<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.913388
104	0.92939	104	1.0968
105	0.85986	105	0.84923
106	0.88317	106	0.87173
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91327
109	0.89495	109	0.91277
110	0.88777	110	0.87688
111	0.90726	111	0.90245
112	0.90291	112	0.89721
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0071
120	1.0259	120	1.0252
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95139



**Figura 3.8 Tensiones para la tercera ubicación.**

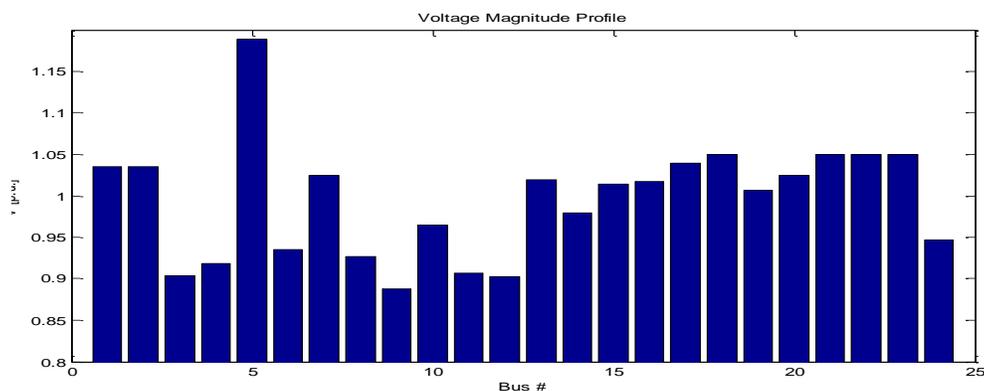
La tabla 3.9 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 105.

www.bdigital.ula.ve

**Tabla 3.9 Tensiones en barras para la cuarta ubicación.**

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.90329
104	0.92939	104	0.9183
105	0.85986	105	1.1886
106	0.88317	106	0.93486
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.92647
109	0.89495	109	0.88737

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
110	0.88777	110	0.96477
111	0.90726	111	0.90719
112	0.90291	112	0.90256
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0067
120	1.0259	120	1.0249
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.94635



**Figura 3.9 Tensiones para la cuarta ubicación.**

La tabla 3.10 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 106.

**Tabla 3.10 Tensiones en barras para la quinta ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.89277
104	0.92939	104	0.90701
105	0.85986	105	0.92021
106	0.88317	106	1.0804
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.92092
109	0.89495	109	0.8752
110	0.88777	110	0.95036
111	0.90726	111	0.90057
112	0.90291	112	0.89475
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0062
120	1.0259	120	1.0245
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.93952

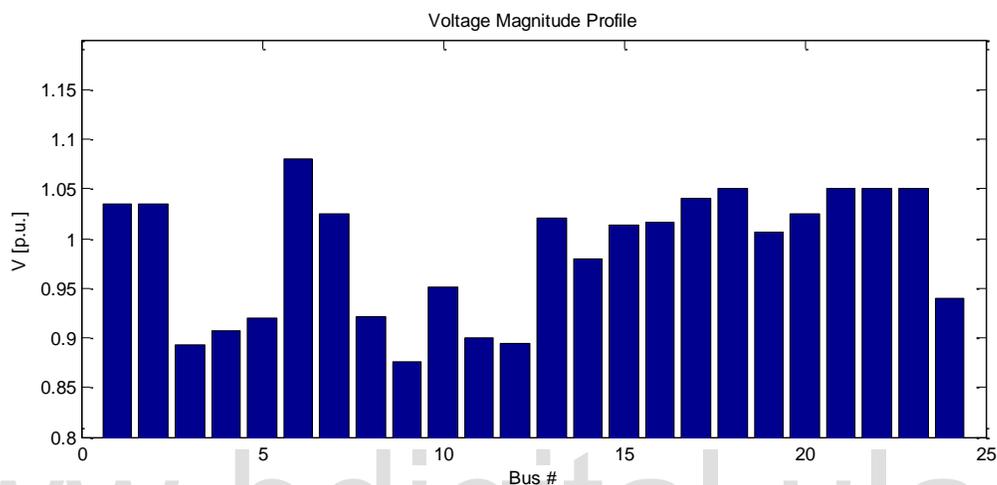


Figura 3.10 Tensiones para la quinta ubicación.

La tabla 3.11 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 107.

Tabla 3.11 Tensiones en barras para la sexta ubicación.

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.90979
104	0.92939	104	0.92576
105	0.85986	105	0.85996
106	0.88317	106	0.88151

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91639
109	0.89495	109	0.89431
110	0.88777	110	0.88792
111	0.90726	111	0.90668
112	0.90291	112	0.90246
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0078
120	1.0259	120	1.0257
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95248

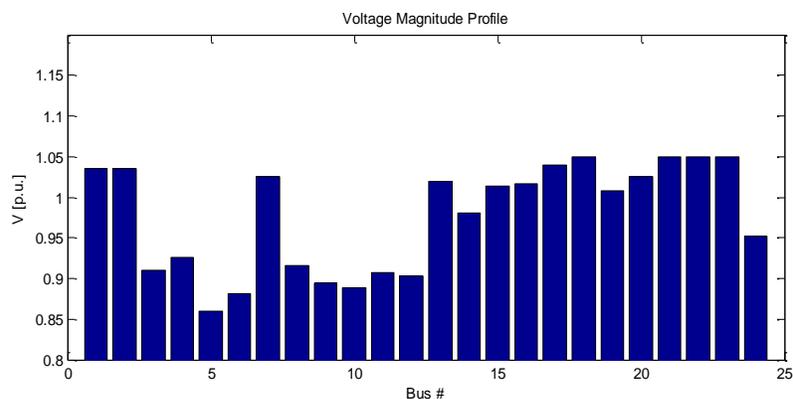


Figura 3.11 Tensiones para la sexta ubicación.

La tabla 3.12 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 108

**Tabla 3.12 Tensiones en barras para la séptima ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.90951
104	0.92939	104	0.92484
105	0.85986	105	0.86959
106	0.88317	106	0.88423
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.96802
109	0.89495	109	0.89935
110	0.88777	110	0.89415
111	0.90726	111	0.9062
112	0.90291	112	0.9019
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0074
120	1.0259	120	1.0254
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95083

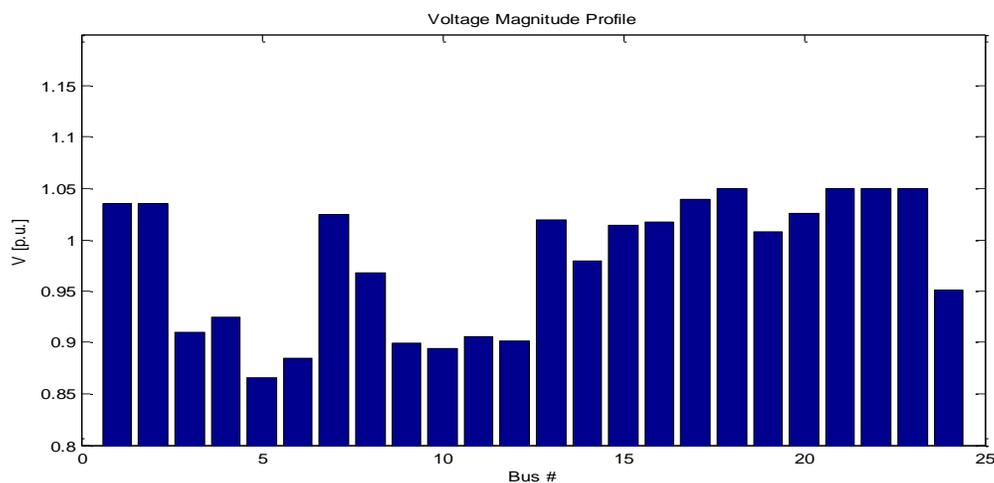


Figura 3.12 Tensiones para la séptima ubicación.

La tabla 3.13 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 109.

Tabla 3.13 Tensiones en barras para la octava ubicación.

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.92429
104	0.92939	104	0.9425
105	0.85986	105	0.86361
106	0.88317	106	0.88601

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91918
109	0.89495	109	0.92572
110	0.88777	110	0.89164
111	0.90726	111	0.91072
112	0.90291	112	0.90699
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0079
120	1.0259	120	1.0258
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95919

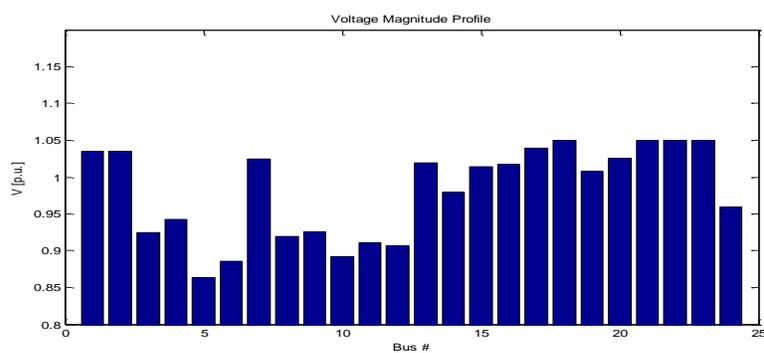


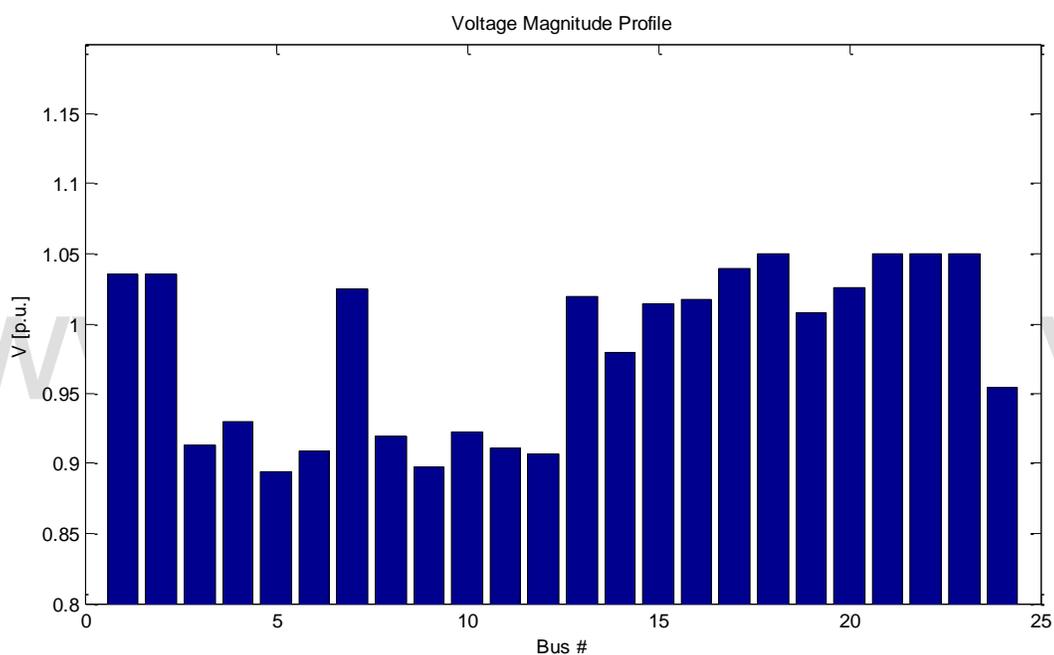
Figura 3.13 Tensiones para la octava ubicación.

La tabla 3.14 contiene los resultados ubicando el regulador entre la barra 101 y la 110.

**Tabla 3.14 Tensiones en barras para la novena ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.91265
104	0.92939	104	0.92955
105	0.85986	105	0.89398
106	0.88317	106	0.90862
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91976
109	0.89495	109	0.89733
110	0.88777	110	0.92306
111	0.90726	111	0.91063
112	0.90291	112	0.90686
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0078
120	1.0259	120	1.0257

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95441



**Figura 3.14 Tensiones para la novena ubicación.**

En la tabla 3.15 se puede observar un promedio de voltaje en p.u. de todas las barras del circuito, tanto sin ubicar el banco de reguladores, como después de ubicar el banco, esto permite hacer una comparación directa de los resultados y poder apreciar si en realidad la colocación del banco de reguladores permite una mejoría en los niveles de tensión del circuito en general.

**Tabla 3.15 Promedio de voltaje general del circuito**

<b>Ubicación</b>	<b>Promedio de voltaje sin regulador (p.u.)</b>	<b>Promedio de voltaje con regulador (p.u.)</b>
1	0.97684	48244.3253
2	0.97684	0.9798
3	0.97684	0.9826
4	0.97684	0.995
5	0.97684	0.9865
6	0.97684	0.977
7	0.97684	0.9794
8	0.97684	0.9803
9	0.97684	0.9815

Las nueve ubicaciones que se acaban de analizar anteriormente son las posibles en el lado de 13.8kV, como se pueden observar tanto en las tablas como en las figuras, los resultados son bastante parecidos con la excepción de la primera ubicación entre la barra 101 y la 102 la cual arrojó resultados muy diferentes y extraños.

De las demás ubicaciones se puede deducir que en todas se incrementa el voltaje con la ayuda del banco de reguladores, pero es notable que la ubicación que proporcionó mejores resultados fue la cuarta ubicación la cual está entre la barra 101 y la 105 en la cual no solo se elevó el voltaje en promedio, sino que también se logró estabilizar el voltaje en todas las barras llevándolas a estar dentro de la norma (90% - 110%). Es decir que esta podría ser la ubicación óptima para este banco de reguladores en el lado de 13.8kV.

En la tabla 3.16 se encuentra un promedio de voltaje solo en el lado de 13.8kV, se consideró necesaria la inclusión de este análisis ya que como se ha observado a lo largo de todas las simulaciones, los valores de voltaje en el lado de 34.5kV no cambian sin importar en donde se ubique el banco de reguladores en el lado de 13.8kV, con este promedio se pueden

hacer más notables los cambios que se obtienen al colocar el banco de reguladores ya que el lado de 13.8kV es el que presenta caídas de tensión cuando no se encuentra el banco de reguladores en el circuito.

**Tabla 3.16 Promedio de voltaje en el lado de 13.8kV.**

<b>Ubicación</b>	<b>Promedio de voltaje sin regulador (p.u.)</b>	<b>Promedio de voltaje con regulador (p.u.)</b>
1	0.9374	130078.84
2	0.9374	0.9427
3	0.9374	0.9529
4	0.9374	0.9818
5	0.9374	0.9641
6	0.9374	0.9370
7	0.9374	0.9444
8	0.9374	0.9447
9	0.9374	0.9479

Al observar los resultados de la tabla 3.16 se hace más notable el incremento de voltaje que representa la ubicación del banco de reguladores en el circuito de potencia estudiado, también se puede observar que se sigue presentando la cuarta ubicación como la más favorable para el circuito ya que su incremento en promedio fue mayor que el incremento en todas las demás ubicaciones, esto en el lado de 13.8kV.

El siguiente grupo de simulaciones que se van a realizar es ubicando el regulador en el lado de 34.5kV para comparar los resultados con los obtenidos en el lado de 13.8kV y poder hacer el análisis una vez terminada la búsqueda exhaustiva para poder dar con el punto óptimo donde se debe ubicar el regulador y obtener el mejor resultado para el circuito.

El procedimiento será similar al del lado de 13.8kV los resultados de las simulaciones se colocarán en tablas acompañadas de un gráfico que muestre el comportamiento de la tensión en cada barra del circuito, posteriormente se realizarán los análisis necesarios.

Para el lado de 34.5kV se usará como barra de origen para la ubicación del banco de reguladores la barra 123, ya que si observamos en la tabla 3.5 es una de las barras que tiene mayor voltaje cuando el circuito no tiene los reguladores instalados, también es la barra más cercana a la subestación. Luego se definirán las barras destino para cada ubicación, cabe destacar que se usarán todas las barras del lado de 34.5kV como barra destino para analizar todas las posibilidades y estar seguros de haber probado en todas las posibles ubicaciones antes de elegir un punto óptimo.

La tabla 3.17 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 111.

**Tabla 3.17 Tensiones en barras para la décima ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0
104	0.92939	104	1.1844
105	0.85986	105	0
106	0.88317	106	0.43653
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.83685
109	0.89495	109	1.7127
110	0.88777	110	0
111	0.90726	111	0.7042

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
112	0.90291	112	0.6615
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0.84093
120	1.0259	120	0.91832
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0

www.bdigital.ula.ve

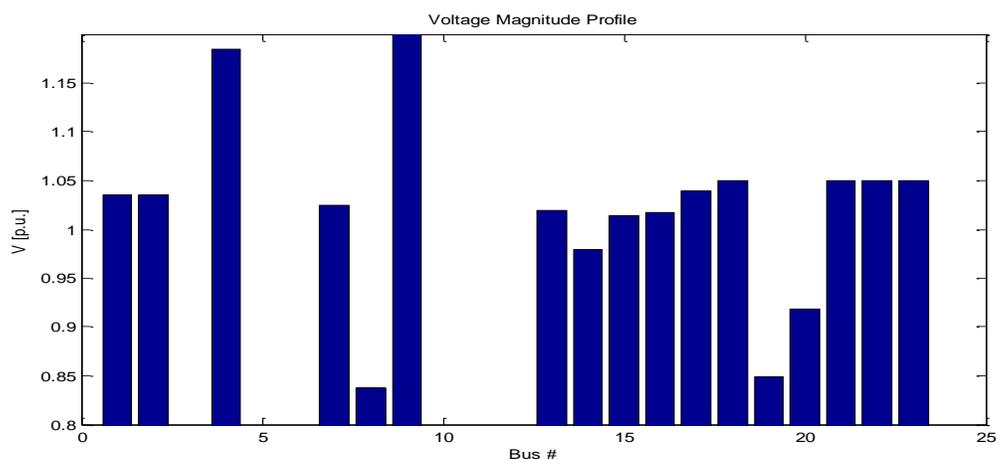
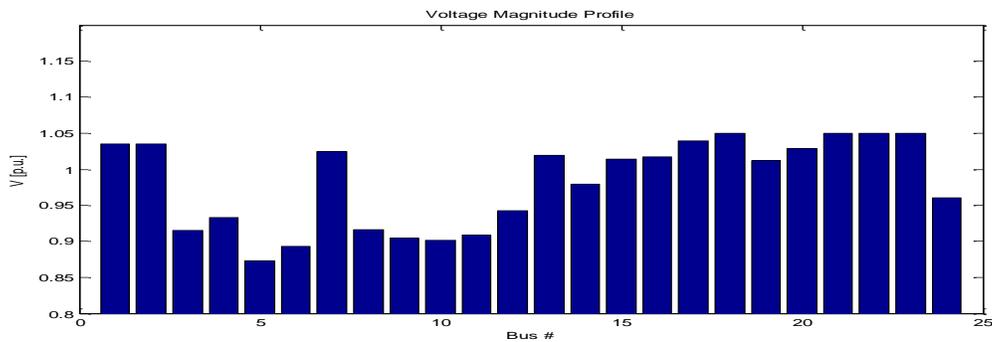


Figura 3.15 Tensiones para la décima ubicación.

La tabla 3.18 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 112.

**Tabla 3.18 Tensiones en barras para la décima primera ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.91491
104	0.92939	104	0.9333
105	0.85986	105	0.87283
106	0.88317	106	0.8927
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91684
109	0.89495	109	0.90514
110	0.88777	110	0.90119
111	0.90726	111	0.9092
112	0.90291	112	0.94312
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.012
120	1.0259	120	1.029
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.96061



**Figura 3.16 Tensiones para la décima primera ubicación.**

La tabla 3.19 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 113.

**Tabla 3.19 Tensiones en barras para la décima segunda ubicación.**

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.91306
104	0.92939	104	0.93025
105	0.85986	105	0.86167
106	0.88317	106	0.88465
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91264
109	0.89495	109	0.89687
110	0.88777	110	0.88973
111	0.90726	111	0.91003

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
112	0.90291	112	0.90478
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0072
120	1.0259	120	1.0253
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.95474

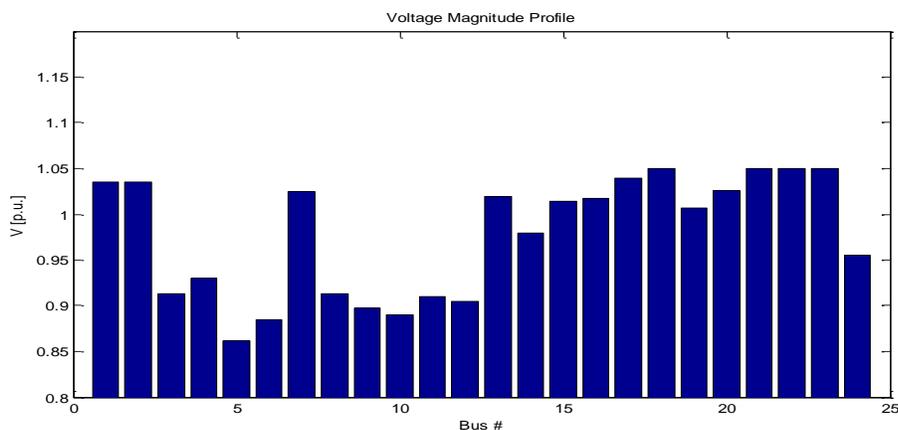


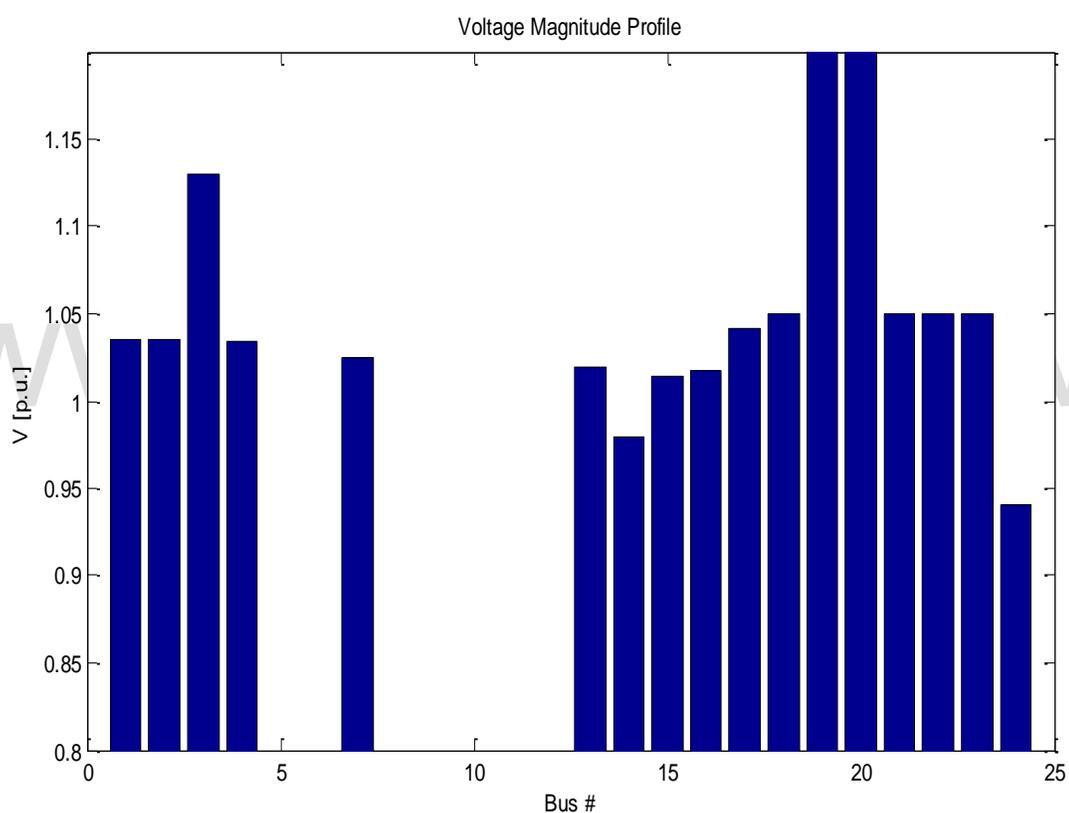
Figura 3.17 Tensiones para la décima segunda ubicación.

La tabla 3.20 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 114.

**Tabla 3.20 Tensiones en barras para la décima tercera ubicación**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	1.1303
104	0.92939	104	1.0347
105	0.85986	105	0
106	0.88317	106	0
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.26233
109	0.89495	109	0.59858
110	0.88777	110	0
111	0.90726	111	0
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0414
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	11.1855

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
120	1.0259	120	7.2563
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.94053

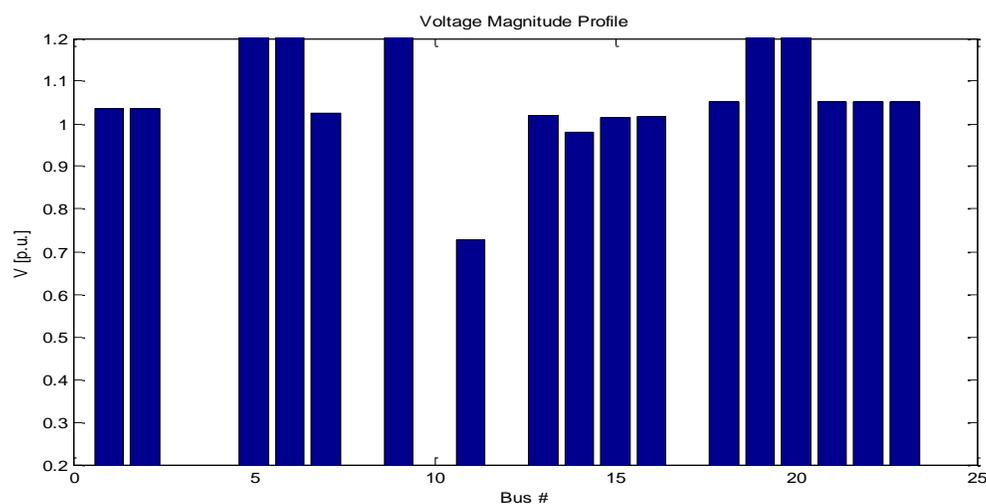


**Figura 3.18 Tensiones para la décima tercera ubicación.**

La tabla 3.21 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 115.

**Tabla 3.21 Tensiones en barras para la décima cuarta ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0
104	0.92939	104	0
105	0.85986	105	60.1327
106	0.88317	106	8.9568
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.02185
109	0.89495	109	717522.66
110	0.88777	110	0
111	0.90726	111	0.72713
112	0.90291	112	0.03216
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	0
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	7.1493
120	1.0259	120	5.2341
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0



**Figura 3.19 Tensiones para la décima cuarta ubicación.**

La tabla 3.22 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 116.

www.bdigital.ula.ve

**Tabla 3.22 Tensiones en barras para la décima quinta ubicación.**

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.95663
104	0.92939	104	0
105	0.85986	105	0
106	0.88317	106	0
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0
109	0.89495	109	0
110	0.88777	110	0
111	0.90726	111	0

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0454
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0.08829
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.11203

www.bdigital.ula.ve

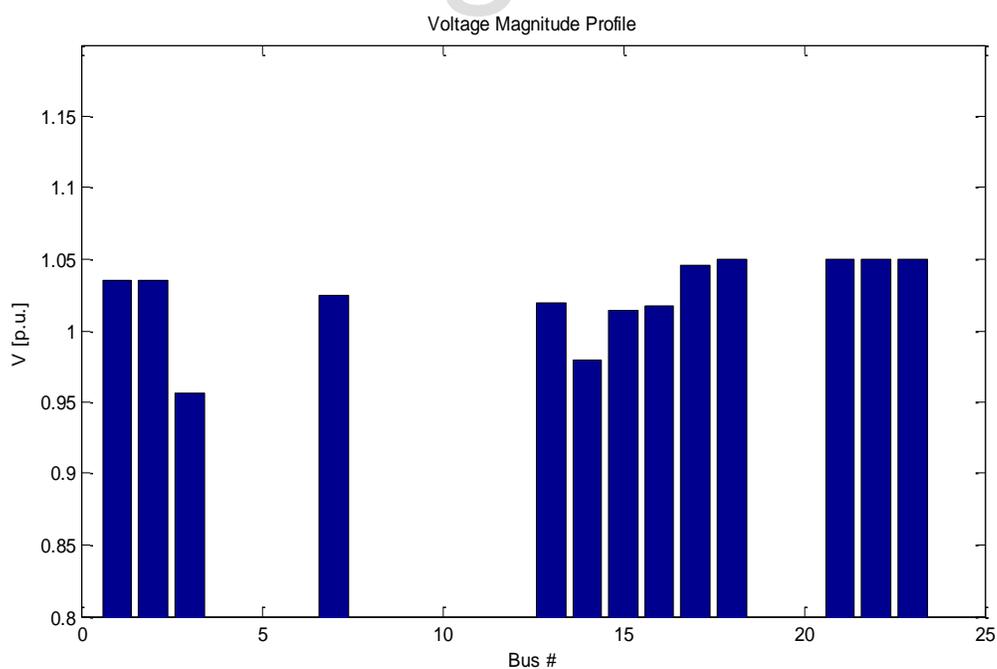


Figura 3.20 Tensiones para la décima quinta ubicación.

La tabla 3.23 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 117.

**Tabla 3.23 Tensiones en barras para la décima sexta ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.9638
104	0.92939	104	0
105	0.85986	105	3.8876
106	0.88317	106	42.8801
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0
109	0.89495	109	1.8781
110	0.88777	110	3.9811
111	0.90726	111	0.245
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	0
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	15.079

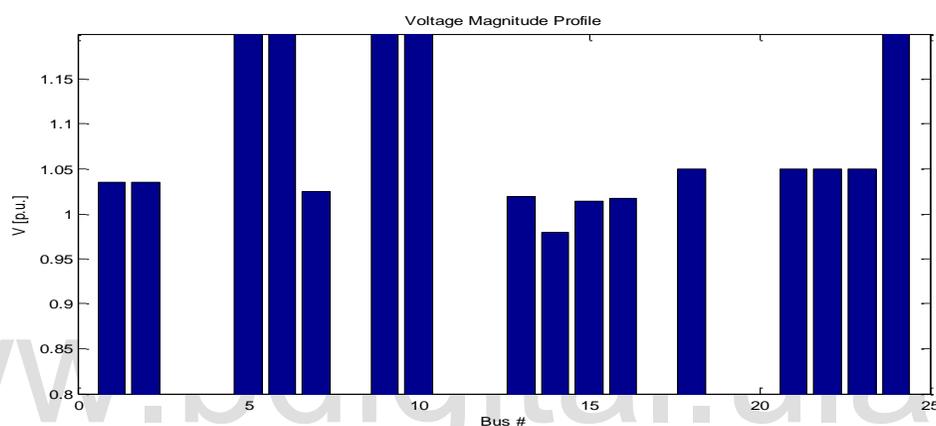


Figura 3.21 Tensiones para la décima sexta ubicación.

La tabla 3.24 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 118.

Tabla 3.24 Tensiones en barras para la décima séptima ubicación.

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0
104	0.92939	104	0.55991

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
105	0.85986	105	19.8447
106	0.88317	106	0
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.07722
109	0.89495	109	0
110	0.88777	110	3.097
111	0.90726	111	0.04169
112	0.90291	112	0.04031
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	2.762
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0

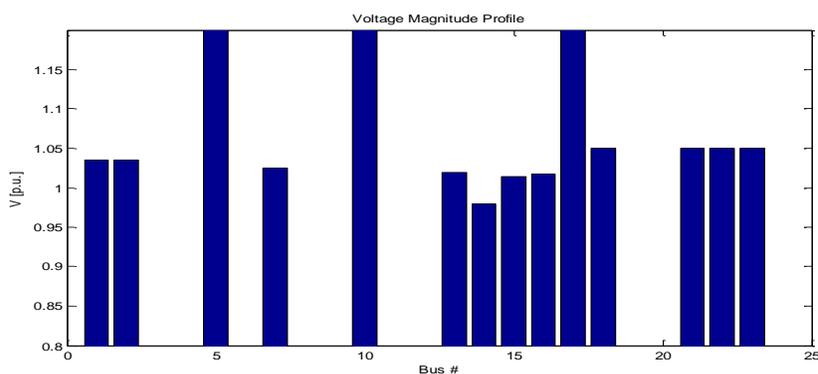


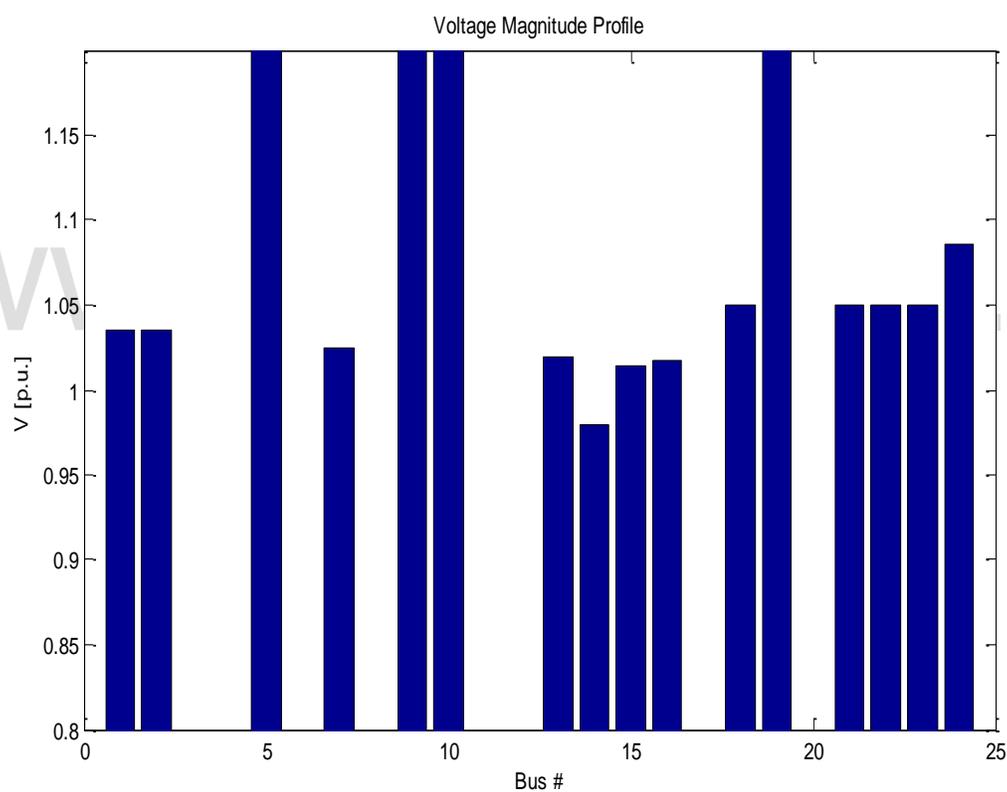
Figura 3.22 Tensiones para la décima séptima ubicación.

La tabla 3.25 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 119.

**Tabla 3.25 Tensiones en barras para la décima octava ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.15511
104	0.92939	104	0
105	0.85986	105	3.9571
106	0.88317	106	0.00697
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.03993
109	0.89495	109	2239.2008
110	0.88777	110	2905.9167
111	0.90726	111	0
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	0
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	5.5815

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
120	1.0259	120	0
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	1.0861

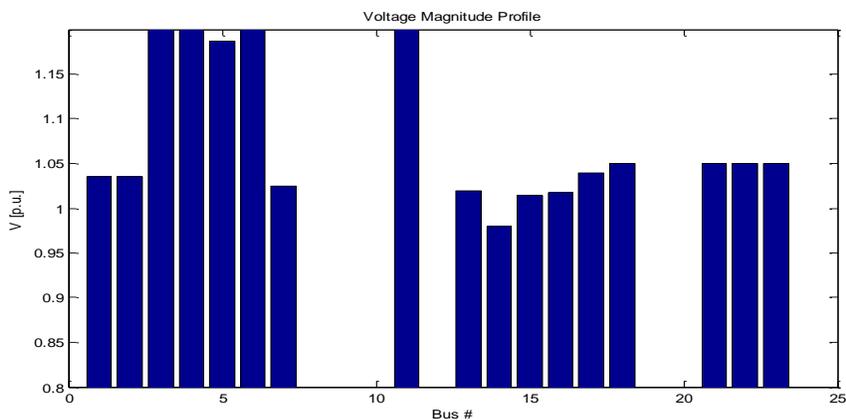


**Figura 3.23 Tensiones para la décima octava ubicación.**

La tabla 3.26 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 120.

Tabla 3.26 Tensiones en barras para la décima novena ubicación.

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	11.7041
104	0.92939	104	1.5022
105	0.85986	105	1.1896
106	0.88317	106	3.6522
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.20502
109	0.89495	109	0
110	0.88777	110	0
111	0.90726	111	4.4481
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0397
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0.09374
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.00038



**Figura 3.24 Tensiones para la décima novena ubicación.**

La tabla 3.27 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 121.

**Tabla 3.27 Tensiones en barras para la vigésima ubicación.**

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0
104	0.92939	104	0.0221
105	0.85986	105	0
106	0.88317	106	0
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.10739
109	0.89495	109	2527.793
110	0.88777	110	0

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
111	0.90726	111	0
112	0.90291	112	0
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	0.46792
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0
120	1.0259	120	0
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.04014

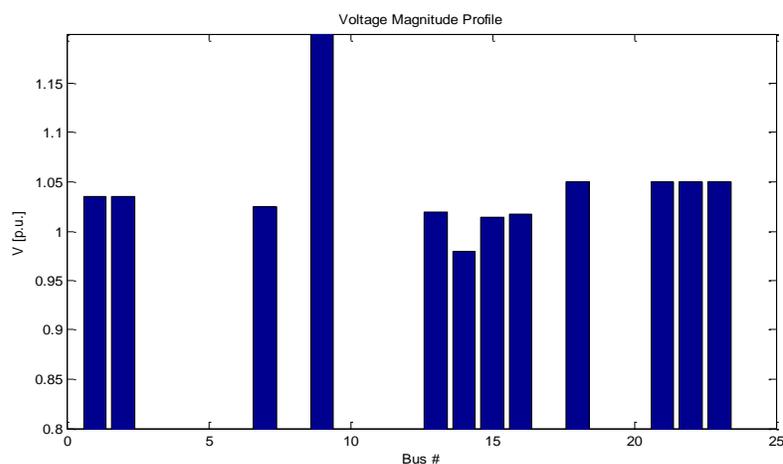


Figura 3.25 Tensiones para la vigésima ubicación.

La tabla 3.28 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 122.

**Tabla 3.28 Tensiones en barras para la vigésima primera ubicación.**

<b>Sin Reguladores</b>		<b>Con Reguladores</b>	
<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.9138
104	0.92939	104	0.93127
105	0.85986	105	0.86352
106	0.88317	106	0.88607
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.91345
109	0.89495	109	0.89894
110	0.88777	110	0.89154
111	0.90726	111	0.90982
112	0.90291	112	0.90686
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0376
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	1.0146
120	1.0259	120	1.0312
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05

Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.9529

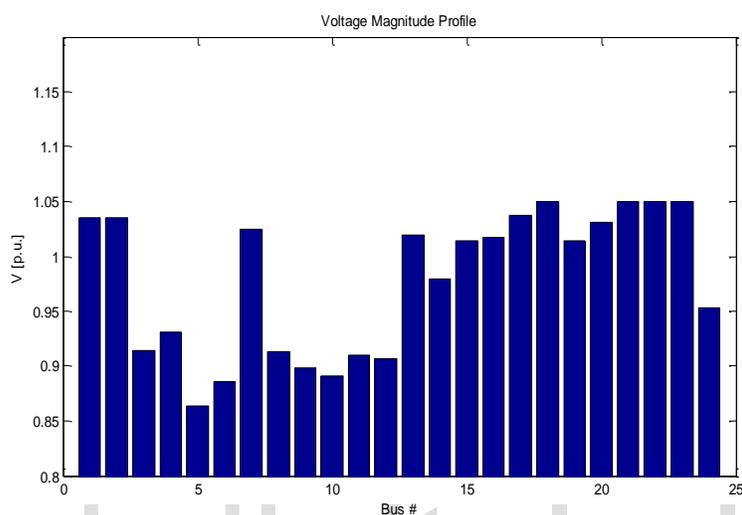


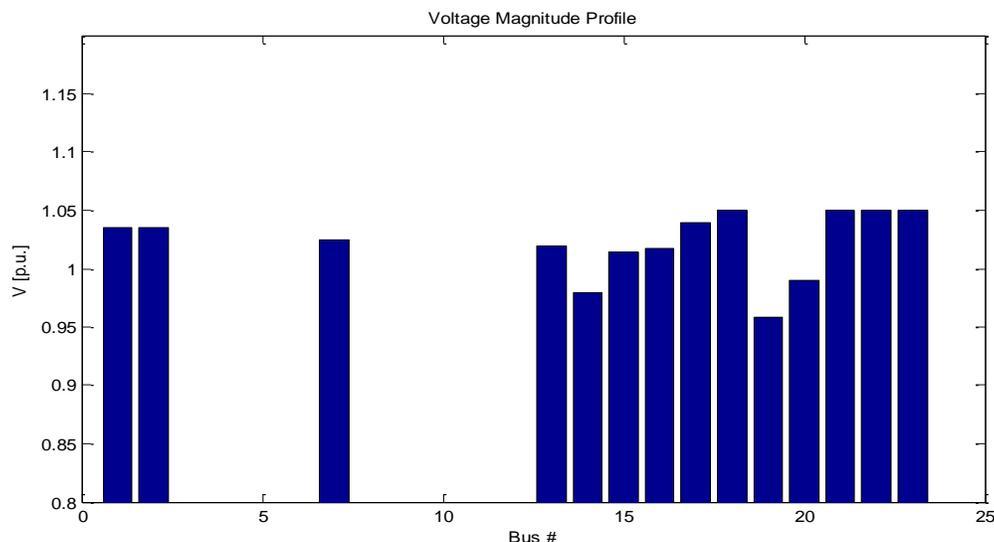
Figura 3.26 Tensiones para la vigésima primera ubicación.

La tabla 3.29 contiene los resultados para la ubicación del regulador entre las barras 123 y la barra 124.

Tabla 3.29 Tensiones en barras para la vigésima segunda ubicación.

Sin Reguladores		Con Reguladores	
Barra #	Tensión (p.u.)	Barra #	Tensión (p.u.)
101	1.035	101	1.035
102	1.035	102	1.035
103	0.91227	103	0.24945
104	0.92939	104	0

<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>	<b>Barra #</b>	<b>Tensión (p.u.)</b>
105	0.85986	105	0.33507
106	0.88317	106	0.02482
107	1.025	107	1.025
108	0.91183	108	0.17005
109	0.89495	109	0
110	0.88777	110	0.34998
111	0.90726	111	0
112	0.90291	112	0.41485
113	1.02	113	1.02
114	0.98	114	0.98
115	1.014	115	1.014
116	1.017	116	1.017
117	1.0397	117	1.0398
118	1.05	118	1.05
119	1.0081	119	0.95868
120	1.0259	120	0.99026
121	1.05	121	1.05
122	1.05	122	1.05
123	1.05	123	1.05
124	0.95512	124	0.19327



**Figura 3.27 Tensiones para la vigésima segunda ubicación.**

Al terminar con las simulaciones en el lado de 34.5kV se puede observar en las diferentes tablas y gráficos que los resultados difieren mucho de los que se obtuvieron en el lado de 13.8kV, lo cual corresponde con lo que se esperaba ya que las principales caídas de tensión se encuentran en las barras del lado de 13.8kV, en el lado de 34.5kV ninguna barra se encuentra con caídas fuera de las normas, también cabe destacar que en este tipo de circuitos de potencia un banco de reguladores va a dar mejores resultados en el lado de menor tensión ya que de esta manera actúa mejor el banco y puede recuperar el voltaje y llevarlo a niveles más estables.

Luego de terminar las simulaciones en el lado de 34.5kV no se consideró necesario la realización de una tabla para comparar los promedios de las tensiones obtenidas en cada ubicación, ya que los resultados estuvieron fuera de lo normal y no existe la manera de que el banco de reguladores funcione de manera adecuada si se ubica en cualquiera de las posibles ubicaciones en este lado de tensión. Solo hubo 3 ubicaciones que arrojaron resultados alentadores las cuales fueron la ubicación décima primera, la décima segunda y la vigésima primera, sin embargo, los resultados obtenidos en estas ubicaciones no logran mejorar los resultados obtenidos en el lado de 13.8kV.

### **3.4 ANÁLISIS GENERAL DE RESULTADOS.**

Analizando los resultados de las simulaciones del circuito en condiciones actuales, es decir, observando la tabla 3.5 se verifica que las tensiones en algunas barras del circuito están presentando caídas de más del 10%, y se ve la necesidad de incluir en este circuito la colocación de un elemento capaz de solucionar esta condición. Por esta razón se prueba con la ubicación de un banco de reguladores.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos a lo largo de todas las simulaciones hechas tanto en el lado de 13.8kV como en el lado de 34.5kV, se puede definir que el banco de reguladores se deberá ubicar entre la barra 101 y la 105, es decir, la cuarta ubicación, ya que esta fue la única ubicación que logró recuperar el voltaje en todas las barras a niveles dentro de la norma CORPOELEC (90% - 110%).

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CONCLUSIONES

Luego de realizar los estudios al circuito de potencia utilizado en este trabajo, se puede concluir tomando en cuenta lo descrito anteriormente:

- El circuito de potencia estudiado en este trabajo presenta problemas en cuanto a los niveles de tensión en las barras que lo componen, ya que debido al aumento de carga se afecta también el voltaje en las barras, haciendo necesaria la implementación de una solución que permita recuperar el voltaje y restablecerlo a los niveles adecuados.
- La regulación de los sistemas ayudaría en gran manera en el fortalecimiento del mismo ante una perturbación. En este trabajo se compensó utilizando un banco de reguladores mediante el uso de técnicas de búsqueda exhaustiva en todas las barras del sistema, donde los resultados obtenidos en las tensiones de las barras de 13.8 kV y 34.5 kV son muy buenos, es decir, los valores obtenidos se encuentran dentro del rango permitido por las normas CORPOELEC (90% - 110%).
- Con la ayuda de las simulaciones se logró obtener el punto óptimo donde se debe colocar el banco de reguladores, también se establecieron comparaciones con los demás puntos y se pudo observar que en un circuito con diferentes niveles de tensión la mejor forma de regular es ubicando los reguladores en el lado de menor tensión, ya que en este se presentan las caídas de voltaje más fuertes y es donde mejor va a actuar el banco de reguladores.

## RECOMENDACIONES

- Los problemas de caída de tensión de todo el sistema están directamente relacionados con el aumento de carga en los circuitos de potencia, también por la falta de potencia en las subestaciones. Se recomienda tratar este problema con mucho cuidado, ya que durante las simulaciones algunos resultados no fueron los esperados, debido principalmente a que en el lado de 34.5kV casi en todas las ubicaciones los resultados estuvieron lejos de la realidad.
- También se recomienda realizar las simulaciones con otro software, con la intención de establecer comparaciones con los resultados obtenidos en este trabajo, ya que la ayuda de otro software puede realizar las simulaciones con mayor exactitud.
- Adicionalmente se recomienda realizar las simulaciones directamente desde MATLAB®, por medio de un código programado para actuar sobre el circuito en PSAT® y realizar diferentes maniobras sin la necesidad de usar la interfaz gráfica del PSAT®. Ya que esto facilita el trabajo con circuitos de mayor volumen, es decir, con un número de barras mucho mayor.
- Como recomendación final se debería trabajar este problema a corto, mediano y largo plazo.

## REFERENCIAS.

Boza, J. Estrada, R. Herrera, A & Barreto, M (2012). *La estabilidad de la tension de los sistemas electricos de potencia utilizando el programa "PSAF"*. Trabajo de investigación [Artículo en línea]. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012012000200001](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012012000200001)

Chakraborty, K. Chakraborti, A. (2011). *Integrated Voltage Stability Indicator Based  $\zeta$  Assessment of Voltage Stability in a Power System and Application of ANN*. [Artículo en línea]. Disponible en: [http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J\\_pdf/89020110204.pdf](http://www.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/89020110204.pdf). [Consulta 2018, febrero 06]

Chakraborty, K. Chakraborti, A. (2015). *Soft Computing Techniques in Voltage Security Analysis*. Energy Systems in Electrical Engineering. Springer, India.

Chimborazo, L. (2010). *Analisis de estabilidad de voltaje del sistema nacional interconectado - SIN para el periodo 2010-2013 usando el programa DigSilent Poder Factory*. Trabajo de grado. Facultad de Ingenieria Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

Dominguez, S. (2006). *Metodos de analisis de sensibilidad para la evaluacion de la estabilidad de voltaje de sistemas electricos de potencia*. Trabajo de grado. Escuela superior de ingenieria mecánica y eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México.

Grainger, J. &. (1996). *Analisis de sistemas de potencia*. Primera edición, McGraw-Hill, México.

Lopez, L. & Osorio, O (2008). *Analisis de estabilidad de tension en el sistema de transmision regional (STR)*. Trabajo de grado. Facultad Tecnológica, Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.

Mora, E. (2011). *Apuntes de sistemas de potencia*. Mérida.

Nguyen, T. N. (2012). *A New Method for Static Voltage Stability Assessment based on The Local Loadability Boundary*. Revista: International Journal of Emerging Electric Power Systems.

Rodriguez, L. (2014). *Analisis de estabilidad de tension considerando sistemas de monitoreo de area amplia y características de cargas mixtas* Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Risaralda, Colombia.

Sunita, D.Palukuru, N.& Subrata, P. (2010). *Global Voltage Stability Analysis of a Power System Using Network Equivalencing Technique in the Presence of TCSC*. [Artículo en línea]. Disponible en: [http://lejpt.academicdirect.org/A16/053\\_068.pdf](http://lejpt.academicdirect.org/A16/053_068.pdf). [Consulta: 2018, Marzo 06].

Vu, K. Begovic, M. Novosel, D.& Mohan, M. (1997). *Use of local measurements to estimate voltage-stability margin* Revista: IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14.

Zabaiou, T.Dessaint, L. & Kamwa, I (2013). *Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices*. Documento en línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6812271>. [Consulta: 2018, Marzo 18].

Zapata, C. (1996). *Colapsos de voltaje en sistemas de potencias*. [Artículo en línea]. Disponible en: <http://academia.utp.edu.co/planeamiento/files/2014/01/cjz-colapsos-voltaje.pdf>. [Consulta: 2018, Mayo 09].

www.bdigital.ula.ve

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)