

# Análisis de Estabilidad de Voltaje en Estado Estable del Sistema de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito

Ing. Antonio Ortiz, PIL S.A., Ing. Jesús Játiva, Ph.D., EPN, Quito, Ecuador

**Resumen** - En este documento se describe los diferentes componentes del Sistema Eléctrico Quito SEQ así como la clasificación de la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, poniendo énfasis en la estabilidad de voltaje en estado estable. Se analiza las causas para llegar al colapso de voltaje así como los medios para mitigar este problema. Se detalla los límites en la transferencia de potencia en generadores, líneas de transmisión y transformadores. Se desarrolla un módulo de programación en lenguaje DPL del software Power Factory de DIgSILENT, el cual es utilizado para realizar el estudio de estabilidad de voltaje considerando diferentes incrementos porcentuales en cada barra de carga del SEQ.

**Índices** - Curvas PV, DIgSILENT Programming Lenguaje DPL, Estabilidad de voltaje, Límites en la transferencia de potencia, Sistema Eléctrico Quito.

**Abstract** - In this document Quito Electric System SEQ various components are described as well as the classification of power system stability, giving emphasis to steady state voltage stability. Causes to reach the voltage collapse are analyzed as well as the means to mitigate this problem. Power transfer limits in generators, transmission lines and transformers are detailed. A program module in DPL DIgSILENT Power Factory language is developed, which is utilized to make the voltage stability study considering percent increments in each load bus of the SEQ.

**Indexes** - PV Curves, DIgSILENT Programming Language DPL, Voltage stability, Power transfer limits, Quito Electric System

## I. INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento de la demanda ha obligado a las empresas eléctricas a mejorar sus sistemas de generación, transmisión, subtransmisión y distribución, para lo cual es necesario realizar varios estudios del estado actual y la proyección de expansión conforme al crecimiento de la carga. Uno de estos estudios es el análisis de estabilidad de voltaje, que permite identificar la máxima cargabilidad del sistema eléctrico. En tal virtud, la Empresa Eléctrica Quito requiere desarrollar un estudio de estabilidad de voltaje de su sistema de subtransmisión tanto en las condiciones actuales como con su red proyectada al año 2020.

## II. COMPONENTES DE UN SISTEMA ELÉCTRICO

La estabilidad de voltaje está estrechamente ligada a las características de los elementos que conforman el sistema de potencia. Para comprender estos efectos se realiza

brevemente un análisis de cada uno de estos, de tal manera que se pueda tener una mejor comprensión de sus comportamientos con respecto al voltaje, cuando el sistema por alguna razón cambia sus condiciones de operación.

### A. Generadores

Los generadores son la fuente de la energía eléctrica en el sistema de potencia. En los estudios de estabilidad y control de voltaje es de vital importancia considerar la capacidad de entrega y absorción de potencia reactiva de los generadores, dada por su curva de capacidad y sus zonas seguras de operación.

### B. Sistemas de Transmisión [3]

Los sistemas de transmisión son el medio de transporte de la energía eléctrica, una representación de un sistema radial simple muestra en la Figura 1.

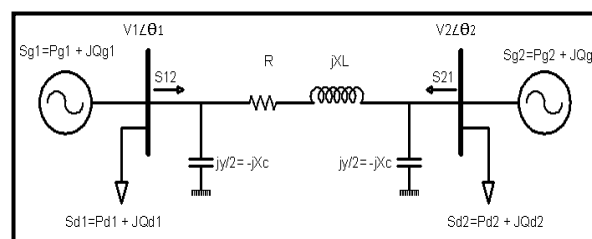


Fig. 1 Sistema de transmisión radial simple

La potencia reactiva consumida y entregada por el sistema de transmisión de la figura 1 se obtiene mediante la ecuación (1):

$$Q_{g1} + Q_{g2} = (Q_{d1} + Q_{d2}) + \frac{1}{x_L} (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(\phi)) - \frac{1}{x_C} (V_1^2 + V_2^2) \quad (1)$$

Donde  $\phi = \theta_1 - \theta_2$

Los términos en la ecuación (1) significan lo siguiente:

$Q_g$  - Potencia reactiva generada por las máquinas 1 y 2

$Q_D$  - Potencia reactiva consumida por las cargas en cada barra 1 y 2

$Q_{XL}$  - Potencia reactiva consumida por la reactancia inductiva de la línea (XL)

$Q_{XC}$  - Potencia reactiva generada por la reactancia capacitiva de la línea (XC)

$$Q_g = Q_D + Q_{XL} - Q_{XC} \quad (2)$$

Suponiendo que la magnitud de los voltajes de generación se encuentran alrededor del valor nominal  $V_1 = V_2 = 1,0$  pu,  $Q_{XL}$  y  $Q_{XC}$  se puede escribir como:

$$Q_{XL} = k_1 - k_1 \cos(\phi) \quad (3)$$

$$Q_{XC} = k_2 \quad (4)$$

Donde  $k_1 = 2/X_L$  y  $k_2 = -2/X_C$

En la Figura 2 se gráfica el comportamiento de la potencia reactiva absorbida y entregada por el sistema de transmisión en función del ángulo  $\phi$ .

### C. Compensación

Existen dos tipos de compensación:

- Compensación reactiva inductiva
- Compensación reactiva capacitiva

Los reactores inductivos en derivación son el medio más económico y atractivo para compensar los excedentes de reactivos en el sistema de potencia.

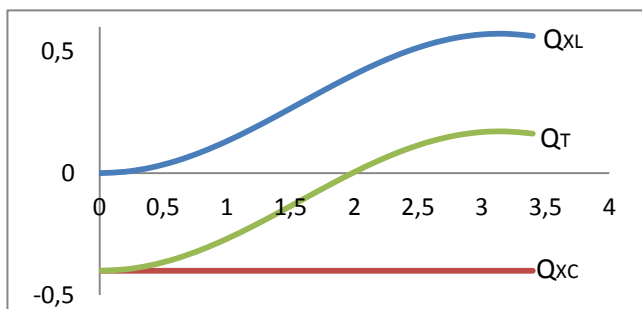


Fig. 2 Potencia reactiva en función del ángulo

Los reactores capacitivos son fuentes pasivas de potencia reactiva, que pueden estar conectados en serie o paralelo. Los capacitores son utilizados entonces para compensar el déficit de potencia reactiva de la red de transmisión, así los conectados en paralelo son usados para aportar potencia reactiva al sistema, mientras que los conectados en serie son usados para reducir la impedancia equivalente entre barras.

### D. Transformadores [4]

En los sistemas de potencia existen transformadores en los cuales la posición del cambiador de tomas (taps) puede ser ajustada sin carga y bajo carga, siendo así una herramienta esencial para el control de voltaje. Estos cambiadores pueden ser controlados manual o automáticamente. En la Figura 3 se muestra el circuito equivalente  $\pi$  de un transformador, el cual es utilizado para realizar análisis computacionales de sistemas de potencia.

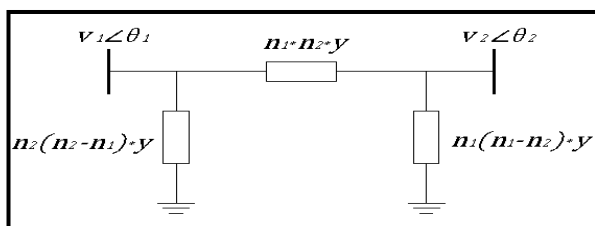


Fig. 3 Modelo generalizado  $\pi$  del transformador

Donde  $y = \frac{1}{n_1^2 Z_2 + n_2^2 Z_1}$  es la admitancia equivalente del transformador.

Si se considera que  $Z_1 = 0$  y que se tiene una relación de transformación de 1:t, se puede graficar el comportamiento de la potencia activa, potencia reactiva y potencia reactiva de pérdidas en un transformador en función de la posición del tap, Figura 4.

### E. Carga

Las características de las cargas que se están alimentando son un factor que juega un papel muy importante en el control del voltaje. En un sistema de potencia existen básicamente dos tipos de carga: las motorizadas y las no motorizadas.

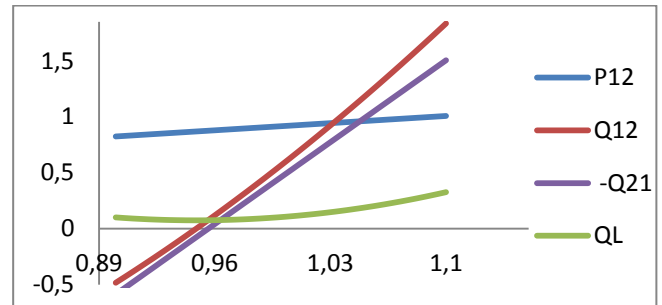


Fig. 4 Potencia activa y reactiva a través del transformador

Las cargas motorizadas no varían significativamente con la magnitud del voltaje, de tal manera que operan normalmente entre un rango aproximado de 90% a 110%. Las cargas no motorizadas varían su magnitud con el voltaje. En la Figura 5 se grafica el comportamiento de la carga respecto al voltaje.

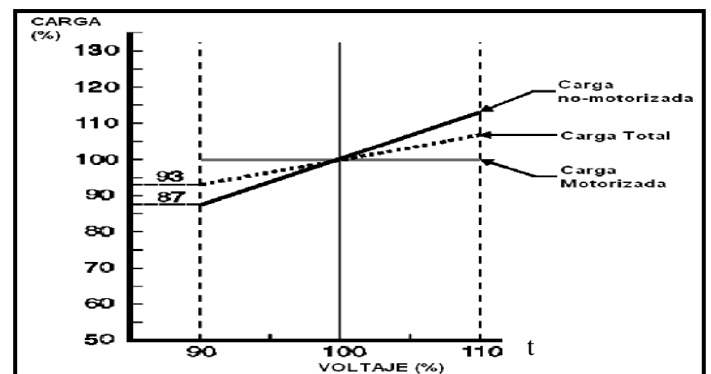


Fig. 5 Comportamiento de la carga respecto al voltaje

## III. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIVALENTES DE RED DEL SNI PARA EL ESTUDIO

Se requiere frecuentemente el uso de equivalentes de red de un sistema complejo para simplificar largos cálculos y analizar fácilmente la estabilidad en estado estable de un sistema. Esta sección provee la revisión de las metodologías de equivalentes de red basados en la teoría de Thevenin y la descripción de los equivalentes de red en los puntos de conexión al SNI del sistema de subtransmisión de la EEQ.

### A. Equivalentes de red mediante el cálculo de cortocircuitos monofásico y trifásico [5]

Mediante el cálculo de cortocircuitos monofásico y trifásico se puede determinar la impedancia Thevenin del sistema.

La información necesaria de secuencia positiva, negativa y cero para determinar los equivalentes Thevenin o equivalentes de red en algún punto dado es la siguiente:

- $I_{cc3f}$  = Corriente de cortocircuito trifásico
- $I_{cc1f}$  = Corriente de cortocircuito monofásico
- $V_f$  = Voltaje de falla o nominal

#### IV. ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

La estabilidad de un sistema eléctrico de potencia denota la habilidad para desde una condición inicial de operación, recobrar un estado de operación en equilibrio después de haber sido sometido a una perturbación. La integridad se conserva cuando prácticamente el sistema de potencia entero permanece intacto sin disparos de generadores o cargas.

##### A. Clasificación [1, 6]

Cuando el sistema es sometido a una perturbación transitoria, la estabilidad del sistema depende de la naturaleza de la perturbación así como la condición inicial de operación. La inestabilidad de sistemas de potencia puede tomar diferentes formas y es influenciada por muchos factores. La Figura 6 muestra una clasificación de la estabilidad de sistemas de potencia.

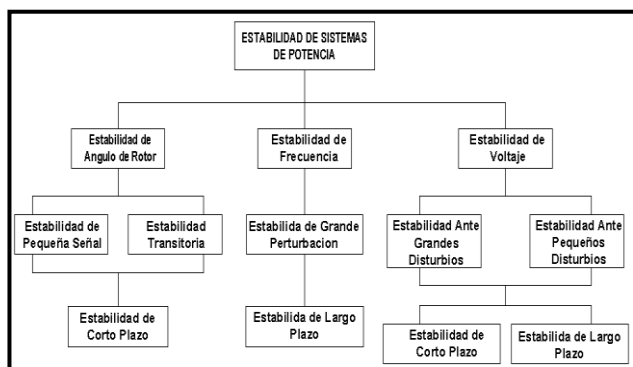


Fig. 6. Clasificación de la estabilidad de sistemas de potencia

##### 1) Estabilidad de ángulo del rotor

La estabilidad de ángulo del rotor se preocupa por la habilidad de las máquinas sincrónicas interconectadas en un sistema de potencia de permanecer en sincronismo bajo condiciones normales de operación y después de haber sido sometidas a una perturbación. Esto depende de la habilidad para mantener o restaurar el equilibrio entre el torque electromagnético y el torque mecánico de cada máquina sincrónica en el sistema.

##### 2) Estabilidad de frecuencia

Se dice que un sistema es estable desde el punto de vista de la frecuencia cuando la generación total es igual a la demanda del sistema, incluyendo las pérdidas. La inestabilidad de frecuencia se analiza generalmente usando simulaciones en el dominio del tiempo, en las que se plantean escenarios como pérdida de generación o carga.

#### V. ESTABILIDAD DE VOLTAJE [1, 6, 7]

El estudio de estabilidad de voltaje es una ramificación dentro de la clasificación de fenómenos de estabilidad en sistemas eléctricos de potencia. Debido a la naturaleza

compleja de este tipo de estudio, es necesario realizar análisis dedicados dentro de las áreas de generación, transmisión y distribución.

##### A. Definiciones

La estabilidad de voltaje está relacionada con la capacidad de un sistema eléctrico de potencia de mantener una magnitud de voltaje estable en todas las barras del sistema, bajo condiciones normales de operación y después de estar sujeto a una perturbación.

La inestabilidad de voltaje tiene como consecuencia un decremento progresivo en la magnitud de voltaje en las barras del sistema.

En el presente trabajo al hacer uso del término colapso de voltaje se hace con la intención de referirse a una condición drástica e irreversible que se ha presentado en la operación del sistema eléctrico de potencia y en la cual se ha perdido la facultad de controlar una parte significativa del mismo.

##### B. Causas para llegar a la inestabilidad de voltaje

Las causas para llegar a la inestabilidad de voltaje son varias, entre las que se citan:

- Aumento de la demanda de reactivos de las cargas.
- Sistema de potencia fuertemente sobrecargado.
- Limitaciones en la producción de potencia reactiva que involucran límites de reactivos en generadores y SVCs.
- Limitaciones en la transmisión de potencia reactiva que involucra grandes pérdidas de reactivos en líneas de transmisión fuertemente cargadas.
- Acción de los cambiadores de “taps” de los transformadores.
- Retoma de carga dinámica.
- Salida de líneas y generadores, reducción de la capacidad de producción y transmisión del sistema de potencia.
- Cambios en cascada en el sistema de potencia, como por ejemplo, una serie de salidas o cortes de líneas con el consiguiente alcance del límite de generación de reactivos.

##### C. Mitigación de problemas de estabilidad de voltaje

Los métodos siguientes pueden usarse para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje:

- Instalación de dispositivos de compensación reactiva.
- Control del voltaje de la red y salida de potencia reactiva de generadores.
- Buena coordinación entre equipos de protección y requerimientos del sistema.
- Control de los cambiadores de tap de transformadores.
- Seccionamiento de carga por voltaje, por el que se desconecta carga para ayudar a que el voltaje se recupere y el problema de bajo voltaje no empeore o se extienda a una zona mayor.

#### D. Restricciones en la transferencia de potencia generación-carga

Para este análisis se considera el sistema generador-carga unida por una línea de transmisión, en la que la resistencia es insignificante, Figura 7.

Las ecuaciones de flujo de potencia para la carga son las siguientes:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} * \sin(-\phi) = -\frac{V_1 V_2}{X_L} * \sin(\phi) \quad (5)$$

$$Q_{21} = -Q = -\frac{V_1 V_2}{X_L} * \cos(\phi) + \frac{V_2^2}{X_L} \quad (6)$$

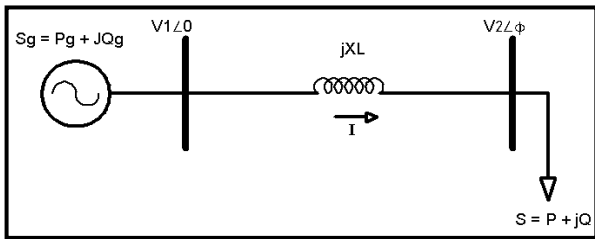


Fig. 7. Sistema radial simple

A partir de las ecuaciones anteriores, eliminando el ángulo  $\phi$ , y luego de realizar algunas operaciones algebraicas se obtiene la ecuación (7).

$$(V_2^2)^2 + V_2^2 * (2 * Q * X_L - V_1^2) + X_L^2 * (P^2 + Q^2) = 0 \quad (7)$$

Esta es una ecuación de segundo grado con respecto a  $V_2^2$ . La condición para tener al menos una solución es:

$$-P^2 - \frac{V_1^2}{X_L} * Q + \left(\frac{V_1^2}{2 * X_L}\right)^2 \geq 0 \quad (8)$$

Asumiendo la restricción de la inecuación anterior, se tienen dos posibles soluciones:

$$V_2 = \sqrt{\frac{V_1^2}{2} - Q * X_L} \pm \sqrt{\frac{V_1^4}{4} - X_L^2 * P^2 - X_L * V_1^2 * Q} \quad (9)$$

La potencia reactiva puede ser expresada como:

$$Q = P * \tan(\phi) \quad (10)$$

Una vez que se ha simplificado el ángulo  $\phi$  de la formulación planteada, el único parámetro desconocido es la magnitud de voltaje  $V_2$ . Para su solución, se considera que los valores de  $V_1$  y  $X_L$  son constantes,  $Q$  depende de  $P$  y considerando un factor de potencia constante, da como resultado que  $V$  sea sólo una función de  $P$ . Esta gráfica se conoce como curva PV.

#### E. Restricciones en centrales de generación [8]

La restricción de generación de potencia activa y reactiva de las centrales de generación está dada por la curva de capacidad. Esta curva es útil para verificar gráficamente algunos parámetros de trabajo que se tiene en una central de generación.

Para la obtención de las zonas seguras de operación se considera los principales límites operativos:

- **Límite por Corriente de Armadura**, debido al calentamiento en el devanado de armadura, se impone un primer límite en la operación del generador. La máxima corriente de armadura será la nominal, que

multiplicada por el voltaje nominal en terminales del generador establece una potencia aparente constante.

- **Límite por Corriente Máxima de Campo**, existe un valor máximo permisible de corriente de excitación impuesto por el calentamiento del rotor o por características propias de la excitatriz. Este valor de corriente de excitación induce en el estator una fuerza electromotriz máxima, el cual genera un límite de potencia aparente entregada por el generador.
- **Límite por Corriente Mínima de Campo**, cuando el generador absorbe reactivos, es decir con factores de potencia en adelanto, existe el problema latente de salirse de sincronismo, apareciendo la inestabilidad, pero también sucede que aparece un calentamiento excesivo en la región extrema de la armadura.
- **Límite por Potencia Máxima**, este límite está determinado por la capacidad de la máquina motriz debido a limitaciones propias de fabricación, esta restricción impide entregar más que cierta cantidad de potencia máxima.
- **Potencia Mínima**, la potencia activa mínima de las centrales está directamente relacionada con un valor aceptable de eficiencia de la turbina.
- **Límite por Margen de Estabilidad**, cuando un generador se encuentra operando en la zona de subexcitación, la corriente de campo es baja, por lo que tiene un margen de estabilidad en estado estable pequeño. Un incremento de carga podría llevar a la inestabilidad al generador debido a que su ángulo es mayor al límite crítico de estabilidad.
- **Límite por Voltaje Máximo y Mínimo de Servicios Auxiliares**, los servicios auxiliares de una central de generación son de gran importancia dado que alimentan los sistemas de control de voltaje y velocidad, sistemas de enfriamiento y suministros de otras cargas de la central.

En la Figura 8 se puede apreciar las zonas seguras de operación de una central eléctrica considerando los límites mencionados.

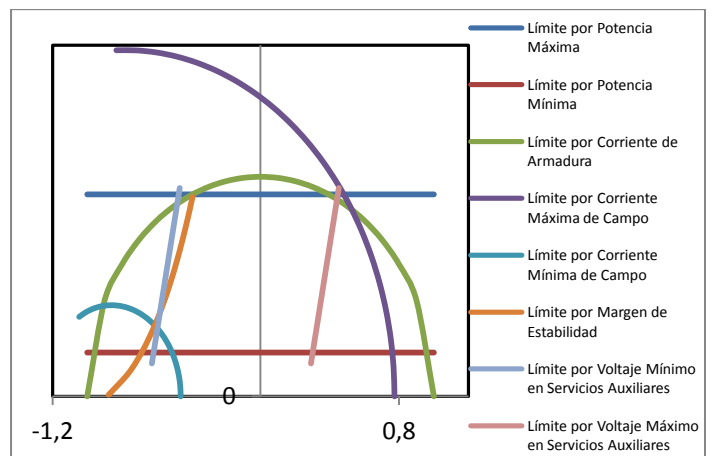


Fig. 8. Curva de capacidad generadores

#### F. Restricciones en líneas de transmisión [12]

En el caso de las líneas es importante conocer la máxima capacidad de transmisión de acuerdo a la condición operativa.

- **Límite Térmico**, determinado por las características mecánicas y eléctricas de los conductores. Al respetarse este límite se conserva la vida útil del conductor.
- **Límite por Caída de voltaje**, relacionado con la calidad de servicio a los usuarios, ya que se debe mantener la magnitud de voltaje en los extremos de la línea de transmisión, dentro de una banda de valores.
- **Límite de estabilidad**, seleccionado para proporcionar un funcionamiento estable del sistema ante una variedad de contingencias que puede provocar cambios de carga transitorios y de estado estable en las líneas.
- **Capacidad de cortocircuito**, al diseñar una línea de transmisión es preciso considerar que por sus conductores existe una probabilidad muy clara de que la línea de transmisión deba soportar la circulación de corrientes de cortocircuito.
- **Sobrecarga Temporal**, existen circunstancias en las cuales los conductores de las líneas de transmisión están obligados a transportar corrientes más elevadas que las normales debido a contingencias.

### G. Restricciones en transformadores

En los transformadores se debe analizar el nivel y tiempo de duración de la carga. Al cargarse sobre su potencia nominal sufren incrementos de temperatura que pueden causar el deterioro del aislamiento de las bobinas y disminuir las bondades del dieléctrico.

Los transformadores son eficientes cuando se les carga entre el 60% y el 100% de la potencia nominal y, eventualmente, sobrecargas del 10% en períodos no mayores a dos horas. Cuando la carga continua del transformador es 75% de la potencia nominal durante un tiempo considerable, se debe analizar la posibilidad de instalar un nuevo transformador.

## VI. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE

La estabilidad de voltaje, siendo un fenómeno dinámico por naturaleza, requiere soluciones en función del tiempo. En muchos casos es posible utilizar métodos de análisis en estado estable, que utilizan ecuaciones algebraicas para representar condiciones sucesivas del sistema.

### A. Curvas PV

La relación entre la potencia activa  $P$  y la magnitud del voltaje  $V$  es de mucho interés en estudios de estabilidad de voltaje y el análisis de su interacción se ha visto reflejado en la construcción de las curvas denominadas PV. Dichas curvas se pueden obtener a partir de que se conocen las dos soluciones de la ecuación 9.

Una curva PV representativa de una barra del sistema de potencia se muestra en la Figura 9.

La primera solución que se obtiene considerando el signo positivo, da como resultado una condición de operación donde prevalece un nivel de voltaje  $V$  y una magnitud de corriente  $I$  pequeña, que corresponde a los puntos en la curva por arriba de la línea punteada marcada en la Figura 9.

La segunda solución que se obtiene considerando el signo negativo, produce los puntos de operación indicados en la parte inferior de la curva, lo que corresponde a un

nivel de voltaje  $V$  pequeño y una corriente  $I$  elevada en magnitud, lo cual denota características de una condición de operación inapropiada.

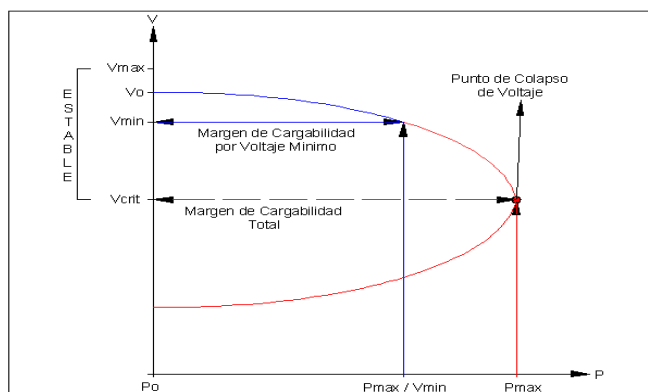


Fig. 9. Características generales de una Curva PV

### B. DigSILENT PowerFactory aplicado al estudio de estabilidad de voltaje

El módulo de estabilidad de voltaje del PowerFactory evalúa la seguridad del sistema eléctrico en cuanto a estabilidad de voltaje. El programa fue creado para responder a este reto evaluando la capacidad de una red eléctrica para mantener un margen adecuado de estabilidad de voltaje al ser sometida a diversas condiciones de carga.

### C. DigSILENT programming language (DPL) [11]

El lenguaje de programación DPL (DigSILENT Programming Language) tiene como propósito ofrecer una interfaz para tareas automáticas a realizarse en la herramienta computacional PowerFactory. Esta interfaz permite acceder a comandos y objetos que maneja PowerFactory así como también acceder a funciones y variables creadas por el usuario. DPL aumenta el alcance del programa PowerFactory permitiendo la creación de nuevas funciones de cálculo.

En la Figura 10 se muestra la estructura de un comando DPL.

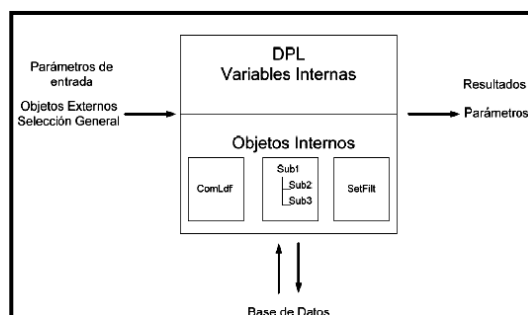


Fig. 10. Estructura de un comando DPL.

Las funciones de cálculo son estructuras algorítmicas en las que se utilizan comandos de flujo como if - then - else, for y do - while.

### D. Curvas PV considerando la tasa de incremento anual

DigSILENT PowerFactory ofrece una herramienta de estudio de estabilidad de voltaje basada en la generación de curvas PV en barras seleccionadas respecto al incremento

de una o varias cargas de distintas subestacionesVII. manteniendo constante el factor de potencia de las cargas. Las cargas son incrementadas hasta que el flujo no converge. Los pasos de incremento de carga se los puede definir. Los valores de voltaje y potencia almacenados se los presenta en una gráfica llamada curva PV. Las ecuaciones de flujo de potencia se las resuelve por el método de Newton Raphson [9, 10].

Una desventaja del módulo de estabilidad de voltaje es que no se puede definir incrementos específicos para cada carga. El incremento definido se lo hace de manera global para todas las cargas, de ahí que fue necesario el desarrollo de un código DPL que permita definir el incremento de carga en cada una de las subestaciones. Dicho incremento se lo establece como la tasa de incremento anual de acuerdo a un plan de expansión del sistema de distribución.

### E. Diagrama de bloques del código (SCRIPT) DPL

El código desarrollado para estudiar la estabilidad de voltaje es aplicado al Sistema Eléctrico Quito. Se considera como incrementos de carga la tasa de incremento anual en cada una de las subestaciones de carga.

En la Figura 11 se presenta el diagrama de bloques del código DPL “Curvas PV” elaborado en este trabajo.

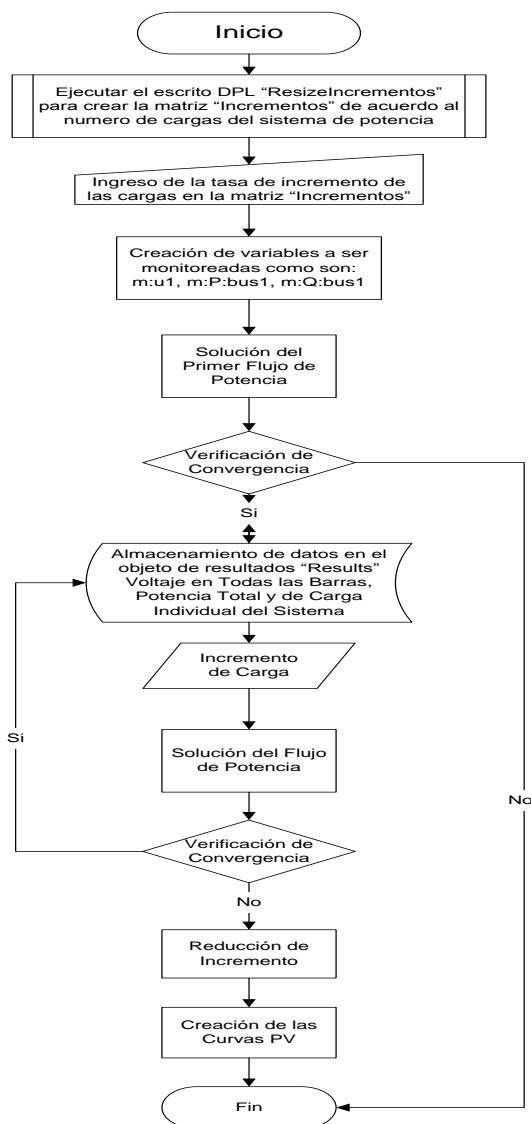


Fig. 11. Código DPL desarrollado en PowerFactory

### ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE DEL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN DE LA EEQ

Para el estudio de estabilidad de voltaje del sistema de la EEQ, se utiliza el código desarrollado en DPL.

#### A. Metodología propuesta para el análisis de estabilidad de voltaje

- Para cada condición de demanda, definir el porcentaje de incremento de cada carga. En este estudio se considera como porcentajes de incremento la tasa de crecimiento de carga anual en cada subestación de acuerdo al plan de expansión de la EEQ [2].
- Crear las curvas PV para monitorear el crecimiento de la carga y el comportamiento del voltaje en las barras.
- Verificar las condiciones del sistema después de haber incrementado las cargas seleccionadas para verificar si existen elementos sobrecargados con la nueva condición de demanda.
- Una vez que se realiza los pasos anteriores para una condición de carga máxima del sistema, se procede a repetir los mismos para demanda media y mínima.
- Una vez que se realiza el análisis para todas las condiciones de carga del sistema se procede a comparar y analizar los resultados y las curvas PV.

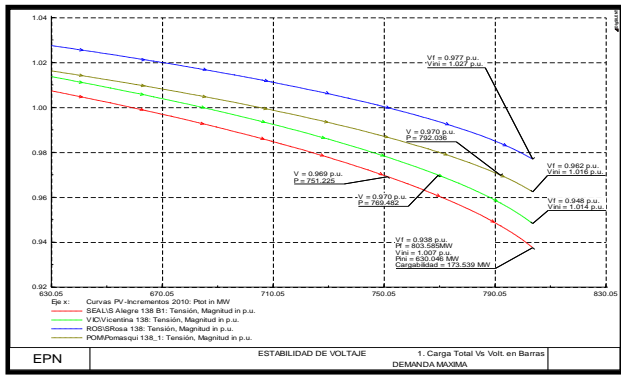
#### B. Aplicación de la metodología propuesta al sistema de subtransmisión de la EEQ en 2010 y 2020

Una vez que se aplica la metodología propuesta en la red de la EEQ en los años 2010 y 2020 para análisis de estabilidad de voltaje en estado estable, se obtiene las curvas PV de las Figuras 12 y 13.

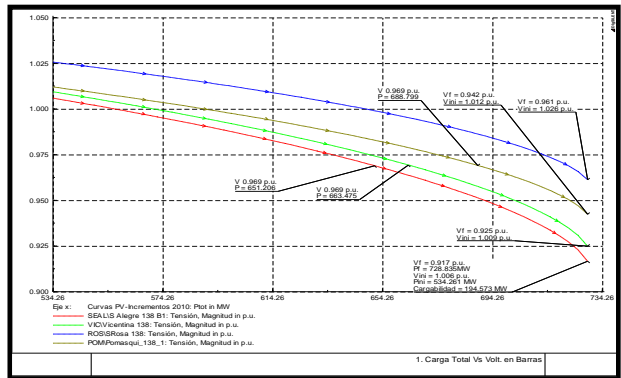
En la Tabla I se muestran los valores de potencias en los años 2010 y 2020.

#### C. Análisis de resultados

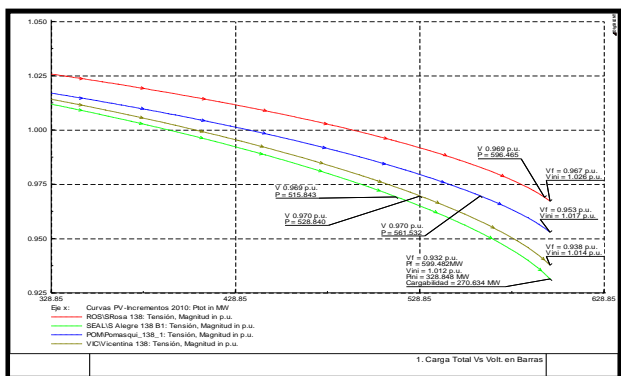
- El SEQ de los años 2010 y 2020, en condiciones normales de operación, en los tres escenarios de demanda presenta niveles de voltaje que se encuentran dentro del rango permitido, esto se debe a la conexión y desconexión de bancos de capacitores que se encuentran y/o se proyectan en las subestaciones de carga.
- La barra más susceptible al incremento de potencia al 2010, en los tres escenarios de demanda, es la subestación HCJB-Papallacta a nivel de 23 kV, al 2020 las barras más susceptibles al incremento de potencia son Los Bancos en demanda máxima, en demanda media la subestación Andalucía y en demanda mínima la subestación HCJB-Papallacta.
- La demanda requerida en cada incremento de carga será suministrada desde los puntos de conexión Santa Rosa, Vicentina y mayormente El Inga, debido a que Ecuador estará eléctricamente robustecido al año 2020 y no será necesario comprar potencia y energía a Colombia.



(a)

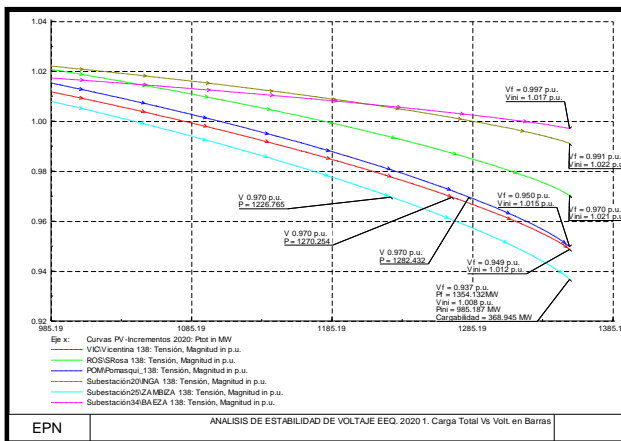


(b)

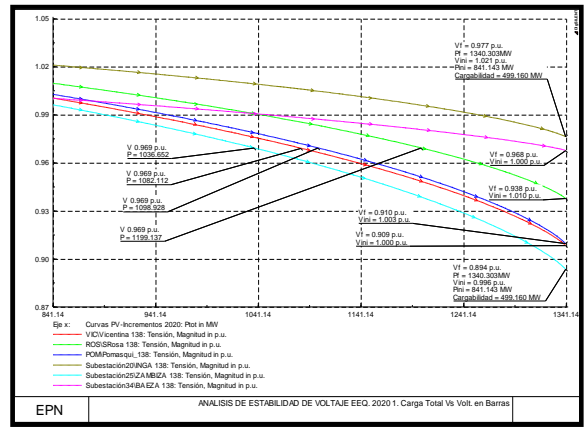


(c)

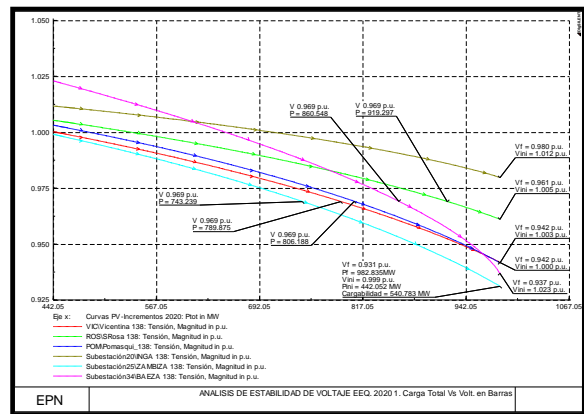
Fig. 12. Comportamiento del voltaje en las subestaciones Santa Rosa, Selva Alegre, Pomasqui y Vicentina en función de la potencia total del SEQ. (a) Demanda Máxima, (b) Demanda Media y (c) Demanda Mínima



(a)



(b)



(c)

Fig. 13. Comportamiento de la potencia total y el voltaje del SEQ con la red al año 2020: (a) Demanda Máxima, (b) Demanda Media y (c) Demanda Mínima

TABLA I

POTENCIA Y PORCENTAJE DE CRECIMIENTO EN LOS AÑOS 2010 Y 2020

DEMANDA MÁXIMA			
AÑO	2010	2020	PORCENTAJE DE CRECIMIENTO [%]
P inicial (MW)	630,05	985,19	56,37
P máxima (MW)	803,58	1354,13	68,51
Cargabilidad (MW)	173,53	368,94	112,6
DEMANDA MEDIA			
AÑO	2010	2020	PORCENTAJE DE CRECIMIENTO [%]
P inicial (MW)	534,26	841,14	57,44
P máxima (MW)	728,83	1340,3	83,9
Cargabilidad (MW)	194,57	499,16	156,54
DEMANDA MÍNIMA			
AÑO	2010	2020	PORCENTAJE DE CRECIMIENTO [%]
P inicial (MW)	328,85	442,05	34,42
P máxima (MW)	599,48	982,83	63,95
Cargabilidad (MW)	270,63	540,78	99,82

- El tener un margen alto de cargabilidad del SEQ no significa que el sistema eléctrico no presente ninguna anomalía eléctrica, al contrario, tanto al año 2010 como al 2020, se llegan a sobrecargar muchos elementos del sistema. Por lo tanto, la cargabilidad del sistema no estará limitada al punto máximo de cargabilidad, sino estará limitada por la cargabilidad de varios equipos ya sea líneas de subtransmisión o transformadores.

### VIII. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos del estudio de estabilidad de voltaje del SEQ muestran que se tiene un margen alto de cargabilidad en los tres escenarios de operación tanto al año 2010 como al año 2020, por lo cual el SEQ no presenta problemas en la cargabilidad del sistema.
- El análisis de estabilidad de voltaje utilizando la herramienta DPL U\_P-Curve disponible en PowerFactory tiene la limitación de que el paso de incremento de carga es el mismo para todas las cargas. Por lo que fue necesario desarrollar un código en DPL que permita ingresar los pasos de incremento para cada barra de carga a través de una matriz generada de dimensiones  $N_{\text{cargas}} \times 1$ . En este trabajo se utiliza como pasos de incremento de carga la tasa de porcentaje de crecimiento anual del SEQ en cada subestación.
- La consideración de la tasa de incremento anual del plan de expansión del SEQ como paso de incremento de carga, permite obtener resultados de cargabilidad del sistema, en los tres escenarios de demanda, mucho más reales que el realizar el estudio considerando pasos de incremento de carga iguales para todas las cargas.
- El nivel de carga a 2020, en condiciones iniciales de operación, no sobrecarga ninguna línea de subtransmisión perteneciente al SEQ.

### REFERENCIAS

- [1] P. Kundur, "Power Stability and Control", EPRI Power System Engineering series, McGraw-Hill, New York 1994.
- [2] División de Planificación, "Plan de Expansión 2010-2020 del Sistema Eléctrico de la EEQ S.A.", EEQ. 2009.
- [3] R. Canelos, "Determinación de la Potencia a Transmitirse en Líneas de Transmisión", teoría de la materia Diseño Electromecánico de Líneas de Transmisión, EPN, Quito.

- [4] IEC, "International Standard CEI IEC 60909-0", IEC, First Edition 2001-07.
- [5] J. Játiva Ibarra, "Modelo General del Transformador", teoría de la materia Sistemas Eléctricos de Potencia, EPN, Quito
- [6] Jan, Machowski, "Power System Dynamics: Stability and Control", WILEY, Second Edition 2008.
- [7] Thierry Van Cutsem, "Voltage Stability of Electric Power System", Kluwer Academic Publisher, second Printing 2001.
- [8] J. Játiva Ibarra, "Límites de Operación de Generadores Sincrónicos", teoría de la materia Sistemas Eléctricos de Potencia, EPN, Quito.
- [9] J. Grainger, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGRAW-HILL, Primera edición 2006.
- [10] P. Kothari, I.J. Nagrath, "Sistemas Eléctricos de Potencia", McGraw-Hill Tercera Edición, Mexico 2008.
- [11] DigSILENT Powerfactory, "DPL Manual 13.1", GmbH Gomaringen Germany, 2007.
- [12] A. von Meier, "Electric Power Systems A Conceptual Introduction", A Wiley-Interscience Publication, First Edition Printing 2006.

### BIOGRAFÍAS:



**Dr. Jesús Játiva Ibarra:** Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional; Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor of Philosophy Ph.D. (1991) de la Universidad de Texas en Arlington Estados Unidos de América. Cursos de postgrado en Energy Conservation in Industry realizado en Suecia en 1995 y en Development Planning Techniques with Computer Applications efectuado en los Países Bajos en 1998. Profesor Titular de la Escuela Politécnica Nacional y Consultor de Sistemas Eléctricos de Potencia.



**Antonio De Jesús Ortiz López:** Nació el 01 de junio de 1986 en la ciudad de Ambato, cursó sus estudios de bachillerato en el Instituto Tecnológico Superior Bolívar de la ciudad de Ambato, sus estudios superiores de Ingeniería Eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional. Su proyecto de titulación trata sobre el análisis de estabilidad de voltaje en estado estable del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Quito. Actualmente se encuentra trabajando en PIL "Proyectos Integrales del Ecuador S.A".