



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

**ESTUDIO DE CARGABILIDAD DEL SISTEMA DE
SUBTRANSMISIÓN A 69kV AMBATO – LATACUNGA
PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE
OPERACIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad
mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Mise Guanoluisa Carlos Danilo

Tutor:

Ing. Carlos Pacheco Msc.

LATACUNGA – ECUADOR

2022

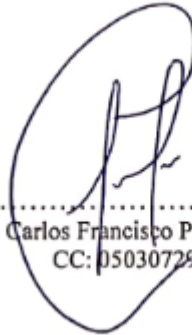
AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “ESTUDIO DE CARGABILIDAD DEL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN A 69 KV AMBATO–LATACUNGA PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.” presentado por Mise Guanoluisa Carlos Danilo, para optar por el título magíster en Electricidad mención sistemas eléctricos de potencia

CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, octubre, 10, 2022.




.....
Msc. Carlos Francisco Pacheco Mena
CC: 0503072902

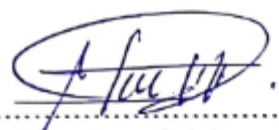
AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación “Estudio de cargabilidad del sistema de subtransmisión a 69 kv Ambato – Latacunga para determinar las condiciones de operación.”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

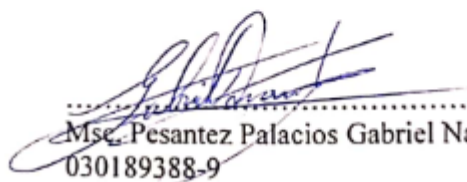
Latacunga, octubre, 11, 2022.



.....
Msc. Porras Reyes Jefferson Alberto
070440044-9
Presidente de tribunal



.....
Msc. León Segovia Marco Aníbal
050230540-2
Lector 2



.....
Msc. Pesantez Palacios Gabriel Napoleón
030189388-9
Lector 3

DEDICATORIA

Dedicado a Dios por regalarme la bendición de cumplir con esta meta profesional. A mis hijos Alisson Daniela, Hillary Natalia, Carlitos Gael y a mi esposa Adriana que son lo más importante en mi vida, por brindarme en sus ojos la fuerza suficiente para alcanzar este logro. Como no dedicar a mis Padres Gonzalo y Agustina, mi hermana Verónica por su apoyo constante y sus sabios consejos para poder superarme día a día.

Carlos Danílo

AGRADECIMIENTO

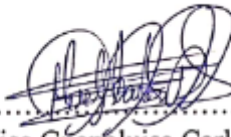
Agradezco a Dios y a la Virgen Santísima que me regalaron esta gran bendición de poder dar este paso que, con esfuerzo y sacrificio logré alcanzar. A mi esposa Adriana que siempre ha estado brindándome el apoyo necesario y constante. Un agradecimiento especial a todas las personas que de manera directa e indirecta contribuyeron con esta investigación.

Carlos Danílo

RESPONSABILIDAD DE AUTORIA

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, octubre, 11,2022



.....
Misé Guanóluisa Carlos Danilo
050285869-9

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, octubre, 11,2022




.....
Mise Guanóluisa Carlos Danilo
050285869-9

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: “Estudio de cargabilidad del sistema de subtransmisión a 69kV Ambato – Latacunga para determinar las condiciones de operación” contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica de tribunal.

Latacunga, octubre, 11,2022



.....
Msc. Porras Reyes Jefferson Alberto
070440044-9

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI DIRECCIÓN DE POSGRADO

MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

Título:

**ESTUDIO DE CARGABILIDAD DEL SISTEMA DE
SUBTRANSMISIÓN A 69kV AMBATO – LATACUNGA
PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE
OPERACIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de magister en Electricidad

mención sistemas eléctricos de potencia

Autor:

Mise Guanoluisa Carlos Danilo

Tutor:

Ing. Carlos Pacheco Msc.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realizó un análisis de cargabilidad de la línea de subtransmisión a 69kV Ambato – Latacunga para determinar las condiciones de operación como son los niveles de voltaje y factor de potencia en cada barra y comparando su estado actual con la normativa ARCONEL 053 / 18 en donde se verificó si sus valores están dentro de los niveles establecidos por esta normativa para lo que se realizó el modelamiento del sistema eléctrico con ayuda del software Digsilent power factory y por medio de simulaciones se determinó que está sucediendo cuando se presentan condiciones a demanda máxima, media y mínima, la variación de voltaje y el factor de potencia no cumplen con los límites establecidos en la normativa para que se realizó el análisis de que medidas de mitigación de problemas de colapsos de voltaje se puede sugerir para mejorar los perfiles de voltaje así como el tipo y potencia de SVC que se debería instalar para compensar automáticamente el factor de potencia.

PALABRAS CLAVE: ARCONEL 053/18, colapso de voltaje, variación de voltaje, sistemas eléctricos de potencia, SVC, compensación.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD
MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Title:

"SYSTEM LOADING STUDY FROM AMBATO-
LATACUNGA 69kV SUBTRANSMISSION FOR
DETERMINING THE OPERATION CONDITIONS"

Author:

Mise Guanoluisa Carlos Danilo

Tutor:

Ing. Carlos Pacheco Msc.

ABSTRACT

Into current research work, it was made a chargeability analysis from 69kV Ambato-Latacunga subtransmission line for determining the operating conditions, such as voltage levels and power factor into each bar, at comparing its current state with the 053/18 ARCONEL regulations, where it was verified if their values are within the levels established by this regulation, which it was made the electrical system modeling with the Digsilent power factory software help and by means simulations, it was determined, what is it happening, when it is presented conditions of maximum, mean and minimum demand, the voltage variation and the power factor do not comply with the established limits in the regulations, what it was made the analysis, what voltage collapse problems mitigation measures can be suggested for improving the voltage profiles, as well as the type and SVC power, which should be installed to automatically compensate the power factor.

KEYWORDS: ARCONEL 053/18, voltage collapse, voltage variation, electrical power systems, SVC, compensation.

Yo, Beltrán Semblantes Marco Paúl con cédula de identidad número: 0502666514 Magister en Lingüística Aplicada a la Enseñanza del idioma Inglés como Lengua Extranjera con número de registro de la SENESCYT: 1020-2021-2354162; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "ESTUDIO DE CARGABILIDAD DEL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN A 69kV AMBATO – LATACUNGA PARA DETERMINAR LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN" de Mise Guanoluisa Carlos Danilo, aspirante a Magister en Electricidad. Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

Atentamente,

Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CC: 0502666514



Latacunga, Noviembre del 2022.

CENTRO
DE IDIOMAS

INDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Planteamiento del problema:.....	1
Formulación del problema:	2
Objetivo General:	2
Objetivos específicos:	2
Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:.....	3
Justificación:	4
CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLOGICA	11
1.1 Sistemas de transmisión.....	11
1.1.1 Subestaciones	12
1.2 Líneas de transmisión	15
1.2.1 Criterios, limitantes y consideraciones.	16
1.2.2 Curvas de capacidad de líneas de transmisión.....	19
1.3 Alimentador primario.....	19
1.4 Circuito radial	20
1.5 Estabilidad de los sistemas de potencia	20
1.5.1 Confiabilidad, seguridad e infraestructura	20
1.5.2 Variaciones de la estabilidad	22
1.5.3 Estabilidad y colapso del voltaje.....	22
1.5.4 Métodos de análisis de estabilidad de tensión	23
1.6 Regulación ARCONEL 053/18	32
1.6.1 Objetivo.....	32
1.6.2 Ámbito	32
1.6.3 Definiciones	32
1.6.4 Nivel de voltaje	33
1.6.5 Límites de operación en los puntos de entrega	34
1.6.6 Incumplimiento de los índices de calidad de producto	34
1.6.7 Modelo eléctrico	36

1.7	Software Digsilent power factory	37
1.8	Conclusiones Capítulo I.....	39
CAPÍTULO II. PROPUESTA		40
2.1	Título del proyecto.....	40
2.2	Objetivo del proyecto.....	40
2.3	Descripción de la propuesta.....	40
2.4	Metodología o procedimientos para el cumplimiento de los objetivos planteados.....	41
2.4.1	Diagrama de flujo para desarrollo de la propuesta.	41
2.4.2	Descripción del Sistema Eléctrico de Potencia.....	42
2.4.3	Evaluación y diagnóstico del sistema eléctrico de potencia	43
2.4.4	Colapso de voltaje:.....	52
2.5	Resultados del análisis de cargabilidad de la línea de subtransmisión.	60
2.6	Conclusiones Capitulo II.....	60
CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA INVESTIGACION		
62		
3.1	Análisis de los resultados.....	62
3.2	Método	63
3.3	Propuesta y alcance del estudio	66
3.4	Mitigación de problemas de estabilidad de voltaje.....	67
3.4.1	Medidas operativas	68
3.4.2	Expansión del sistema.....	70
3.4.3	Compensación reactiva controlada	70
3.4.4	Deslastre de carga por voltaje	70
3.4.5	Bloqueo de los cambiadores de tap´s.....	71
3.4.6	Sistema de medida de área amplia	71
3.4.7	Sistemas de monitoreo, protección y control de área amplia.....	71
3.4.8	Partición del sistema	72
3.5	Validación técnica – económica	72
3.6	Conclusiones del capítulo III	74
3.7	Conclusiones generales	74
3.8	Recomendaciones	75



3.9	Referencias bibliográficas.....	76
4	Bibliografía	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.	11
Figura 2. Sección de una línea de transmisión de dos conductores.	16
Figura 3. Curvas P-V con distinto factor de potencia.	17
Figura 4. Circuito para cálculo de cargabilidad en líneas de subtransmisión.	18
Figura 5. Sección de una línea de transmisión de dos conductores.	19
Figura 6. Estabilidad y sus características.	21
Figura 7. Respuesta del rotor a una perturbación.	22
Figura 8. Curva P – V.	29
Figura 9. Modelo matemático para la Curva Q – V.	30
Figura 10. Familia de Curvas Q - V.	31
Figura 11. Software Digsilent power factory.	39
Figura 12. Diagrama de flujo para desarrollo de la propuesta.	41
Figura 13. Torres de subtransmisión.	44
Figura 14. Resultados a demanda máxima.	46
Figura 15. Datos a demanda máxima.	47
Figura 16. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda máxima.	47
Figura 17. Resultados a demanda mínima.	48
Figura 18. Datos a demanda mínima.	49
Figura 19. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda mínima.	49
Figura 20. Resultados a demanda media.	50
Figura 21. Datos a demanda media.	51
Figura 22. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda media.	51
Figura 23. Respuesta del SEP frente a un colapso de voltaje.	55
Figura 24. Datos del SEP frente a un colapso de voltaje.	55
Figura 25. Datos de cargabilidad en las líneas de subtransmisión.	56
Figura 26. Curvas P-V en un colapso de voltaje.	57
Figura 27. Curva Q-V.	58
Figura 28. Estabilidad de voltaje.	59
Figura 29. Respuesta de la corriente de corto circuito.	59
Figura 30. Respuesta de la frecuencia en el SEP.	60
Figura 31. Diagramas de flujo para estudio de cargabilidad.	62

Figura 32. Curvas P-V en subtransmisión a 69kV.....	63
Figura 33. Curvas P-V en distribución a 13,8kV.....	64
Figura 34. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.	65
Figura 35. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.	66
Figura 36. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.	67
Figura 37. Medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje.....	68
Figura 38. Implementación del SVC.	73

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos.	3
Tabla 2. Variaciones de voltaje admitidas	33
Tabla 3. Límites de variación de voltaje para la operación del S.N.I.	34
Tabla 4. Características líneas de subtransmisión Ambato - Salcedo.....	42
Tabla 5. Características del transformador Salcedo.....	43
Tabla 6. Datos de la subestación AMBATO.....	45
Tabla 7. Datos de la subestación HOLCIM.	45
Tabla 8. Datos de la subestación FAÍRIS.	45
Tabla 9. Datos de la subestación ALIMENTADOR 1.....	45
Tabla 10. Datos de la subestación ALIMENTADOR 2.....	45
Tabla 11. Datos de la subestación ALIMENTADOR 3.....	45
Tabla 12. Datos de la subestación ALIMENTADOR 4.....	46
Tabla 13. Condiciones del sistema eléctrico Ambato - Latacunga	60
Tabla 14. Presupuesto referencial para instalación SVC 8Mvar.....	72
Tabla 15. Condiciones del sistema eléctrico Ambato - Latacunga	73

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1)	16
Ecuación (2)	16
Ecuación (3)	16
Ecuación (4)	16
Ecuación (5)	17
Ecuación (6)	25
Ecuación (7)	33



Glosario

kV	Kilovoltio
P_{max}	Potencia máxima
S	Potencia aparente
VAR	Voltamperios reactivos
SVC	Compensador estático de reactivos
ΔV	Variación de voltaje
ΔQ	Variación de potencia reactiva
V_n	Voltaje nominal

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Se presenta como una problemática en los sistemas eléctricos de potencia las largas distancias entre generación y cargas concentradas para transferir toda la potencia necesaria debido a que los centros de generación se encuentran a distancia considerable hasta el consumidor final siendo las zonas rurales las más alejadas de la zona de operación de ELEPCO S.A.

El análisis de cargabilidad de una línea de subtransmisión a 69 kV determina las condiciones de operación entre el punto frontera de la subestación Ambato y la conexión al sistema de subtransmisión ELEPCOSA, la caída de voltaje se hace mucho más evidente, en condiciones normales de operación el voltaje en la carga se incrementa hasta los límites permitidos.

Planteamiento del problema:

La transferencia de energía en un sistema eléctrico de potencia asume criterios de funcionalidad y operación dentro de planificación, cuando suceden condiciones adversas se podría asumir que la cargabilidad de la línea de subtransmisión es la característica principal para los incrementos o descensos de niveles de voltaje en barras, además de la incidencia de distintos factores eléctricos como mecánicos que afectarían a la operación provocando temperaturas elevadas haciendo que el conductor se dilate ó temperaturas bajas haciendo que el conductor se contraiga tanto en condiciones de prefalla como en contingencias.

Si una línea de subtransmisión al asumirse su máxima cargabilidad no cuenta con la capacidad de mantener los niveles de operación se asumiría condiciones de inestabilidad de voltaje debido a las cargas que intentar restaurar el consumo de energía. Determinándose y cuantificando la variación de voltaje entre el punto de salida y el punto de llegada, de ser el caso se definirá una alternativa de mejoramiento que contribuyan a minimizar esta problemática.

Formulación del problema:

El análisis de la cargabilidad de la línea de subtransmisión se hace necesario para determinar si tiene o no afectaciones al sistema eléctrico de potencia Elepcosa que provocarían variaciones en los niveles de voltaje, variaciones de corriente, la variación de frecuencia que finalmente desconecten el sistema eléctrico de potencia. Con la expansión de redes eléctricas no programadas y el crecimiento de la población contribuyen a que líneas de transmisión más largas tengan un alto índice de probabilidad de variaciones de voltaje en los puntos frontera de la red.

Objetivo General:

Analizar la cargabilidad del sistema de subtransmisión a 69kV Ambato – Latacunga para determinar las condiciones actuales de operación.

Objetivos específicos:

1. Documentar información acerca de los análisis de cargabilidad en líneas de subtransmisión.
2. Obtener datos de las variables eléctricas de las líneas de subtransmisión.
3. Utilizar técnicas analíticas y computaciones para análisis de cargabilidad de líneas de subtransmisión y variación de voltaje en sistemas eléctricos de potencia.

Sistemas de tareas en relación a los objetivos específicos:

Se tiene previsto realizar las siguientes actividades:

Tabla 1. Sistema de tareas en relación a los objetivos específicos.

Objetivos específicos	Actividad (tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
1	Investigar y utilizar información acerca de los análisis de cargabilidad en líneas de subtransmisión.	Información de cargabilidad de líneas de subtransmisión.	Investigación científica.
	Estudio de las características principales en una línea de subtransmisión.	Consideración de la variación de voltaje como característica principal de la cargabilidad de una línea de subtransmisión.	
2	Analizar los datos de las variables eléctricas de las líneas de subtransmisión.	Definir el estado actual operativo de las líneas de subtransmisión.	Recolección de datos.
		Evaluar las variables eléctricas en las líneas de subtransmisión. Utilizar la normativa correspondiente para determinar el estado condicional de operación	
3	Utilizar técnicas analíticas y computaciones para análisis de cargabilidad	Realización del diagnóstico de los parámetros eléctricos de las L/T. Modelamiento por medio de un software de energía eléctrica.	Simulación en software de energía eléctrica para determinar las condiciones de operación del Sistema

de líneas de subtransmisión y variación de voltaje en sistemas eléctricos de potencia.	Obtención de flujos de potencia. Comparación de los resultados con la normativa eléctrica.	eléctrico de potencia propuesto y comparación de resultados con la normativa eléctrica.
--	--	---

Elaborado por: Autor.

Justificación:

En la actualidad todo sistema eléctrico de potencia está sometido al constante crecimiento industrial, comercial y doméstico afectando su operación y planificación, provocando variaciones en sus parámetros eléctricos y un deficiente servicio de energía eléctrica a los consumidores finales, se buscará con este análisis de cargabilidad en la L/T a 69kV en el tramo Ambato – Latacunga proponer alternativas de solución.

Hipótesis

El análisis de la cargabilidad de la línea de subtransmisión a 69kV Ambato - Latacunga permitirá conocer si existen variaciones de voltaje en condiciones actuales.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA- METODOLÓGICA

1.1 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado del arte.-

En [1], el autor N. Torrealba analiza los puntos de equilibrio utilizando las curvas Q-V en base al modelado del sistema eléctrico de potencia en la norma IEEE de barra en el que se comprueba con exactitud y precisión los datos enviados desde barras, utilizando programación en Matlab y Power Factory Digsilent se evidencia que la exactitud y precisión en los resultados permitiendo realizar mejoras y propuestas que ayudaron en la estabilidad de voltaje. “Trata un método de análisis de estabilidad de voltaje, conocido como curvas Q-V, con el cual se puede establecer los límites de potencia reactiva que pueden ser suministrados por una barra o nodo del sistema sin que este entre en un estado inestable, apoyados en el sistema eléctrico de potencia de 14 barras de la IEEE para aplicar este método” [1].

En [2], los autores H. Salama y T. Youssef, realizan un análisis de los sistemas eléctricos de potencia para aumentar la capacidad de transferencia de potencia sin comprometer la estabilidad de voltaje en estado estacionario, así como en estado dinámico. Las restricciones económicas y ambientales llevan a operar al límite cuando no se realiza una planificación acorde al crecimiento de carga. Este artículo toma en base que un sistema eléctrico de potencia debe ser estable en cualquier situación o contingencia ante la generación distribuida del caso de estudio, [2].

En [3], los autores M.C. Reyes, P.A. Córdoba, E. Rivas, presenta el análisis para estabilidad transitoria y de pequeña señal en un sistema multimáquina donde realizan su estudio basándose en el segundo método de Lyapunov y el flujo de potencia en el DIgSILENT PowerFactory, en donde con la función RMS/EMS simulation para definir la curva t- δ con perfiles de velocidad, voltaje y frecuencia. Utilizando el análisis de lugares geométricos de la raíz permite ampliar la visión en sistemas eléctricos de potencia más robustos que deberán soportar fallas en la

operación, así como coordinar las protecciones eléctricas de manera que respondan de manera eficaz a su sensibilidad. Haciendo mención en que “Los sistemas eléctricos de potencia son estables cuando las variables eléctricas se encuentran dentro de un rango establecido en el transcurso del tiempo, también si al presentar una contingencia el sistema es capaz de volver a un estado de equilibrio que garantice su continuidad; lo anterior implica que todas las máquinas permanezcan en sincronismo unas con otras. De forma general, la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia (SEP) se puede clasificar de acuerdo con lo planteado, donde la estabilidad de ángulo relaciona el sincronismo en las máquinas, la estabilidad de tensión, el colapso de voltaje y la estabilidad de frecuencia, las variaciones en magnitud y forma de onda”, [3].

En [4], los autores R. Tirira, C. Barrera, presentan un análisis de sistemas eléctricos de potencia utilizando el método de continuación (CPF) donde se realiza una reformulación de potencias especificadas al que se incluye ecuaciones que representan los diferentes modelos de carga, para así obtener una comparación entre puntos de colapsos con y sin modelos de carga. En donde se concluye que: “La estabilidad de voltaje puede ser estudiada y analizada por diferentes métodos, siendo la elección de este factor decisivo en los resultados que se obtendrán de este estudio. Se deben considerar las variables que presenta el sistema a analizar para elegir el método que se acople a las necesidades de este y resolver la problemática planteada”, [4].

En [5], los autores M. Ullauri, J. Cepeda, H. Arcos, presentan un análisis de generación para estudios dinámicos, las que permiten emular en Digsilent power factory las respuestas del sistema de potencia más aproximadas, estos modelos de estudio son sometidos a diferentes pruebas de gabinetes en sistemas aislados donde la congruencia de los resultados dará validez y mejorará la emulación de transitorios electromecánicos que se utiliza para estudios de estabilidad. Como conclusión se tiene que “Las pruebas de los modelos de los controladores de velocidad y voltaje, se deben realizar en una red aislada, esto con la finalidad de evitar la influencia de una red externa y/o de otros reguladores o dispositivos de control que pueden

favorecer o desfavorecer el desempeño del control a probar, llevando a un posible análisis erróneo del desempeño”, [5].

En [6], los autores R. Arrieta, J. Sepúlveda, establecen un estudio de basado en el método CPF el método de flujo de carga continuado donde establece que para calcular la máxima carga en un SEP donde la variación de potencia activa y reactiva son los principales contribuyentes que conducen al flujo de carga llegando a la conclusión que: “El método de flujo de carga continuado es una herramienta muy útil, la cual permite simular los sistemas en un punto de estrés bastante alto con lo cual se determina cómo se comportan los sistemas ante las mencionadas condiciones y que permitan organizar una mejor planeación del despacho, el cual según los resultados es de vital influencia para determinar el riesgo de inestabilidad”, [6].

En [7], el autor E. Montoya, establece que la cargabilidad de una línea de transmisión desde el punto de vista estadístico puede definir el comportamiento de los sistemas empleados cuando el voltaje en si no cumplan con los parámetros o normas establecidas y que están por encima de los 0.9volts en p.u. y notando el punto de colapso debido al constante incremento de la carga y el comportamiento de los flujos de salida en referencia a la potencia máxima transmitida. Como conclusión que “la principal utilidad del estudio de flujo estocástico se encuentra en el análisis de la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia, en el estudio convencional los datos y los resultados son valores únicos, mientras que en un estudio estocástico son rangos alrededor de un valor esperado”, [7].

En [8], los autores J. Rodríguez, A. Yulán, J. Chancay, realizan un análisis para los proyectos de inversión y expansión con el fin de mejorar los sistemas de transmisión de la provincia de Manabí en relación al voltaje y a la cargabilidad de las líneas, definiendo mediante los flujos de potencia, perfiles de voltaje y potencias los elementos que conforman el sistemas eléctrico de potencia así como los problemas que lo están afectando su operatividad, las simulaciones realizadas demostró mediante el software POWERWORLD que el sistema eléctrico de potencia estaba operando al “límite de sus condiciones generando problemas de voltaje en las redes de CNEL-Manabí”, [8].

En [9], el autor M. Guánchez, realiza un estudio relacionado al “continuo crecimiento de la demanda eléctrica puede eventualmente conducir al sistema eléctrico de potencia a un estado inestable, caracterizado por una rápida disminución de las magnitudes de la tensión. En donde el colapso de voltaje es conocido como un fenómeno y a menudo se lo estudia usando perfiles de voltajes. La estabilidad de voltaje debe ser analizado en estudios de planificación y operación”. Este trabajo utiliza la herramienta MATLAB para realizar el análisis en régimen permanente en las curvas P-V con el método de flujo de potencia continuado en donde este método hace el cálculo del punto de bifurcación en un sistema eléctrico de potencia, [9].

En [10], el autor G. Alfonso Palacios, presenta su trabajo “el proceso de la realización de una serie de guías, además de la metodología para tener la información necesaria y comprender la estabilidad partiendo desde conocimientos básicos, en estas guías se encuentra como conocer la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia y como poder realizar la compensación del mismo. Con el método de criterio de áreas iguales se encuentra el tiempo de despeje de la falla, a partir del ángulo crítico del sistema. Se debe tener en cuenta más parámetros para garantizar la estabilidad; se puede implementar el método de valores propios y obtener la matriz de estado, y así conocer la estabilidad del mismo, este método es más real permitiendo implementar dispositivos de compensación para lograr estabilidad”. Para este estudio se utilizó información recopiladas en donde sirvieron para la elaboración de las guías y plantear los modelos matemáticos donde cada uno de ellas justifica su operación, [10].

En [11], el autor M. Valero Laguado, realiza un estudio de las variaciones del nivel de tensión en toda una ciudad, proponiendo el cambio de dirección del recorrido del flujo aumentado la carga para optimizar el sistema. Utilizando el software DlgSILENT para simular los diferentes escenarios que se analizan con las demandas máximas mínimas del sistema eléctrico de potencia, en donde se propone dos casos particulares para ver si en horas de demanda máxima la estabilidad se ve afectado. Con el estudio se “determinó una propuesta de cambiar la dirección de

flujo de del sistema eléctrico de potencia implementado un transformador de potencia de 50MVA, un reactor de 10MVAR y una línea de transmisión de 20km interconectado al sistema nacional interconectado y así mantener el nivel de tensión dentro de los parámetros normativos por lo que mejorarían notablemente el servicio eléctrico”, [11].

En [12], los autores D. Ariza, L. Correa, proponen un estudio de “un sistema de transmisión regional del país, el potencial de aumento de la cargabilidad que tendría el uso de la capacidad térmica dinámica DTR. En una primera parte revisan los procedimientos y criterios tradicionales (conservativos) usados en el diseño de líneas de transmisión y los antecedentes y experiencia exitosas de la implantación de DTR a nivel mundial. Además, plantea alternativas de esquemas de capacidad térmica dinámica que integran un software. Luego de identificar el mejor esquema, el trabajo continúa con el enfoque en la aplicación del modelo térmico del conductor (Norma IEEE 738) para una línea de transmisión de 115kV de un sistema de transmisión regional del centro del país”, [12].

En [13], el autor Perdomo, S. Ramírez, realiza un análisis sobre “una nueva metodología para el monitoreo en tiempo real de la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico de potencia utilizando PMUs. Implementado un índice de nodos y líneas utilizados para esta aplicación en donde los índices de nodos DSY y el índice de línea LFCI entregaron mejores resultados sobre el grado de estabilidad de un SEP ante los incrementos de carga y demás contingencias que a través de PMUs. Con la ayuda del software DIgSILENT se modeló un SEP de 14 y 39 de nodos considerando las restricciones operativas de límites de tensión de operación y máxima capacidad de entrega de reactivos por parte los generadores, además de obtener y analizar los diferentes modelos de carga en operación normas y diferentes contingencias, comparándose con el margen de estabilidad, el análisis modal y el índice ISI que es usado para el monitoreo de la estabilidad de tensión”, [13].

En [14], los autores C Narváez Perez, D. García Conejo, hace mención que “la creciente demanda de energía eléctrica provoca que un sistema eléctrico de potencia opere dentro de sus límites operativos. Una línea de transmisión al ser el componente más elemental en un sistema eléctrico de potencia requiere de un

cálculo minucioso dentro de su límite de cargabilidad. Se ha desarrollado un método para calcular la cargabilidad de las líneas de transmisión que considera el soporte de reactivos de los nodos emisor y receptor, de forma que se considere un escenario más apegado a la realidad, con soporte de reactivos en los extremos de la línea de interés mediante el programa elaborado en MATLAB, haciendo flujos de potencia en estado estable”,[14].

En [15], el autor D. Sánchez Salazar, propone un modelo para “el estudio de estabilidad de voltaje en sistemas de transmisión incluyendo las curvas de capacidad de las líneas asociadas a la barra de estudio, haciendo referencia al método de flujos de potencia continuados (CPF) utilizando el algoritmo predicción-corrección, el cual determina mediante soluciones sucesivas el punto de voltaje crítico de operación de cada barra en el sistema. Además, se puede observar el incremento del flujo de potencia por las líneas asociadas a la barra de estudio debido a una variación de potencia de carga con la finalidad de determinar si la potencia transmitida se encuentra dentro del límite de operación segura de la línea asociada a la barra”. Con este estudio se logra determinar cómo se incrementa la potencia transportada por la línea y permite determinar si existe un colapso de voltaje y bajo qué condiciones podría ocurrir antes que las líneas lleguen a su máxima capacidad de transmisión, [15].

Los datos para el estudio serán proporcionados por la Dirección de Planificación, la Dirección Técnica, la Dirección Comercial de ELEPCO S.A , la colaboración del Departamento de Operaciones de la Empresa Eléctrica Ambato.

CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA METODOLOGICA

1.1 Sistemas de transmisión

Debido a que el voltaje de generación en una central eléctrica es relativamente bajo y su ubicación bastante lejana de los centros de consumo, el transporte de energía eléctrica a estos niveles resulta demasiado costoso. Para que el costo del transporte sea razonable es necesario elevar el voltaje a un nivel alto que depende de varios factores como: la potencia a transmitir, la longitud de la línea, las pérdidas, en nuestro medio estos niveles pueden ser 13,8 kV 22 kV 69 kV 138 kV 230 kV o 500kV. Dicha operación se efectúa en una instalación que se denomina en general estación transformadora elevador o subestación elevadora que eleva el voltaje para que, una vez hecha la conducción por las líneas de transmisión, en los centros de consumo debe procederse a la distribución de esta potencia requiriéndose de subestaciones distribuidoras, que reducen el voltaje a 13,2 kV 13,8 kV 22 kV, [16].

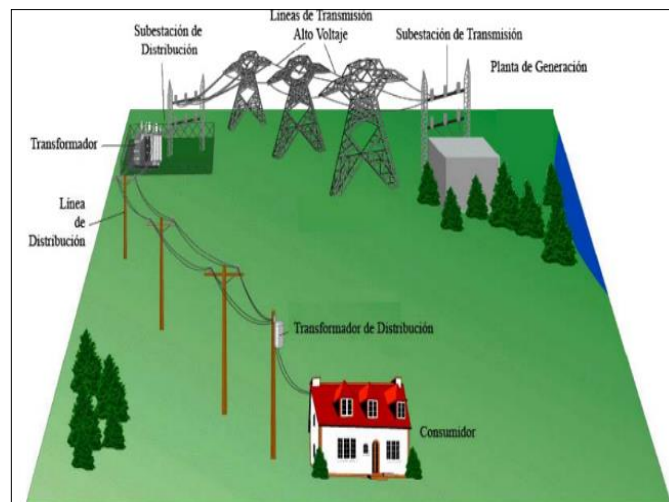


Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.

Fuente: [16]

Algunas veces se enlazan sistemas por medio de subestaciones de interconexión, finalmente se reduce el voltaje a un valor adecuado para los centros de consumo en unas casetas de transformación, cuyo elemento principal es el transformador de distribución, además se tiene un nivel intermedio denominado subtransmisión. En la figura 1, se presenta un sistema eléctrico con centros de producción y de consumo

de la energía eléctrica, así como los puntos donde la energía sufre cambios en los niveles de voltaje de acuerdo al tipo de subestación requerido, [16].

Un sistema eléctrico de potencia es un sistema constituido por varios elementos como: torres de transmisión, conductores, aisladores, postes, que se encarga de llevar la energía eléctrica desde las fuentes de generación hasta los puntos de consumo a través de grandes distancias. Considerando que, para un determinado nivel de potencia a transmitir, al elevar el voltaje en los conductores se reducirá la intensidad de corriente eléctrica que conducen y disminuirá las pérdidas por efecto joule, los conductores están sujetos a tracciones causadas por la combinación de agentes como el viento, la temperatura del conductor, la temperatura del aire, el voltaje y la capacidad de la línea de transmisión afectan el tamaño de estas estructuras principales. Las torres pueden ser postes simples para las líneas de transmisión pequeñas de hasta 46 kV, estructuras de postes en forma de H para las líneas de subtransmisión de 69 kV, para las líneas de 138 kV o de mayor voltaje se utilizan estructuras de acero independiente, de circuito simple.

1.1.1 Subestaciones

Una subestación es un punto dentro del sistema de potencia en el cual se cambian los niveles de voltaje y corriente con el fin de minimizar pérdidas y optimizar la distribución de la potencia por todo el sistema. Es además el centro donde se recibe y reparte la energía producida en las centrales generadoras, maniobrando y controlando su destino final a los diferentes centros de consumo, con determinados requisitos de calidad, [15].

1.1.1.1 Clasificación de las subestaciones por su función dentro del sistema

Subestación de generación: Es la estación primaria de la energía producida por las plantas generadoras, su objetivo esencial es transformar el voltaje a niveles altos para lograr economía con la reducción de la corriente en el transporte de la energía eléctrica.

- **Subestación de transmisión:** Su función es interconectar las diferentes líneas de transmisión de 138 kV o 230 kV y actualmente 500 kV. Estas generalmente alimentan también barrajes de 69 kV y/o 13,8 kV.

- **Subestación de subtransmisión:** Son aquellas que alimentan o interconectan líneas de nivel intermedio de voltaje 69 kV ó 22 kV, para transporte a distancias moderadas y de cargas no muy altas, con cargas distribuidas a lo largo de la línea.
- **Subestación de distribución:** Su función es reducir el voltaje a niveles de distribución 13,2 kV y 13,8 kV para enviarla a los centros de consumo industrial o residencial, donde los transformadores de distribución instalados a lo largo de los circuitos, se encargan de reducir los niveles de voltaje para el cliente final, [15].

1.1.1.2 Clasificación de las subestaciones por tipo de operación

Según el tipo de operación la subestación de transformación es una estación que transforma el voltaje dentro del sistema de potencia, a valores adecuados para su transporte o utilización. De acuerdo a la función de transformación que cumplan en el sistema de potencia se dividen en:

- **Subestación de transformación:** El voltaje de salida es diferente de la de entrada; estas son las que permiten elevar o reducir los niveles de voltaje desde los puntos de generación, pasando por lo niveles más altos de transmisión, hasta los niveles más bajos de subtransmisión o distribución.
- **Subestación de maniobra:** Su función es unir algunas líneas de transporte con otras de distribución, con el propósito de dar mayor confiabilidad y continuidad al servicio; el nivel de voltaje es uno solo, por lo tanto, no se utilizan transformadores de potencia que eleven o reduzcan el voltaje, [15].

1.1.1.3 Clasificación de las subestaciones por su forma constructiva:

Por su montaje:

- **Subestaciones interiores:** Donde sus elementos constitutivos se instalan en el interior de edificios apropiados.
- **Subestaciones exteriores o a la intemperie:** Sus elementos constitutivos se instalan a las condiciones ambientales.

Por su tipo de equipo:

- **Subestación convencional:** Es del tipo exterior pero la instalación de su equipo es abierta, sin que nada los proteja.
- **Subestación encapsulada:** Es una subestación cuyas partes vivas y equipos que soportan voltaje están contenidos dentro de envolventes metálicos. Por ejemplo, las subestaciones encapsuladas en SF₆.
- **Subestación móvil:** Se caracteriza porque todo el conjunto de equipos está instalado sobre un remolque. Su objetivo básico es el de ser utilizado bajo circunstancias de emergencia, en cualquier punto del sistema, [15].

1.1.1.4 Características de operación de las subestaciones

Características que determinan la forma de una subestación y se definen de la forma siguiente:

- **Flexibilidad:** Es la propiedad de la instalación para acomodarse a las diferentes condiciones que se puedan presentar, bien sea por mantenimiento, por cambios en el sistema o por fallas.
- **Confiabilidad:** Se define como la propiedad de que una subestación pueda mantener el suministro de energía, bajo la condición que al menos un componente de la subestación pueda repararse durante la operación.
- **Seguridad:** Es la propiedad de una instalación de operar adecuadamente bajo condiciones normales y anormales de manera que se evite el daño en los equipos o riesgo para las personas.
- **Modularidad:** Es la facilidad que tiene una subestación para cambiar de configuración cuando sus necesidades o el sistema lo requieran. Estas características pueden conjugarse en el momento de decidir la configuración de una subestación, dependiendo de la ubicación dentro del sistema de potencia, de acuerdo con su función o por su capacidad:
 - Si la subestación es de una capacidad e importancia tales que su salida del sistema de potencia produzca suspensiones y problemas de racionamiento en todo un sistema eléctrico considerable, entonces la subestación requiere de un alto grado de seguridad.

- Si la subestación tiene un gran número de circuitos y ellos pertenecen a diferentes sistemas, dicha subestación requiere de un alto grado de flexibilidad.
- Si la subestación tiene como objetivo primordial el suministro de energía la necesidad principal de esta subestación es la confiabilidad, [15].

1.2 Líneas de transmisión

En 1953 Saint Clair desarrolló una curva de cargabilidad de líneas que relacionaba la longitud (mi) y la potencia de carga de la línea (PU del SIL) a una tensión de operación. Posteriormente, en 1979, Dunlop ajustó la curva de Clair para los niveles de tensión de aquel entonces, además de que este tipo de curvas se les pueden incluir diversas consideraciones que afectan la capacidad de la transmisión en la línea:

- a) Nivel de tensión
- b) Configuración de los conductores (tipo de torre)
- c) Número de conductores por fase
- d) Hilos de guarda
- e) Máximo ángulo de separación entre el nodo emisor y el receptor
- f) Calibre de los conductores de fase
- g) Elementos de compensación serie
- h) Capacidad de cortocircuito del nodo emisor y del receptor
- i) Elementos de compensación paralelo
- j) Capacidad de soporte de reactivos del nodo emisor y del receptor

Este tipo de curvas son adecuadas como primera aproximación en la planificación de sistemas, pero para situaciones de operación, se deben realizar estudios de cargabilidad con flujos y de estabilidad, por medio de un modelo simple pero eficaz en la consideración de los diversos factores que influyen en la capacidad de transmisión.

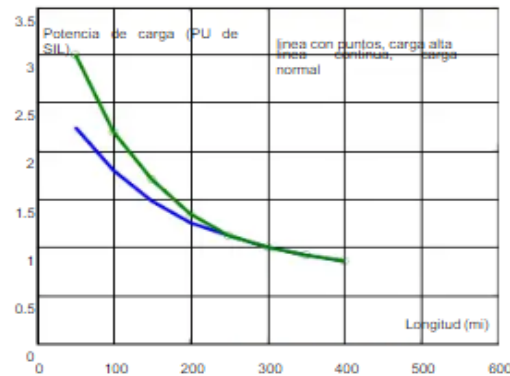


Figura 2. Sección de una línea de transmisión de dos conductores.
Fuente: [14]

1.2.1 Criterios, limitantes y consideraciones.

Los límites operativos más comúnmente considerados en la cargabilidad son:

- a) Estabilidad angular (separación angular)
- b) Caída de tensión (entre nodo emisor y receptor)
- c) Térmico (por capacidad de disipación de calor)
- d) Capacidad de equipo adyacente
- e) Estabilidad de tensión (dinámico)
- f) Estabilidad de frecuencia (dinámico)

Una separación angular máxima, esto es, al tener un margen de estabilidad, se tendrá un margen de operación segura ante contingencias, sin llegar al colapso, por la pérdida de sincronismo de las unidades que se conectan a la red eléctrica. Dicho margen se establece para una potencia de operación, P_o igual al 70% de la máxima potencia transmisible, P_{max} :

$$\%ME = \frac{P_{max} - P_o}{P_{max}} \quad (1)$$

Siendo:

$$P_{max} = \frac{|V_{emisor}| |V_{receptor}|}{X_{equivalente}} \quad (2)$$

$$X_{equivalente} = X_{emisor} + X_{línea} + X_{receptor} \quad (3)$$

Además, considerando que la potencia de transmisión de una línea viene dada por:

$$P_{max} = \frac{|V_{emisor}| |V_{receptor}|}{X_{equivalente}} (\sin \delta) \quad (4)$$

Una caída de tensión máxima entre los extremos alejados de los nodos generadores, para que se considere que está dentro de un margen, con calidad, no debe exceder del 2% al 7% de la tensión nominal del nodo emisor, o bien, el porcentaje establecido por cada centro de control, de acuerdo a la importancia de la línea en el mismo sistema. Una política común, es considerada dicho porcentaje igual al 5%. La capacidad máxima de transmisión, que produce un calentamiento y elongación del conductor, sin distorsión del mismo, es decir, sin exceder su límite elástico, depende del viento, su velocidad y dirección, radiación incidente, así como de la temperatura ambiente, a este se le denomina límite térmico. Los fabricantes de conductores, regularmente ya establecen la máxima corriente, I_{max} , de transmisión para este límite, en consecuencia, sólo se debe especificar el nivel de tensión y aplicar la siguiente fórmula, para sistemas trifásicos:

$$S = \sqrt{3} * V_{receptor} * I_{max} * n \quad (5)$$

Siendo n el número de conductores por fase. En el caso de los equipos adyacentes, en la bahía de cada extremo de la línea, se tendrán condiciones máximas de operación continua, que serán especificados por los proveedores de los mismos y deberán considerarse en la cargabilidad de la línea. La estabilidad de voltaje vendrá dada por la robustez de cada nodo de los extremos de la línea y de las condiciones del soporte de reactivos de éstos.

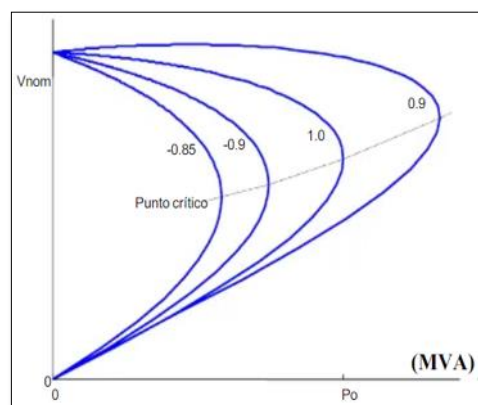


Figura 3. Curvas P-V con distinto factor de potencia.

Fuente: [14]

La estabilidad de frecuencia, se verá afectada por contingencias en líneas que conectan a “grandes” cargas y las adyacentes a los nodos de generación, principalmente, por ello se deben considerar para las contingencias de éstas y como afectan a su frecuencia, mediante simulaciones dinámicas, para encontrar la máxima potencia transmisible sin pérdida de estabilidad en las unidades. Generalmente, el límite máximo de caída de tensión afecta a las líneas “cortas” de longitudes por debajo de los cincuenta km, además, a este tipo de líneas, también es común que se vean afectadas por su límite térmico. En tanto que el límite máximo para un margen de estabilidad predefinido, afecta en mayor medida, a las líneas “largas” de longitud superior a los 300 km. Los parámetros R, X e Y de la línea de transmisión, utilizan el modelo pi, con funciones hiperbólicas, regularmente, la capacidad de cortocircuito de los nodos extremos (para una capacidad superior a 15,000 MVA, se le considera al nodo como **robusto**). El límite de caída de tensión se monitorea entre los nodos **3** y la máxima diferencia angular entre los nodos **4** y **1** que representará al límite por separación angular de la línea de transmisión. Pero, cabe señalar que este sistema considera que las variables que afectan la capacidad de la transmisión en la línea de manera “ligera” a los elementos de compensación paralelo, su capacidad de soporte de reactivos del nodo emisor y del receptor como los compensadores estáticos de VAR y unidades que estén eléctricamente cercanas a los nodos extremos de la línea. Por ello, se debe proponer un circuito simple, pero que considere estas aportaciones, de soporte de reactivos, principalmente, [14].

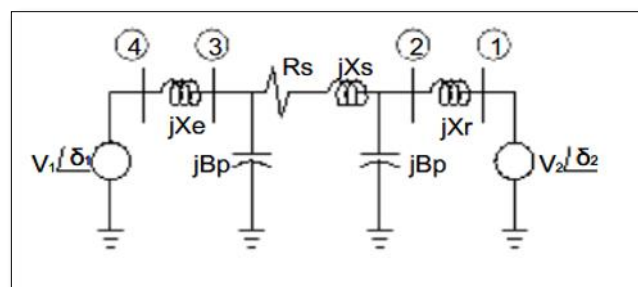


Figura 4. Circuito para cálculo de cargabilidad en líneas de subtransmisión.

Fuente: [14]

1.2.2 Curvas de capacidad de líneas de transmisión

Uno de los parámetros de investigación propuestos, son las llamadas curvas de capacidad (cargabilidad) o curvas de Saint Clair de líneas de transmisión, se define la cargabilidad de las líneas de transmisión como: el límite de potencia que puede circular por una línea de transmisión en función de su longitud, y otros parámetros propios de cada línea tales como resistencia, reactancia, corriente de límite térmico, voltaje de operación, entre otros. Entonces se puede decir que la cargabilidad está definida como: la potencia máxima entregada en el terminal de recepción del sistema de transmisión y expresada en por unidad del SIL (PU SIL) propio de la línea. Cuando se realizan las gráficas de margen de estabilidad y caída de voltaje en función de la longitud de la línea de transmisión, se encuentra la curva de capacidad característica para líneas de transmisión, la envolvente de las curvas por caída máxima de voltaje y margen de estabilidad es la que define el límite de carga máximo de líneas de transmisión en función de su longitud. No se considera el límite térmico de transmisión, pues este es relevante únicamente para líneas cortas y cuyos voltajes de operación son inferiores a los 138kV. El límite térmico es relevante especialmente para el área de subtransmisión y distribución. Para obtener las curvas de capacidad se calcula los límites de estabilidad de líneas de transmisión.

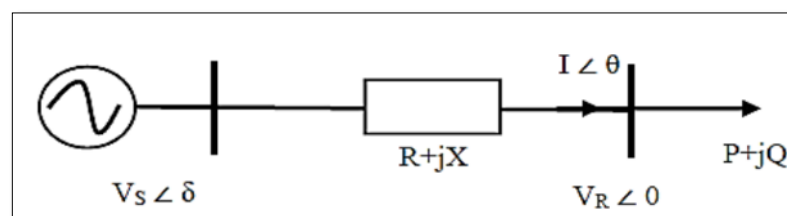


Figura 5. Sección de una línea de transmisión de dos conductores.

Fuente: [17]

1.3 Alimentador primario

Circuitos con niveles de voltaje comprendidos entre 2,4kV y 69kV que transporta energía eléctrica desde una subestación de distribución, hasta el lado de medio voltaje de los transformadores de distribución.

1.4 Circuito radial

Circuito por el cual la corriente fluye en una sola dirección y tiene un punto único de alimentación, [16].

1.5 Estabilidad de los sistemas de potencia

La inestabilidad puede manifestarse de diversas maneras dependiendo de la configuración de la red y el modo de operación en el que se encuentre. La clasificación de la estabilidad en diversas categorías se basa en las siguientes consideraciones:

- La naturaleza física de la perturbación y su efecto consecuente.
- El tamaño de la perturbación considerada.
- Los dispositivos, procesos, y períodos de tiempo en consideración.
- Métodos para el cálculo y la predicción de los márgenes de seguridad.

El acercamiento de algunas soluciones incluye la determinación de las $N - 1$ contingencias más probables. En el estado actual de los sistemas de potencia, evaluar todas las combinaciones y contingencias ha perdido practicidad debido a la alta carga computacional, el tiempo requerido, y la cantidad de información a ser procesada, frente al crecimiento en complejidad, la demanda de respuestas más veloces y las necesidades de las instituciones administrativas involucradas en el sector eléctrico. Este último establece las políticas de estado y las regulaciones pertinentes que afectan a la generación, transmisión y distribución. Las directrices suelen tener matices diferentes dependiendo de la política ideológica nacional y el tamaño del sistema, [17].

1.5.1 Confiabilidad, seguridad e infraestructura

Es mandatorio que la calidad de la energía eléctrica suministrada deba cumplir estándares con respecto a la frecuencia, voltaje, calidad y en general, confiabilidad. La habilidad de un sistema de potencia para proveer adecuadamente energía eléctrica se denomina confiabilidad, y generalmente suele dividirse en seguridad y suficiencia en infraestructura. La seguridad se refiere a la habilidad del sistema a responder apropiadamente a las perturbaciones del sistema propias de sus

condiciones dinámicas, mientras que la suficiencia en infraestructura determina la capacidad del sistema para satisfacer la demanda de los usuarios y denominarse como condición estática. La mayoría de las técnicas probabilísticas para la evaluación de confiabilidad valoran la suficiencia en infraestructura. Un sistema de potencia debe ser capaz de afrontar y resistir perturbaciones inminentes debido a diversas contingencias, con interrupciones mínimas en el servicio. Esto demanda concebir una ‘robustez’, [17].



Figura 6. Estabilidad y sus características.

Fuente: [11]

1.5.1.1 De corto plazo

La estabilidad de voltaje de corto plazo se refiere a estudiar el impacto causado por elementos eléctricos en la red, dichos elementos consisten especialmente en motores eléctricos, sincronización de generadores u otros elementos con la red eléctrica. Este tipo de actividades causan una variación en el nivel de voltaje en régimen transitorio, lo cual está fuera del alcance de este trabajo.

1.5.1.2 De largo plazo

El estudio de estabilidad de voltaje de largo plazo puede ser realizado bajo diversos métodos de estudio, los más usados son el análisis por curvas P-V ó curvas Q-V. En el primer caso es de interés, pues el método planteado está relacionado con el análisis de curvas P-V. Este método permite observar el comportamiento del voltaje en una barra del sistema mientras la carga varía, es decir que al incrementar el

porcentaje de carga en una barra del sistema gráficamente se puede inferir el comportamiento del voltaje hasta llegar al punto crítico de operación.

1.5.2 Variaciones de la estabilidad

El problema de la estabilidad tradicionalmente ha tenido relación con el mantenimiento del sincronismo en generadores. Pero los fenómenos no se limitan a tener generadores o secciones del sistema perdiendo sincronismo, sino que pueden manifestarse en colapsos del voltaje, perturbaciones oscilatorias, largas excursiones de frecuencia, entre otros. Los orígenes de estos problemas se pueden clasificar por separado, aunque sus interacciones no sean excluyentes.

1.5.3 Estabilidad y colapso del voltaje

Las variaciones de la demanda pueden conllevar al decremento progresivo del voltaje debido a la incapacidad del sistema de suplir la necesidad de potencia reactiva. En ciertas ocasiones, al pasar un estado de transferencia máximo de potencia, incrementos en la potencia reactiva no se traducen en una mejora del perfil de voltaje, pero sí la incursión en una zona de degradación permanente de la cual no hay retorno inmediato a un estado estable, el cual se ve aún más agravado por las maniobras automáticas de los cambiadores de tap on-line OLTC en su intento por salvar la situación. Estas condiciones pueden analizarse apropiadamente con las características V_R-P_R y V_R-Q_R del sistema.

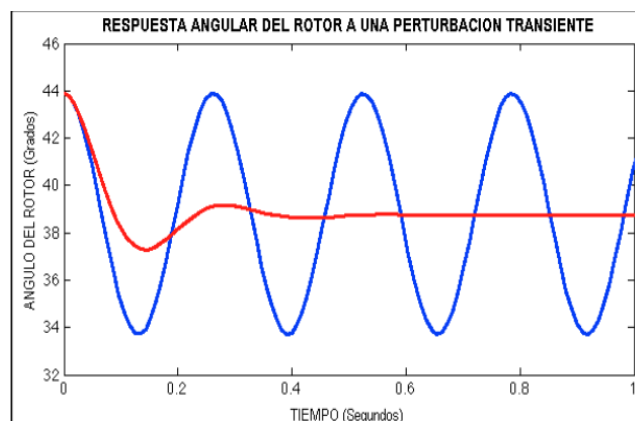


Figura 7. Respuesta del rotor a una perturbación.

Fuente: [19]

1.5.4 Métodos de análisis de estabilidad de tensión

Uno de los objetivos de la estabilidad de voltaje, es encontrar que tan cerca está el sistema al punto de colapso, el cual puede ser determinado en función de la carga y reserva de potencia reactiva, entre otros. La importancia de buscar el punto de inestabilidad es la determinación del margen de cargabilidad del sistema, lo que conlleva a determinar las medidas preventivas que se deberían tomar para evitar que el fenómeno del colapso ocurra y el espacio de tiempo en el que se deberían considerar estas medidas. El análisis de estabilidad de voltaje, se puede hacer usando las herramientas para el análisis dinámico o estático, la elección se basa en los objetivos planteados en el estudio, velocidad de cálculo computacional, entre otros. A continuación, se presenta una descripción de cada una de estas herramientas de análisis a considerar:

1.5.4.1 Análisis dinámico

El análisis dinámico busca determinar la cronología de los eventos que llevan a la inestabilidad de voltaje, la resolución matemática es a través de ecuaciones diferenciales y usa simulaciones en el dominio del tiempo. Estas simulaciones se usan para estudiar casos específicos de eventos que provocan el colapso, para analizar los sistemas de protecciones y de control del sistema eléctrico de potencia.

1.5.4.2 Análisis estático

El análisis estático se utiliza para determinar límites y localización de áreas problemáticas, este utiliza ecuaciones algebraicas para representar las condiciones del sistema. Algunas metodologías utilizadas para este análisis son:

- Análisis de Flujos de Potencia.
- Análisis de Sensibilidad V-Q.
- Análisis Modal.
- Curvas PV.
- Curvas QV.

Los criterios de estabilidad de voltaje generalmente son especificados en términos de los márgenes de potencia real y reactiva. Estos márgenes de seguridad de cada región o área debe cumplirlos tomando en cuenta algunas incertidumbres como:

- Crecimientos inesperados en la proyección de la demanda
- Variaciones de potencia en los despachos de generación de áreas vecinas.

1.5.4.3 Flujos de potencia

La planificación, diseño y operación de sistemas de potencia requiere de tales cálculos para analizar el rendimiento en régimen permanente del sistema de potencia bajo variedad de condiciones operativas y a estudiar los efectos de cambios de configuración y equipos. Las soluciones de flujo de potencia son realizadas usando programas de computadoras diseñados específicamente para este propósito. Los sistemas de potencia son complejos y poseen muchas partes o ramales sobre los cuales se producen flujos de potencia, tales sistemas forman partes en serie y paralelo.

El flujo de potencia eléctrica en esas redes se divide entre los ramales mientras un balance es logrado de acuerdo a las leyes de Kirchhoff. Los programas computacionales, para resolver estos flujos de potencias son divididos en dos tipos:

- Estáticos (Off-Line)
- Dinámica (tiempo real)

La mayoría de los estudios de flujo de potencia están basados en modelos estáticos de redes. El flujo de potencia trifásico es posible analizarlo con softwares, pero esto no es normalmente necesario en estudios rutinarios de sistemas de potencia.

Un cálculo de flujo de potencia determina el estado del sistema de potencia para cada carga dada y una distribución de generación, este representa una condición de régimen permanente como si esta condición ha sido mantenida por algún tiempo, en la realidad el voltaje de las barras fluctúa constantemente por valores pequeños debido a que las cargas cambian como iluminación, motores y otras cargas que son encendidas y pagadas.

Los flujos de potencia estáticos representan la variación de los voltajes en los nodos del sistema con respecto al cambio de la potencia de la carga. Esta técnica calcula los estados, límites y márgenes de estabilidad de voltaje en el sistema de potencia, para el estado normal de operación y después de contingencias. Sus resultados se utilizan para graficar el voltaje contra la potencia y calcular los límites de carga, márgenes de cargabilidad, índices de proximidad a la inestabilidad e identificación de las áreas, nodos o elementos débiles del sistema. Algunas técnicas desarrolladas para los métodos de flujos convencionales son:

- Análisis de sensibilidad
- Análisis por equivalentes de red
- Singularidad de la matriz Jacobiana
- Diferencia vectorial
- Técnicas basadas en energía, entre otras.

El análisis de sensibilidad V-Q se basa en el análisis de la variación del voltaje con respecto a la potencia, para determinar los márgenes y límites de estabilidad de voltaje, así como las áreas y zonas más sensibles del sistema.

En 1983, se analizó la sensibilidad del voltaje con respecto a la potencia reactiva de un nodo de carga, $\partial V / \partial Q$. En 1990, se midió la distancia al colapso con matrices de sensibilidad de voltaje en los nodos y la variación de reactivos de la carga hasta el límite ΔQ_i . En 1991, se analizó la sensibilidad del voltaje ante el cambio de potencia activa $\partial V / \partial P$ y la potencia reactiva $\partial V / \partial Q$, y se definió un índice de proximidad al colapso de voltaje para cada nodo.

El análisis de sensibilidad V-Q calcula la relación entre el cambio de voltaje y el cambio de potencia reactiva.

$$\Delta V = J_R^{-1} * \Delta Q \quad (6)$$

Donde:

- ΔV : Cambio en el incremento de la magnitud del voltaje en un nodo (Vector).
- ΔQ : 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} representan las sensibilidades V-Q. Los componentes de la diagonal representan las sensibilidades propias $\partial V_i / \partial Q_i$ lo que indica la sensibilidad del nodo con el respecto a el mismo y los elementos fuera de la diagonal representan las sensibilidades mutuas $\partial V_k / \partial Q_i$ que quiere decir la sensibilidad del nodo con respecto al sistema. Las sensibilidades de los nodos controlados por voltaje son iguales a cero. Para una interpretación adecuada del análisis de sensibilidad cabe aclarar lo siguiente.

- **Sensibilidad positiva:** Indica 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.
- **Sensibilidad Negativa:** Indica que el sistema es inestable, debido a que ante aumentos en la inyección de potencia reactiva los niveles de voltaje caen en el sistema eléctrico de potencia. 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, [19].

1.5.4.4 Curvas P – V

Las curvas P-V son muy útiles para un análisis conceptual de la estabilidad de voltaje y para el estudio de sistemas radiales. Este método es también utilizado para grandes redes malladas donde P es la carga total en un área y V es el voltaje en un bus crítico o representativo. P puede ser también la potencia de transferencia a través de una línea de enlace o de interconexión. En estas curvas es posible graficar el voltaje en varios buses. Una desventaja en este tipo de curvas es que la simulación de flujos de potencia va a divergir en el punto cercano a la nariz o máximo punto de potencia sobre la curva. Otra desventaja es el hecho de que conforme la carga del área se va incrementando, la generación tiene que ser redespachada considerando despachos reales de generación.

El análisis P-V es una herramienta de estado estable que desarrolla una curva que relaciona el voltaje en uno o más nodos con la carga en un área o el flujo a través de un enlace. Los voltajes de los nodos son monitoreados a lo largo de un rango de

incrementos de carga y de flujos de potencia activa dentro de una región. Uno de los beneficios más importantes de esta metodología, es que proporciona una indicación directa de la proximidad al colapso de voltaje a lo largo de un rango de niveles de carga o flujos en enlaces para la topología del sistema simulado. Los aspectos específicos del planteamiento del o los casos a simular, así como herramientas de estudio y teoría son responsabilidad del ingeniero que efectúa el análisis. La naturaleza del colapso de voltaje es que conforme se incrementa la transferencia de potencia hacia alguna región de carga específica, el perfil de voltaje de esa región tendería a deteriorarse y deteriorarse hasta un punto donde se alcance el colapso de voltaje. Los voltajes en nodos específicos de la región pueden variar significativamente y algunos de estos voltajes de nodo pueden parecer aceptables. Sin embargo, el punto de colapso de voltaje en todos los nodos de la región de estudio, ocurrirá en el mismo nivel de importación de potencia, independientemente de los voltajes en esos nodos específicos. Las áreas susceptibles a problemas de colapso de voltaje pueden ser identificadas mediante un análisis de contingencias de flujos de potencia. Aquellos casos que no tienen convergencia o que presentan grandes desviaciones de voltaje post – disturbio, están típicamente dentro o muy cerca del punto de inestabilidad de voltaje respectivamente.

En caso de que el programa de flujos de potencia utilizado tenga la posibilidad de poder monitorear $\Delta V/\Delta Q$ de la matriz Jacobiana durante la generación de la curva P-V, estas magnitudes pueden proporcionar valiosa información sobre los nodos donde el colapso de voltaje iniciaría. El nodo que tiene la mayor relación de cambio de $\Delta V/\Delta Q$ antes del colapso (nariz de la curva), es el nodo más débil; por otro lado, el modelo de potencia constante para la carga del sistema es el que típicamente representa el colapso de voltaje más crítico en un análisis P-V.

1.5.4.5 Generación de las curvas P – V

Procedimiento para desarrollar una curva P-V:

1. Se elige una región de estudio en la cual se irá incrementando gradualmente la carga. Esta región es generalmente una parte del sistema en la que se espera o se conoce que puede ser susceptible a presentar problemas de

colapso de voltaje y puede ser tan pequeña o grande como sea necesario. Las variables que se irán modificando son, la carga interna de la región de estudio a un factor de potencia constante.

2. Ajustar la generación interna del área de estudio a un nivel constante (sin variación) de las unidades en línea. Dicho de otra manera, la salida de potencia activa de los generadores internos debe permanecer sin cambios durante el análisis P-V. Por su parte, sí es permitido que la salida de potencia reactiva de las unidades generadoras se vaya ajustando conforme se va formando la curva P-V. De esta forma, el colapso de voltaje ocurrirá en la región de estudio después de que la capacidad de potencia reactiva de sus generadores sea rebasada.
3. Elegir el nodo o nodos del área de estudio en los cuales se observará el voltaje conforme la transferencia de potencia hacia el área mencionada se incremente. En este aspecto, el elegir los nodos adecuados a monitorear es una investigación previa que el ingeniero analista debe realizar. Los voltajes monitoreados son los datos del eje y de la curva P-V.
4. Elegir la condición operativa a simular del sistema. Esta condición del sistema debe ser representada antes de que las cargas internas y la generación externa sean escaladas para desarrollar la curva P-V.
5. Resolver el caso inicial de flujos de potencia partiendo de un nivel bajo de carga o de un flujo en el enlace.
6. Hacer un reporte de los voltajes de los nodos monitoreados y el nivel de carga o de la transferencia de potencia para los cuales se resolvió el caso de flujos.
7. Los resultados del análisis P-V pueden indicar que, en el punto de colapso, el perfil de voltaje de una región es significativamente más bajo que el mínimo permitido para condiciones operativas aceptables, [19],

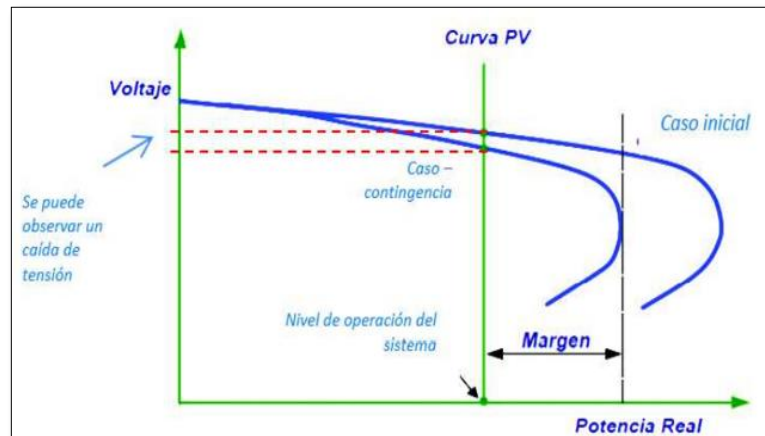


Figura 8. Curva P – V.
Fuente: [20]

1.5.4.6 Curvas Q-V

Las curvas Q-V son otro método utilizado para el análisis de estabilidad de tensión en un SEP. Este método de análisis surge debido al problema de la no convergencia del flujo de carga para la obtención de las curvas P-V, recordando que la no convergencia se da para cuando el voltaje se hace inestable. La convergencia en este método se logró mediante el truco de la fijación de la tensión en la barra en estudio. El parámetro clave para caracterizar la estabilidad de voltaje, según este método, es la demanda de reactivos en una barra o grupo de barras determinadas y observando cómo influyen en las tensiones de esas barras.

Es bueno aclarar que existen dos tipos de curvas Q-V, las mismas que se realizan u obtienen de forma distintas.

a) Método 1:

Se realiza manteniendo el factor de potencia de la carga constante, análoga a la obtención de las curvas P-V ya estudiadas, obteniendo para cada valor de Q el valor de V y trazando la gráfica con estos valores, lo cual sería equivalente a multiplicar la potencia de la curva ($P - V$) * $\tan \phi$.

b) Método 2:

La curva en este estudio, se obtiene a potencia constante, de la forma que se describe a continuación:

- Se coloca un condensador ficticio con capacidad de suplir potencia reactiva infinita en el nodo de carga estudiado.

- Se varía el voltaje del nodo en estudio, en pasos discretos, desde V_{min} hasta V_{max} , manteniendo constante la demanda de potencia activa.
- Para cada uno de los voltajes, se resuelve un flujo de carga, calculándose la inyección de potencia reactiva de condensador sincrónico ficticio.
- Se grafica la inyección de potencia reactiva del condensador contra el voltaje. Al igual que el caso de las curvas P-V, las curvas Q-V también pueden ser obtenidas para una potencia dada.

El análisis de obtención necesitará de un poco de abstracción, ya que se puede observar la forma de esta curva si se traza para un valor de potencia constante en un plano perpendicular al plano P-Q, que contenga esta potencia, este plano cortara a los meridianos de dicha grafica en dos puntos, uno superior y uno inferior, es de saber que realmente la cantidad de meridianos de esta grafica son infinitos debido a que estos representan cada uno un valor de factor de potencia, así, el corte de estos meridianos con el plano que contiene a la potencia constante describirán un lugar geométrico de valores continuos que será la curva Q-V. Si se ha llegado a ver esta curva en el espacio, con la lo antes explicado, se puede observar que la misma contara con un límite de potencia, que corresponderá a la nariz de esta curva, que representara el punto límite de estabilidad y es el cruce de esta curva con la curva de valores máximos de P-Q, representada en el plano P-Q de la figura 9. Los puntos superiores representan los puntos de operación estable, mientras que los puntos inferiores representan los puntos de operación inestable.

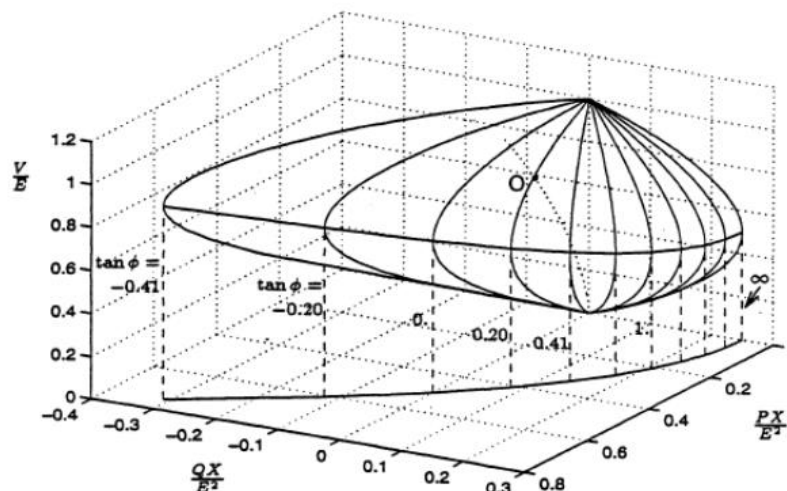


Figura 9. Modelo matemático para la Curva Q – V.

Fuente: [21]

El punto mínimo de la curva representa el punto crítico y a partir de este punto hasta el nivel de cero de potencia reactiva (donde el generador ficticio no absorbe o inyecta potencia reactiva al nodo en estudio) se mide el margen de estabilidad.

En la figura 10 se muestra algunas graficas típicas de estas curvas, [20], en donde se observa que los cortes de la curva con el eje de voltaje corresponden a la no compensación de potencia reactiva, es decir, corresponde a la característica de operación del sistema para las condiciones de carga dadas. También se aprecia que la curva 2 representa un sistema que opera con más carga que la curva, debido a que esta posee menos margen de estabilidad ($Q_1 > Q_2$), mientras la curva 3 representa un sistema que ya no puede operar sin inyección de potencia reactiva, lo cual no es ventajoso para un sistema, ya que un SEP debe operar en condiciones estables normales de operación en ausencia de inyección de potencia reactiva. La estabilidad de tensión depende de cómo las variaciones de P y Q en el área de carga afectan las tensiones en la barra de carga, es por ello que la relación Q-V es la característica más apropiada para ciertos aspectos de análisis de la estabilidad de tensión, ya que esta muestra la sensibilidad y variación de tensión de la barra con respecto a la inyección o absorción de potencia reactiva para una potencia activa de transferencia dada.

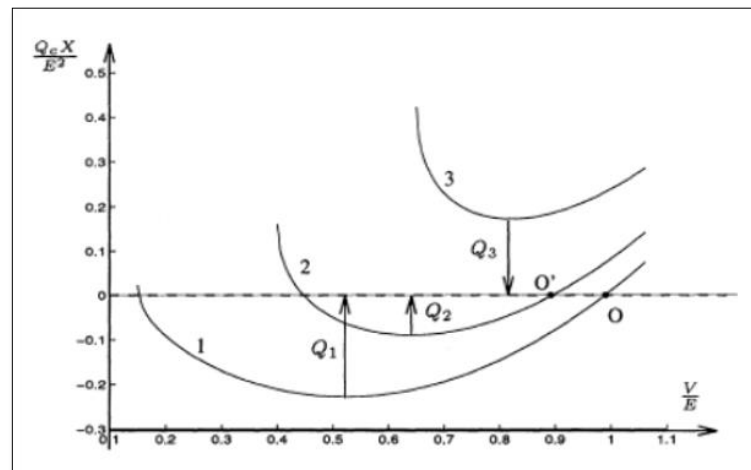


Figura 10. Familia de Curvas Q - V.

Fuente: [21]

La ventaja más importante de este método es que identifica la barra más propensa a presentar problemas de estabilidad de tensión, la cual presenta el punto de colapso de tensión más alto en las curvas Q-V o lo que es igual, tiene el menor margen de

potencia reactiva. Otra ventaja de estas curvas es que la pendiente indica la rigidez de la barra de prueba (el ΔV para un ΔQ). Además, las curvas Q-V pueden ayudar a determinar la cantidad de compensación en derivación necesaria para restaurar un punto de operación u obtener un voltaje deseado, [20].

1.6 Regulación ARCONEL 053/18

1.6.1 Objetivo

Establecer los indicadores, índices y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica; y, definir los procedimientos de medición, registro y evaluación a ser cumplidos por las empresas eléctricas de distribución y consumidores, según corresponda.

1.6.2 Ámbito

La presente regulación es de cumplimiento obligatorio para las empresas eléctricas de distribución y para los consumidores regulados y no regulados conectados a la red de distribución.

1.6.3 Definiciones

- a) **Alimentador de alta densidad:** Es aquel alimentador primario de distribución que tiene una carga nominal instalada distribuida por kilómetro de línea mayor a 50kVA/km.
- b) **Área de servicio:** Es el área geográfica definida en el título habilitante de una empresa eléctrica, en la cual ésta prestará el servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica y el servicio de alumbrado público general.
- c) **Barras de salida:** Corresponde a las barras de alto voltaje o medio voltaje, situadas en el lado secundario del transformador o transformadores, en las subestaciones de distribución.
- d) **Fluctuaciones o variaciones de voltaje:** Son perturbaciones en las cuales el valor eficaz del voltaje de suministro cambia con respecto al valor nominal.
- e) **Niveles de voltaje:** Se definen los siguientes valores de niveles de voltaje:

- Bajo voltaje: menor igual a 0,6kV;
- Medio voltaje: mayor a 0,6 y menor igual a 40kV;
- Alto voltaje grupo 1: mayor a 40 y menor igual a 138kV;
- Alto voltaje grupo 2: mayor a 138kV.

1.6.4 Nivel de voltaje

Los niveles de voltaje varían a lo largo de la línea de transporte de los alimentadores primarios, la variación de voltaje debe mantenerse dentro de los límites permitidos por la regulación establecida:

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad (7)$$

Donde:

- ΔV_k : variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.
- V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.
- V_n : voltaje nominal en el punto de medición.

Se define la calidad de voltaje como las variaciones de los valores eficaces (rms) medidos con relación al voltaje nominal y expresado en porcentaje, en los diferentes niveles de voltaje. La variación de voltaje admitido con respecto al valor del voltaje nominal se señala en la tabla 4:

Tabla 2. Variaciones de voltaje admitidas

	Grupo 1	Grupo 2
Alto voltaje	± 7,0 %	± 5,0 %
Medio voltaje	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo voltaje zonas urbanas	± 10,0 %	± 8,0 %
Bajo voltaje zonas rurales	± 13,0 %	± 10,0 %

Fuente: [22]

El distribuidor debe realizar mensualmente un registro de voltaje en cada uno de los siguientes puntos de medición:

- 20% de las barras de salida de subestaciones de distribución AV/MV, no menos de 3.
- 0,15% de los transformadores de distribución, no menos de 5.
- 0,01 % de los consumidores de bajo voltaje del área de concesión, no menos de 10.

1.6.5 Límites de operación en los puntos de entrega

El ARCONEL conjuntamente con el CENACE consideró aspectos técnicos debido a la entrada en operación de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair y el sistema de transmisión Coca Codo Sinclair – San Rafael – El Inga a 500kV, el 24 de marzo de 2016 generó un informe que estableció límites de bandas de variación de voltaje en barras y factor de potencia en los puntos de entrega del Sistema Nacional de Transmisión.

Límites de voltaje: En la tabla 5 se observa los límites de voltaje que se puede tener tanto inferior como superior.

Tabla 3. Límites de variación de voltaje para la operación del S.N.I.

Voltaje	Inferior		Superior	
	Normal	Emergencia	Normal	Emergencia
500kV	-5%	-8%	5%	7%
230kV	-5%	-7%	5%	6%
138kV	-5%	-10%	5%	6%
69 y 46kV	-3%	-5%	4%	6%

Fuente: [22]

Factor de potencia: El valor límite para una subestación o puntos de entrega del Sistema Nacional Interconectado del factor de potencia se estableció en 0,96 inductivo o superior inductivo para condiciones de demanda máxima, media y mínima, [22].

1.6.6 Incumplimiento de los índices de calidad de producto

1.6.6.1 Consumidores en AV

La ARCONEL en función del informe mensual que entregue la distribuidora y de las acciones de control pertinentes, según lo establecido en la presente regulación

para la calidad de producto, determinará el cumplimiento o no de los índices para la calidad de producto para la muestra seleccionada en ese mes para los consumidores en AV. En caso de determinar incumplimientos de los índices de calidad de producto para los consumidores en AV, la ARCONEL iniciará el procedimiento de imposición de sanción a la distribuidora por cada índice incumplido, mismo que, de ser el caso, se establecerá a la distribuidora una sanción de 20 SBU por consumidor y por índice incumplido.

Las acciones a ejecutar no podrán exceder un término máximo de ciento veinte (120) días contados desde la notificación de la resolución de la sanción. En caso de que la distribuidora requiera un plazo mayor para implementar las acciones de mejora, ésta deberá solicitar la ampliación de plazo a la ARCONEL con al menos 30 días de anticipación a la fecha de culminación del plazo original, indicando las razones que justifiquen su extensión. Una vez ejecutado las acciones de mejora, la distribuidora deberá, en cada punto de AV del mes que presentó incumplimientos, verificará e informará a la ARCONEL que el incumplimiento ha sido corregido mediante la medición conforme lo establecido en la presente regulación. En caso que, la calidad de producto en los puntos de AV de esa muestra mensual no hubiere sido subsanados, se considera que la distribuidora incumple de manera reincidente, por lo que ARCONEL iniciará el procedimiento de imposición de sanción a la distribuidora, mismo que, de ser el caso, se establecerá una sanción de 30 SBU por cada consumidor y por índice incumplido. La distribuidora deberá aplicar nuevamente lo establecido en el párrafo anterior, [22].

1.6.6.2 Consumidores en BV, MV, barras de salida de subestaciones y transformadores de distribución

ARCONEL en función del informe mensual que entregue la distribuidora y de las acciones de control pertinentes, según lo establecido en la presente regulación para la calidad de producto, determinará el cumplimiento o no de los índices para la calidad de producto para la muestra seleccionada en ese mes para los consumidores de BV, MV, barras de salida de subestaciones y transformadores de distribución. En caso de la determinación de incumplimientos en uno o varios índices, según

corresponda, la ARCONEL iniciará el procedimiento de imposición de sanción a la distribuidora por cada índice incumplido, mismo que, de ser el caso, se establecerá a la distribuidora una sanción de 20 SBU por cada índice incumplido, multiplicado los factores de ajuste establecidos en el reglamento. El procedimiento de imposición de sanción se regirá conforme la regulación expedida para el efecto.. Las acciones a ejecutar no podrán exceder un término máximo de ciento veinte (120) días contados desde la notificación de la resolución de la sanción. En caso la distribuidora requiera un plazo mayor para implementar las acciones de mejora, ésta deberá solicitar la ampliación del término a la ARCONEL con al menos treinta (30) días de anticipación a la fecha de culminación del plazo original, indicando las razones que justifiquen su extensión. Una vez ejecutado las acciones de mejora, la distribuidora deberá, en cada punto de la muestra de ese mes que presentó incumplimientos, verificará e informará a la ARCONEL que el incumplimiento ha sido corregido mediante la medición conforme lo establecido en la presente regulación. En caso que, la calidad de producto en los puntos de esa muestra mensual no hubiere sido subsanados, se considera que la distribuidora incumple de manera reincidente, por lo que ARCONEL iniciará el procedimiento de imposición de sanción a la distribuidora por cada índice incumplido, mismo que, de ser el caso, se establecerá una sanción de 30 SBU por cada índice incumplido, multiplicado por los factores de ponderación del reglamento. La distribuidora deberá aplicar nuevamente lo establecido en el párrafo anterior, [22].

1.6.7 Modelo eléctrico

Se hace necesario representar cada elemento del sistema de potencia por su respectivo modelo matemático equivalente. Es importante mencionar que se pueden utilizar modelos equivalentes sencillos, cuando los cálculos lo permitan, debido a que no reviste ninguna ventaja en utilizar una representación exacta de los elementos del sistema, cuando las cargas solo se conocen con una exactitud limitada. Análogamente los modelos exactos y complejos solo se limitan para objetivos muy especializados, donde la exactitud es clave, como en los estudios de estabilidad. Es frecuente en los estudios de flujo de carga, despreciar la resistencia con solo una pequeña pérdida de exactitud y un ahorro inmenso de cálculos.

- **Generadores:** Comúnmente en los estudios de flujo de carga se representarán como fuentes P-V o Slack. Los Generadores se suelen representar por el voltaje interno en serie con la impedancia equivalente de secuencia directa.
- **Líneas de Transmisión:** Las líneas de transporte poseen un modelo equivalente que depende de la longitud de la línea de transmisión; así las líneas cortas, cuya longitud es menor a 80 km se representa a través de una reactancia única en serie; en cambio las líneas de transmisión largas de longitudes mayores a 320km, por lo general se modelan por un circuito Pi equivalente.
- **Transformadores:** En los estudios de flujo de carga es común representar el transformador por medio de su reactancia de cortocircuito en serie con un transformador ideal que toma en cuenta la posición del cambiador de tomas. En el caso del transformador de tres devanados en el que el terciario no tiene carga o posee una carga muy baja también se representa por la impedancia de cortocircuito.

1.7 Software Digsilent power factory

El programa de cálculo DIgSILENT PowerFactory es una herramienta de calculo asistida por computadora para el análisis de sistema de potencia, industriales, comerciales y de grandes empresas eléctricas. Ha sido diseñado como un avanzado e integrado paquete computacional interactivo dedicado al análisis de sistema de potencia y control a fin de lograr los principales objetivos de planificación y optimización de operación.

El nombre DIgSILENT proviene de la lengua inglesa “DIgital SIMulation and Electrical NeTwork calculation program”, que se traduce al castellano como programa de cálculo de redes eléctricas y simulación digital. La versión 7 del DIgSILENT fue el primer programa mundial de análisis de sistema de potencia con una interfaz gráfica unifilar integrada. Este diagrama unifilar interactivo incluía funciones gráficas, capacidades de edición y todas las características relevantes de cálculos dinámicos y estáticos.

El DIgSILENT Power Factory es un mayor desarrollo del programa de análisis de sistema de potencia DIgSILENT 10.3, pero al mismo tiempo es un representante de la nueva generación de programas de análisis de sistemas de potencia DIgSILENT. El paquete DIgSILENT fue diseñado y desarrollado por ingenieros calificados y programadores con muchos años de experiencia tanto en el análisis de sistemas de potencia y en el campo de la programación. La precisión y valides de los resultados obtenidos con este paquete han sido confirmada en una gran numero de implementaciones por organizaciones involucradas en la planificación y operación de sistemas de potencia.

A fin de cumplir con los requerimientos actuales del análisis de sistema de potencia, el paquete de cálculo de sistema de potencia DIgSILENT fue diseñado como una herramienta integrada de ingeniería que provee una técnica global a través de todas las funciones disponibles, más que una colección de módulos diferentes. Las siguientes características principales son proveídas dentro de un programa ejecutable:

- Funciones centrales de DIgSILENT: definiciones, modificaciones y organización de casos, funciones numéricas centrales, funciones de salida y documentación.
- Gráficos de casos y manejos de casos, interactivos e integrados.
- Base de datos de casos y elementos de sistemas de potencia.
- Funciones de cálculo (por ejemplo, cálculos de parámetros de líneas y máquinas.
- basados en información de placa o geométrica).
- Un elemento de configuración de red con un interactivo o acceso en línea a sistema SCADA.

El usuario en este enfoque comienza con un nuevo proyecto y construye un sistema de potencia, al cual se le van agregando elementos y se le emprenden cálculos, con una complejidad creciente y paseándose por los elementos más relevantes del DIgSILENT hasta la construcción de un elemental sistema de potencia de tres barras, la modificación de sus parámetros y efectuar los cálculos de flujo de

potencia y cortocircuito con los respectivos reportes de salidas. Esto es lo mínimo elemental, para comenzar el trabajo con la herramienta.

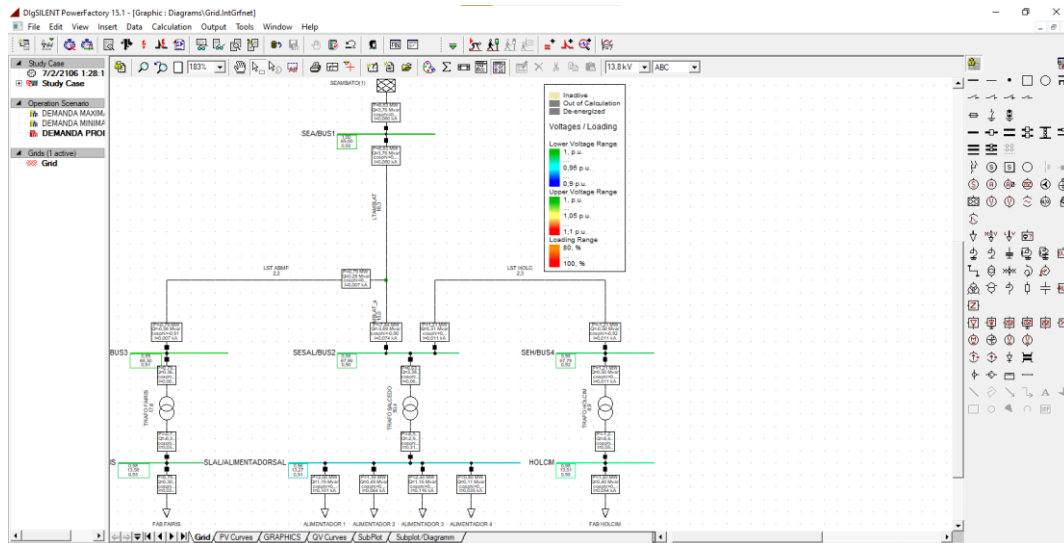


Figura 11. Software Digsilent power factory.

Fuente: autor

1.8 Conclusiones Capítulo I

- En este capítulo se determinó la fundamentación teórica útil para especificar los elementos que intervienen en un sistema eléctrico de potencia y cargabilidad de líneas de subtransmisión.
- Se tomó como referencia varios trabajos de investigación donde proponen el uso de herramientas tecnológicas como es el uso de software especializado para flujos de potencia y planificación a través del Digsilent power factory que permitirá determinar las condiciones de operación actual de la línea de subtransmisión.
- Para el análisis de la cargabilidad de la línea de subtransmisión se utilizará la normativa de electricidad ARCONEL 053 / 18 para comparar sus niveles de voltaje con los resultados del modelamiento en el software del sistema eléctrico de potencia Ambato – Latacunga a nivel de subtransmisión.

CAPÍTULO II. PROPUESTA

2.1 Título del proyecto.

Modelar el sistema eléctrico de potencia de la subestación Ambato con interconexión a Latacunga perteneciente a TRANSELECTRIC EP.

2.2 Objetivo del proyecto.

Determinar la cargabilidad en la línea de subtransmisión Ambato – Latacunga mediante el modelamiento del sistema eléctrico en el software Digsilent power factory para establecer los niveles de voltaje de operación.

2.3 Descripción de la propuesta.

Se plantea analizar las condiciones actuales de cargabilidad en la línea de subtransmisión para determinar si sus niveles de voltaje están dentro de los límites establecidos por la normativa ARCONEL 053 / 18, este análisis se realiza mediante la simulación de flujos de potencia del sistema eléctrico en el software Digsilent power factory.

El análisis de cargabilidad a realizar en la línea de subtransmisión será en condiciones de demanda máxima, mínima y media en donde se determinará la peor condición de los niveles de voltaje, además se presentará el análisis de eventos adicionales como colapsos de voltaje, exceso de consumo de potencia reactiva o cualquier contingencia en donde se determinará qué condiciones de operación asumiría la línea de subtransmisión.

Una vez realizado el análisis de estos parámetros, se propondrá medidas que ayuden a solucionar o mitigar los problemas que podrían presentarse ante un evento de colapso de voltaje que afectaría a la estabilidad de voltaje. Con el propósito de que se pueda mejorar el perfil de voltaje en la línea de subtransmisión y aún más que la cargabilidad de la línea sea aliviada para que cuando sufra algún evento no previsto, no se vea afectada.

2.4 Metodología o procedimientos para el cumplimiento de los objetivos planteados.

2.4.1 Diagrama de flujo para desarrollo de la propuesta.

Se utilizará el siguiente modelo de flujograma donde se toma en cuenta la normativa eléctrica para sustentar el análisis de la cargabilidad de la línea de subtransmisión.

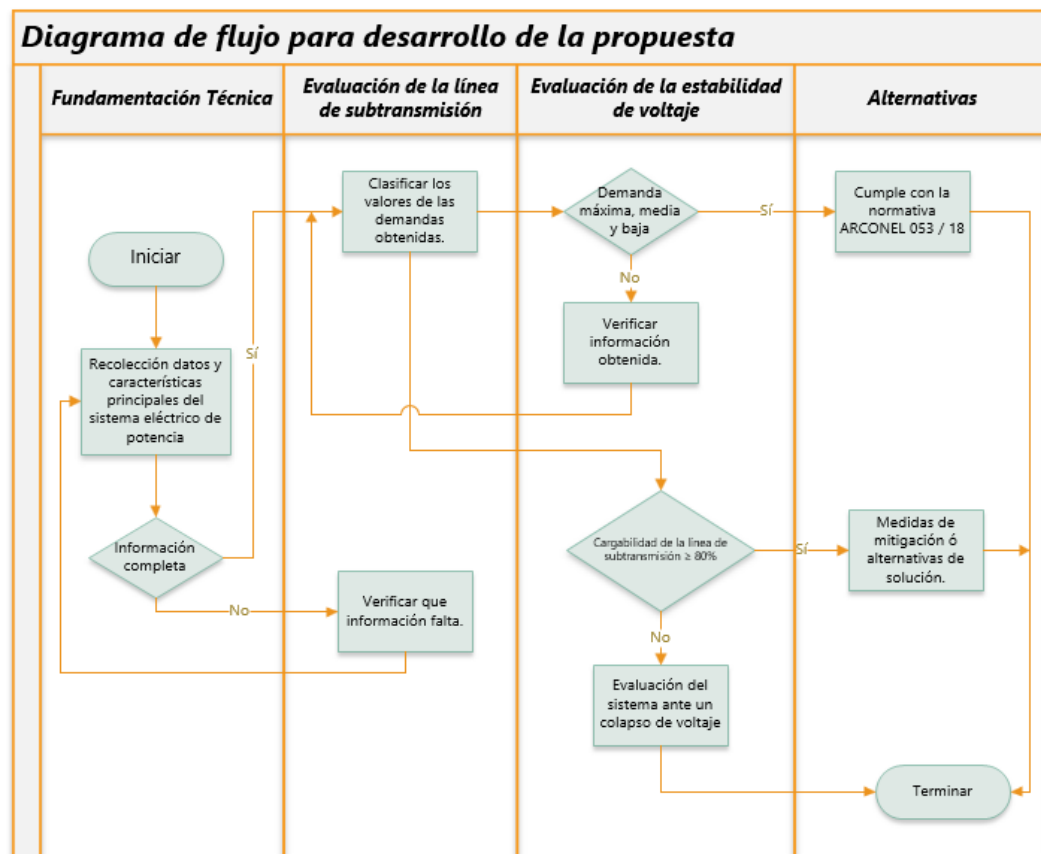


Figura 12. Diagrama de flujo para desarrollo de la propuesta.

Fuente: Autor

Para modelar el sistema eléctrico de potencia para desarrollar la propuesta en base a funciones principales que son:

- Fundamentación técnica
- Evaluación de la línea de subtransmisión
- Evaluación de la estabilidad de voltaje
- Alternativas

2.4.2 Descripción del Sistema Eléctrico de Potencia

Subestación AMBATO

La subestación Ambato con una potencia de 75MVA, se encuentra ubicada a 23,58km tiene en la salida No. 4 la conexión local con la subestación Salcedo que a su vez tiene interconexión directa con TRANSELECTRIC EP siendo la proveedora de servicio eléctrico a nivel nacional.

Tabla 4. Características líneas de subtransmisión Ambato - Salcedo.

TRAMO	Voltaje (kV)	Conductor	Tipo	Longitud (Km)	R (Ω /km)	I (Amp.)
Ambato-Faíris	69	300 MCM	Aluminio ACSR	13,37	0,185	0,493
Faíris-Salcedo	69	300 MCM	Aluminio ACSR	10,21	0,185	0,493
Salcedo-Holcim	69	300 MCM	Aluminio ACSR	10,21	0,185	0,493

Fuente: Autor

Subestación FAÍRIS

En este recorrido de Ambato a Latacunga existe una derivación a nivel de 69kV a la subestación FAÍRIS con un transformador de potencia 5MVA y 13,8kV en el lado secundario, fábrica dedicada al templado de vidrio, el consumo de esta planta industrial por su ubicación pertenece a la Empresa Eléctrica Ambato S.A. (EEASA), para suministrar energía eléctrica a los centros de transformación de la planta industrial. Se dispone de equipos de medición en el lado de alto voltaje y medio voltaje.

Subestación SALCEDO

Esta subestación tiene cuatro alimentadores a un nivel de voltaje de 13,8kV.

1. **Alimentador 1:** Norte Oriente de Salcedo.
2. **Alimentador 2:** Centro de Salcedo.
3. **Alimentador 3:** Sur Oriente.
4. **Alimentador 4:** Occidente de Salcedo.

Además de las siguientes características en el lado de alto voltaje en la línea transmisión:

Tabla 5. Características del transformador Salcedo.

No.	Datos	Características
1	Ubicación	Sector occidental del Barrio Rumipamba
2	Altura de localización	2760 msnm.
3	Número de transformadores	1
4	Voltaje AV	69kV
5	Voltaje BV	13,8kV
6	Potencia Instalada	10/12,5 MVA
7	Demanda máxima	11,3 MW
8	Factor de Potencia	0,96
9	Número de Tap's del Transformador	5
10	Número de Alimentadores que salen de la S/E	4

Fuente: Autor

Subestación HOLCIM

Dispone de un transformador de potencia de 7,5/9,3 MVA a un nivel de voltaje de 69/13,8kV que se deriva de la línea de subtransmisión de 69kV para suministrar energía eléctrica a los centros de transformación que dispone la planta industrial de la fábrica HOLCIM, abasteciendo a las cargas conectadas aguas abajo. Se dispone de un equipo de medición en el lado de medio voltaje.

2.4.3 Evaluación y diagnóstico del sistema eléctrico de potencia

El colapso de voltaje en cualquier sistema eléctrico de potencia es típico, más aún cuando se trata en líneas de subtransmisión a 69kV debido a que las condiciones ambientales y/o constructivas afectan las franjas de servidumbre establecidas en la resolución del ARCONEL-018/18, en donde por ser una línea de 69kV, su recorrido puede ser dentro de una ciudad ó en espacios verdes, donde la norma establece parámetros de variación de voltaje y estos deben ser cumplidos en el sistema eléctrico de potencia.

La inestabilidad de voltaje puede provocar grandes cambios si no se tiene en cuenta que los términos de seguridad, operación del sistema y calidad de energía, donde el mayor estado del arte se concentra en estudios de carga estáticos de largo tiempo.



Figura 13. Torres de subtransmisión.
Fuente: [22]

Este método utiliza demasiada información computacional de potencia, voltaje, corriente, factor de potencia, en la actualidad los estudios para estos tipos de estudios dinámicos proponen una metodología mucha más sencilla con software especializados y que contienen librerías ya definidas como el digilent power factory.

El sistema eléctrico de potencia consta de dos partes fundamentales que constan de subtransmisión desde la subestación Ambato a 69kV hasta la subestación Salcedo que al ser una subestación comercial realiza distribución eléctrica en niveles de voltaje a 13,8kV.

Este programa utiliza el método de Newton Rapshon para realizar los flujos de potencia y encontrar la convergencia de las ecuaciones planteadas para sistemas eléctricos de potencia e inestabilidad de voltaje que son utilizados para planificación y operación en cada empresa donde se desea monitorear parámetros eléctricos. Los SEP`s suelen utilizar información de generadores, transformadores, líneas de transmisión y cargas a las cuales se asocian parámetros de medición y control, en donde asegurar su operación es más que una necesidad.

2.4.3.1 Demandas de energía del sistema eléctrico de potencia

Para este caso se utilizó los siguientes datos para realizar los flujos de potencia, en donde se tomó los siguientes datos:

Tabla 6. Datos de la subestación AMBATO.

S/E AMBATO	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	25/4/2021	19:15:00	15.992,963	5.792,290	17.009,570	0,940	3.998,241	1.448,073
MINIMO	25/4/2021	3:30:00	8.395,077	3.598,836	9.133,944	0,919	2.098,769	899,709
PROMEDIO	25/4/2021	10:30:00	11.245,044	5.551,793	12.540,870	0,897	2.811,261	1.387,948

Fuente: Autor

Tabla 7. Datos de la subestación HOLCIM.

S/E HOLCIM	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	23:30:00	3.628,00	1.416,00	3.894,54	0,93	907,00	354,00
MINIMO	21/4/2021	12:45:00	192,00	128,00	230,76	0,83	48,00	32,00
PROMEDIO	21/4/2021	21:15:00	1.208,00	396,00	1.271,25	0,95	302,00	99,00

Fuente: Autor

Tabla 8. Datos de la subestación FAÍRIS.

S/E FAIRIS	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	23:15:00	1.355,50	501,02	1.445,13	0,94	338,88	125,26
MINIMO	21/4/2021	0:00:00	65,36	19,99	68,34	0,96	16,34	5,00
PROMEDIO	21/4/2021	18:30:00	786,76	304,67	843,70	0,93	196,69	76,17

Fuente: Autor

Tabla 9. Datos de la subestación ALIMENTADOR 1.

ALIM1	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	19:15:00	3.044,41	1.296,87	3.309,12	0,92	500,34	210,50
MINIMO	21/4/2021	1:45:00	1.454,21	793,55	1.656,64	0,88	246,14	133,61
PROMEDIO	21/4/2021	8:45:00	2.070,48	1.193,79	2.389,98	0,87	337,86	184,25

Fuente: Autor

Tabla 10. Datos de la subestación ALIMENTADOR 2.

ALIM2	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	19:00:00	2.165,71	335,36	2.191,52	0,99	359,38	56,42
MINIMO	21/4/2021	2:00:00	878,55	419,31	973,49	0,90	149,23	71,07
PROMEDIO	21/4/2021	9:30:00	1.395,81	486,44	1.478,15	0,94	241,74	86,74

Fuente: Autor

Tabla 11. Datos de la subestación ALIMENTADOR 3.

ALIM3	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	19:20:00	4.076,76	1.110,32	4.225,25	0,96	669,64	175,12
MINIMO	21/4/2021	2:30:00	1.598,01	728,38	1.756,18	0,91	269,77	122,85
PROMEDIO	21/4/2021	16:30:00	2.406,29	1.162,20	2.672,25	0,90	395,69	194,96

Fuente: Autor

Tabla 12. Datos de la subestación ALIMENTADOR 4.

ALIM4	Fecha	Hora	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)	S	FP	Energía Recibida (kWh)	Energía Recibida (kVArh)
MAXIMO	21/4/2021	19:15:00	1.555,99	83,28	1.558,22	1,00	257,55	14,30
MINIMO	21/4/2021	17:15:00	543,19	85,76	549,92	0,99	91,58	15,97
PROMEDIO	21/4/2021	22:45:00	780,82	55,70	782,81	1,00	132,49	10,61

Fuente: Autor

Con los datos presentados se plantea tres escenarios de análisis, donde se determina las condiciones de operación del sistema eléctrico de potencia.

2.4.3.2 Demanda máxima:

Utilizando el software Digsilent power factory se realiza la modelación planteando un escenario donde solo las 3 subestaciones están conectadas directamente con la línea de subtransmisión en la subestación Ambato, de ahí que se modeló de acuerdo a este parámetro, entonces se tiene los siguientes resultados:

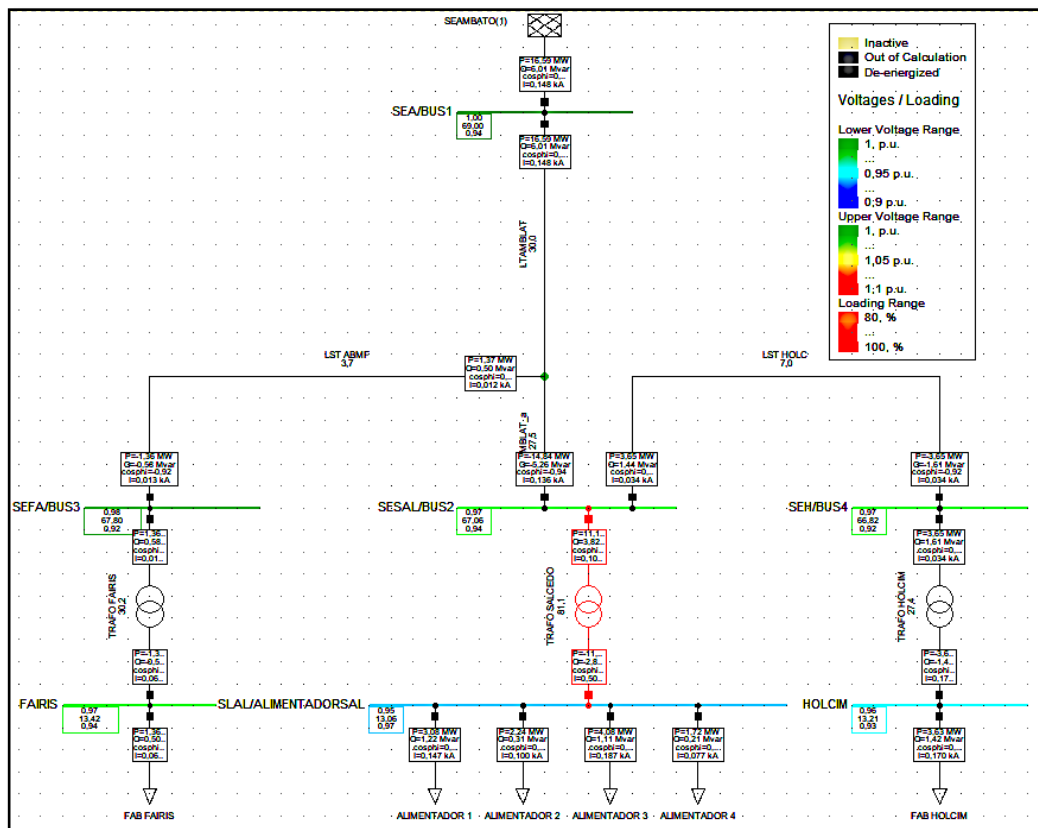


Figura 14. Resultados a demanda máxima.

Fuente: autor

El voltaje en el sistema eléctrico de potencia no se ve afectado la condición de un voltaje 1p.u., del software se tiene los siguientes datos:

Grid: Grid		System Stage: Grid		Study Case: Study Case		Annex: / 3		
rtd.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%]	+5	+10
SALIDASALM								
ALIMENTADORSAL	13,80	0,947	13,06	-35,85				
SEAMBATO								
BUS1	69,00	1,000	69,00	0,00				
SEFAIRIS								
BUS3	69,00	0,983	67,80	-1,06				
SEHOLC								
BUS4	69,00	0,968	66,82	-1,96				
SESAL								
BUS2	69,00	0,972	67,06	-1,76				
FAIRIS								
	13,80	0,973	13,42	-32,15				
HOLCIM								
	13,80	0,957	13,21	-33,27				

Figura 15. Datos a demanda máxima.

Fuente: autor

En subtransmisión a 69kV, la variación de voltaje es:

- En la subestación Fairis: 1.79%
- En la subestación Holcim: 1%
- En la subestación Salcedo: 1%

Donde como conclusión se define que todas las subestaciones a demanda máxima cumplen con la normativa establecida en el ARCONEL 053/18.

En distribución en la subestación Salcedo es donde la mayor afectación se tiene en el lado de bajo voltaje debido a que por la demanda de energía del alimentador afectó la regulación de voltaje llegando al 5% de variación.

Cargabilidad de la línea de subtransmisión a demanda máxima

El sistema de potencia a condiciones de demanda máxima presenta las siguientes condiciones de cargabilidad:

Grid: Grid		System Stage: Grid		Study Case: Study Case		Annex: / 1					
rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data		
SALIDASALM											
ALIMENTADO,80	0,95	13,06	-35,85								
SALIDA /Lod				3,08	1,22	0,93	0,15		P10: 3,08 MW	Q10: 1,22 Mvar	
SALIDA /Lod				2,24	0,31	0,99	0,10		P10: 2,24 MW	Q10: 0,31 Mvar	
SALIDA /Lod				4,08	1,11	0,96	0,19		P10: 4,08 MW	Q10: 1,11 Mvar	
SALIDA /Lod				1,72	0,21	0,99	0,08		P10: 1,72 MW	Q10: 0,21 Mvar	
TRAF0/S/Tr2				-11,12	-2,85	-0,97	0,51	81,07	Tap: 0,00	Min: -2	Max: 2
				Total							
				Load:	11,12	2,85					
SEAMBATO											
BUS1	69,00	1,00	69,00	0,00							
SUBS AM/Xnet				16,59	6,01	0,94	0,15	29,98	Sk": 10000,00 MVA	cLod: 0,23 Mvar	L: 13,37 km
Cub_1 /Lne				16,59	6,01	0,94	0,15		Fv: 232,83 kW		
SEFAIRIS											
BUS3	69,00	0,98	67,80	-1,06							
Cub_1 /Lne				-1,36	-0,58	-0,92	0,01	3,71	Fv: 0,63 kW	cLod: 0,08 Mvar	L: 5,00 km
TRAF0/S/Tr2				1,36	0,58	0,92	0,01	30,16	Tap: 0,00	Min: -2	Max: 2
SEHOLC											
BUS4	69,00	0,97	66,82	-1,96							
Cub_1 /Lne				-3,65	-1,61	-0,92	0,03	7,03	Fv: 7,80 kW	cLod: 0,19 Mvar	L: 11,48 km
TRAF0/H/Tr2				3,65	1,61	0,92	0,03	27,43	Tap: 0,00	Min: -2	Max: 2
SESAL											
BUS2	69,00	0,97	67,06	-1,76							
Cub_1 /Lne				3,65	1,44	0,93	0,03	7,03	Fv: 7,80 kW	cLod: 0,19 Mvar	L: 11,48 km
Cub_1 /Lne				-14,84	-5,26	-0,94	0,14	27,49	Fv: 154,27 kW	cLod: 0,17 Mvar	L: 10,11 km
TRAF0/S/Tr2				11,18	3,92	0,95	0,10	81,07	Tap: 0,00	Min: -2	Max: 2

Figura 16. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda máxima.

Fuente: autor

- La línea de subtransmisión a 69kV Ambato - Latacunga se encuentran operando con una cargabilidad del 30%.
- En la derivación de la subestación Fairis hacia el punto de conexión su demanda de energía consume solo el 3,7%.
- La línea de subtransmisión Salcedo Holcim se encuentra operando con una cargabilidad de 7%.
- La cargabilidad del transformador en la subestación Salcedo llega al 80%, valor que tiene que tomarse en cuenta para una expansión o reconfiguración de la red eléctrica.

2.4.3.3 Demanda mínima:

Para demanda mínima se tiene los siguientes resultados

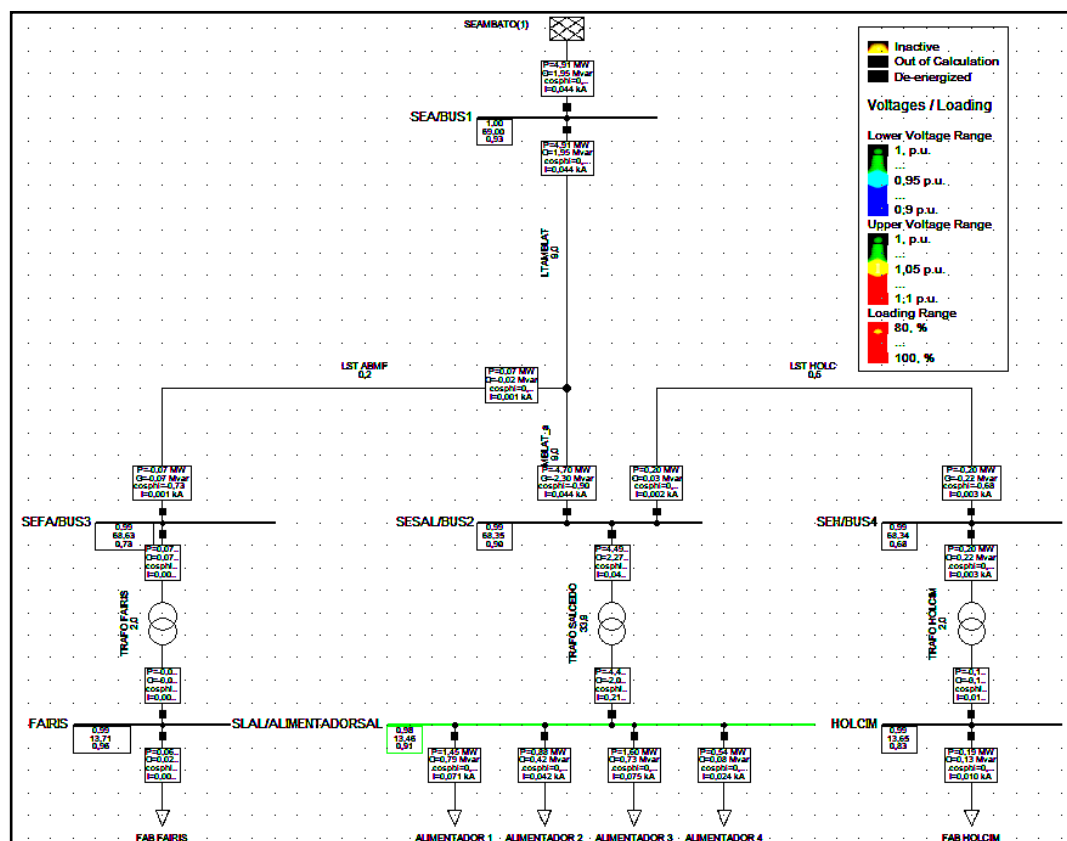


Figura 17. Resultados a demanda mínima.
Fuente: autor

El voltaje en el sistema eléctrico de potencia no se ve afectado la condición de un voltaje 1p.u., del software se tiene los siguientes datos:

Grid: Grid	System Stage: Grid				Study Case: Study Case			Annex: / 3		
	rtd.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	voltage [kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%]	0	+5	+10
SALIDASALM										
ALIMENTADOR SAL	13,80	0,974	13,45	-32,63						
SEAMBATO										
BUS1	69,00	1,000	69,00	0,00						
SEFAIRIS										
BUS3	69,00	0,994	68,59	-0,38						
SEHOLC										
BUS4	69,00	0,989	68,26	-0,67						
SESAL										
BUS2	69,00	0,989	68,27	-0,66						
FAIRIS										
FAIRIS	13,80	0,993	13,70	-30,43						
HOLCIM										
HOLCIM	13,80	0,988	13,63	-30,73						

Figura 18. Datos a demanda mínima.

Fuente: autor

En subtransmisión a 69kV, la variación de voltaje es:

- En la subestación Faíris: 1%
- En la subestación Holcim: 1%
- En la subestación Salcedo: 1%

Donde como conclusión se define que todas las subestaciones a demanda mínima cumplen con la normativa establecida en el ARCONEL 053/18.

En distribución en la subestación Salcedo la variación de voltaje llega al 1% debido que no existe mayor carga conectada a la barra de bajo voltaje.

Cargabilidad de la línea de subtransmisión a demanda mínima

El sistema de potencia a condiciones de demanda mínima presenta las siguientes condiciones de cargabilidad:

Grid: Grid	System Stage: Grid				Study Case: Study Case			Annex: / 1			
	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	voltage [kV]	[deg]	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data	
SALIDASALM											
ALIMENTADOR 1	0,97	13,45	-32,63		1,33	0,78	0,86	0,07		P10: 1,34 MW	Q10: 0,78 Mvar
SALIDA /Lod					2,16	0,33	0,99	0,09		P10: 2,16 MW	Q10: 0,34 Mvar
SALIDA /Lod					1,60	0,73	0,91	0,08		P10: 1,60 MW	Q10: 0,73 Mvar
SALIDA /Lod					0,54	0,08	0,99	0,02		P10: 0,54 MW	Q10: 0,09 Mvar
TRAF0/S/Tr2					-5,64	-1,93	-0,95	0,26	41,08	Tap: 0,00	Min: -2 Max: 2
Total Load:					5,64	1,93					
SEAMBATO											
BUS1	69,00	1,00	69,00	0,00	6,09	1,95	0,95	0,05	10,88	Sk": 10000,00 MVA	
SUBS AM/Xnet					6,09	1,95	0,95	0,05		Fv: 85,67 kW	cLod: 0,23 Mvar L: 13,37 km
Cub_1 /Lne											
SEFAIRIS											
BUS3	69,00	0,99	68,59	-0,38	-0,07	-0,07	-0,73	0,00	0,24	Fv: 0,00 kW	cLod: 0,08 Mvar L: 5,00 km
Cub_1 /Lne					0,07	0,07	0,73	0,00	1,97	Tap: 0,00	Min: -2 Max: 2
TRAF0/S/Tr2											
SEHOLC											
BUS4	69,00	0,99	68,26	-0,67	-0,20	-0,22	-0,68	0,00	0,52	Fv: 0,03 kW	cLod: 0,19 Mvar L: 11,48 km
Cub_1 /Lne					0,20	0,22	0,68	0,00	2,04	Tap: 0,00	Min: -2 Max: 2
TRAF0/H/Tr2											
SESAL											
BUS2	69,00	0,99	68,27	-0,66	0,20	0,03	0,99	0,00	0,52	Fv: 0,03 kW	cLod: 0,19 Mvar L: 11,48 km
Cub_1 /Lne					-5,87	-2,28	-0,93	0,05	10,80	Fv: 64,03 kW	cLod: 0,17 Mvar L: 10,11 km
Cub_1 /Lne					5,67	2,25	0,93	0,05	41,08	Tap: 0,00	Min: -2 Max: 2
TRAF0/S/Tr2											

Figura 19. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda mínima.

Fuente: autor

- La línea de subtransmisión a 69kV Ambato - Latacunga se encuentran operando con una cargabilidad del 11%.
- En la derivación de la subestación Fairis hacia el punto de conexión su demanda de energía consume solo el 0.24%.
- La línea de subtransmisión Salcedo Holcim se encuentra operando con una cargabilidad 0.52%.
- La cargabilidad del transformador en la subestación Salcedo llega al 41%, debido a la carga conectada al sistema eléctrico de potencia.

2.4.3.4 Demanda media:

Para demanda media se tiene los siguientes resultados

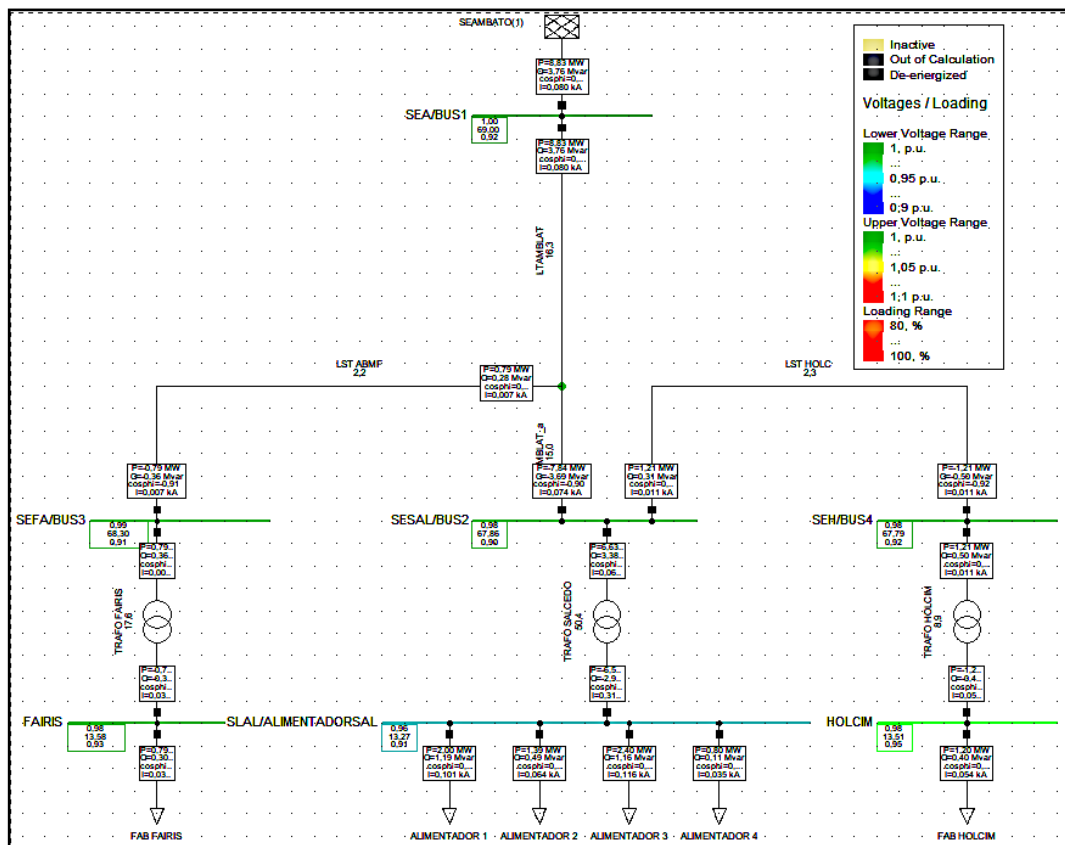


Figura 20. Resultados a demanda media.

Fuente: autor

El voltaje en el sistema eléctrico de potencia no se ve afectado la condición de un voltaje 1p.u., del software se tiene los siguientes datos:

Grid: Grid	System Stage: Grid			Study Case: Study Case		Annex: / 3		
	rtd.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	voltage [kV] [deg]	-10	-5	Voltage 0	Deviation [%]	+10
SALIDASALM								
ALIMENTADOR SAL	13,80	0,967	13,35 -33,18					
SEAMBATO								
BUS1	69,00	1,000	69,00 0,00					
SEFAIRIS								
BUS3	69,00	0,991	68,37 -0,55					
SEHOLC								
BUS4	69,00	0,984	67,90 -0,96					
SESAL								
BUS2	69,00	0,985	67,97 -0,90					
FAIRIS								
FAIRIS	13,80	0,985	13,59 -31,17					
HOLCIM								
HOLCIM	13,80	0,981	13,53 -31,38					

Figura 21. Datos a demanda media.

Fuente: autor

En subtransmisión a 69kV, la variación de voltaje es:

- En la subestación Faíris: 1%
- En la subestación Holcim: 1.5%
- En la subestación Salcedo: 1.5%

Donde se define que todas las subestaciones a demanda media cumplen con la normativa establecida en el ARCONEL 053/18.

En distribución en la subestación Salcedo la variación de voltaje llega al 3.26% debido a la carga conectada a la barra del secundario del transformador 13,8kV.

Cargabilidad de la línea de subtransmisión a demanda media

El sistema de potencia a condiciones de demanda media presenta las siguientes condiciones de cargabilidad:

Grid: Grid	System Stage: Grid			Study Case: Study Case		Annex: / 1			
	rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.]	Bus-voltage [kV] [deg]	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data
SALIDASALM									
ALIMENTADO,80	0,97	13,35	-33,18						
SALIDA /Lod				2,00	1,07	0,88	0,10		P10: 2,00 MW Q10: 1,07 Mvar
SALIDA /Lod				1,35	0,28	0,98	0,06		P10: 1,35 MW Q10: 0,28 Mvar
SALIDA /Lod				2,31	0,87	0,94	0,11		P10: 2,31 MW Q10: 0,87 Mvar
SALIDA /Lod				0,80	0,11	0,99	0,03		P10: 0,80 MW Q10: 0,11 Mvar
TRAFO/S/Tr2				-6,45	-2,32	-0,94	0,30	47,58	Tap: 0,00 Min: -2 Max: 2
Total Load:				6,45	2,32				
SEAMBATO									
BUS1	69,00	1,00	69,00 0,00						
SUBS AM/Xnet				8,68	3,08	0,94	0,08		SK": 10000,00 MVA
Cub_1 /Lne				8,68	3,08	0,94	0,08	15,66	Pv: 109,51 kW cLod: 0,23 Mvar L: 13,37 km
SEFAIRIS									
BUS3	69,00	0,99	68,37 -0,55						
Cub_1 /Lne				-0,79	-0,36	-0,91	0,01	2,17	Pv: 0,21 kW cLod: 0,08 Mvar L: 5,00 km
TRAFO/S/Tr2				0,79	0,36	0,91	0,01	17,60	Tap: 0,00 Min: -2 Max: 2
SEHOLC									
BUS4	69,00	0,98	67,90 -0,96						
Cub_1 /Lne				-1,21	-0,50	-0,92	0,01	2,28	Pv: 0,79 kW cLod: 0,19 Mvar L: 11,48 km
TRAFO/H/Tr2				1,21	0,50	0,92	0,01	8,89	Tap: 0,00 Min: -2 Max: 2
SESAL									
BUS2	69,00	0,99	67,97 -0,90						
Cub_1 /Lne				1,21	0,31	0,97	0,01	2,28	Pv: 0,79 kW cLod: 0,19 Mvar L: 11,48 km
Cub_1 /Lne				-7,70	-3,03	-0,93	0,07	14,25	Pv: 76,06 kW cLod: 0,17 Mvar L: 10,11 km
TRAFO/S/Tr2				6,48	2,72	0,92	0,06	47,58	Tap: 0,00 Min: -2 Max: 2

Figura 22. Datos de cargabilidad del flujo de potencia a demanda media.

Fuente: autor

- La línea de subtransmisión a 69kV Ambato - Latacunga se encuentran operando con una cargabilidad del 15.66%.
- En la derivación de la subestación Faíris hacia el punto de conexión su demanda de energía consume solo el 2.17%.
- La línea de subtransmisión Salcedo - Holcim se encuentra operando con una cargabilidad 2.28%.
- La cargabilidad del transformador en la subestación Salcedo llega al 47.58%, debido a la carga conectada al sistema eléctrico de potencia.

2.4.4 Colapso de voltaje:

Estas demandas excepcionales de energía se pueden presentar por un aumento anormal de la carga, Ejemplo: Condiciones climáticas extremas, ó a la pérdida de un elemento como un generador, transformador o línea, debido a una falla. El uso de las redes de un sistema para transferir potencia entre otros sistemas representa una carga adicional. Existe importación de potencia activa y reactiva a grandes distancias o desde otros sistemas lo que puede comprometer la seguridad del sistema al presentarse pérdida de la conexión, debido a una falla en una línea de transmisión, especialmente si el sistema no tiene reserva para atender la generación que se perdió.

Algunas perturbaciones y cambios en la estructura de un sistema eléctrico de potencia inician su necesidad de potencia reactiva que no debe ser suministrada localmente. En condiciones de operación al tratar de encontrar un punto de equilibrio se tiene tendencia al colapso de voltaje. En el análisis de colapso de voltaje el comportamiento de la carga es muy importante ya que puede tener un efecto estabilizador o bien puede hacer más crítico el problema. Los transformadores con cambio automático de TAP bajo carga también pueden afectar la estabilidad del voltaje al modificar la característica propia de la carga. La desconexión de la carga con una programación definida considera un soporte local de voltaje como estrategia para evitar el colapso de voltaje, donde se establece una relación entre el voltaje en el nodo de la carga y la demanda a suministrar para que el control de voltaje dependerá del nivel de carga en el sistema de transmisión y de los requerimientos de reactivos de la carga, [18].

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

- 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.
- Limitaciones en la transmisión de potencia reactiva que involucra grandes pérdidas de reactivos en líneas de transmisión fuertemente cargadas.
- Acción de los cambiadores de “tap's” 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 una serie de salidas o cortes de líneas con el consiguiente alcance del límite de generación de reactivos, [19].

Cuando un sistema de potencia es sometido a un incremento de demanda de potencia reactiva, seguido de una contingencia del sistema, la demanda adicional es reunida por las reservas de potencia reactiva llevadas por los generadores y compensadores. Generalmente hay reservas suficientes y el sistema establece un nivel de voltaje estable. Sin embargo, es posible, debido a una combinación de eventos y condiciones del sistema, que la demanda de potencia reactiva adicional puede llevar al colapso de voltaje, causando una avería mayor en parte o en todo el sistema.

El evento inicial puede deberse a una variedad de causas: pequeños cambios graduales del sistema, como un incremento natural en la carga del sistema o desórdenes largos repentinos como pérdidas en la unidad generador o líneas fuertemente cargadas. Algunas veces una alteración aparentemente tranquila puede permitir eventos subsecuentes que pueden causar en el futuro un derrumbamiento del sistema. El corazón del problema es la inhabilidad del sistema para enfrentar sus demandas reactivas. Usualmente, pero no siempre, el colapso de voltaje involucra condiciones del sistema con líneas fuertemente cargadas. Cuando el transporte de poder reactivo de áreas vecinas es difícil,

cualquier cambio que requiere apoyo de potencia reactiva adicional puede llevar al colapso de voltaje que generalmente se manifiesta como un lento descenso de voltaje siendo el resultado de un proceso acumulativo que involucra acciones e interacciones de muchos dispositivos, controles y sistemas de protección. El horario de derrumbamiento en tales casos podría estar en el orden de varios minutos. La duración del derrumbamiento dinámico del voltaje en algunas situaciones pueden ser muy cortas dichos eventos suelen ser causados por componentes desfavorables de carga como motores de inducción y convertidores. El horario de derrumbamiento en esta clase de inestabilidad de voltaje es la misma que la inestabilidad de un rotor de ángulo.

El colapso de voltaje es fuertemente influenciado por condiciones y características de sistemas eléctricos de potencia. Los siguientes son factores que contribuyen significativamente a la inestabilidad y derrumbamiento de voltaje como:

- Largas distancias entre la generación y la carga.
- Características desfavorables de carga.
- Falta de coordinación entre diferentes sistemas de control y protección eléctrica.

El problema de colapso de voltaje puede agravarse por el uso excesivo de condensadores en desviación. La compensación reactiva puede hacerse más efectiva que perjudicial escogiendo una combinación de capacitores de derivación, condensadores posiblemente síncronos, [18].

El colapso de voltaje en el sistema de subtransmisión empieza a notarse cuando una contingencia o evento se presenta sin previo aviso, ya sea por causas naturales y/o provocados. Este suceso es impredecible en un sistema eléctrico de potencia, por lo tanto debe ser lo suficientemente robusto y debe contar con todas las protecciones necesarias y los respaldos de energía para poder suplir en el caso más extremo, tomando en consideración estos posibles eventos se realizó estos posibles escenarios para poder determinar qué respuesta tendrá ante un colapso de voltaje el sistema de subtransmisión Ambato – Latacunga mediante las curvas PV y determinar que cargabilidad se genera en todos sus

componentes, se tomó en consideración el caso más extremo de energía a demanda máxima, es así que se presenta los siguientes resultados:

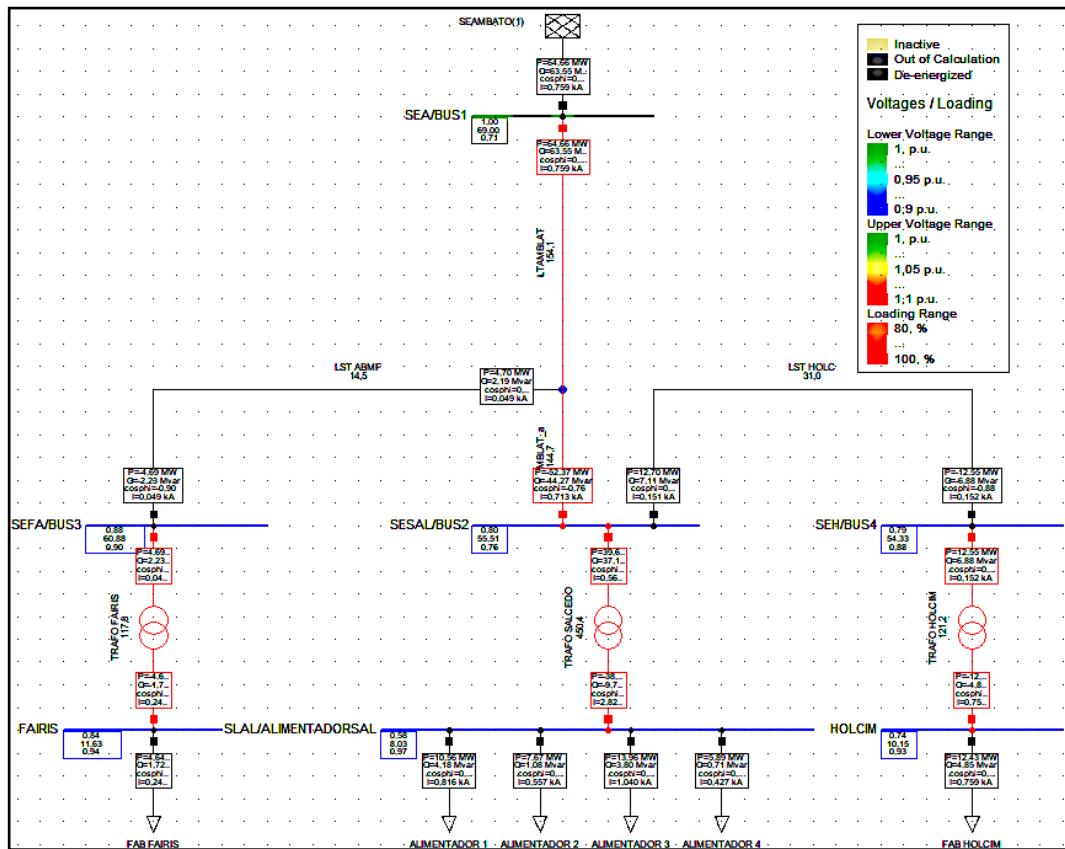


Figura 23. Respuesta del SEP frente a un colapso de voltaje.

Fuente: autor

El voltaje en el sistema eléctrico de potencia tiene la condición de un voltaje 1p.u. pero el factor de potencia decrece a 0,7 causando los siguientes efectos que con ayuda del software Digsilent power factory se tiene los siguientes resultados:

Grid:	Grid	System Stage:	Grid	Study Case:	Study Case	Annex:	/ 3
		Bus - voltage		Voltage - Deviation [%]			
	rtd.V [kV]	[p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	0
					+5	+10	
SALIDASALM							
ALIMENTADOR SAL	13,80	0,582	8,03	-64,34			
SEAMBATO							
BUS1	69,00	1,000	69,00	0,00			
SEFAIRIS							
BUS3	69,00	0,882	60,88	-3,19			
SEHOLC							
BUS4	69,00	0,787	54,33	-6,60			
SESAL							
BUS2	69,00	0,804	55,51	-5,65			
FAIRIS							
BUS2	13,80	0,843	11,63	-38,00			
HOLCIM							
BUS2	13,80	0,735	10,15	-43,82			

Figura 24. Datos del SEP frente a un colapso de voltaje.

Fuente: autor

En subtransmisión a 69kV, la variación de voltaje es:

- En la subestación Fairis: 12%
- En la subestación Holcim: 22%
- En la subestación Salcedo: 20%

Donde se define que todas las subestaciones a demanda máxima, frente a un colapso del sistema pierden la estabilidad del sistema causando afectación de la operación de la línea de subtransmisión.

En distribución en la subestación Salcedo la variación de voltaje llega al 42% debido al colapso de voltaje que se presenta en el sistema eléctrico de potencia a un nivel de voltaje de 13,8kV.

Cargabilidad del sistema eléctrico de potencia

El sistema de potencia a condiciones de demanda máxima frente a un colapso de voltaje presenta las siguientes condiciones de cargabilidad:

Grid: Grid		System Stage: Grid		Study Case: Study Case		Annex:		/ 1	
rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.] [kV]	deg	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data	
SALIDASALM									
ALIMENTADO,80	0,58	8,03	-64,34						
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 1		10,56	4,18	0,93	0,82	P10:	3,08 MW	Q10: 1,22 Mvar
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 2		7,67	1,08	0,99	0,56	P10:	2,24 MW	Q10: 0,31 Mvar
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 3		13,96	3,80	0,96	1,04	P10:	4,08 MW	Q10: 1,11 Mvar
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 4		5,89	0,71	0,99	0,43	P10:	1,72 MW	Q10: 0,21 Mvar
TRAF0/S/Tr2	TRAFO SALCEDO		-38,08	-9,77	-0,97	2,83	450,40	Tap:	0,00
	Total							Min:	-2
	Load:		38,08	9,77				Max:	2
SEAMBATO									
BUS1	69,00	1,00	69,00	0,00					
SUBS AM/Xnet	SEAMBATO(1)		64,66	63,55	0,71	0,76	154,06	Sk*:	10000,00 MVA
Cub_1 /Lne	LTAMBLAT		64,66	63,55	0,71	0,76		Pv:	4552,59 kW
								cLod:	0,21 Mvar
								L:	13,37 km
SEFAIRIS									
BUS3	69,00	0,88	60,88	-3,19					
Cub_1 /Lne	LST ABMF		-4,69	-2,23	-0,90	0,05	14,50	Pv:	9,78 kW
TRAF0/S/Tr2	TRAFO FAIRIS		4,69	2,23	0,90	0,05	117,84	Tap:	0,00
								Min:	-2
								Max:	2
SEHOLC									
BUS4	69,00	0,79	54,33	-6,60					
Cub_1 /Lne	LST HOLC		-12,55	-6,88	-0,88	0,15	31,03	Pv:	154,43 kW
TRAF0/H/Tr2	TRAFO HOLCIM		12,55	6,88	0,88	0,15	121,16	Tap:	0,00
								Min:	-2
								Max:	2
SESAL									
BUS2	69,00	0,80	55,51	-5,65					
Cub_1 /Lne	LST HOLC		12,70	7,11	0,87	0,15	31,03	Pv:	154,43 kW
Cub_1 /Lne	LTAMBLAT a		-52,37	-44,27	-0,76	0,71	144,67	Pv:	3033,26 kW
TRAF0/S/Tr2	TRAFO SALCEDO		39,67	37,15	0,73	0,57	450,40	Tap:	0,00
								Min:	-2
								Max:	2

Figura 25. Datos de cargabilidad en las líneas de subtransmisión.

Fuente: autor

- La línea de subtransmisión a 69kV Ambato - Latacunga frente a un colapso de voltaje produce una cargabilidad del 154,06%.

- La subestación Faírís hacia el punto de conexión frente al colapso de voltaje presenta la cargabilidad de un 14,5%.
- La línea de subtransmisión Salcedo - Holcim frente al colapso de voltaje presenta la cargabilidad de un 31,00%.
- La cargabilidad del transformador en la subestación Salcedo llega al 47.58%, debido a la carga conectada al sistema eléctrico de potencia.

2.4.4.1 Curvas P-V

Con la condición a demanda máxima se proyecta como el peor escenario para que se presente un colapso de voltaje, es así que se define las curvas P-V debido a este fenómeno, teniendo en cuenta los siguientes resultados:

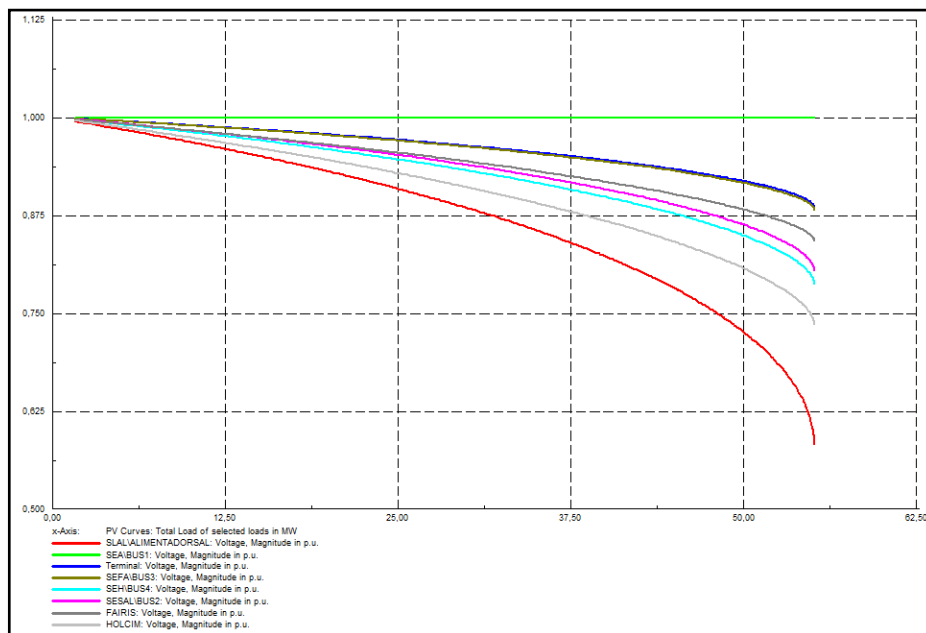


Figura 26. Curvas P-V en un colapso de voltaje.

Fuente: autor

Donde queda en evidencia la afectación de producirse un colapso de voltaje en cada una de las barras del sistema eléctrico de potencia, siendo la barra más afectada la del secundario del transformador de la subestación de Salcedo con una variación del voltaje hasta llegar a un mínimo de 0,58pu equivalente al 42% de variación de voltaje y provocando una cargabilidad a la línea de subtransmisión que no es capaz de soportar si no tiene un respaldo para sacarla de operación.

2.4.4.2 Curvas Q-V

La proximidad a la inestabilidad de voltaje ante la presencia de un evento, podría ocurrir en función de cómo el sistema eléctrico de potencia en subtransmisión es capaz de soportar con la condición a demanda máxima el peor escenario para que se presente un colapso de voltaje, es así que se define las curvas Q-V debido a este fenómeno, teniendo en cuenta los siguientes resultados:

Esta representación del consumo de reactivos en el sistema eléctrico de potencia puede ser más útil, que permite realizar el diseño de estrategias para evitar el colapso de voltaje.

Para poder obtener la curva Q-V en Digsilent power factory, se necesita un compensador de reactivos en el sistema eléctrico de potencia, es así que se a tomado a la Barra de distribución de la subestación Salcedo para poder determinar la condición de operación ante un colapso de voltaje.

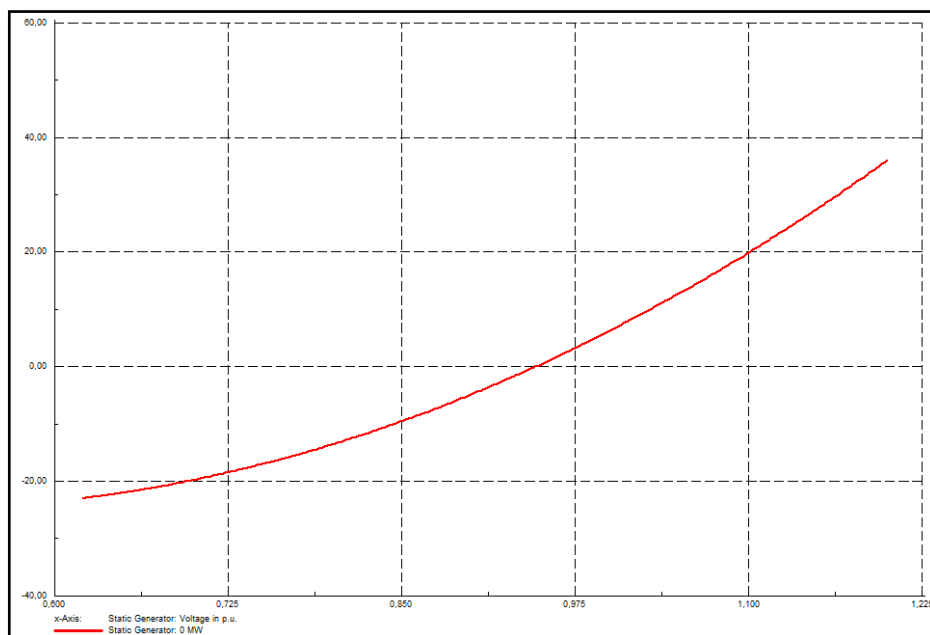


Figura 27. Curva Q-V.

Fuente: autor

Esta curva presenta el siguiente distintivo, que como característica típica va de ser una inyección creciente reactiva que aporta mucho más al sistema eléctrico de potencia con la finalidad de encontrar un margen de estabilidad de voltaje que una

vez encontrado el punto máximo de transferencia, regresara a condiciones de operación donde el voltaje ya no está en condiciones fuera de línea.

2.4.3.3 Estabilidad de voltaje ante contingencias y eventos de una falla de línea y una falla a tierra

En el software digsilent power factory se tiene la facilidad de simular eventos que pueden presentarse comúnmente en un sistema eléctrico de potencia que dispone de los siguientes eventos, una falla en la barra de la subestación Salcedo al ser la principal que recibe la potencia desde la Subestación Ambato y al ser una barra netamente de subtransmisión a 69kV se puede programar un evento, es así que se tiene lo siguiente:

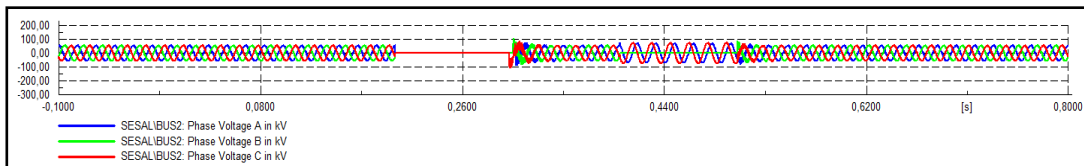


Figura 28. Estabilidad de voltaje.

Fuente: autor

En la figura podemos observar la respuesta del voltaje ante un evento instantáneo de una falla trifásica con despeje instantáneo, donde la corriente de cortocircuito llega a tener un valor de 5A con despeje de la falla a los 100ms, el sistema vuelve a trabajar en condiciones de operación: durante este tiempo de regresar a la estabilidad de voltaje el sistema eléctrico de potencia despeja las remanencias de corriente parasita o de cortocircuito producida.

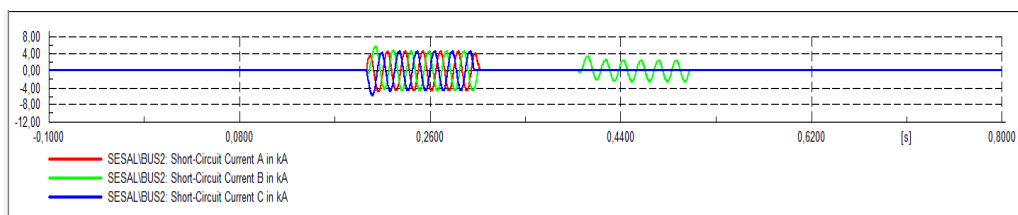


Figura 29. Respuesta de la corriente de corto circuito.

Fuente: autor

Después de 100ms se produce una falla a tierra de una fase con la finalidad de saber si el sistema sale de operación o tiene la robustez suficiente para soportar la cargabilidad en exceso y poder regresar a trabajar normalmente después. En

consecuencia, se define que la falla a tierra puede ser despejada 100ms después y continuar con la operación normal del sistema eléctrico de potencia.

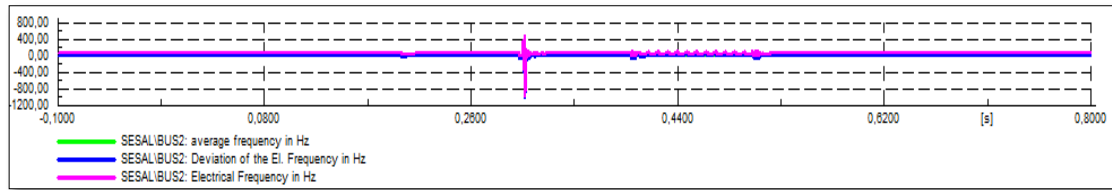


Figura 30. Respuesta de la frecuencia en el SEP.

Fuente: autor

La frecuencia también se vuelve un elemento que sufre afectaciones al presentarse una falla trifásica como se tiene en principio, pero es capaz de soportar el evento dentro del sistema eléctrico de potencia y evitar la pérdida de operación al ser instantánea, de igual manera soporta una falla a tierra de una fase con la diferencia que la oscilación tiene un periodo prolongado de tiempo respondiendo después al sistema con la estabilidad de voltaje y por ende la frecuencia se recupera.

2.5 Resultados del análisis de cargabilidad de la línea de subtransmisión.

Enfoque de manera resumida de los resultados obtenidos del modelamiento eléctrico en donde se considera que el factor de potencia en escenarios de operación de demanda mínima y media no cumple con los parámetros establecidos en la normativa eléctrica ARCONEL 053 / 18.

Tabla 13. Condiciones del sistema eléctrico Ambato - Latacunga

CASO	Sistema Salcedo	Δ	% ΔV	CUMPLE	
				SI	NO
Demanda máxima	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	0,92		X	
Demanda mínima	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	0,902			X
Demanda media	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	0,918			X

2.6 Conclusiones Capítulo II

- En este capítulo se determinó que tipo de metodología se empleó para determinar cómo está operando el sistema eléctrico de potencia y en base a criterios técnicos emitir una resolución de su operación en la línea de subtransmisión a 69kV Ambato – Latacunga.

- Los criterios técnicos planteados describen la operación del sistema eléctrico de potencia en escenarios de demanda máxima, mínima y media definiendo bajo qué parámetros se encuentran y si están dentro de los límites establecidos con la norma ARCONEL 053/18.
- Al presentarse una variación de voltaje en condiciones de demanda media o mínima se expone en gran parte al sistema eléctrico de potencia lo que significaría una desconexión y por lo tanto pérdidas económicas altas al estado provocando un colapso de voltaje en el sistema nacional interconectado (SNI), es así que por el sur la provincia de Cotopaxi específicamente no se tenía respaldo suficiente de operación para realizar el traslape de energía eléctrica para sacar la línea de subtransmisión de operación.
- El sistema eléctrico de potencia de subtransmisión al presentarse un evento no programado o falla trifásica, es capaz de soportar una sobrecarga de energía por un tiempo limitado.

CAPÍTULO III. APLICACIÓN Y/O VALIDACIÓN DE LA INVESTIGACION

3.1 Análisis de los resultados

Se utilizó un modelo de flujograma donde se tomó en cuenta los datos obtenidos desde los medidores en cada subestación, haciendo énfasis en la potencia activa como principal elemento para su análisis y modelamiento.

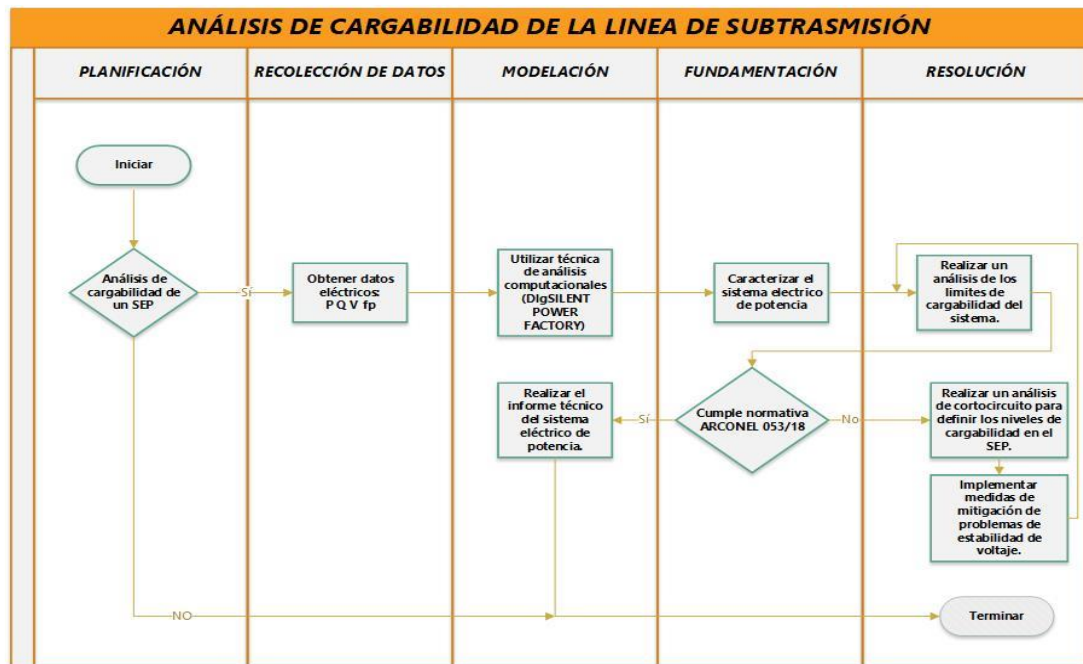


Figura 31. Diagramas de flujo para estudio de cargabilidad.

Fuente: autor

Para un sistema eléctrico de potencia se decide qué actividad se va realizar en base a funciones principales que son:

- Planificación
- Recolección de datos
- Modelación
- Fundamentación
- Resolución

En donde por cada función se realiza las tareas asignadas, se realizó el análisis de cargabilidad basándose en este proceso.

3.2 Método

Los valores obtenidos con la perturbación generada a través de la contingencia y con la que se obtuvo el nivel máximo de cargabilidad de la línea de subtransmisión entre Ambato – Latacunga de determinó en base al crecimiento poblacional de 0,1Mvar establecido en el Plan Maestro de Electricidad.

En la figura 31, se analiza las curvas P-V generadas por cada barra de subestación del sistema eléctrico de potencia, la misma que utiliza los scripts precargados en el lenguaje de programación DPL de Digsilent power factory. Es así que se tiene los siguientes datos generados a partir de la demanda máxima del sistema eléctrico de potencia Ambato – Latacunga:

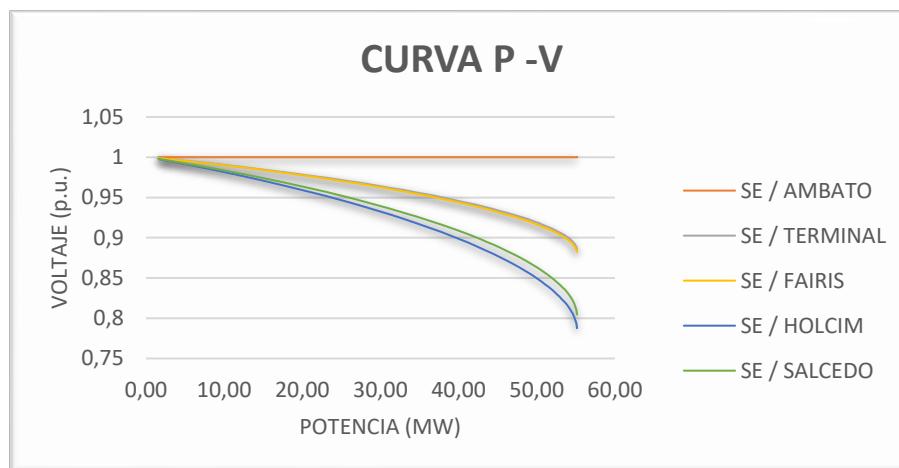


Figura 32. Curvas P-V en subtransmisión a 69kV.

Fuente: autor

A nivel de subtransmisión en el sistema eléctrico de potencia:

- En la Subestación Salcedo en 69kV el colapso de voltaje que sufriría no tiene respuesta cuando llega a 0,8046p.u.
- En la subestación Fáiris en 69kV, el colapso de voltaje que sufriría no tiene respuesta cuando llega 0,8824 p.u. de voltaje.
- En la subestación Holcim en 69kV el nivel más crítico se ubica en donde su respuesta ante un colapso de voltaje hace que el punto más crítico que pueda soportar un nivel de voltaje de 0,7876p.u.

Todos estos puntos de colapso en las subestaciones se producen por una cargabilidad de la línea que llega al 154% excediéndose a sus parámetros de construcción, cuando la potencia llega a un nivel extremo de 55.15MW, manteniendo la estabilidad de potencia o niveles aceptables de potencia hasta 40MW. A nivel de distribución en el sistema eléctrico de potencia los alimentadores ó salidas de cada una expone el siguiente voltaje:

- En la subestación Salcedo a 13,8kV, el colapso de voltaje que sufriría no tiene respuesta cuando llega 0,5825 p.u. de voltaje.
- En la subestación Holcim a 13,8kV, el colapso de voltaje que sufriría no tiene respuesta cuando llega 0,7356 p.u. de voltaje.
- En la subestación Faíris a 13,8kV, el colapso de voltaje que sufriría no tiene respuesta cuando llega 0,8426 p.u. de voltaje.

En nivel de distribución el colapso de voltaje es mucho más inestable y tiene mayor afectación debido a que en 30MW promedio empieza el rango de inestabilidad y descenso de voltaje.

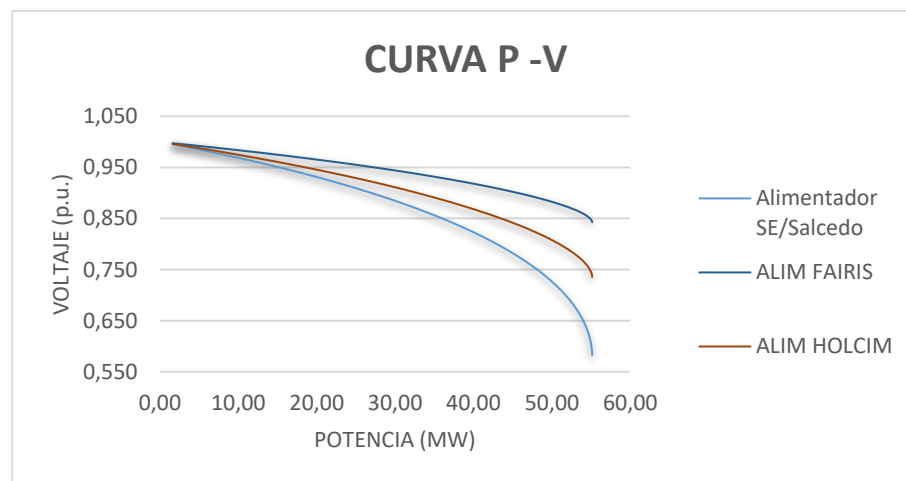


Figura 33. Curvas P-V en distribución a 13,8kV.

Fuente: autor

Ninguna barra cumple con la regulación establecida por el ARCONEL 053/18 porque ninguna barra tiene un valor superior a 0,9 p.u. debido a que en todo el sistema existe una demanda de potencia activa para todo el sistema, por lo que es necesario crear alternativas que puedan ayudar a solucionar estos inconvenientes en el sistema eléctrico de potencia para estabilizar el voltaje bajo estos parámetros.

En el Anexo 1 se puede encontrar la tabla de los valores obtenidos con cada iteración obtenida del flujo de potencia del SEP que se modeló en el software y se hace notoriedad que para encontrar el comportamiento de una curva Q-V se necesita un generador estático asimétrico que se instale en la barra donde se va a realizar el análisis de potencia reactiva.

Se ha tomado en cuenta a la barra de 13,8kV de la subestación Salcedo como punto de análisis, debido a que, en condiciones de contingencia, sufre la mayor afectación, y para tratar de minimizar las pérdidas a nivel de distribución en todas las salidas, se consideró instalar un generador estático.

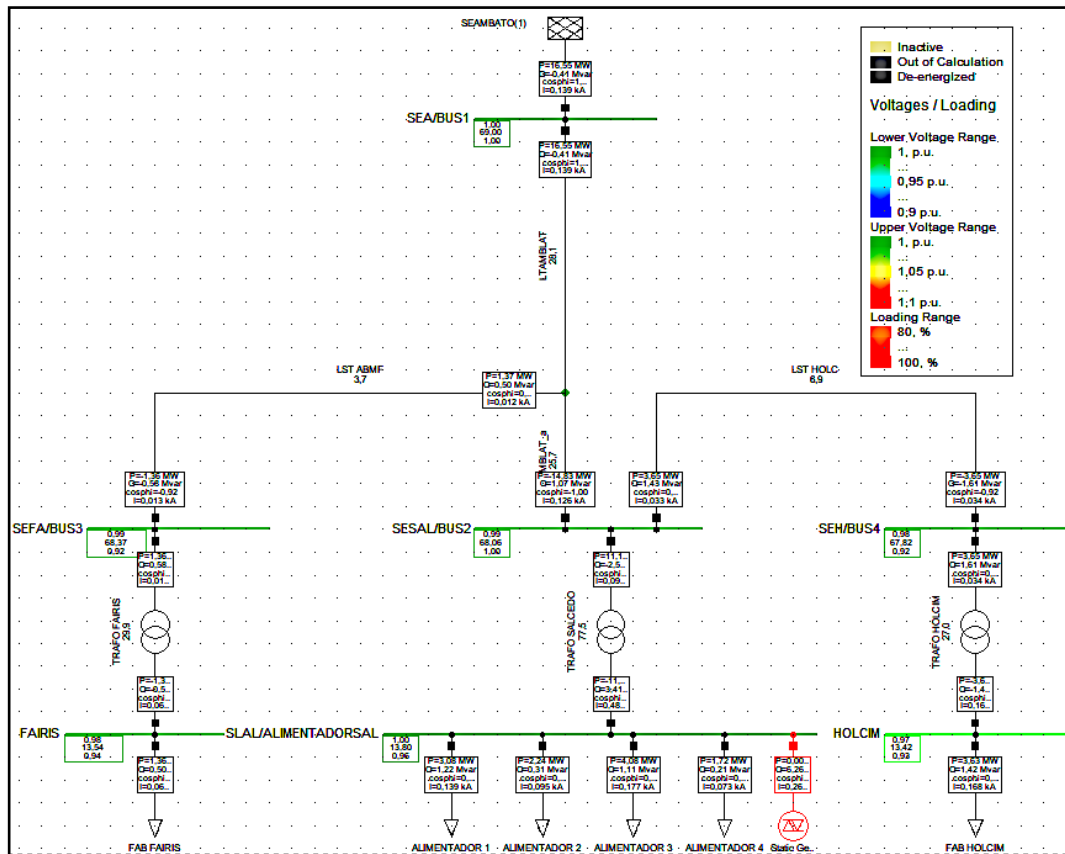


Figura 34. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.

Fuente: autor

En la subestación Salcedo se tiene un estado de crítico al presentar la condición de caída de voltaje a 0,5825p.u. haciendo que el consumo de reactivos se vaya incrementando de manera que el voltaje siga creciendo, es así que la zona de

estabilidad del sistema eléctrico de potencia se vuelve estable hasta el cruce por cero.

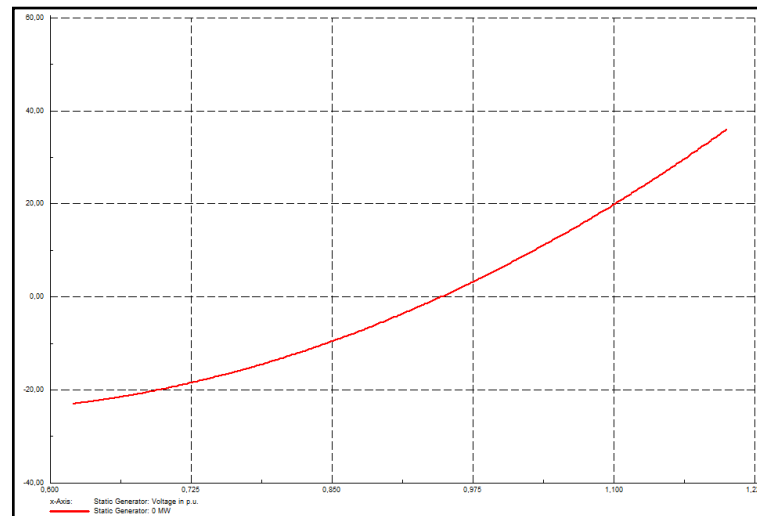


Figura 35. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.

Fuente: autor

En el **Anexo 2** se puede encontrar la tabla de los valores obtenidos con cada iteración obtenida del flujo de potencia en base al cálculo por el método 2 especificado en la sección 1.3.12.

3.3 Propuesta y alcance del estudio

En base a los resultados que se obtuvo en cada uno de las simulaciones se puede identificar en el sistema eléctrico de potencia colapsos de voltaje así como bajo factor de potencia en condiciones de demanda mínima y media, donde los factores de potencia en varias barras no se pueden sostener en condiciones de operatividad normal como se puede visualizar en la figura **36** y que está en mayor detalle en el ANEXO 3.

rated Voltage [kV]	Bus-voltage [p.u.] [kV]	deg	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]	Power Factor [-]	Current [kA]	Loading [%]	Additional Data			
SALIDASAIM											
ALIMENTADO, 80	0,58	8,03	-64,34								
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 1	10,56	4,18	0,93	0,82		P10:	3,08 MW	Q10:	1,22 Mvar	
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 2	7,67	1,08	0,99	0,56		P10:	2,24 MW	Q10:	0,31 Mvar	
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 3	13,96	3,80	0,96	1,04		P10:	4,08 MW	Q10:	1,11 Mvar	
SALIDA /Lod	ALIMENTADOR 4	5,89	0,71	0,99	0,43		P10:	1,72 MW	Q10:	0,21 Mvar	
TRAFO/S/Tr2	TRAFO SALCEDO	-38,08	-9,77	-0,97	2,83	450,40	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2
	Total Load:	38,08	9,77								
SEAMBATO											
BUS1 69,00	1,00	69,00	0,00								
SUBS AM/Xnet	SEAMBATO (1)	64,66	63,55	0,71	0,76		Sk":	10000,00 MVA			
Cub_1 /Lne	LTAMBLAT	64,66	63,55	0,71	0,76	154,06	Pv:	4552,59 kW	cLod:	0,21 Mvar	L: 13,37 km
SEFAIRIS											
BUS3 69,00	0,88	60,88	-3,19								
Cub_1 /Lne	LST ARMF	-4,69	-2,23	-0,90	0,05	14,50	Pv:	9,78 kW	cLod:	0,07 Mvar	L: 5,00 km
TRAFO/S/Tr2	TRAFO FAIRIS	4,69	2,23	0,90	0,05	117,84	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2
SEHOLC											
BUS4 69,00	0,79	54,33	-6,60								
Cub_1 /Lne	LST HOLC	-12,55	-6,88	-0,88	0,15	31,03	Pv:	154,43 kW	cLod:	0,13 Mvar	L: 11,48 km
TRAFO/H/Tr2	TRAFO HOLCIM	12,55	6,88	0,88	0,15	121,16	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2
SESAL											
BUS2 69,00	0,80	55,51	-5,65								
Cub_1 /Lne	LST HOLC	12,70	7,11	0,87	0,15	31,03	Pv:	154,43 kW	cLod:	0,13 Mvar	L: 11,48 km
Cub_1 /Lne	LTAMBLAT_a	-52,37	-44,27	-0,76	0,71	144,67	Pv:	3033,26 kW	cLod:	0,12 Mvar	L: 10,11 km
TRAFO/S/Tr2	TRAFO SALCEDO	39,67	37,15	0,73	0,57	450,40	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2
FAIRIS											
13,80	0,84	11,63	-38,00								
Cub_2 /Lod	FAB FAIRIS	4,64	1,72	0,94	0,25		P10:	1,36 MW	Q10:	0,50 Mvar	
TRAFO/S/Tr2	TRAFO FAIRIS	-4,64	-1,72	-0,94	0,25	117,84	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2
HOLCIM											
13,80	0,74	10,15	-43,82								
FAB HOL/Lod	FAB HOLCIM	12,43	4,85	0,93	0,76		P10:	3,63 MW	Q10:	1,42 Mvar	
TRAFO/H/Tr2	TRAFO HOLCIM	-12,43	-4,85	-0,93	0,76	121,16	Tap:	0,00	Min:	-2	Max: 2

Figura 36. Curvas Q-V en la barra de bajo voltaje.

Fuente: autor

3.4 Mitigación de problemas de estabilidad de voltaje

Una primera taxonomía de las medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje se encuentra en el reporte de un grupo de trabajo de IEEE del año 1993.

Dicha taxonomía incluye las siguientes categorías:

- i. Soluciones operativas
- ii. Modificaciones al sistema
- iii. Deslaste de carga por voltaje.

Aunque se utiliza el término “solución” para estas categorías, en este artículo se reemplaza dicho término por “medida de mitigamiento”, dado que es difícil asegurar en sentido general que dichas medidas siempre sean soluciones. Estas medidas se dividen en expansión del sistema y compensación reactiva controlada y se añaden tres categorías más. Así, la taxonomía propuesta comprende las siguientes categorías. La Figura 2 presenta un esquema de la taxonomía propuesta. Cada una de las categorías se describe a continuación.

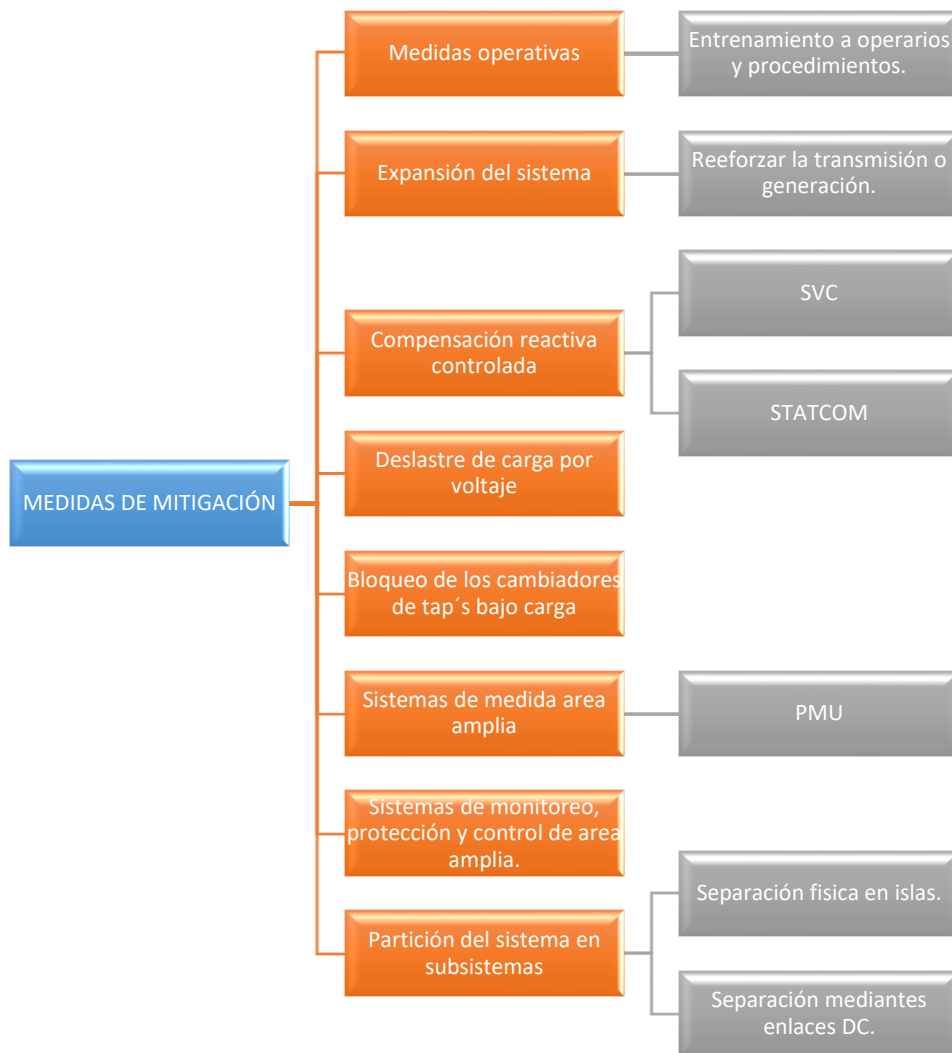


Figura 37. Medidas para mitigar los problemas de estabilidad de voltaje.

Fuente: autor

3.4.1 Medidas operativas

Se puede aplicar las siguientes medidas, pero el operador deberá tener base y fundamento para saber cómo y qué hacer en:

1. Deslastre manual de carga.
2. Suspender la operación automática de los cambiadores de tap's bajo carga.
3. Reducir el voltaje a las cargas para disminuir la demanda
4. Operar manualmente las fuentes de reactivos:
 - Desconectar reactores

- Conectar bancos de condensadores.

5. Estrategias de despacho de los generadores:

- Arranque de unidades rápidas
- Limitación de la corriente de armadura

En donde los procedimientos y las guías para operación de unidades en coordinación con los diferentes centros de control del país deben actuar en forma sincronizada, para así prevenir desconexiones por variaciones de frecuencia y oscilaciones, problemas que pueden suceder a causa del operador y su no intervención inmediata:

- La inapropiada estimación por parte de los operadores de los centros de control de la situación conducente a la violación de las reglas de seguridad operativa.
- La debilidad de los procedimientos de coordinación entre los operadores de los centros de control de distintos sistemas.
- Las malas decisiones de los operadores en situaciones críticas.
- La falta de conocimiento por parte de los operadores de los centros de control en cuanto a lo que sucede más allá de las fronteras de su sistema.

Este soporte fue creado para concientizar al operador que sobre la importancia de implementar programas de entrenamiento y certificación de los operadores de centros de control.

Así como la aplicación de medidas como intercambio de despacho en generación y deslastre de carga no se puede realizar de manera remota sino mas bien mediante controles automáticos determinar que estrategia me resulta útil para implementar definiendo así puntos exactos de deslastre de carga, cantidad de generadores a sincronizarse, puntos de carga donde aplicar la medida.

Se justifica la implementación de estos controles automáticos en fallas que son impredecibles, y cuando el operador reaccione talvez sea demasiado tarde, entonces en una subestación o generación se podría programar estos eventos que si se

sucedan la pérdida de estabilidad o colapso de voltaje sea mínimo y determinar una estrategia óptima de redespacho o deslastre.

3.4.2 Expansión del sistema

Para adicionar componentes de transmisión y generación se debe tomar en cuenta si es la solución más técnica y rentable para implementar, debido a que la estabilidad de voltaje pone en riesgo un sistema nacional interconectado del Ecuador pero al analizar en soluciones lo más eficientes posibles se presentan problemas ambientales de geografía que son la tala o ampliación de derecho de vías en zonas protegidas ó la falta de recursos económicos de parte del estado para mitigar estos problemas de estabilidad de voltaje. Los estudios de expansión para transmisión y generación a largo plazo se identifican estos inconvenientes mencionados.

3.4.3 Compensación reactiva controlada

Los dispositivos FACTS (Flexible AC Transmisión Systems) adiciona fuentes de reactivos controladas para problemas de estabilidad de voltaje, de los que se puede mencionar a los SVC (Static Var Compensation) y los STATCOM (Static Compensation).

- Los SVC son condensadores y reactores para conexión en paralelo los mismos que son controlados electrónicamente.
- Los STATCOM son dispositivos de conexión en paralelo, su función principal es inyectar corriente de reactivos constante. Debido a que los capacitores de inyección fija no producen los suficientes reactivos para la demanda de voltaje del sistema.

3.4.4 Deslastre de carga por voltaje

Cuando exista una carga que pueda ser identificada por monitoreo, se podría desconectar esta parte del sistema eléctrico de potencia ó desconectar todo el alimentador que es de preferencia lo más viable técnica y económicamente, a este procedimiento se lo conoce como deslastre de carga ó Load Shedding. Al realizar este procedimiento el perfil de voltaje mejorará notablemente y con los relés o reconectores automáticos realizar por medio de operación la reinserción del resto del sistema eléctrico para su operación total.

3.4.5 Bloqueo de los cambiadores de tap's

El cambio de tap's automático actúan bajo carga para poder recuperar el voltaje incrementando la demanda de reactivos al sistema y empeorando la inestabilidad de voltaje en el sistema eléctrico de potencia, viéndose como mejor opción, bloquear esta acción de intercambio de tap's centrales en el transformador. El voltaje monitoreado envía la señal a un actuador para que puedan variar los tap's centrales pero este actuador deberá ser bloqueado para que en caso de colapso de voltaje no actúe.

3.4.6 Sistema de medida de área amplia

Los PMUS (Phase Measurement Units) utilizan en tiempo real mediciones desde distintos puntos del sistema eléctrico de potencia, implementador algoritmos para detección de problemas de inestabilidad de voltaje y proximidad al colapso directamente en forma on-line. El sistema completo de unidades ó las mediciones fasoriales se denominan sistemas de monitoreo de área amplia. Estos PMUS envían información necesaria y útil mejorándose considerablemente la seguridad y confiabilidad.

3.4.7 Sistemas de monitoreo, protección y control de área amplia

Otra opción que se puede utilizar para mitigación de estabilidad de voltaje son los sistemas WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control), que utilizan la parte de control y automatización de la subestación con la parte mas sensible del sistema eléctrico de potencia, las protecciones eléctricas. Estos dispositivos hacen que se integren el control y la protección de fuentes de reactivos, el deslastre de carga por voltaje, el bloqueo de cambiadores de tap's bajo carga y la información que proporciona los sistemas SCADA con las PMUS. Las acciones que se pueden tomar con estos equipos son: desconexión de reactores, manejo óptimo de las fuentes de reactivos, arranque de las unidades de generación. Las zonas de control de estos dispositivos deben ser definidas, para que puedan actuar en el menor tiempo posible.

3.4.8 Partición del sistema

Realizar una ramificación del sistema eléctrico de potencia se tomaría como opción para poder aliviar la carga en una subestación, teniendo en cuenta que:

- Realizar separaciones al sistema eléctrico en varios subsistemas con ramificaciones pero que se interconectan mediante enlaces DC de tal forma que la inestabilidad de voltaje sea minimizada.
- La división del sistema eléctrico en subsistemas deberá ser operados de manera independiente pues formaran parte de otra ramificación del sistema eléctrico diferente al fueron separados.

3.5 Validación técnica – económica

La mitigación de estabilidad de voltaje que se utilizará es la de implementación de compensación reactiva controlada para escenarios de operación a demanda mínima y media, de manera que implementando los bancos SVC en la subestación Salcedo debe tener una potencia mínima de 8MVAR necesarios. El análisis técnico económico está tomado de manera alternativa, dado que su implementación se dejará a criterio del departamento de planificación de la Empresa Eléctrica de Cotopaxi Latacunga. En donde se necesitará adquirir, colocar y energizar el SVC en la subestación Salcedo:

Tabla 14. Presupuesto referencial para instalación SVC 8Mvar.

UBICACIÓN	Subestación Salcedo
Equipos	Static Var Compensation (SVC)
Potencia reactiva	8 Mvar
Horas	76
Costo equipos	\$ 100.000,00
Costo personal	\$ 20.000,00
Total montaje y operación:	\$15.000,00
Total:	\$ 135.000,00

Fuente: Autor

El costo para la operación y montaje del compensador estativo de reactivos en la subestación es de \$135.000,00 costo rentable tomando en cuenta que la inversión es necesaria, ayudando de manera eficiente a solucionar problemas de inestabilidad o colapso de voltaje.

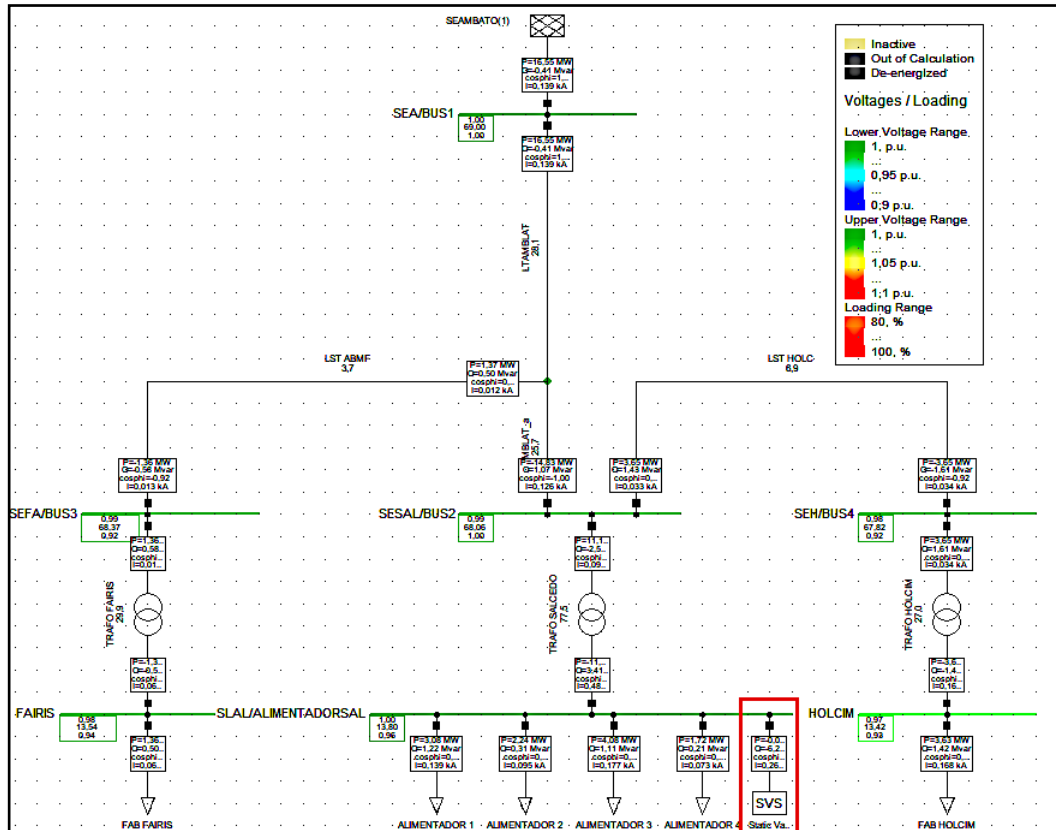


Figura 38. Implementación del SVC.

Fuente: autor

En la figura 37, se puede visualizar que, mediante la implementación del compensador estativo de reactivos, la cargabilidad y el voltaje en todo el sistema eléctrico de potencia mejora notablemente llegando a tener un $fp = 1$ y un voltaje de 1p.u. en todos sus ramales

Tabla 15. Condiciones del sistema eléctrico Ambato - Latacunga

CASO	Sistema Salcedo	Δ	% ΔV	CUMPLE	
				SI	NO
Demanda máxima	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	1,00		X	
Demanda mínima	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	1,00		X	
Demanda media	Voltaje (kV)	69,00	0,00	X	
	Factor de Potencia	1,00		X	

3.6 Conclusiones del capítulo III

- En este capítulo se definió una metodología para realizar análisis de cargabilidad en una línea de subtransmisión para que mediante procesos se puede llegar a determinar que potencia máxima puede transferirse desde la subestación Ambato hacia todo el sistema eléctrico de potencia en la ciudad de Latacunga.
- En las simulaciones se puede identificar que el peor escenario del sistema eléctrico de potencia se presenta ante un colapso de voltaje y condiciones de demanda media y mínima, donde los factores de potencia en varias barras no se pueden sostener en condiciones de operatividad normal.
- Se planteo diversas estructuras de mitigamiento de estabilidad de voltaje y se realizó la compensación de reactivos mediante la implementación de un SVC que como se puede observar en la tabla 15 mejora notablemente los registros de factor de potencia y por lo tanto mejora el perfil de voltaje en todo el sistema eléctrico de potencia.
- Se consideró además que una forma útil y más provechosa seria capacitar constantemente a los operadores de las centrales de generación para que los colapsos de voltaje sean manejados de manera más rápida y en caso de cualquier eventualidad implementar los sistemas automáticos de monitoreo con la independencia necesaria.

3.7 Conclusiones generales

- Se realizó la documentación técnica - teórica para el análisis de cargabilidad en líneas de subtransmisión en donde se analizó que el nivel de voltaje como característica principal de operación está un 5% debajo de su valor nominal para lo que se propone soluciones de mejoramiento que permitió llegar a un perfil de voltaje de 1 pu.
- Se realizó el análisis de datos de las variables eléctricas de las líneas de subtransmisión donde se determinó que el estado actual de la cargabilidad de la línea de subtransmisión referido a factor de potencia sufrió un descenso del 10% en todo el sistema eléctrico de potencia Ambato –

Latacunga por lo que se propuso que para elevar su valor a 1 se deben implementar compensadores SVC de 8MVAR.

- Se utilizó técnicas analíticas y computaciones para realizar el análisis de cargabilidad de líneas de subtransmisión y variación de voltaje donde con ayuda del software Digsilent power factory se modeló el sistema eléctrico de potencia, realizando una planificación de mejoramiento en base a los problemas encontrados para que su operación este bajo los parámetros establecidos en la normativa ARCONEL 053 / 18.

3.8 Recomendaciones

- Implementar estudios de localización optima PMUS debido a que estos análisis que puedan realizarse, contribuirán a mejorar los sistemas eléctricos de potencia.
- Realizar un estudio acerca de los intercambiadores de tap's centrales de transformación frente a la variación de voltaje por contingencia o inestabilidad de voltaje, para saber en qué estado de operación y cargabilidad se encuentra los transformadores de la empresa eléctrica de Cotopaxi Latacunga.

3.9 Referencias bibliográficas

4 Bibliografía

- [1] A. M. NICK HERRERA, ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA USANDO CURVAS Q-V, NAGUANAGUA: UNIVERSIDAD DE CARABOBO, 2015.
- [2] T. Y. H. SALAMA, VOLTAJE STABILITY OF TRANSMISSION, USA: UNIVERSITY OF BRIDGEPORT, 2018.
- [3] C. P. R. E. REYES M.C., ANÁLISIS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA Y DE PEQUEÑA SEÑAL EN UN SISTEMA MULTIMAQUINA: CASO DE ESTUDIO., CALDAS: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2018.
- [4] C. B. RUBEN TIRIRA, Long-Term Voltage Stability Using Load Models In Electric Power Systems, QUITO: PUCESA, 2018.
- [5] J. C. H. A. M. ULLAURI, MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL DE UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO ECUATORIANO, QUITO: CENACE, 2018.
- [6] J. S. R. ARRIETA, ANALLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE CON INCERTIDUMBRE EN LA DEMANDA UTILIZANDO LA TECNICA DE

FLUJO DE CARGA CONTINUADO, CARTAGENA: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, 2018.

- [7] E. MONTOYA, ESTUDIO ESTOCÁSTICO DE CARGABILIDAD EN LINEAS DE TRANSMISIÓN, MÉXICO D.F.: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 2018.
- [8] A. Y. J. C. J. RODRIGUEZ, EVALUACION DE LA OPERACIÓN DE LINEAS DE TRANSMISION DE ALTA TENSIÓN, GUAYAQUIL: ESCUELA POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2020.
- [9] M. GUÁNCHEZ, FLUJOS DE POTENCIA CONTINUADO PARA ANALISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN REGIMEN PERMANENTE, MÉRIDA: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, 2018.
- [10] G. A. PALACIOS, GUIA PARA MODELADO DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA, BOGOTÁ: UNIVERSIDAD DE LA SALLE, 2017.
- [11] M. V. Laguado, ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES DEL NIVEL DE TENSIÓN POR INCREMENTO DE CARGA EN LA LINEA DE SUBTRANSMISIÓN DE 66kV COBRIZA-HUANTA-AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DEL SERVICIO ELÉCTRICO., HUANCAYO: UNIVERSIDAD CONTINENTAL, 2017.
- [12] L. C. D. ARIZA, EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE AUMENTO DE CARGABILIDAD EN LINEA ELÉCTRICAS MEDIANTE EL USO DE

DTR (CAPACIDAD TERMINCA DINAMICA) CASO DE ESTUDIO
PARA UN SISTEMA DE TRANSIÓN REGIONAL, COLOMBIA:
UNIVERSIDAD DE LA SALLE, 2017.

[13] S. R. PERDOMO, METODLOGIA PARA EL MONITOREO DE
ESTABILIDAD DE TENSÓN EN TIEMPO REAL EN SISTEMAS DE
POTENCIA USANDO MEDICIONES PMU, SANTIAGO DE CALI:
UNIVERSIDAD DEL VALLE, 2018.

[14] D. G. C. C. NARVAEZ PEREZ, SISTEMA DE CÁLCULO DE
CARGABILIDAD DE LINEAS DE TRANSMISION EN SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA, GUADALAJARA: UNIVERSIDAD DEL
VALLE DE ATEMAJAC, 2018.

[15] D. S. SALAZAR, ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE
CAPACIDAD PARA LINEAS DE TRANSMISIÓN BASADOS EN EL
METODO CPF, QUITO: UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA,
2018.

[16] J. García, «Rincon Eléctrico,» 2013. [En línea]. Available:
http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/SUBESTACIONES.html.
[Último acceso: 10 Abril 2022].

[17] D. SANCHEZ, «ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS
ELECTRICOS DE POTENCIA INCLUYENDO CURVAS DE
CAPACIDAD PARA LINEAS DE TRANSMISIÓN BASADO EN EL

METODO CPF,» UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA, QUITO, 2018.

- [18] C. Saavedra, Análisis y Diagnóstico del Sistema de Subtransmisión a 69 kV, para la Demanda Actual y para la Demanda Proyectada al Año 2020 en el Área de Concesión de la ELEPCO S.A., Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2011, pp. 70-75.
- [19] A. Recalde, «ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA: PROBLEMÁTICA EN ESCENARIOS COMPLEJOS.,» RESEARCHGATE, EEUU, 2022.
- [20] I. Diaz, ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA APLICANDO TEORÍA DE BIFURCACIONES, México: UNAM, 2017.
- [21] N. TORREALBA y M. R., ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA USANDO CURVAS Q-V, NAGUANAGUA: UNIVERSIDAD DE CARABOBO, 2017.
- [22] ARCONEL, «REGULACION No. 053 / 18,» ARCONEL, ARCONEL, 2020.
- [23] CNEL, «CNEL,» 10 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.cnelep.gob.ec/noticias/page/48/?mode=grid>.
- [24] P. VALERO, COMPORTAMIENTO EN SISTEMAS DE POTENCIA ANTE COLAPSO DE VOLTAJE, MEXICO: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON, 2001.

[25] J. J. ORTIZ A., ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE VOLTAJE EN ESTADO ESTABLE DEL SISTEMA DE SUBTRANSMISIÓN DE LA EMPRESA ELECTRICA QUITO., QUITO: EPN, 2018.

[26] J. García, «Rincon Eléctrico,» 2013. [En línea]. Available: http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/SUBESTACIONES.html.

[Último acceso: 10 Abril 2016].



ANEXOS

Anexo 2. Datos para la curva P-V

P (MW)	SLAL\ALIMENTADOR SAL	SEA\BUS1	Terminal	SEFA\BUS3	SEH\BUS4	SESAL\BUS2	FAÍRIS	HOLCIM
1,6102	0,9952	1,0000	0,9989	0,9988	0,9976	0,9979	0,9972	0,9960
1,6118	0,9952	1,0000	0,9989	0,9988	0,9976	0,9979	0,9972	0,9960
1,6134	0,9952	1,0000	0,9988	0,9988	0,9976	0,9979	0,9972	0,9960
1,6150	0,9952	1,0000	0,9988	0,9988	0,9975	0,9979	0,9972	0,9960
1,6183	0,9952	1,0000	0,9988	0,9988	0,9975	0,9979	0,9972	0,9960
1,6215	0,9951	1,0000	0,9988	0,9988	0,9975	0,9979	0,9972	0,9960
1,6279	0,9951	1,0000	0,9988	0,9988	0,9975	0,9979	0,9972	0,9960
1,6344	0,9951	1,0000	0,9988	0,9988	0,9975	0,9979	0,9972	0,9959
1,6472	0,9951	1,0000	0,9988	0,9987	0,9975	0,9978	0,9972	0,9959
1,6601	0,9950	1,0000	0,9988	0,9987	0,9975	0,9978	0,9972	0,9959
1,6859	0,9950	1,0000	0,9988	0,9987	0,9974	0,9978	0,9971	0,9958
1,7116	0,9949	1,0000	0,9988	0,9987	0,9974	0,9977	0,9971	0,9958
1,7632	0,9947	1,0000	0,9987	0,9986	0,9973	0,9976	0,9970	0,9956
1,8147	0,9946	1,0000	0,9987	0,9986	0,9972	0,9976	0,9969	0,9955
1,9177	0,9943	1,0000	0,9986	0,9985	0,9970	0,9974	0,9968	0,9953
2,0208	0,9940	1,0000	0,9985	0,9984	0,9968	0,9972	0,9966	0,9950
2,2269	0,9934	1,0000	0,9983	0,9982	0,9964	0,9969	0,9963	0,9945
2,4330	0,9928	1,0000	0,9981	0,9980	0,9961	0,9966	0,9960	0,9940
2,8452	0,9915	1,0000	0,9977	0,9976	0,9953	0,9959	0,9953	0,9930
3,2574	0,9903	1,0000	0,9973	0,9971	0,9946	0,9952	0,9947	0,9920
4,0819	0,9878	1,0000	0,9965	0,9963	0,9930	0,9939	0,9934	0,9899

4,9063	0,9852	1,0000	0,9956	0,9954	0,9915	0,9925	0,9920	0,9879
6,5551	0,9800	1,0000	0,9940	0,9937	0,9883	0,9897	0,9894	0,9837
8,2040	0,9747	1,0000	0,9923	0,9919	0,9851	0,9868	0,9866	0,9794
11,5017	0,9635	1,0000	0,9887	0,9882	0,9784	0,9808	0,9810	0,9705
14,7993	0,9516	1,0000	0,9849	0,9843	0,9713	0,9744	0,9751	0,9612
18,0970	0,9389	1,0000	0,9809	0,9801	0,9637	0,9677	0,9689	0,9514
21,3947	0,9253	1,0000	0,9766	0,9757	0,9558	0,9605	0,9625	0,9410
23,0436	0,9181	1,0000	0,9744	0,9734	0,9516	0,9568	0,9591	0,9356
24,6924	0,9107	1,0000	0,9720	0,9710	0,9473	0,9529	0,9557	0,9301
26,3413	0,9029	1,0000	0,9697	0,9685	0,9429	0,9489	0,9521	0,9244
27,9901	0,8949	1,0000	0,9672	0,9660	0,9383	0,9447	0,9485	0,9185
29,6390	0,8865	1,0000	0,9646	0,9633	0,9336	0,9404	0,9447	0,9124
31,2878	0,8777	1,0000	0,9619	0,9606	0,9286	0,9359	0,9409	0,9061
32,9366	0,8685	1,0000	0,9592	0,9577	0,9235	0,9313	0,9369	0,8995
34,5855	0,8588	1,0000	0,9563	0,9547	0,9181	0,9264	0,9327	0,8927
36,2343	0,8487	1,0000	0,9532	0,9516	0,9125	0,9213	0,9285	0,8857
37,8832	0,8379	1,0000	0,9501	0,9484	0,9067	0,9160	0,9240	0,8783
39,5320	0,8265	1,0000	0,9467	0,9449	0,9005	0,9103	0,9194	0,8705
41,1809	0,8143	1,0000	0,9432	0,9413	0,8940	0,9044	0,9145	0,8624
42,0053	0,8078	1,0000	0,9413	0,9394	0,8906	0,9012	0,9120	0,8582
42,8297	0,8012	1,0000	0,9394	0,9375	0,8871	0,8980	0,9094	0,8538
43,6541	0,7942	1,0000	0,9375	0,9355	0,8835	0,8947	0,9067	0,8493
44,4786	0,7869	1,0000	0,9354	0,9334	0,8797	0,8912	0,9040	0,8446
45,3030	0,7793	1,0000	0,9333	0,9312	0,8758	0,8876	0,9011	0,8398
46,1274	0,7713	1,0000	0,9311	0,9289	0,8718	0,8839	0,8982	0,8348
46,9518	0,7629	1,0000	0,9288	0,9266	0,8675	0,8799	0,8952	0,8296
47,7762	0,7540	1,0000	0,9264	0,9241	0,8631	0,8758	0,8920	0,8241

48,6007	0,7445	1,0000	0,9238	0,9215	0,8584	0,8715	0,8887	0,8184
49,4251	0,7342	1,0000	0,9211	0,9187	0,8534	0,8668	0,8852	0,8123
49,8373	0,7288	1,0000	0,9196	0,9173	0,8507	0,8644	0,8834	0,8091
50,2495	0,7231	1,0000	0,9182	0,9158	0,8480	0,8618	0,8815	0,8058
50,6617	0,7172	1,0000	0,9166	0,9142	0,8452	0,8592	0,8795	0,8024
51,0739	0,7110	1,0000	0,9150	0,9126	0,8422	0,8565	0,8775	0,7989
51,4861	0,7044	1,0000	0,9133	0,9109	0,8392	0,8536	0,8754	0,7951
51,8984	0,6973	1,0000	0,9116	0,9091	0,8359	0,8505	0,8732	0,7912
52,3106	0,6898	1,0000	0,9097	0,9071	0,8324	0,8473	0,8709	0,7871
52,7228	0,6817	1,0000	0,9077	0,9051	0,8287	0,8438	0,8684	0,7827
52,9289	0,6773	1,0000	0,9066	0,9040	0,8268	0,8420	0,8672	0,7804
53,1350	0,6727	1,0000	0,9055	0,9029	0,8247	0,8400	0,8658	0,7780
53,3411	0,6679	1,0000	0,9043	0,9017	0,8226	0,8380	0,8644	0,7755
53,5472	0,6628	1,0000	0,9031	0,9005	0,8203	0,8359	0,8629	0,7729
53,7533	0,6573	1,0000	0,9018	0,8991	0,8180	0,8336	0,8614	0,7701
53,9594	0,6514	1,0000	0,9004	0,8977	0,8154	0,8312	0,8597	0,7671
54,1655	0,6449	1,0000	0,8989	0,8962	0,8126	0,8286	0,8580	0,7638
54,2686	0,6414	1,0000	0,8980	0,8954	0,8111	0,8272	0,8570	0,7621
54,3716	0,6376	1,0000	0,8972	0,8945	0,8095	0,8257	0,8560	0,7603
54,4747	0,6336	1,0000	0,8963	0,8936	0,8079	0,8241	0,8550	0,7584
54,5777	0,6293	1,0000	0,8953	0,8926	0,8061	0,8224	0,8538	0,7563
54,6808	0,6245	1,0000	0,8942	0,8915	0,8041	0,8205	0,8526	0,7541
54,7838	0,6192	1,0000	0,8930	0,8903	0,8020	0,8184	0,8513	0,7516
54,8354	0,6163	1,0000	0,8924	0,8896	0,8008	0,8173	0,8505	0,7503
54,8869	0,6131	1,0000	0,8917	0,8889	0,7995	0,8161	0,8498	0,7488
54,9384	0,6095	1,0000	0,8909	0,8882	0,7981	0,8147	0,8489	0,7472
54,9899	0,6055	1,0000	0,8900	0,8873	0,7965	0,8132	0,8479	0,7454

55,0157	0,6033	1,0000	0,8895	0,8868	0,7956	0,8123	0,8474	0,7444
55,0415	0,6009	1,0000	0,8890	0,8863	0,7947	0,8114	0,8468	0,7434
55,0672	0,5980	1,0000	0,8884	0,8857	0,7935	0,8104	0,8462	0,7421
55,0930	0,5948	1,0000	0,8877	0,8850	0,7923	0,8092	0,8454	0,7407
55,1059	0,5931	1,0000	0,8874	0,8846	0,7916	0,8085	0,8450	0,7400
55,1188	0,5910	1,0000	0,8869	0,8842	0,7908	0,8077	0,8445	0,7391
55,1252	0,5896	1,0000	0,8866	0,8839	0,7903	0,8072	0,8442	0,7385
55,1316	0,5883	1,0000	0,8864	0,8836	0,7898	0,8067	0,8439	0,7380
55,1381	0,5869	1,0000	0,8861	0,8833	0,7892	0,8062	0,8436	0,7374
55,1445	0,5849	1,0000	0,8857	0,8829	0,7885	0,8055	0,8432	0,7366
55,1510	0,5825	1,0000	0,8852	0,8824	0,7876	0,8046	0,8426	0,7356

Anexo 2. Datos para la curva Q-V

V	Q
1,2000	36,0000
1,1800	32,5786
1,1600	29,2567
1,1400	26,0343
1,1200	22,9113
1,1000	19,8877
1,0800	16,9634
1,0600	14,1383
1,0400	11,4124
1,0200	8,7857
1,0000	6,2579
0,9800	3,8292
0,9600	1,4994
0,9400	-0,7315
0,9200	-2,8635
0,9000	-4,8967
0,8800	-6,8312
0,8600	-8,6669
0,8400	-10,4039
0,8200	-12,0423
0,8000	-13,5820
0,7800	-15,0232
0,7600	-16,3657
0,7400	-17,6096
0,7200	-18,7549
0,7000	-19,8017
0,6800	-20,7499
0,6600	-21,5986
0,6400	-22,3491
0,6200	-23,0008

Anexo 2. Datos para la curva estabilidad de voltaje

Time in s	Phase Voltage A in kV	Phase Voltage B in kV	Phase Voltage C in kV
-0,100	54,749	-27,042	-27,707
-0,100	54,695	-25,228	-29,467
-0,100	54,564	-23,379	-31,185
-0,100	54,356	-21,497	-32,859
-0,100	54,070	-19,583	-34,487
-0,099	53,707	-17,642	-36,064
-0,099	53,268	-15,676	-37,591
-0,099	52,753	-13,688	-39,065
-0,099	52,164	-11,680	-40,483
-0,099	51,500	-9,656	-41,844
-0,099	50,763	-7,618	-43,145
-0,099	49,953	-5,569	-44,384
-0,099	49,073	-3,512	-45,561
-0,099	48,124	-1,451	-46,673
-0,099	47,106	0,613	-47,719
-0,098	46,020	2,676	-48,696
-0,098	44,869	4,735	-49,605
-0,098	43,655	6,788	-50,443
-0,098	42,379	8,831	-51,209
-0,098	41,042	10,861	-51,903
-0,098	39,647	12,876	-52,523
-0,098	38,196	14,872	-53,068
-0,098	36,690	16,848	-53,538
-0,098	35,132	18,799	-53,932
-0,098	33,525	20,724	-54,249
-0,097	31,870	22,619	-54,489
-0,097	30,169	24,482	-54,652
-0,097	28,426	26,311	-54,736
-0,097	26,642	28,101	-54,743
-0,097	24,820	29,852	-54,673
-0,097	22,963	31,561	-54,525
-0,097	21,074	33,225	-54,299
-0,097	19,154	34,841	-53,996
-0,097	17,207	36,408	-53,616
-0,097	15,236	37,924	-53,160
-0,096	13,244	39,385	-52,629
-0,096	11,232	40,790	-52,022
-0,096	9,204	42,138	-51,342
-0,096	7,163	43,426	-50,589
-0,096	5,112	44,651	-49,764
-0,096	3,054	45,814	-48,868
-0,096	0,992	46,911	-47,903
-0,096	-1,072	47,942	-46,870
-0,096	-3,134	48,904	-45,770
-0,096	-5,192	49,797	-44,605
-0,095	-7,243	50,620	-43,377
-0,095	-9,283	51,370	-42,087
-0,095	-11,310	52,047	-40,737
-0,095	-13,321	52,651	-39,330
-0,095	-15,313	53,179	-37,866
-0,095	-17,284	53,632	-36,348
-0,095	-19,229	54,009	-34,780
-0,095	-21,148	54,309	-33,161
-0,095	-23,036	54,532	-31,496
-0,095	-24,892	54,677	-29,785
-0,094	-26,712	54,745	-28,033
-0,094	-28,494	54,734	-26,240
-0,094	-30,236	54,647	-24,411
-0,094	-31,935	54,481	-22,546
-0,094	-33,588	54,238	-20,650
-0,094	-35,194	53,918	-18,724
-0,094	-36,750	53,521	-16,771
-0,094	-38,253	53,048	-14,795
-0,094	-39,702	52,500	-12,798
-0,094	-41,095	51,877	-10,783
-0,093	-42,429	51,181	-8,752
-0,093	-43,703	50,412	-6,708
-0,093	-44,915	49,571	-4,656
-0,093	-46,063	48,660	-2,596
-0,093	-47,146	47,679	-0,533
-0,093	-48,161	46,631	1,530
-0,093	-49,109	45,517	3,592
-0,093	-49,986	44,337	5,649
-0,093	-50,793	43,095	7,697
-0,093	-51,527	41,792	9,735
-0,092	-52,188	40,429	11,758
-0,092	-52,774	39,009	13,765
-0,092	-53,286	37,533	15,753
-0,092	-53,722	36,004	17,718
-0,092	-54,082	34,424	19,658
-0,092	-54,365	32,795	21,570
-0,092	-54,571	31,119	23,451
-0,092	-54,699	29,399	25,299
-0,092	-54,749	27,638	27,111
-0,092	-54,722	25,837	28,885
-0,091	-54,616	23,999	30,617
-0,091	-54,434	22,127	32,306
-0,091	-54,173	20,224	33,949
-0,091	-53,836	18,292	35,544
-0,091	-53,423	16,334	37,088
-0,091	-52,933	14,353	38,580
-0,091	-52,368	12,352	40,017
-0,091	-51,729	10,332	41,397
-0,091	-51,016	8,299	42,718
-0,091	-50,231	6,253	43,978
-0,090	-49,375	4,199	45,176
-0,090	-48,448	2,138	46,310
-0,090	-47,452	0,075	47,377
-0,090	-46,389	-1,989	48,378