



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**DOCTORADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**(MENCIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA)**

**EVALUACIÓN DE LA CARGABILIDAD Y  
DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE  
THÉVENIN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA EN BASE AL CÁLCULO DE LA  
POTENCIA DE CORTOCIRCUITO USANDO  
MEDICIONES LOCALES**

**TRABAJO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MSc. CHRISTIAN ANTONIO FONSECA AMAYA**

**DIRECTOR: DR. ING. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR  
YÉPEZ**

**CODIRECTOR: DR. ING. FABIÁN ERNESTO PÉREZ  
YAULI**

**Quito, marzo 2021**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**DOCTORADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**(MENCIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA)**

**EVALUACIÓN DE LA CARGABILIDAD Y  
DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE  
THÉVENIN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA EN BASE AL CÁLCULO DE LA  
POTENCIA DE CORTOCIRCUITO USANDO  
MEDICIONES LOCALES**

**MSc. CHRISTIAN ANTONIO FONSECA AMAYA**

**Director:** Dr. Ing. Gabriel Benjamín Salazar Yépez

**Codirector:** Dr. Ing. Fabián Ernesto Pérez Yauli

**Tribunal de Defensa:**

**Dr. Ing. Hugo Arcos**

*Escuela Politécnica Nacional / Departamento Energía Eléctrica / Ecuador*

**Dr. Ing. Carlos Gallardo**

*Escuela Politécnica Nacional / Departamento Energía Eléctrica / Ecuador*

**Dr. Ing. Jaime Cepeda**

*Escuela Politécnica Nacional / Departamento Energía Eléctrica / Ecuador*

**Dr. Ing. Rolando Pringles**

*Universidad Nacional de San Juan / Instituto de Energía Eléctrica / Argentina*

**Dr. Ing. Víctor Hinojosa**

*Universidad Técnica Federico Santa María / Departamento de Ingeniería Eléctrica / Chile*

Catalogación:

225 páginas; 21 x 15 cm

Línea de Investigación: Sistemas Eléctricos de Potencia: Estudios de SEP en Estado Estable y Dinámico.

Departamento de ENERGÍA ELÉCTRICA

Primera Edición. Fecha de Catalogación: Marzo/2021

---

# **EVALUACIÓN DE LA CARGABILIDAD Y DETERMINACIÓN DEL EQUIVALENTE THÉVENIN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN BASE AL CÁLCULO DE LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO USANDO MEDICIONES LOCALES**

**MSc. CHRISTIAN ANTONIO FONSECA AMAYA**

Tesis de Doctorado

Programa de Doctorado en Ingeniería Eléctrica

Mención: Ingeniería Eléctrica

**ISBN: 978-9942-40-013-0**

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2021**

La reproducción total o parcial de este libro en forma idéntica o modificada, impresa o digital, no autorizada por los editores, viola derechos reservados.

Cualquier utilización debe ser previamente solicitada.

© 2021 by Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

## **AVAL**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Christian Antonio Fonseca Amaya, bajo nuestra supervisión.

---

**Dr. Ing. Gabriel Benjamín Salazar Yépez**  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

---

**Dr. Ing. Fabián Ernesto Pérez Yauli**  
**CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Yo, Christian Antonio Fonseca Amaya, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

---

**Christian Antonio Fonseca Amaya**

## DEDICATORIA

*A mi familia....*

## **AGRADECIMIENTO**

*Un agradecimiento eterno a Dios....*

*Un agradecimiento total a mi esposa y a mis hijos....*

*Un agradecimiento especial a los Doctores*

*Gabriel Salazar, Fabián Pérez y Franklin Quilumba,*

*así como a la CELEC EP – Unidad de Negocio*

*Transelectric por su apoyo a esta investigación.*

# ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
INDICE DE FIGURAS.....	IX
INDICE DE TABLAS.....	XIII
INDICE DE ACRÓNIMOS.....	XIV
Abreviaciones.....	XIV
Símbolos.....	XV
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XX
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Hipótesis de Investigación.....	2
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	3
1.4 Motivación y Justificación .....	4
1.5 Principales contribuciones.....	8
1.6 Listado de Publicaciones.....	9
1.7 Esquema del documento.....	11
2. CARGABILIDAD Y EQUIVALENTE THÉVENIN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	13
2.1 Estabilidad de Voltaje y Cargabilidad de SEP .....	13
2.1.1 Estabilidad de Voltaje.....	15



2.1.2	Límite por Estabilidad de Voltaje .....	17
2.1.3	Estabilidad y Cargabilidad en SEP.....	27
2.2	Máxima Cargabilidad y Equivalente Thévenin de un SEP	31
2.2.1	Cargabilidad en el espacio de la Potencia de Cortocircuito $S_{SC}$ .....	32
2.2.2	Máxima Cargabilidad considerando relación de Impedancias .....	37
2.3	Métodos de monitoreo de cargabilidad de SEP .....	39
2.3.1	Estrategias de Medición Locales .....	39
2.3.2	Estrategias de Monitoreo de Área Extendida .....	42
2.4	Técnicas utilizadas para la determinación del ET.....	43
2.4.1	Modelación con variación del factor de potencia de la carga	45
2.4.1.1	Carga con Factor de Potencia Constante .....	46
2.4.1.2	Carga con Factor de Potencia Variable.....	49
2.4.2	Modelación de generadores como fuentes reales...	54
2.4.2.1	Límites de los Generadores.....	55
2.4.2.1.1	<i>Limitador de corriente de estator</i> .....	56
2.4.2.1.2	<i>Limitador de corriente de campo</i> .....	57
2.4.2.1.3	<i>Límites de un generador en estado estacionario</i> ...	59
2.4.2.2	Simulación considerando límites de los Generadores	61
2.4.2.3	Efecto de los límites de generadores en la cargabilidad del SEP.....	63
2.4.3	Limitaciones de las técnicas utilizadas para la determinación del Equivalente Thévenin.....	67
3.	DETERMINACIÓN DE LA CARGABILIDAD Y EQUIVALENTE THÉVENIN EN BASE A LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO.....	71

3.1	Indicador de Estabilidad del Sistema en base a la Relación Potencia-Voltaje ( $VPSI_S$ ) .....	71
3.1.1	Valoración de la Cargabilidad de un SEP en base a $S_{SC}$ 72	
3.1.2	Relación entre $S_S$ y $V_S$ .....	75
3.1.3	Definición y Maximización de $VPSI_S$ .....	77
3.1.4	Indicador local $VPSI$ y relación con $VPSI_S$ .....	83
3.1.5	Análisis variacional de $VPSI_S$ y $VPSI$ .....	84
3.1.5.1	Análisis y comportamiento de $VPSI_S$ y $VPSI$ ante variaciones en la carga .....	85
3.1.5.2	Análisis y comportamiento de $VPSI$ y $VPSI_S$ ante variaciones en el SEP .....	86
3.2	Determinación de la potencia de cortocircuito $S_{SC}$ y Equivalente Thévenin en base a $VPSI_S$ .....	88
3.2.1	Determinación de $S_{SC}$ y el nivel de cargabilidad de un SEP 88	
3.2.2	Determinación del Equivalente Thévenin en base a $S_{SC}$ 94	
3.2.3	Algoritmo para determinar el nivel de cargabilidad y Equivalente Thévenin en base a $S_{SC}$ .....	95
3.3	Desempeño del algoritmo planteado .....	98
3.3.1	Análisis con variación de factor de potencia de la carga 99	
3.3.2	Análisis con modelación de generadores como fuentes reales.....	106
3.3.3	Análisis ante cambios topológicos y contingencias en el SEP 110	
3.4	Evaluación de Cargabilidad y Equivalentes Thévenin en diversos puntos de un Sistema de Potencia.....	123
3.4.1	Escenarios planteados.....	125
3.4.2	Aplicación de la metodología propuesta y análisis de resultados 129	

4.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE REGISTROS REALES .....	137
4.1	Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano (SNT) y zona de estudio planteada.....	138
4.2	Aplicación de la metodología propuesta a los resultados de simulación de la zona de estudio .....	141
4.2.1	Condición 1: Incremento únicamente de la carga considerada bajo estudio – Gualaceo 22 kV.....	143
4.2.2	Condición 2: Incremento de todas las cargas del SNT de manera simultánea.....	147
4.3	Aplicación de la metodología propuesta a registros reales de la zona de estudio planteada .....	151
4.3.1	Esquema de Procesamiento de Registros Reales...	151
4.3.2	Procesamiento de Registros Reales .....	153
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	165
5.1	Conclusiones.....	165
5.2	Trabajo Futuro .....	168
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	169
7.	APÉNDICES .....	177
	APÉNDICE 1: Análisis variacional y derivadas de VPSIs.....	178
	APÉNDICE 2: Cálculo numérico para Determinación del Equivalente Thevenin (DET).....	181
8.	ANEXOS .....	191
	ANEXO 1: Datos del Sistema de Prueba.....	192
	ANEXO 2: Datos del Sistema IEEE14 Barras .....	196
	ANEXO 3: Datos del Sistema Nacional de Transmisión.....	200
	ORDEN DE EMPASTADO.....	225

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Esquema previsto para la estimación de $S_{sc}$ , cargabilidad y el ET .....	4
<b>Figura 2.1</b> Clasificación de Estabilidad de SEP [22]. .....	14
<b>Figura 2.2</b> Circuito eléctrico reducido .....	17
<b>Figura 2.3</b> Límites de Cargabilidad para diferentes valores de $k$ .....	23
<b>Figura 2.4</b> Dominio de solución $V_S - P_S - Q_S$ y Curvas $P_S - V_S$ para SEP con $k=0$ .....	25
<b>Figura 2.5</b> Dominio de solución $V_S - P_S - Q_S$ y Curvas $P_S - V_S$ para SEP con $k=0.3$ .....	26
<b>Figura 2.6</b> Dominio de solución $V_S - P_S - Q_S$ .....	28
<b>Figura 2.7</b> Curva $P_S - V_S$ .....	29
<b>Figura 2.8</b> Reducción del SEP en un Equivalente Thévenin .....	32
<b>Figura 2.9</b> Dominios de solución de la Ecuación 2.13 .....	33
<b>Figura 2.10</b> Rangos del factor de acoplamiento sistema - carga $m$ para $\varphi$ entre $80^\circ \pm 7^\circ$ y $\theta$ entre $10^\circ \pm 20^\circ$ .....	35
<b>Figura 2.11</b> Límite de Cargabilidad de un SEP en el espacio de $S_S$ .....	36
<b>Figura 2.12</b> Clasificación de los métodos de monitoreo de estabilidad de voltaje [1] .....	40
<b>Figura 2.13</b> Modelo de SEP considerando los generadores como fuentes ideales .....	45
<b>Figura 2.14</b> Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante .....	48
<b>Figura 2.15</b> Cargabilidad en el espacio de $S_S$ - Carga con factor de potencia constante .....	49

<b>Figura 2.16</b> Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable. ....	50
<b>Figura 2.17</b> Cargabilidad en el espacio de $S_S$ - Carga con factor de potencia variable .....	52
<b>Figura 2.18</b> Diagrama de bloques de un AVR [24] .....	56
<b>Figura 2.19</b> Capacidad normalizada ante sobrecargas, para estator y rotor [56] .....	57
<b>Figura 2.20</b> Curva de régimen de operación de un generador ...	60
<b>Figura 2.21</b> Modelo de SEP considerando G2 como fuente real	61
<b>Figura 2.22</b> Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable .....	62
<b>Figura 2.23</b> Sistema con modelación de generador real .....	64
<b>Figura 2.24</b> ET con G2 dentro de sus límites y bajo los supuestos considerados.....	65
<b>Figura 2.25</b> ET con G2 alcanzando sus límites y bajo los supuestos considerados.....	66
<b>Figura 3.1</b> $S_{Smax}$ y $S_{S0}$ para $x=0.3$ y $x=0.8$ , en función del factor m .....	74
<b>Figura 3.2</b> $S_{Smax}$ y $S_{S(V_{Smax})}$ en función del factor m .....	77
<b>Figura 3.3</b> Voltaje $V_S$ y Potencia $S_S$ para $\theta=14^\circ$ (0.97 atraso) ....	78
<b>Figura 3.4</b> Producto entre $V_S$ y $S_S$ - Variación del exponente de voltaje n.....	79
<b>Figura 3.5</b> Lugar geométrico $VPSI_S$ para un 80% de cargabilidad .....	82
<b>Figura 3.6</b> Sistema de la Figura 2.2 con valores reales.....	90

<b>Figura 3.7</b> Perfiles de Voltaje y Potencia .....	91
<b>Figura 3.8</b> Perfiles de indicadores en función de potencia.....	93
<b>Figura 3.9</b> Diagrama de flujo de la metodología en base a $S_{SC}$ .	97
<b>Figura 3.10</b> Potencia de cortocircuito $S_{SC}$ y voltaje Thévenin $E_{TH}$ - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante .....	100
<b>Figura 3.11</b> Impedancia Thévenin $Z_{TH}$ y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante .....	101
<b>Figura 3.12</b> Cargabilidad $x$ en base a $S_{SC}$ y Relación de Impedancias - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante.....	102
<b>Figura 3.13</b> Potencia de cortocircuito $S_{SC}$ y voltaje Thévenin $E_{TH}$ - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable. ....	103
<b>Figura 3.14</b> Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin $Z_{TH}$ y Potencia de Carga - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable .....	104
<b>Figura 3.15</b> Cargabilidad $x$ en base a $S_{SC}$ y Relación de Impedancias – generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable .....	105
<b>Figura 3.16</b> Potencia de cortocircuito $S_{SC}$ y voltaje Thévenin $E_{TH}$ - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable. ....	107
<b>Figura 3.17</b> Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin $Z_{TH}$ y Potencia de Carga - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable .....	108

<b>Figura 3.18</b> Cargabilidad $x$ en base a $S_{SC}$ y Relación de Impedancias - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable.....	109
<b>Figura 3.19</b> Potencia y Voltaje de Carga considerando contingencias.....	112
<b>Figura 3.20</b> Potencia $S_{SC}$ considerando los eventos simulados.....	114
<b>Figura 3.21</b> Impedancia Thévenin $Z_{TH}$ y Voltaje Thévenin $E_{TH}$ considerando los eventos simulados.....	115
<b>Figura 3.22</b> Cargabilidad $x$ y Relación de Impedancias considerando los eventos simulados.....	116
<b>Figura 3.23</b> Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin $Z_{TH}$ y Potencia de Carga considerando los eventos simulados.....	121
<b>Figura 3.24</b> Flujo de potencia inicial del sistema IEEE 14 barras .....	125
<b>Figura 3.25</b> Curvas PV de los Escenarios E.1.1 y E.1.2.....	127
<b>Figura 3.26</b> Curvas PV de los Escenarios E.2.1 y E.2.2.....	128
<b>Figura 3.27</b> Impedancia Thévenin, Impedancia y Potencia de Carga para los Escenarios E.1.1 y E.1.2.....	130
<b>Figura 3.28</b> ET para los Escenarios E.1.1 y E.1.2.....	130
<b>Figura 3.29</b> Potencia de Cortocircuito y Cargabilidad para los Escenarios E.1.1 y E.1.2.....	131
<b>Figura 3.30</b> Impedancia Thévenin, Impedancia y Potencia de Carga para los Escenarios E.2.1 y E.2.2.....	132
<b>Figura 3.31</b> ET para los Escenarios E.2.1 y E.2.2.....	132
<b>Figura 3.32</b> Potencia de Cortocircuito y Cargabilidad para los Escenarios E.2.1 y E.2.2.....	133

<b>Figura 3.33</b> Cargabilidad en las barras de carga para el Escenario E.1.1 .....	134
<b>Figura 3.34</b> Potencia de Cortocircuito en Barras de carga para el Escenario E.1.1 .....	135
<b>Figura 4.1</b> Diagrama unifilar del SNT .....	139
<b>Figura 4.2</b> Detalle de la Zona Suroriental .....	140
<b>Figura 4.3</b> Barra de Gualaceo 22 kV - Simulación en Condición 1 .....	145
<b>Figura 4.4</b> Cortocircuito trifásico en la Barra de Gualaceo 22 kV .....	146
<b>Figura 4.5</b> Barra de Gualaceo 22 kV - Simulación en Condición 2 .....	149
<b>Figura 4.6</b> Modelo de Procesamiento para Registros Reales ..	152
<b>Figura 4.7</b> Registros Reales: V, P y Q - Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019).....	153
<b>Figura 4.8</b> $S_{SC}$ y $x$ – Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019) .....	154
<b>Figura 4.9</b> $Z_{TH}$ y $E_{TH}$ – Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019) .....	155
<b>Figura 4.10</b> Barra de Méndez 13.8 kV -Simulación en Condición 2 .....	158
<b>Figura 4.11</b> Registros Reales: V, P y Q - Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019).....	159
<b>Figura 4.12</b> $S_{SC}$ y $x$ – Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019). .....	160
<b>Figura 4.13</b> $Z_{TH}$ y $E_{TH}$ – Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019) .....	161



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b> Resultados de Eventos Simulados en barra de carga .....	117
<b>Tabla 3.2</b> Resultados del algoritmo de la Sección 3.2 aplicado en los puntos simulados de la Tabla 3.1 .....	118
<b>Tabla 3.3</b> Máximos niveles de cargabilidad de los Escenarios E.1.1 y E.1.2 .....	127
<b>Tabla 3.4</b> Máximos niveles de cargabilidad de los Escenarios E.2.1 y E.2.2 .....	128
<b>Tabla 3.5</b> $S_{SC}$ y ET en el punto de máxima cargabilidad .....	133
<b>Tabla 4.1</b> Potencia y voltaje en los puntos de carga analizados .....	142
<b>Tabla 4.2</b> Resultados para la barra de Gualaceo 22 kV en el punto inicial del flujo de potencia .....	150
<b>Tabla 4.3</b> Resultados reales para la Barra de Gualaceo 22 kV	155
<b>Tabla 4.4</b> Resultados comparativos para la Barra de Gualaceo 22 kV (03:00 – 20:00) .....	156
<b>Tabla 4.5</b> Resultados para la Barra de Méndez 13.8 kV en el punto inicial del flujo de potencia en la Condición 2 .....	159
<b>Tabla 4.6</b> Resultados para la Barra de Méndez 13.8kV .....	160
<b>Tabla 4.7</b> Resultados comparativos para la Barra de Méndez 13.8 kV (03:00 – 20:00) .....	162
<b>Tabla 4.8</b> Rango del ET para las barras analizadas .....	163

## INDICE DE ACRÓNIMOS

### Abreviaciones

<i>ET</i>	Equivalente Thévenin
<i>SEP</i>	Sistema Eléctrico de Potencia
<i>EHV</i>	Extra High Voltage - Extra Alto Voltaje
<i>OXL</i>	Overexcitation Limiter – Limitador de sobreexcitación
<i>VPSI</i>	Voltage Power Stability Indicator / Indicador de Estabilidad de Voltaje en base a la relación P–V
<i>VPSIs</i>	System Voltage Power Stability Indicator / Indicador de Estabilidad de Voltaje en base a la relación P – V normalizado respecto al Sistema
<i>BCU</i>	Bay Control Unit – Unidad de Control de Bahía
<i>PMU</i>	Phasor Measurement Unit – Unidad de Medición Fasorial
<i>SNT</i>	Sistema Nacional de Transmisión Ecuatoriano

## **Símbolos**

$P$	Potencia Activa de Carga
$Q$	Potencia Reactiva de Carga
$V$	Voltaje en nodo de Carga
$\theta$	Ángulo de la Potencia de Carga
$I$	Corriente de Carga
$Z_L$	Impedancia de Carga
$\lambda$	Factor de Escalamiento de Carga
$E_{TH}$	Voltaje Equivalente Thévenin
$\delta$	Ángulo del Voltaje Equivalente Thévenin
$Z_{TH}$	Impedancia Equivalente Thévenin
$\varphi$	Ángulo de la Impedancia Equivalente Thévenin
$R_{TH}$	Resistencia Equivalente Thévenin
$X_{TH}$	Reactancia Equivalente Thévenin
$m$	Factor de Acoplamiento Sistema – Carga
$S_{SC}$	Potencia de Cortocircuito en una barra de carga
$V_s$	Voltaje de Carga Equivalente normalizado respecto al Sistema
$S_s$	Potencia de Carga Equivalente normalizada respecto al Sistema
$x$	Cargabilidad

$S_{S\text{máx}}$	Cargabilidad máxima de un SEP en el espacio de $S_s$
$A$	Discriminante de la ecuación de voltaje $V_s$
$n$	Exponente del voltaje $V_s$
$VPSI$	Indicador de Estabilidad de Voltaje en base a la relación $P - V$
$VPSI_s$	Indicador de Estabilidad normalizado respecto al Sistema

## RESUMEN

El límite de transferencia de potencia de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) está fuertemente relacionado con la capacidad del sistema de generación-transmisión. Con el crecimiento continuo de la demanda, las capacidades de este sistema deben incrementarse para mantener la confiabilidad del SEP. Sin embargo, por diversos factores se presentan retrasos en la ejecución de los planes de expansión de generación y transmisión, por lo que la operación de los SEPs se aproxima a sus límites de capacidad de carga, y consecuentemente las zonas seguras de operación se reducen.

Una metodología de análisis de cargabilidad de SEP muy extendida considera que un SEP puede ser representado, en un nodo de carga, por un Equivalente Thévenin (ET). El ET corresponde a un circuito equivalente básico lineal conformado por una fuente de voltaje en serie con una impedancia. Mediante esa aproximación la transferencia de potencia hacia la carga puede ser maximizada cuando la impedancia de carga es igual a la impedancia del ET. Sin embargo, la no linealidad de los SEP así como factores relacionados con el comportamiento de la carga y de los generadores, conlleva a limitaciones en la aplicación de las metodologías basada en el ET.

En este sentido, esta investigación desarrolla una metodología para determinar los parámetros del ET sobre la base de la Potencia de Cortocircuito ( $S_{sc}$ ) del ET. Esta condición permite mejorar la aplicación del criterio de maximización de potencia transferida en un SEP en base a

la impedancia del ET. El esquema general propuesto considera resolver la determinación del ET desde el espacio paramétrico de potencias, permitiendo inicialmente establecer la  $S_{SC}$  y la cargabilidad del SEP. Posteriormente se determinan los parámetros eléctricos del ET.

Adicionalmente, la presente investigación plantea un nuevo indicador de estabilidad de voltaje denominado *VPSI* (Voltage–Power Stability Indicator), el cual es calculado mediante el procesamiento de mediciones consecutivas, de las magnitudes de voltaje y potencia, en un mismo punto del SEP. Mediante el procesamiento del *VPSI* es posible obtener directamente la  $S_{SC}$ .

El desarrollo de un algoritmo para la determinación del ET y del nivel de cargabilidad, en base a la  $S_{SC}$  es también presentado en esta investigación. Los resultados encontrados sobre sistemas de prueba permiten verificar que esta propuesta presenta un mejor desempeño que las técnicas basadas en los métodos existentes.

Finalmente, los algoritmos desarrollados se aplican sobre registros de mediciones reales del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano, en diferentes niveles de voltaje, con resultados satisfactorios. De esta manera se puede observar la practicidad de la presente propuesta.

**PALABRAS CLAVE:** Estabilidad de Voltaje, Equivalente Thévenin, Límites de Cargabilidad, Máxima Transferencia de Potencia, Potencia de Cortocircuito, Sistemas Eléctricos de Potencia.

## ABSTRACT

The power transfer limit of an Electric Power System (EPS) is strongly associated with the capacity of the transmission and generation systems. As the power demand increases, transmission and generating capacity additions are essential to ensure continued reliability of the electric grid. However, diverse reasons in the power system planning to make timely decisions of generation and transmission facilities, have taken the EPS close to its loadability limits, and therefore, the secure operating zones have been reduced.

A very widespread methodology for loadability analysis is based on the reduction of the complete system into a basic Thevenin Equivalent (TE) at a load bus. This TE is a linear equivalent circuit consisting of a source with a series impedance. By this approach the power transfer to the load can be maximized when the load impedance matches the impedance of the TE. However, the non-linear nature of the EPSs, and the behavior of load and generation lead to limitations in the application of the TE-based methodology.

In this context, this research proposes the development of a methodology to determine the TE parameters based on Short Circuit Power ( $S_{SC}$ ) of the TE. This condition improves the application of the maximization criterion for power transferred in an EPS based on TE impedance. The proposed scheme considers the determination of the TE from the parametric power space by first obtaining information concerning to the  $S_{SC}$  and the loadability of the EPS. Then, the electrical parameters of the TE are determined.

In addition, the present work proposes a new voltage stability indicator, called VPSI (Voltage – Power Stability Indicator), which is calculated by processing consecutive measurements of the voltage and power, both measured at the same point of the EPS. By processing the VPSI it is possible to obtain the  $S_{Sc}$ .

The development of an algorithm to determine the ET and the loading, based on the  $S_{Sc}$ , is also presented in this research. The results obtained in test systems present a better performance than the techniques based on the existing methods.

Finally, to prove the suitability of the proposed schemes, the algorithms are applied using real-world measurement of the Ecuadorian National Transmission System, at different voltage levels with satisfactory results. This provides a substantial prove of the practicality of the proposed approaches.

**KEYWORDS:** Loadability, Thevenin Equivalent, Short Circuit Power, Voltage Stability, Maximun Power Transfer, Power Systems.



# 1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) experimentan a través de los años, una operación en continuo acercamiento a sus límites de operación segura, esto debido a que los niveles de cargabilidad de los elementos de un SEP se incrementan y los márgenes seguros de operación disminuyen, llegando inclusive, para cierto tipo de contingencias, a alcanzar puntos de inestabilidad.

El concepto del Equivalente Thévenin (ET), en un punto terminal de un SEP, corresponde a la representación del SEP original, generalmente muy complejo, en un circuito básico conformado por una fuente de voltaje en serie con una impedancia. Este circuito reducido permite el desarrollo de diversas aplicaciones prácticas, tanto de diagnóstico como de monitoreo operativo del SEP, entre las que se destacan: límites máximos de cargabilidad del SEP, análisis y monitoreo de estabilidad de voltaje de largo plazo, proyección de niveles de cortocircuito, entre otros.

Los mecanismos para determinación del ET requieren, para su aplicación práctica, compatibilizar su modelación teórica con los esquemas de medición disponibles.

Desde la perspectiva teórica las metodologías existentes, basadas en mediciones locales, consideran la condición invariante del SEP ante los cambios de la carga. Esta condición de invariancia se dificulta si se considera la no-linealidad en la distribución de la potencia entre los generadores del SEP así como la variación del factor de potencia de la carga. Estos aspectos afectan la determinación del ET.

En la presente propuesta de investigación se plantea la hipótesis de mejorar la determinación del ET mediante el planteamiento de un cambio de dominio en las variables de análisis.

Se debe mencionar que la precisión de la tecnología de medición sincrofasorial (PMU) puede ser compatibilizada en esta hipótesis, abriendo la posibilidad de implementar las aplicaciones prácticas basadas en el ET con la infraestructura existente y futura.

## **1.1 Hipótesis de Investigación**

El nivel de cargabilidad y el Equivalente Thévenin, en los nodos terminales de un Sistema Eléctrico de Potencia, pueden ser determinados considerando variables locales, en base al cálculo de la Potencia de Cortocircuito.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Establecer un método para la determinación del nivel de cargabilidad y del Equivalente Thévenin (ET) en puntos terminales de un sistema eléctrico de potencia (SEP), en base a la Potencia de Cortocircuito ( $S_{sc}$ ) considerando mediciones locales, con el fin de mejorar la aplicación del criterio de maximización de potencia transferida en un SEP en base a la impedancia del ET.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar un algoritmo para la determinación de la  $S_{sc}$  de un SEP, en puntos terminales, utilizando mediciones locales.

- Desarrollar un algoritmo para la determinación del Equivalente Thévenin y del nivel de cargabilidad, en base a la  $S_{SC}$ .
- Probar el algoritmo desarrollado mediante registros de mediciones locales. Para lo cual se utilizarán, donde se dispongan, registros reales del Sistema Nacional de Transmisión en diferentes niveles de voltaje.
- Verificar que la determinación del Equivalente Thévenin y la cargabilidad del SEP, determinadas en base a  $S_{SC}$ , presenta un mejor desempeño que las técnicas basadas en los métodos existentes.

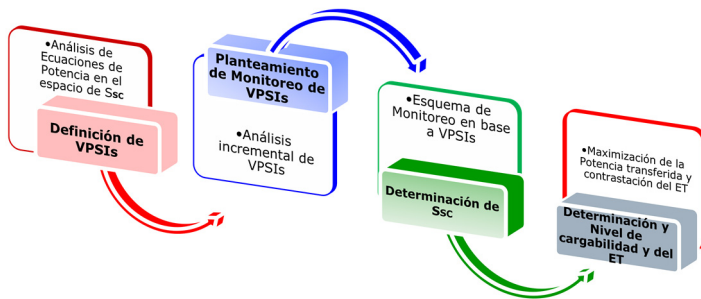
### 1.3 Alcance

La propuesta de investigación plantea determinar el ET y el nivel de cargabilidad, en nodos terminales de un SEP, a través de las ecuaciones de potencia considerando la Potencia de Cortocircuito ( $S_{SC}$ ) como espacio paramétrico.

Para determinar la  $S_{SC}$  se planteará un nuevo indicador de estabilidad de voltaje de largo plazo (System Voltage-Power Stability Indicator -  $VPS/S$ ), el cual será determinado por el procesamiento de mediciones locales consecutivas, tanto de magnitud de voltaje como de potencia de carga; estas mediciones serán tomadas en nodos terminales del SEP.

Mediante el monitoreo del indicador propuesto, será posible determinar la  $S_{SC}$ , consecuentemente se estimará el nivel de cargabilidad en base a la  $S_{SC}$ . Finalmente, el ET del SEP en el nodo terminal bajo estudio será determinado.

En la Figura 1.1 se esboza el esquema previsto en la presente investigación para la estimación de la  $S_{sc}$ , de la cargabilidad y el ET.



**Figura 1.1** Esquema previsto para la estimación de  $S_{sc}$ , cargabilidad y el ET

## 1.4 Motivación y Justificación

Esta sección inicia explicando la necesidad de monitorear la cargabilidad de un SEP así como la practicidad de la aplicación del ET para realizar este monitoreo. Se expone también el uso del ET para otras aplicaciones en SEPs.

Aunque la operación de los SEPs generalmente se encuentra bien planeada, condiciones inesperadas como eventos y disturbios pueden llevar al sistema cerca de sus límites y causar la interrupción del abastecimiento de potencia. En este sentido, es conveniente tener un adecuado monitoreo que permita detectar la cercanía a los límites operativos en tiempo real, este monitoreo es necesario inclusive para establecer la activación de acciones remediales requeridas para mantener la operación segura y confiable del SEP.

Considerando esta necesidad de supervisión de los sistemas eléctricos, un aspecto importante corresponde al monitoreo de los márgenes de cargabilidad del SEP. Se debe indicar, que uno de los principales aspectos tratados dentro de la estabilidad de voltaje es la capacidad de transferencia de un SEP; en este sentido, el monitoreo de los márgenes de cargabilidad se encuentra muy correlacionado con el análisis de estabilidad de voltaje.

Una clasificación de los métodos de monitoreo de estabilidad de voltaje se indica en [1], en este documento se establece diferenciar los métodos de monitoreo en base a las estrategias de medición utilizadas. De esta manera, se definen dos grupos de monitoreo basados en estrategias de medición: locales y de área extendida.

En el contexto de las estrategias de medición locales, se considera plantear la reducción del sistema completo hacia un circuito eléctrico simple que corresponde al ET en una barra terminal, generalmente una barra de carga. Considerando que en un circuito eléctrico la potencia de carga es maximizada cuando la impedancia de dicha carga coincide con la impedancia del circuito bajo análisis, el principal objetivo de las metodologías se centra en la determinación del ET.

Dentro de los análisis para la determinación del ET, se han planteado varios enfoques y propuestas. Los autores en [2] y [3] proponen realizar el cálculo del ET mediante la aplicación de la técnica de mínimos cuadrados recursivos a mediciones locales consecutivas. En [4] los autores aplican el teorema de Tellegen para realizar la determinación del ET, en base a mediciones consecutivas sincronizadas posible de ser obtenidas mediante PMUs.

En [5] se propone un algoritmo para identificar el componente de reactancia del ET siendo este esquema válido para sistemas de Extra Alto Voltaje, donde el voltaje equivalente del ET es continuamente actualizado basado en el signo de variación de la carga. Por su parte en [6] los autores plantean obtener el ET mediante una solución analítica del ET utilizando las magnitudes de tres mediciones locales consecutivas, evitando de esta manera el requerimiento del uso de mediciones sincronizadas.

Por otro lado, en la perspectiva de las estrategias de medición de área extendida la idea fundamental consiste en buscar la mayor observabilidad del SEP, con el objetivo de implementar esquemas de monitoreo y protección sistémicos. Sin embargo, el criterio de maximización de potencia transferida en base a la impedancia Thévenin es aún utilizado dentro estos esquemas [7]–[10].

Adicionalmente, la determinación del ET presenta áreas de análisis que requieren el desarrollo de investigación, aspectos como el perfeccionamiento e implementación de métodos de determinación de ET mediante el uso de infraestructura existente, el análisis del desempeño de las metodologías del ET ante cambios en los parámetros del SEP, el uso del ET para estimación de condiciones de cortocircuito [11], entre otras, establecen áreas de investigación cuyas aplicaciones no solo promueven la mejora en la operación de los SEPs sino que permiten cubrir áreas adicionales como el análisis de falla y su aplicación en los sistemas de protección.

Como se puede observar, el ET de un SEP representa un modelo práctico muy aplicado por su simplicidad conceptual. Sin embargo, esta simplicidad conceptual basada en la

linealidad del ET, conlleva ciertas limitaciones debido a las condiciones no lineales del SEP. Dentro de las condiciones de no linealidad del SEP se destacan aspectos como: cambios en el factor de potencia de las cargas del sistema, cambios simultáneos de todas las cargas del sistema [12], [13] y modelado de la respuesta en estado estacionario de los generadores debido a la distribución no-lineal de la potencia en los SEPs [14]–[16]. Estos aspectos afectan la determinación adecuada del ET.

La condición de modelamiento de cargas con factor de potencia constante, es una premisa que se considera en las metodologías inicialmente desarrolladas [2]–[6] y se mantiene en las metodologías existentes [13], [15]–[19]. Se debe señalar que, si esta condición no se cumple, se producen resultados incorrectos de determinación del ET porque la capacidad de carga máxima no se alcanza cuando la impedancia de carga y la impedancia del ET determinada son iguales. El análisis de esta condición se expone con un mayor detalle en el Capítulo 2, como parte de la revisión bibliográfica correspondiente.

En resumen, los problemas detectados en el proceso de determinación del ET, limitan la aplicación del criterio de maximización de potencia transferida desde el sistema hacia la carga, basado en la igualdad de la impedancia del ET con la impedancia de carga.

En este sentido, se observa la necesidad de plantear esquemas que mejoren la determinación tanto del ET así como de la cargabilidad del sistema, siendo este requerimiento la principal motivación del presente trabajo de investigación.

## 1.5 Principales contribuciones

Las principales contribuciones obtenidas en esta investigación son:

- Desarrollo de un nuevo método para la determinación del nivel de cargabilidad y del ET en puntos terminales de un SEP utilizando mediciones locales y en base a la Potencia de Cortocircuito del ET.
- Determinación de una ecuación para el análisis del criterio de igualdad de impedancias, en el punto de máxima transferencia de potencia, cuando la carga trabaja con factores de potencia variables. Esta ecuación se desarrolla en base al análisis de la cargabilidad del SEP considerando el dominio de solución correspondiente a la Potencia de Cortocircuito del ET planteada en esta investigación.
- Planteamiento de un nuevo algoritmo para determinar la Potencia de Cortocircuito del ET y el nivel de cargabilidad en un punto terminal de un SEP. El algoritmo considera la utilización de la maximización de un nuevo indicador de estabilidad de voltaje de largo plazo denominado  $VPSI_s$  el cual se define en base a mediciones de magnitudes de voltaje y potencia de carga.
- Desarrollo de un esquema para la reconstrucción de los parámetros del ET, voltaje e impedancia Thévenin, para lo cual se utiliza la Potencia de Cortocircuito determinada en el primer algoritmo. La reconstrucción del ET se realiza determinando, en primera instancia el voltaje Thévenin, en base a las mediciones de voltaje real en una barra de carga analizada. La metodología



propuesta corrige los inconvenientes que se presentan ante cargas con factor de potencia variable.

- La evaluación de la potencia de cortocircuito y de la cargabilidad, determinados mediante la presente propuesta, corresponden a evaluaciones locales pero consideran todos los efectos que se presenten en el sistema de potencia, permitiendo de esta manera plantear el monitoreo de la cargabilidad de un SEP, en base a las barras que presente el mayor valor de cargabilidad local.
- Los algoritmos desarrollados han sido probados mediante registros de mediciones reales del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano en diferentes niveles de voltaje con resultados satisfactorios.

## 1.6 Listado de Publicaciones

A continuación se presentan las publicaciones que se han generado como parte del presente trabajo de investigación.

**Publicación A:** A. Fonseca, G. Salazar, F. Quilumba and F. Perez-Yauli, “Determination of the Thevenin Equivalent in Power Grids using Real Records based on Short Circuit Power”, Research Article, IET Generation, Transmission & Distribution, ISSN 1751-8687, DOI: 10.1049/gtd2.12003, 2020.

**Publicación B:** A. Fonseca, F. Perez-Yauli, and G. Salazar, “Loadability Analysis based on Short Circuit Power”, Research Article, IET Generation, Transmission & Distribution, ISSN 1751-8687, DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.1290, 2017.

**Publicación C:** A. Fonseca, G. Salazar, “Load Shedding Scheme for voltage instability using voltage – impedance ratio”, Revista Ciencia e Ingeniería Universidad de los Andes, ISSN 1316-7081, Artículo de Investigación, vol. 36, no. 3, pp. 167–178, 2015.

Adicionalmente este trabajo permitió producir otras publicaciones en áreas relacionadas:

**Publicación D:** F. Chapi, A. Fonseca, and F. Perez-Yauli, “Determination of Overcurrent Protection Settings Based on Estimation of Short Circuit Currents Using Local Measurements”, Research Article, IEEE ETCM Conference, 2019. Best Paper Award.

**Publicación E:** A. Fonseca, “Principal Components Analysis applied to Continuation Power Flow”, XXVI Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional - Ecuador, Artículo Técnico, vol. 1, pp. 60–66, 2016.

## 1.7 Esquema del documento

El presente documento se encuentra organizado de la siguiente manera:

El Capítulo 1, inicia presentando la Hipótesis de Investigación, Objetivos y Alcance de la propuesta de investigación. Posteriormente se exponen la motivación y justificación para la realización de esta investigación, así como se expone una descripción generalizada del estado del arte de la presente investigación.

El Capítulo 2 corresponde al marco teórico relacionado con el análisis de cargabilidad y Equivalente Thévenin en puntos terminales de un SEP. A lo largo de este capítulo se presenta la revisión bibliográfica detallada respecto a los métodos de monitoreo de cargabilidad, finalizando con la exposición de las limitaciones de las metodologías para determinación del ET existentes.

El Capítulo 3 inicia con el planteamiento del indicador  $VPS/s$  que permite realizar la determinación de la Potencia de Cortocircuito del ET. Se expone el algoritmo planteado para determinar la  $S_{sc}$  y el ET así como se presenta el desempeño del mismo ante las limitaciones que presentan las metodologías existentes. Como parte final de este capítulo, se presenta la evaluación de cargabilidad y ET realizado en diversos puntos de SEP.

El Capítulo 4 plantea la aplicación de la metodología presentada en esta investigación sobre registros reales obtenidos desde el Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano.

El Capítulo 5 presenta las principales conclusiones de esta investigación y plantea posibles líneas futuras de nuevas investigaciones y aplicación.

## **2. CARGABILIDAD Y EQUIVALENTE THÉVENIN EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

El presente capítulo inicia con una revisión general de los conceptos de estabilidad de voltaje en SEP, se describe la determinación del límite por estabilidad de voltaje de largo plazo y su relación con la máxima cargabilidad que puede soportar un SEP.

A continuación se establece la relación entre la máxima cargabilidad del SEP y el ET en un punto terminal del SEP. Este análisis se realiza considerando el dominio de solución correspondiente a la Potencia de Cortocircuito del ET.

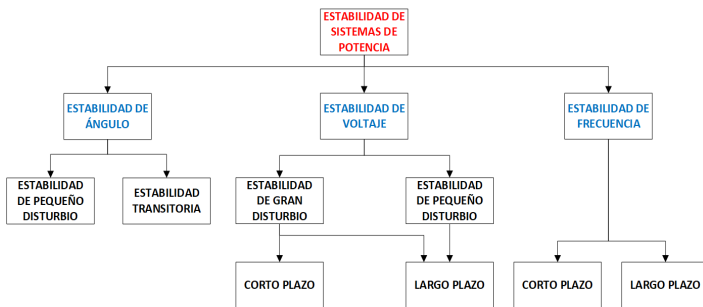
Finalmente se presentan las principales técnicas utilizadas para la determinación del ET en puntos terminales de un SEP y sus limitaciones considerando efectos como la variación del factor de potencia de la carga y la distribución no-lineal de la potencia de los generadores dentro de un SEP.

### **2.1 Estabilidad de Voltaje y Cargabilidad de SEP**

El fenómeno de estabilidad es considerado dentro de los análisis que permiten garantizar la operación segura de un SEP, más aún cuando muchos eventos que han ocasionado desconexiones totales de sistemas eléctricos se han producido por fenómenos dinámicos que involucraron comportamientos inestables del sistema eléctrico en su conjunto [20].

La IEEE-CIGRE [21] y la IEEE-PES en [22], definen a la estabilidad de un sistema de potencia como la habilidad que tiene el mismo, desde una condición inicial dada, para mantener un estado operativo de equilibrio después de haber sido sometido a un disturbio, con la mayoría de las variables del sistema dentro de sus límites. En este sentido, se plantea la clasificación de la estabilidad de los SEP indicada en la Figura 2.1.

Considerando la naturaleza física del tipo resultante de inestabilidad, generalmente se establecen tres tipos de estabilidad dentro de un SEP: Estabilidad de Ángulo, Estabilidad de Frecuencia y Estabilidad de Voltaje. Se debe indicar que estos tipos de estabilidad no son completamente independientes, presentándose casos de inestabilidad de SEP en los que han interactuado más de uno de estos tres tipos [23] de forma simultánea.



**Figura 2.1** Clasificación de Estabilidad de SEP [22].

### **2.1.1 Estabilidad de Voltaje**

Considerando la naturaleza física del tipo resultante de inestabilidad, se establece que cuando la principal variable del sistema en la que la inestabilidad puede ser observada es el voltaje, entonces, la inestabilidad se enmarca en un análisis de Estabilidad de Voltaje.

Desde el punto de vista práctico, la estabilidad de voltaje puede analizarse considerando la capacidad de mantener y/o restablecer el transporte de potencia activa y reactiva desde el sistema de generación – transmisión hacia la carga. Cuando este equilibrio se rompe, se puede producir una disminución progresiva de los niveles de voltaje en todo el SEP, llegando inclusive al fenómeno conocido como colapso de voltaje [24].

Durante el desarrollo de un colapso de voltaje, los niveles de voltaje llegan a valores anormales y, de no tomarse medidas correctivas, se puede llegar a una desconexión parcial o total del sistema [25]. El comportamiento dinámico ante la variación del voltaje de algunos elementos del SEP, pueden llegar a incrementar el consumo de potencia reactiva del sistema, causando disminuciones adicionales de voltaje [24]. También se debe considerar que la presencia de bajos voltajes puede producir la operación de los sistemas de protecciones complicando aún más el estado del sistema.

Desde el punto de vista del tiempo de evolución del fenómeno, la estabilidad de voltaje puede analizarse en dos escalas de tiempo: de corto plazo y de largo plazo, como se observa en la Figura 2.1.

Respecto al análisis de estabilidad en el corto plazo, su estudio considera incluir cargas de rápida respuesta tales como: motores de inducción y elementos con control electrónico. En este sentido, su estudio se realiza con un proceso de simulación en el dominio del tiempo, en el orden de pocos segundos [22].

Por su parte, el análisis de estabilidad del voltaje de largo plazo considera la respuesta lenta de los elementos del SEP y se evalúa en el orden de minutos [22]. Por esta razón, es posible aplicar metodologías de simulación de estado estacionario estimando el margen de estabilidad en términos del aumento de potencia de carga, desde un punto de operación, hasta la máxima transferencia de potencia.

El punto inicial de operación en estado estacionario corresponde a un punto de equilibrio definido por la convergencia del flujo de potencia. Mediante el incremento de carga se determina un punto en el que matemáticamente no se presente convergencia; este punto corresponde al límite de estabilidad del sistema, más allá de este valor no existen condiciones de equilibrio para el sistema.

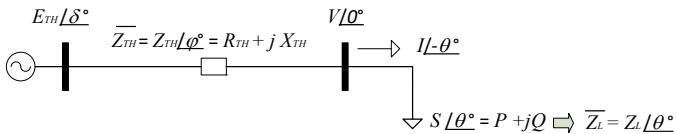
Por su parte, es muy importante que los operadores del sistema utilicen métodos rápidos y simples que permitan determinar la distancia al límite de estabilidad que, en función del modelo de carga, puede coincidir con el punto de máxima cargabilidad. En este sentido, es posible implementar métodos para determinar la máxima cargabilidad en base a modelos estáticos reducidos del SEP y la utilización de mediciones fasoriales de tiempo real.



La principal idea de la reducción del SEP, a estos modelos de estado estacionario, es que la información fasorial permite detectar de manera directa los márgenes de cargabilidad además de generar un mecanismo sencillo de monitoreo en tiempo real. Mediante el uso de estos métodos, es posible determinar los límites de cargabilidad de un SEP, como se plantea en el presente trabajo.

### 2.1.2 Límite por Estabilidad de Voltaje

Se considera el circuito eléctrico reducido indicado en la Figura 2.2, el cual consiste de una carga alimentada desde una fuente ideal de voltaje  $E_{TH}$  por medio de una impedancia  $Z_{TH}$ . Esta impedancia finalmente representa la impedancia equivalente del sistema en el punto de análisis, y se denomina Impedancia Thévenin.



**Figura 2.2** Circuito eléctrico reducido

En este circuito, en el que por simplicidad se considera que la carga corresponde a un modelo de potencia constante, las ecuaciones básicas de las potencias activa (P) y reactiva (Q) consumidas por la carga corresponden a las ecuaciones (2.1) y (2.2), respectivamente.

$$P = \frac{V}{Z_{TH}^2} \{R_{TH} [E_{TH} \cos(\delta) - V] + X_{TH} E_{TH} \sin(\delta)\} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{V}{Z_{TH}^2} \{-R_{TH} E_{TH} \sin(\delta) + X_{TH} [E_{TH} \cos(\delta) - V]\} \quad (2.2)$$

Donde:

$E_{TH}$ : Voltaje Equivalente Thévenin

$\delta$ : Ángulo del Voltaje Equivalente Thévenin

$Z_{TH}$ : Impedancia Equivalente Thévenin

$\varphi$ : Ángulo de la Impedancia Equivalente Thévenin

$V$ : Voltaje en nodo de Carga

$\theta$ : Ángulo de la Potencia de Carga

Se debe indicar que estas variables se encuentran en por unidad del voltaje y potencia bases reales del SEP bajo análisis.

En primera instancia se puede desarrollar la sumatoria cuadrática de las ecuaciones (2.1) y (2.2), con la finalidad de plantear una ecuación básica de potencias con respecto al voltaje de carga del circuito, tal como se indica en la ecuación (2.3).

$$P^2 + Q^2 = \frac{V}{Z_{TH}^2} \cdot [V^2 - 2 \cdot E_{TH} \cdot V \cdot \cos(\delta) + E_{TH}^2] \quad (2.3)$$

Se observa que la ecuación (2.3) tiene una dependencia del Ángulo del Voltaje Equivalente Thévenin ( $\delta$ ). Esta dependencia implica, desde el punto de vista de implementaciones prácticas, el requerimiento de mantener una referencia de tiempo permanente lo cual puede ser realizado mediante el uso de los sincrofasores.

Sin embargo, con la finalidad de analizar el circuito equivalente únicamente mediante mediciones de magnitudes, es necesario eliminar esta dependencia. En este sentido, se puede considerar a los términos de las ecuaciones (2.1) y (2.2) multiplicados por  $R_{TH}$  y  $X_{TH}$  respectivamente, de tal manera que se obtienen los términos expresados en la ecuación (2.4)

$$\begin{aligned} R_{TH} \cdot P &= \frac{V}{Z_{TH}^2} \cdot \{R_{TH}^2 \cdot [E_{TH} \cdot \cos(\delta) - V] + R_{TH} \cdot X_{TH} \cdot E_{TH} \cdot \sin(\delta)\} \\ X_{TH} \cdot Q &= \frac{V}{Z_{TH}^2} \cdot \{-R_{TH} \cdot X_{TH} \cdot E_{TH} \cdot \sin(\delta) + X_{TH}^2 \cdot [E_{TH} \cdot \cos(\delta) - V]\} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Se observa que mediante la sumatoria de los términos indicados en la ecuación (2.4) es posible obtener una expresión equivalente al término que mantiene la dependencia de la referencia angular de la ecuación (2.3). La principal ventaja que presenta esta expresión es que procesa únicamente magnitudes de los componentes del circuito Thévenin, tal como lo expresa la ecuación (2.5).

$$E_{TH} \cdot V \cdot \cos(\delta) = X_{TH} \cdot Q + R_{TH} \cdot P + V^2 \quad (2.5)$$

Con el uso de la ecuación (2.5) es posible reescribir la ecuación (2.3) y obtener la ecuación básica de solución del voltaje en la carga del circuito Thévenin, indicado en la ecuación (2.6).

$$(V^2)^2 + V^2 [2(X_{TH} Q + R_{TH} P) - E_{TH}^2] + Z_{TH}^2 (P^2 + Q^2) = 0 \quad (2.6)$$

Si se define un factor  $m$ , como el coseno de la diferencia entre los ángulos de las impedancias del ET y de la carga, i.e.  $m = \cos(\varphi - \theta)$ , la ecuación (2.6) puede ser planteada como se indica en la ecuación (2.7). Este

factor  $m$  se denomina “factor de acoplamiento sistema – carga”.

$$(V^2)^2 + V^2 (2Z_{TH}Sm - E_{TH}^2) + Z_{TH}^2 S^2 = 0 \quad (2.7)$$

La ecuación (2.7) puede ser dividida para la magnitud del voltaje del ET, con lo que se obtiene la ecuación (2.8), la misma que expresa la solución del voltaje de carga en por unidad del  $E_{TH}$  del SEP. Este voltaje se denomina Voltaje de Carga normalizado respecto al Sistema ( $V_s$ ).

$$(V_s^2)^2 + V_s^2 (2mS_s - 1) + S_s^2 = 0 \quad (2.8)$$

Las variables  $V_s$  y  $S_s$ , corresponden a las indicadas en la ecuación (2.9); en este sentido, estas variables se encuentran normalizadas respecto a la capacidad propia del SEP.

$$V_s = \frac{V}{E_{TH}}, \quad S_s = \frac{S}{S_{sc}} \quad (2.9)$$

Las variables de la ecuación (2.8), válidas para cualquier SEP, se encuentran relacionadas en un parámetro básico que corresponde a la Potencia de Cortocircuito del ET en la barra de carga, definida en la ecuación (2.10).

$$S_{sc} = \frac{E_{TH}^2}{Z_{TH}} \quad (2.10)$$

Finalmente la ecuación (2.8), presenta un comportamiento cuadrático respecto a las variables  $V_s$  y  $S_s$ , permitiendo generar soluciones analíticas para cada una de las variables antes mencionadas, soluciones que se exponen en las ecuaciones (2.11) y (2.12).

$$V_s = \sqrt{\frac{1}{2} - m S_s \pm \sqrt{\frac{1}{4} + (m^2 - 1) S_s^2 - m S_s}} \quad (2.11)$$

$$S_s = -m V_s^2 \pm \sqrt{V_s^4 (m^2 - 1) + V_s^2} \quad (2.12)$$

La ecuación (2.11), establece el espacio de solución del voltaje de carga respecto a la capacidad del sistema de generación-transmisión para abastecer la potencia de carga. Considerando esta ecuación, se observa que existirá al menos una solución real si el término indicado en la ecuación (2.13) se cumple.

$$1 + 4 (m^2 - 1) S_s^2 - 4 m S_s \geq 0 \quad (2.13)$$

Por otra parte, considerando que la ecuación (2.13) es igual a cero, se determina que existirá una única solución real para el voltaje de carga del SEP; este punto determina el límite de convergencia del flujo de potencia en el que matemáticamente se presenta una singularidad en su Jacobiano y establece el límite de estabilidad de voltaje [20], [24], [26].

Desde la perspectiva de cargabilidad, la ecuación (2.13) igualada a cero permite establecer la máxima potencia posible de transferirse  $S_{Smax}$ , como se expresa en la ecuación (2.14).

$$S_{Smax} = \frac{1}{2(1+m)} \quad (2.14)$$

Considerando la condición de abastecimiento a una carga con modelo de potencia constante,  $S_{Smax}$  no solo representa el límite de estabilidad de voltaje del SEP sino que también corresponde al *límite de cargabilidad* sobre el cual no es posible abastecer mayores

potencias de carga desde el sistema de generación-transmisión.

Con la finalidad de analizar los límites por estabilidad de voltaje para diversos SEP dentro de los espacios de potencia activa y reactiva, se considera realizar un incremento permanente de carga manteniendo constante el factor de potencia de la misma, i.e.  $\theta = \text{cte.}$ , de esta manera la máxima potencia activa y reactiva  $P_{S_{max}}$  y  $Q_{S_{max}}$ , se encuentran en función de la máxima potencia aparente  $S_{S_{max}}$ , y se relacionan mediante la ecuación (2.15).

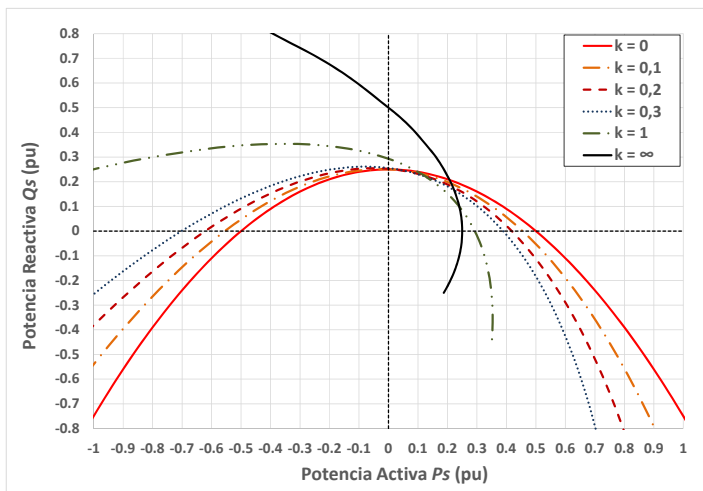
$$1 + 4(m^2 - 1)S_{S_{max}}^2 - 4mS_{S_{max}} = 0 \quad (2.15)$$

Donde:  $P_{S_{max}} = S_{S_{max}} \cos(\theta)$   
 $Q_{S_{max}} = S_{S_{max}} \text{sen}(\theta)$

Si se define un factor  $k$  como la relación entre la resistencia y la reactancia del sistema eléctrico, i.e.  $k = R_{TH} / X_{TH}$ , es posible redefinir el factor  $m$  como se expresa en la ecuación (2.16).

$$m = \cos(\varphi - \theta) = \cos(\text{ctg}^{-1}k - \theta) \quad (2.16)$$

La Figura 2.3 detalla el dominio de solución del flujo de potencia, determinado en base a la ecuación (2.15), para diferentes valores de  $k$ . Considerando que valores típicos del ángulo de la impedancia del ET ( $\varphi$ ) están entre  $80^\circ \pm 7^\circ$  [27], se determina que  $k$  se encuentra entre 0.05 y 0.3.



**Figura 2.3** Límites de Cargabilidad para diferentes valores de  $k$

Más aún, en sistemas de Extra Alto Voltaje (EHV por sus siglas en inglés) el rango de variación de  $k$  está entre 0.05 y 0.1 [28] que corresponden ángulos  $\varphi$  entre  $87^\circ$  y  $84^\circ$ , respectivamente.

Como se observa en la Figura 2.3 el efecto del incremento del componente resistivo  $R_{TH}$  produce una rotación del dominio de solución del voltaje de la carga con la consecuente variación de los límites de cargabilidad [29].

Si se considera que el SEP es fuertemente inductivo, i.e. EHV ideal ( $\varphi = 90^\circ \rightarrow k = 0$ ), los límites de estabilidad definen una parábola simétrica respecto al eje vertical  $P_s$ , sobre el cual es posible realizar un análisis de las máximas potencias factibles de transferirse en función del factor de potencia de la carga ( $\theta$ ):

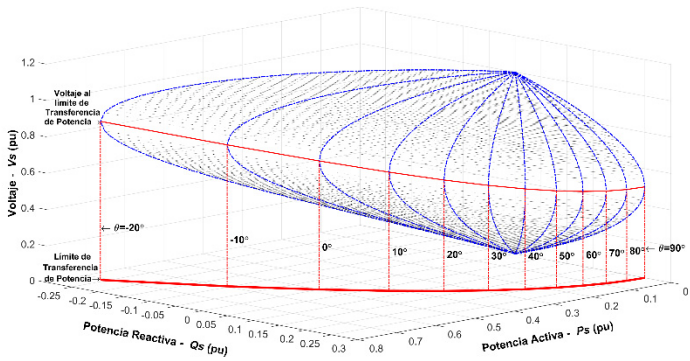
- Carga Inductiva ( $\theta=90^\circ$ ):  $S_{S_{\max}} = \frac{1}{4}$ ,  $\rightarrow S_{\max} = Q_{\max} = \frac{S_{SC}}{4}$
- Carga Resistiva ( $\theta= 0^\circ$ ):  $S_{S_{\max}} = \frac{1}{2}$ ,  $\rightarrow S_{\max} = P_{\max} = \frac{S_{SC}}{2}$
- Carga Capacitiva ( $\theta=-90^\circ$ ):  $S_{S_{\max}} = \infty$ ,  $\rightarrow S_{\max} = \infty$

Estas condiciones expresan que la transferencia de potencia se encuentra limitada para cargas con componentes inductivos y/o resistivos únicamente. Se debe señalar que esta situación se observa aún para valores de  $k$  hasta 0.3, lo cual generaliza esta definición para la mayoría de los SEP.

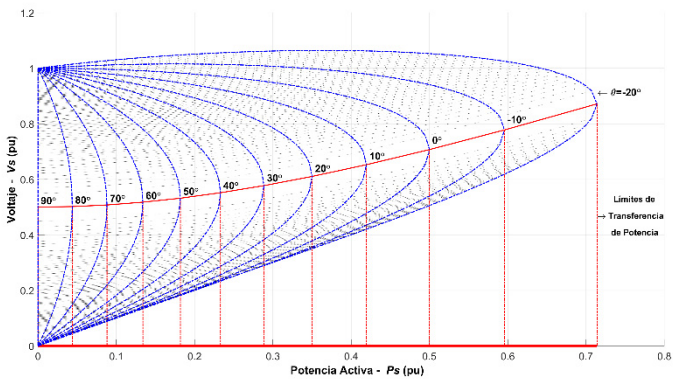
Considerando la solución de  $V_S$  desde la ecuación (2.11), dentro del espacio de solución de  $P_S$  y  $Q_S$ , es posible establecer el dominio total de solución de transferencia de potencia del circuito eléctrico de la Figura 2.2 tal como se detalla en las Figuras 2.4 y 2.5, donde se ha considerado el rango posible de  $k$  para sistemas eléctricos  $0 \leq k \leq 0.3$ .

En estas figuras se exponen también las proyecciones del dominio total de solución en los ejes  $P_S$  y  $V_S$ , con lo que se obtienen las curvas Potencia – Voltaje o más conocidas como Curvas PV. Complementariamente, se debe señalar que considerando el valor máximo para sistemas de EHV ( $k=0.1$ ), se presentan límites muy cercanos a los indicados para  $k=0$ .





a) Dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$ .

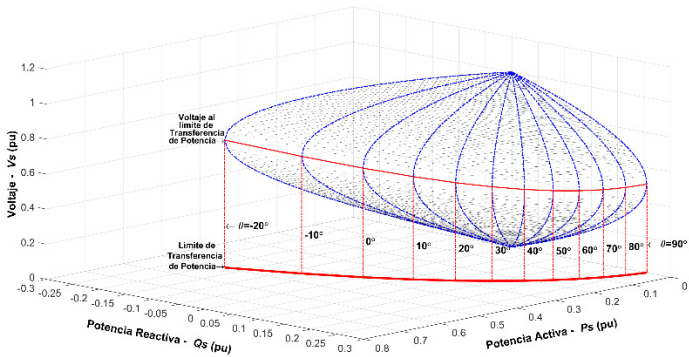


b) Curvas  $P_S - V_S$

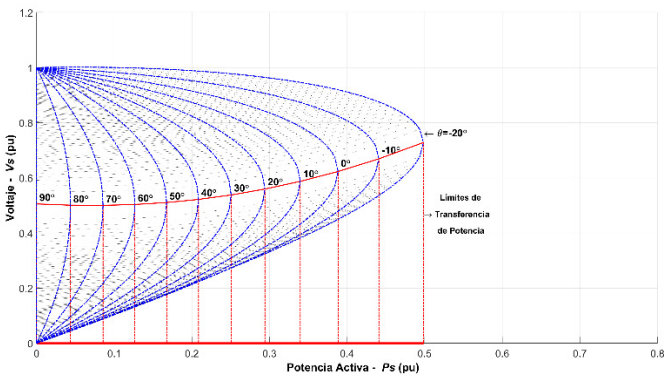
**Figura 2.4** Dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$  y Curvas  $P_S - V_S$  para SEP con  $k=0$

Considerando las Figuras 2.4.a y 2.5.a, se observa que las proyecciones en los ejes  $P_S - Q_S$ , indicados en estas

figuras como Límite de Transferencia de Potencia, representan los límites de cargabilidad indicados en la Figura 2.3 para  $k$  igual a 0 y 0.3, respectivamente.



a) Dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$ .



b) Curvas  $P_S - V_S$

**Figura 2.5** Dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$  y Curvas  $P_S - V_S$  para SEP con  $k=0.3$

### 2.1.3 Estabilidad y Cargabilidad en SEP

Como se menciona en el inciso anterior, en base a las curvas PV se pueden establecer los puntos límites de estabilidad de voltaje así como la máxima potencia que se puede abastecer desde el sistema hacia la demanda. Se observa que para el *modelo de carga a potencia constante*, el límite de estabilidad de voltaje coincide con el punto de máxima cargabilidad del SEP.

Sin embargo, los modelos de carga no presentan únicamente componentes de potencia constante sino que pueden incluir componentes de corriente constante, impedancia constante o modelos con características mixtas. Bajo esta consideración, es necesario diferenciar los límites de estabilidad de voltaje y cargabilidad que se presentan con estos modelos de carga. Para establecer esta condición, se considera el sistema de la Figura 2.2 pero con un *modelo de carga exponencial* desarrollado desde la ecuación (2.17). [24]

$$\begin{aligned} P &= \lambda P_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\alpha \\ Q &= \lambda Q_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\beta \end{aligned} \tag{2.17}$$

Donde  $V_o$  es el voltaje de referencia o nominal y el factor lambda ( $\lambda$ ) es utilizado para representar el factor de escalamiento de la carga. Los exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  dependen del tipo de carga, de manera general, cuando los exponentes son iguales, es posible establecer tres casos de modelos particulares a *factor de potencia constante*: Impedancia constante ( $\alpha=\beta=2$ ),

Corriente constante ( $\alpha=\beta=1$ ) y Potencia constante ( $\alpha=\beta=0$ ).

Por su parte, exponentes fraccionarios corresponden a modelos con características mixtas, y en caso de tener valores diferentes se presentará una variación continua del factor de potencia de la carga.

Considerando la ecuación (2.17), es posible sobreponer la característica de la carga en el dominio total de solución  $V_S - P_S - Q_S$ , tal como se indica en la Figura 2.6. En esta figura se observa que los puntos de intersección de la característica de carga con el dominio  $V_S - P_S - Q_S$  corresponden a los puntos de solución del circuito eléctrico para cada valor específico de carga. En esta figura se considera un modelo exponencial con coeficientes  $\alpha = \beta = 1.5$  y una variación del factor lambda ( $\lambda$ ) desde 0.5 hasta 0.8 en pasos de 0.05, se considera también un factor de potencia de 0.985 inductivo ( $\theta=10^\circ$ ).

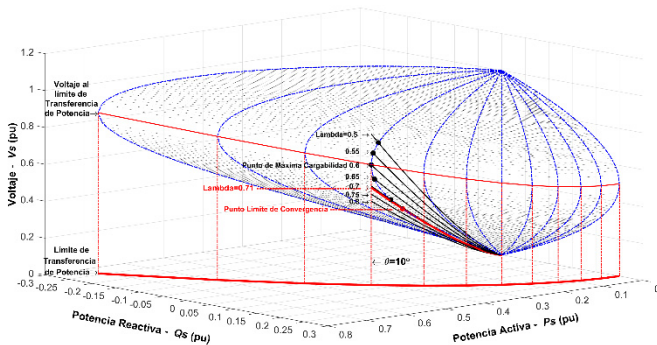
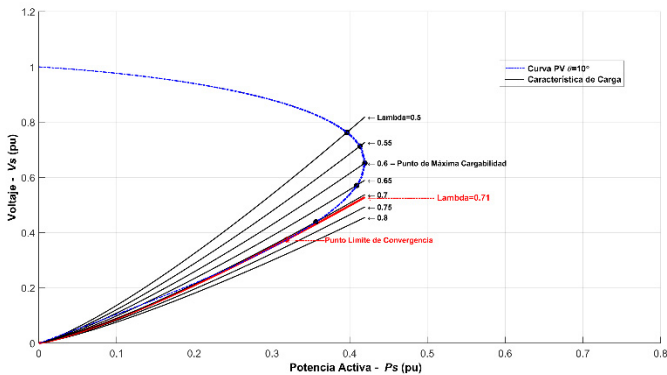


Figura 2.6 Dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$

En la Figura 2.7 se presentan la curva PV y la característica de carga, donde se observa que para  $\lambda=0.71$  la característica de la carga es tangente respecto con el dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$  del sistema eléctrico. Este valor corresponde al *Punto Límite* de convergencia del flujo de potencia en el que matemáticamente se presenta una singularidad en el Jacobiano de solución del mismo y establece el límite de estabilidad de voltaje. Valores del factor lambda superiores a 0.71 no intersecan el dominio de solución  $V_S - P_S - Q_S$  del sistema por lo que no presentan soluciones factibles.



**Figura 2.7** Curva  $P_S - V_S$

Por otra parte, el límite de máxima cargabilidad se presenta en  $\lambda=0.6$ . Se determina entonces que si se consideran modelos que incluyan componentes diferentes a los de potencia constante se pueden presentar límites de estabilidad de voltaje más allá del punto de máxima cargabilidad [30] [24].

Adicionalmente, se debe señalar que si los modelos de carga corresponden a modelos con factor de potencia constante, en los puntos de máxima cargabilidad de potencia aparente se presenta también una maximización de la potencia activa y reactiva de manera simultánea. Esta condición no se cumple para modelos de carga con factor de potencia variable, como el caso de los modelos exponenciales con coeficientes de potencia activa y reactiva diferentes ( $\alpha \neq \beta$ ).

En este sentido, la cargabilidad del SEP, de manera independiente del modelo de carga utilizado, se determina en base a los valores de máxima potencia de carga que el sistema puede alcanzar a abastecer.

Por esta razón, aunque los algoritmos de flujos de continuación pueden establecer toda la curva PV, para fines prácticos muchos algoritmos establecen la mitad superior de la curva, que va desde la condición inicial hasta el punto de inflexión de esta curva, el mismo que corresponde al punto de máxima cargabilidad del sistema eléctrico.

Finalmente, y como se detalla en el Capítulo 3, es posible desarrollar una metodología para la determinación de la cargabilidad y el ET en base al cálculo inicial de la  $S_{SC}$ , lo cual genera una mejor correlación de la máxima cargabilidad con el criterio de igualdad entre la impedancia del ET y la impedancia de carga.

## **2.2 Máxima Cargabilidad y Equivalente Thévenin de un SEP**

La reducción de una red eléctrica es un proceso matemático que combina y/o elimina barras y enlaces de red de un sistema eléctrico para determinar un sistema equivalente reducido con menor número de nodos y enlaces que la red original. El sistema equivalente reducido debe ser capaz de reproducir el comportamiento eléctrico del sistema original en los elementos frontera con suficiente precisión [31].

Existen varios tipos de equivalentes de sistemas eléctricos cuyas características dependen del tipo de análisis del sistema de energía que se esté llevando a cabo. Los equivalentes generalmente se pueden clasificar como equivalentes estáticos o dinámicos. Se debe indicar que los equivalentes estáticos se pueden usar en análisis de flujo de potencia y análisis de cortocircuito, y bajo ciertas condiciones es posible utilizar el mismo sistema equivalente para los dos análisis [32].

Por otra parte, como se menciona en 2.1.2 y se detalla en [23], [31], para análisis de cargabilidad en estado estacionario, un sistema de potencia puede ser reducido en una barra terminal por medio de un circuito ET estático, tal como se indica en la Figura 2.8.

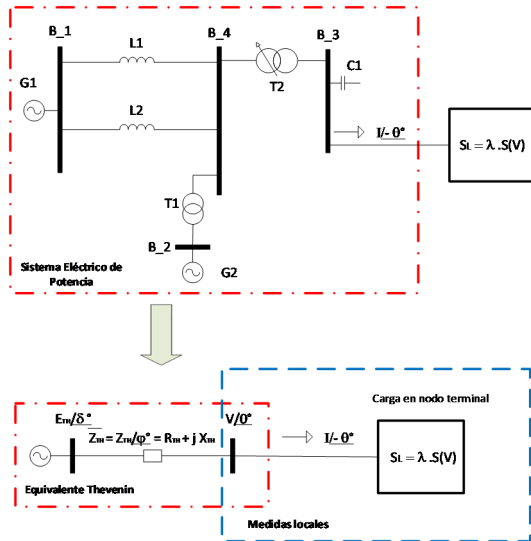


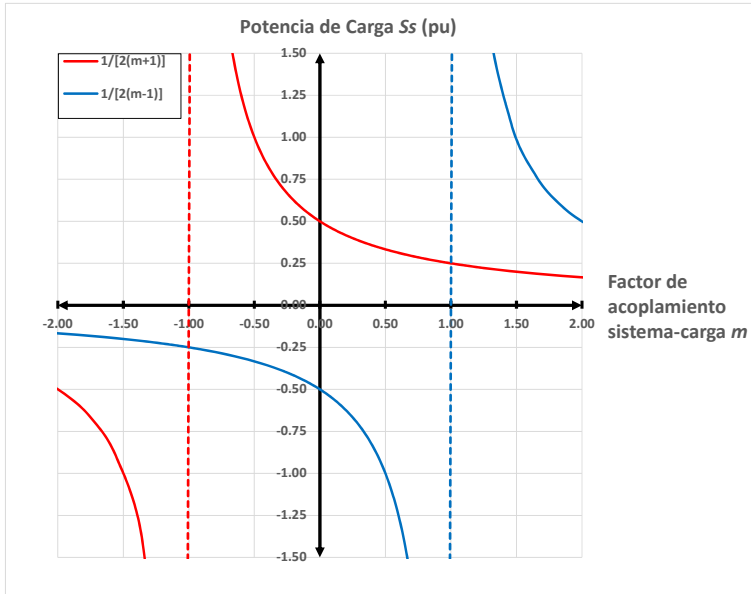
Figura 2.8 Reducción del SEP en un Equivalente Thévenin

## 2.2.1 Cargabilidad en el espacio de la Potencia de Cortocircuito $S_{sc}$

La ecuación (2.13) establece la condición para que exista solución real de  $V_s$ , y en su igualdad a cero establece una única solución del flujo de potencia. Esta ecuación puede ser expresada como se indica en la ecuación (2.18), y representada en la Figura 2.9. Consecuentemente, esta ecuación igualada a cero representa el punto de máxima transferencia de potencia desde el sistema hacia la carga.

$$[2 S_s (m+1) - 1][2 S_s (m-1) - 1] \geq 0 \quad (2.18)$$





**Figura 2.9** Dominios de solución de la Ecuación 2.13

Como se observa en la Figura 2.9, se tienen tres dominios de solución bien delimitados  $m < -1$ ,  $-1 \leq m \leq 1$  y  $m > 1$ .

Como se indicó en 2.1.2, los valores típicos del ángulo de la impedancia del ET ( $\varphi$ ) se encuentran entre  $80^\circ \pm 7^\circ$  [27] y para sistemas EHV el rango se reduce entre  $84^\circ$  y  $87^\circ$ , complementariamente ángulos de carga ( $\theta$ ) típicos están en el orden de  $10^\circ \pm 20^\circ$  [33]–[35].

En la Figura 2.10 se observan los valores del factor  $m$  para el rango del ángulo  $\theta$  anteriormente indicado considerando el dominio total de solución del ángulo  $\varphi$ .

En la parte inferior de esta figura se exponen, como señales binarias, los rangos en los que el factor  $m$  tiene valores válidos para sistemas reales, se detalla también el rango para sistemas EHV.

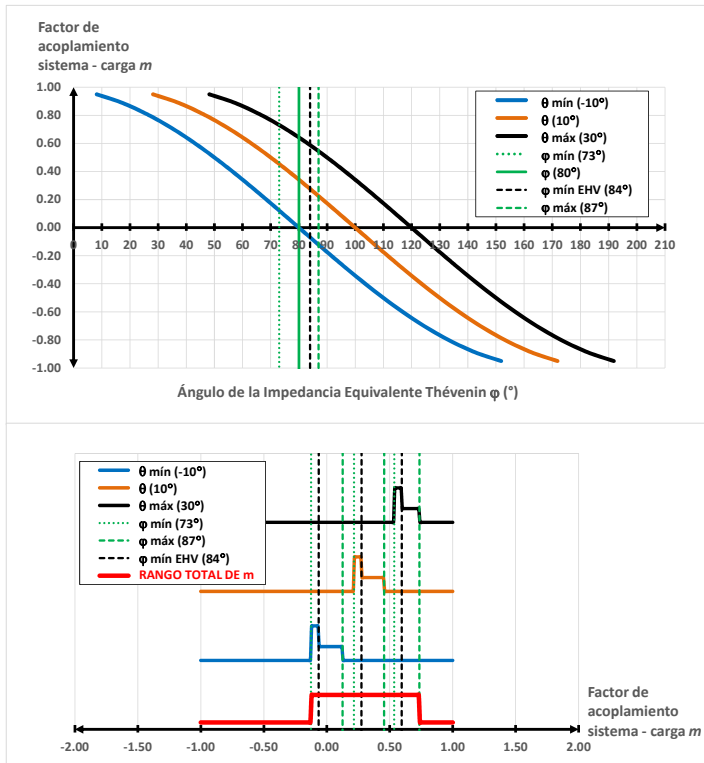
Considerando esta figura, se determina que el espacio de operación normal de los SEP se encuentra en el dominio central  $-1 \leq m \leq 1$  y específicamente dentro de un rango reducido entre  $-0.12 \leq m \leq 0.73$ .

Por definición, la variable  $S_s$  corresponde a una relación de la potencia de carga  $S$  respecto a la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$ . En este sentido, la variable  $S_s$  establece un dominio positivo, i.e.  $S_s \geq 0$ , por lo que la solución de la ecuación (2.18), en el contexto de la operación de los SEP, queda determinada en la ecuación (2.19).

Complementariamente, esta ecuación *en su límite representa la máxima cargabilidad del SEP normalizada respecto de  $S_{sc}$* , como se visualiza en la Figura 2.11. En esta figura se visualiza también el rango establecido para el factor  $m$ .

$$S_s = \frac{S}{S_{sc}} \leq \frac{1}{2(m+1)} \quad (2.19)$$

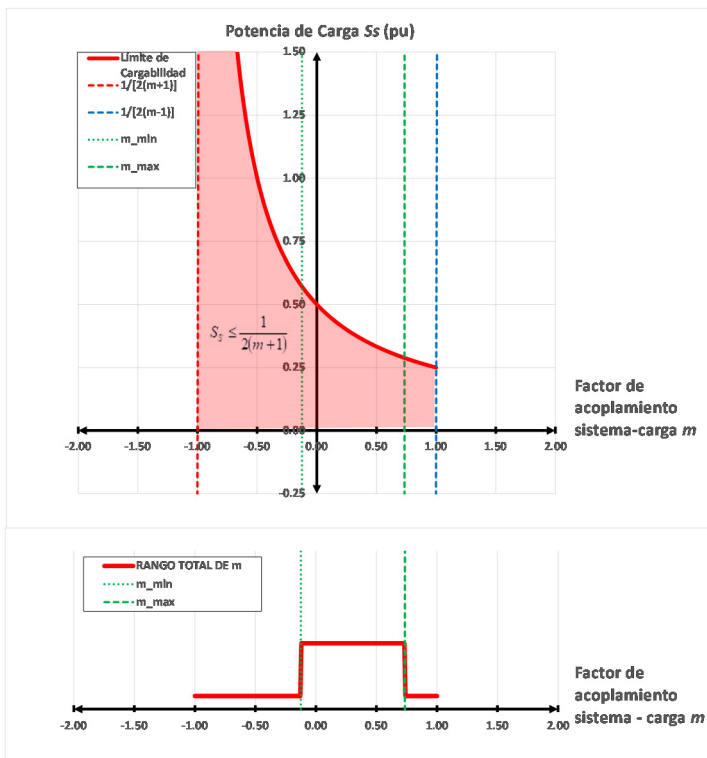
La ecuación (2.19) permite determinar los niveles de cargabilidad de un SEP en función de tres variables:  $m$ ,  $S_{sc}$  y  $S$ , la primera procesa la diferencia entre los ángulos de las impedancias del ET y de la carga, mientras que la segunda establece la potencia de cortocircuito del ET y la tercera variable representa la potencia de la carga.



**Figura 2.10** Rangos del factor de acoplamiento sistema - carga  $m$  para  $\varphi$  entre  $80^\circ \pm 7^\circ$  y  $\theta$  entre  $10^\circ \pm 20^\circ$

Considerando la ecuación (2.19), expresada en términos de la potencia de carga  $S$  y la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$ , se obtiene la ecuación (2.20).

$$S_{sc} \geq 2(m+1)S \quad (2.20)$$



**Figura 2.11** Límite de Cargabilidad de un SEP en el espacio de  $S_s$

Para el caso de un sistema EHV ideal ( $\varphi=90^\circ$ ) la cargabilidad del SEP se reduce a una interesante simplificación indicada en la ecuación (2.21), la misma que se puede establecer mediante la potencia de cortocircuito y la potencia de carga de manera directa.

$$S_{sc} \geq 2(S+Q) \quad (2.21)$$

Complementariamente para sistemas EHV ideales, i.e.  $k$  igual a cero, las máximas potencias factibles de transferirse, en función del factor de potencia de la carga, corresponden a las ya indicadas en la sección 2.1.2:

- $m=1$ ,  $\rightarrow \theta=90^\circ$ ,  $\rightarrow$  Carga Inductiva,  $\rightarrow S_{S_{\max}} = \frac{1}{4}$
- $m=0$ ,  $\rightarrow \theta=0^\circ$ ,  $\rightarrow$  Carga Resistiva,  $\rightarrow S_{S_{\max}} = \frac{1}{2}$
- $m=-1$ ,  $\rightarrow \theta=-90^\circ$ ,  $\rightarrow$  Carga Capacitiva,  $\rightarrow S_{S_{\max}} = \infty$

## 2.2.2 Máxima Cargabilidad considerando relación de Impedancias

Mediante la ecuación (2.20) es posible aplicar el Teorema de Máxima Transferencia de Potencia [36] en un circuito eléctrico desde la perspectiva de impedancias. Para esto se considera la ecuación (2.22), la misma que corresponde a la ecuación (2.7) pero en términos de la impedancia reflejada por la carga, i.e.  $S = V^2 / Z_L$ .

$$V^2 \left( 1 + 2m \frac{Z_{TH}}{Z_L} + \frac{Z_{TH}^2}{Z_L^2} \right) - E_{TH}^2 = 0 \quad (2.22)$$

Desde esta ecuación es posible obtener la magnitud del voltaje  $E_{TH}$ , expresada en términos de impedancias, como se indica en la ecuación (2.23).

$$E_{TH}^2 = V^2 \left( 1 + 2m \frac{Z_{TH}}{Z_L} + \frac{Z_{TH}^2}{Z_L^2} \right) \quad (2.23)$$

La ecuación (2.23) permite determinar  $S_{SC}$ , en términos de impedancias, al dividirla para  $Z_{TH}$  como lo establece la ecuación (2.10). Finalmente, esta  $S_{SC}$  al ser reemplazada en la ecuación (2.20) permite establecer la ecuación (2.24) donde se observa el cumplimiento del criterio de máxima transferencia de potencia el mismo que ocurre cuando la magnitud de la impedancia de carga  $Z_L$  es igual a la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ .

$$\frac{1}{Z_{TH}} \left( 1 + 2m \frac{Z_{TH}}{Z_L} + \frac{Z_{TH}^2}{Z_L^2} \right) \geq 2(m+1) \frac{1}{Z_L} \Rightarrow \frac{Z_L}{Z_{TH}} \geq 1 \quad (2.24)$$

Se puede observar, de manera preliminar, que el planteamiento para establecer el nivel de cargabilidad de un SEP en base a la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{TH} \geq 1$ ), sigue un patrón bastante lineal. Por otra parte, el análisis de cargabilidad en base a la relación de potencias expresado en la ecuación (2.20), permite establecer un indicador con un comportamiento más cercano a las no linealidades que presenta la operación de los SEP's. Esta consideración es observada en el capítulo 3, en la sección 3.3.1.

Adicionalmente, en caso de cargas con factores de potencia variables, para que se cumpla el criterio de igualdad de impedancias en base a las metodologías existentes, se requiere de una complementación en la relación de impedancias [37]. Este aspecto es analizado en el apartado 2.4.1.

## **2.3 Métodos de monitoreo de cargabilidad de SEP**

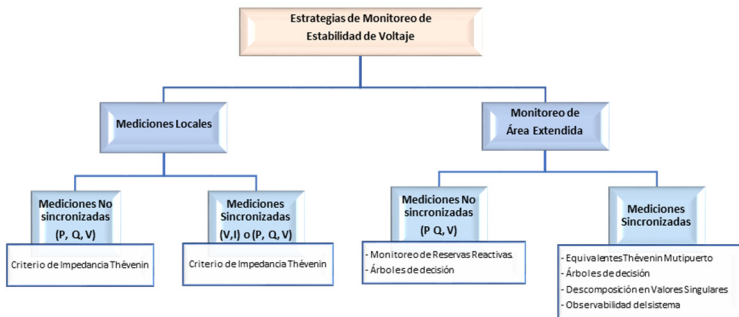
Considerando las actuales condiciones operativas de los sistemas eléctricos, un aspecto importante corresponde al monitoreo de los márgenes de cargabilidad del SEP. Como se detalla en la sección 2.1, uno de los principales elementos tratados dentro de la estabilidad de voltaje es la capacidad de transferencia de un SEP, en este sentido el monitoreo de los márgenes de cargabilidad se encuentra muy correlacionado con el análisis de estabilidad de voltaje de largo plazo.

Una clasificación de los métodos de monitoreo de estabilidad de voltaje de largo plazo se indica en la Figura 2.12 [1] donde se establece como criterio de clasificación las estrategias de medición utilizadas, las cuales se definen como locales o de monitoreo de área extendida.

### **2.3.1 Estrategias de Medición Locales**

Las estrategias de medición locales, consideran la reducción del sistema completo hacia un circuito ET en una barra de carga, para lo cual se han planteado varios enfoques con el objetivo de determinar el ET.

En este contexto, sobresale la propuesta presentada en [2] que corresponde a la primera metodología para determinación del ET. Esta propuesta utiliza mediciones locales consecutivas en conjunto con técnicas tradicionales de ajuste de curvas basadas en mínimos cuadrados recursivos.



**Figura 2.12** Clasificación de los métodos de monitoreo de estabilidad de voltaje [1]

Con el desarrollo tecnológico de las unidades de medición sincrofásorial (PMU por sus siglas en inglés) se presentaron nuevas posibilidades de aplicación de los conceptos relacionados con el ET. Considerando el uso de PMUs, las propuestas planteadas se subdividen entre: técnicas de mediciones sincronizadas y técnicas de mediciones no sincronizadas.

Considerando las técnicas de medición sincronizadas se debe resaltar [4], donde los autores proponen la aplicación del teorema de Tellegen como el proceso de solución teórico más simple para determinar el ET. Sin embargo, la condición del uso de medición sincronizada asume que la frecuencia entre puntos de medición sea constante, condición que no se cumple en su totalidad por lo que se requiere de esquemas complementarios para la corrección de desvío de la frecuencia como se observa en [38], [39].



Otra propuesta importante con mediciones sincronizadas corresponde a la presentada en [5] donde se propone un algoritmo para identificar únicamente el componente de reactancia del ET. Este planteamiento es válido para los sistemas de Extra Alto Voltaje (EHV por sus siglas en inglés), dicha metodología evita el uso de mínimos cuadrados recursivos y plantea una actualización del voltaje Thévenin considerando la dirección del cambio que experimenta la carga.

Dentro de las técnicas de medición no sincronizadas se destaca la propuesta indicada en [6], en la que los autores plantean obtener el ET utilizando las magnitudes de tres mediciones locales, evitando de esta manera la necesidad de mantener una referencia sincronizada en todas los conjuntos de mediciones.

En [40], [41] se realiza el planteamiento de un filtro de Kalman para fines de cálculo del ET en presencia de ruido en las mediciones. Por último, estudios comparativos de algunas de estas técnicas de ET se presentan en [42], [43].

Todas las técnicas antes mencionadas presentan una precisión adecuada para la determinación del ET cuando se producen cambios en la carga, esta condición es un requerimiento básico para realizar el cálculo del ET como se detalla en [44].

Propuestas de mejoras hacia estas técnicas han sido planteadas en [45] con especial atención en el desempeño de la determinación del ET ante cambios en el SEP.

Adicionalmente, el desempeño de la determinación del ET en presencia de un considerable componente resistivo en la impedancia Thévenin es analizado en [46]. De manera complementaria, algunos índices e indicadores de estabilidad de voltaje han sido propuestos en [4], [16], [27], [30], [47]–[49] basados en el mismo concepto de reducción del SEP hacia un ET.

En las referencias [17], [19], [50] se presentan metodologías para determinación del ET, considerando la aplicación sobre registros reales. Estas metodologías trabajan en base a procesos iterativos de estimación de la impedancia Thévenin que permita tener un voltaje Thévenin constante entre los puntos de medición procesados.

Finalmente, en [18] los autores proponen una metodología para determinar el ET y su aplicación sobre registros reales sincronizados basada en la suposición de que el factor de potencia de la carga es casi constante.

### **2.3.2 Estrategias de Monitoreo de Área Extendida**

En la perspectiva de monitoreo de área extendida, la idea fundamental consiste en buscar la observabilidad de los estados del SEP con el objetivo de implementar esquemas de monitoreo y protección sistémicos. Consecuentemente, el objetivo principal está orientado a reconstruir los estados del sistema, generalmente mediante un referenciamiento sincronizado en base a PMUs.

El uso de PMUs en el contexto de estabilidad de voltaje de largo plazo es detallado en [51]. Sin embargo, el criterio de maximización de potencia transferida en base a la impedancia Thévenin es aún utilizado, como se observa en: el uso del concepto de sistemas multipuerto indicado en [7], la aplicación de corredores de potencia propuesto en [18] y [19], o en la visualización de márgenes de estabilidad utilizando información de PMUs analizado en [10].

Complementariamente, el planteamiento de nuevos equivalentes para corredores de transmisión se propone en [52], [53] donde se plantean la reducción del SEP hacia modelos equivalentes de dos y tres barras, respectivamente.

## 2.4 Técnicas utilizadas para la determinación del ET

De manera general, las metodologías desarrolladas para la determinación del ET se basan en el planteamiento de la ecuación (2.25), la misma que corresponde a la caída de voltaje del circuito de la Figura 2.2 sin considerar una referencia de ángulo preestablecida.

$$E_{TH} \underline{\angle \delta} = V \underline{\angle \phi} + I \underline{\angle \theta} \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \quad (2.25)$$

Si se realizan  $n$  incrementos sucesivos de carga en el tiempo, considerando el SEP constante, i.e.  $E_{TH} \underline{\angle \delta} = cte$ ,  $Z_{TH} \underline{\angle \varphi} = R_{TH} + jX_{TH} = cte$ , es posible obtener  $n$  mediciones como se indica en la ecuación (2.26).

$$E_{TH} \underline{\angle \delta} = V \underline{\angle \phi} + I \underline{\angle \theta} \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \quad i = 1, \dots, n \quad (2.26)$$

Un análisis simple de esta ecuación, en dos puntos consecutivos, permite establecer la metodología más directa para obtener el ET, la misma que establece que la impedancia Thévenin se determina mediante la relación de los cambios incrementales de voltaje respecto a los cambios incrementales de corriente, tal como se indica en la ecuación (2.27).

$$R_{TH} + jX_{TH} = -\frac{V_1/\phi_1 - V_2/\phi_2}{I_1/\theta_1 - I_2/\theta_2} = -\frac{\Delta\bar{V}}{\Delta\bar{I}} \quad (2.27)$$

La ecuación (2.27) puede ser establecida desde el Teorema de Tellegen [4], y la misma requiere de manera implícita mantener la referencia del voltaje del ET en el tiempo. Es decir, que considera que la *fente de voltaje del ET debe mantenerse constante*, entre los puntos de medición, tanto en magnitud como en ángulo, lo cual implica mantener una referencia temporal constante. Esta condición se cumple desde la perspectiva de simulación ya que en la misma se mantiene una única referencia de tiempo durante todos los eventos simulados. Por esta razón, para su implementación práctica se requiere del uso de PMUs.

Por otra parte, y de manera complementaria, es posible evitar el requerimiento de mantener la referencia en el tiempo mediante el procesamiento de un tercer punto de medida. Un punto de medida adicional genera un conjunto de ecuaciones con un mismo número de incógnitas, con lo que es posible resolver este sistema de manera analítica como se detalla en [6].

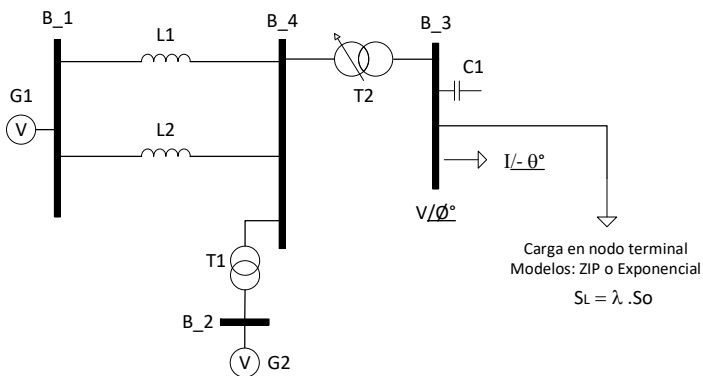
En resumen, tanto la aplicación del teorema de Tellegen [4] como la aplicación de una solución analítica [6], representan los principales esquemas base para la determinación del ET

de las metodologías existentes. Con la finalidad de observar el comportamiento de estas dos metodologías, se plantea su implementación y aplicación con respecto a la respuesta del modelo del SEP indicado en la Figura 2.8, modelo que es tomado de la referencia [24] y detallado en el Anexo 1.

Sobre este modelo inicial, a continuación se desarrolla un análisis de flujos de continuación, de tal manera que permita observar los problemas asociados en la determinación del ET. La herramienta utilizada para la solución de los flujos de carga corresponde a Power Factory de DigSILENT.

### 2.4.1 Modelación con variación del factor de potencia de la carga

Se considera al SEP de la Figura 2.8 con los generadores modelados como fuentes ideales, es decir como fuentes de voltaje constante tal como se indica en la Figura 2.13.



**Figura 2.13** Modelo de SEP considerando los generadores como fuentes ideales

Sobre este planteamiento de los generadores se consideran dos modelos de carga en el presente análisis: modelo polinomial con factor de potencia constante y modelo exponencial con factor de potencia variable.

### 2.4.1.1 Carga con Factor de Potencia Constante

Una carga puede estar conformada por diversos elementos de diferentes características, una alternativa de modelación es considerar la carga compuesta por la suma polinomial de componentes de potencia constante ( $P$ ), corriente constante ( $I$ ) e impedancia constante ( $Z$ ), modelo conocido generalmente como ZIP. El modelo ZIP se formula como se indica en la ecuación (2.28). [24]

$$\begin{aligned}
 P &= \lambda P_o \cdot \left[ a_p \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 + b_p \left( \frac{V}{V_o} \right) + c_p \right] \\
 Q &= \lambda Q_o \cdot \left[ a_q \left( \frac{V}{V_o} \right)^2 + b_q \left( \frac{V}{V_o} \right) + c_q \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

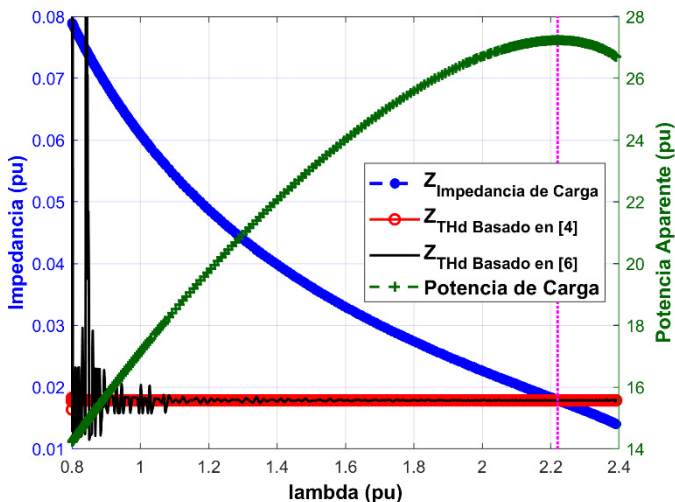
Donde  $V_o$  es el voltaje de referencia o nominal, los términos  $a_p$ ,  $a_q$ ,  $b_p$ ,  $b_q$ ,  $c_p$  y  $c_q$  corresponden a los coeficientes polinomiales para cada uno de los componentes del modelo ZIP, mientras que  $P_o$  y  $Q_o$  son la potencia activa y reactiva determinadas al voltaje de referencia o nominal. El término lambda ( $\lambda$ ) es utilizado para representar el factor de escalamiento de la carga.

Para la simulación realizada se considera un valor de potencia  $P_0$  de 1500 MW, fp: 0.894 inductivo ( $\theta=27^\circ$ ),  $\lambda_0=0.8$  y un valor de un tercio de  $P_0$  para cada componente del modelo ZIP, i.e.  $a_P=b_P=c_P=a_Q=b_Q=c_Q=1/3$ . La potencia base se considera en 100 MVA.

Desde esta condición inicial se desarrolla un incremento progresivo de carga, mediante el aumento de lambda. Se debe indicar que al considerar que las potencias, activa y reactiva, se incrementan en la misma proporción se produce una condición de factor de potencia constante en toda la simulación realizada.

Durante este proceso se determina la impedancia Thévenin con las dos metodologías [4] y [6] indicadas anteriormente, las mismas que procesan información de dos y tres puntos de mediciones sucesivas, respectivamente. Los resultados se exponen en la Figura 2.14, en la que se visualizan también la potencia de carga y su impedancia reflejada en pu por unidad (pu).

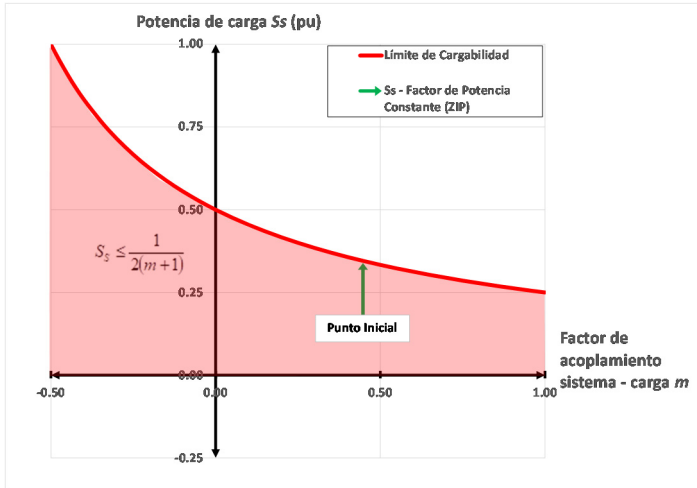
Se observa que, para un valor de lambda igual a 2.22, efectivamente la máxima potencia transferida coincide cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin determinada por cada una de las metodologías indicadas ( $Z_{THd}$ ). Esta condición convalida el planteamiento de establecer la cargabilidad de un SEP mediante la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{THd} \geq 1$ ).



**Figura 2.14** Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante

Por su parte, la trayectoria de la cargabilidad puede ser observada en el espacio de  $S_S$  como se aprecia en la Figura 2.15. En esta figura se observa que durante el proceso de incremento de carga el desplazamiento de la cargabilidad (línea en verde) se realiza de manera vertical desde su punto de operación inicial hasta su límite, esta condición se debe a que el incremento de carga se realiza a factor de potencia constante lo cual representa un factor  $m$  también constante.





**Figura 2.15** Cargabilidad en el espacio de  $S_s$  - Carga con factor de potencia constante

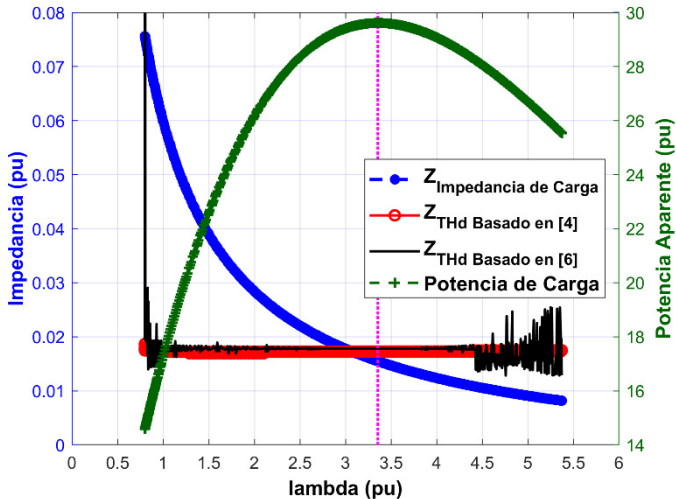
Como se mencionó en el inciso 2.1.2, al considerar modelos a factor de potencia constante, los puntos de máxima cargabilidad de potencia aparente, activa y reactiva suceden en el mismo instante. Se debe indicar que los desplazamientos verticales sobre el plano  $S_s$  corresponden a las proyecciones de las curvas PV indicadas en el mismo apartado 2.1.2.

### 2.4.1.2 Carga con Factor de Potencia Variable

Como se detalló en el inciso 2.1.3, el modelo de carga exponencial es desarrollado desde la ecuación (2.17). Para la presente simulación se ha considerado coeficientes diferentes:  $\alpha = 1.5$  y  $\beta = 2.5$ , de esta forma

la respuesta de la carga presentará una variación permanente del factor de potencia.

De la misma manera, que para el caso del modelo de factor de potencia constante, en la Figura 2.16 se exponen los resultados de la determinación de la impedancia Thévenin realizada con las dos metodologías [4] y [6] indicadas anteriormente ( $Z_{THd}$ ). En esta figura se muestran también la potencia de carga y su impedancia reflejada en pu.



**Figura 2.16** Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable.

En este caso se observa que para  $\lambda$  igual a 3.355 se presenta la máxima potencia transferida hacia la carga.

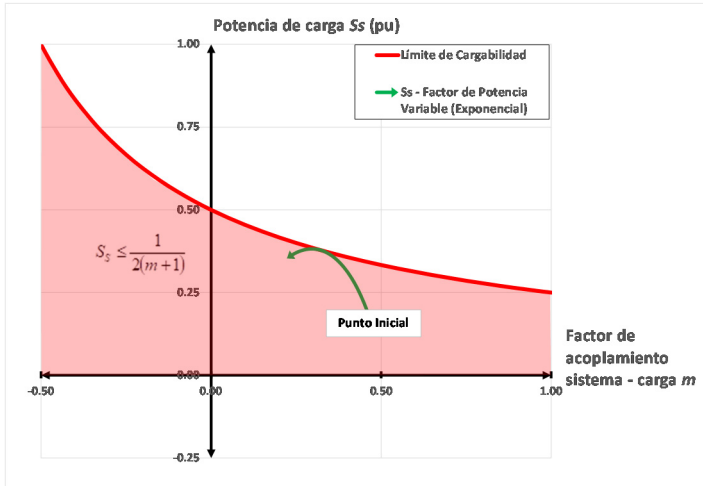
Se observa también que la máxima cargabilidad no coincide cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin determinada por cada una de las metodologías indicadas. Para el presente caso los valores de cargabilidad en los que las impedancias se igualan corresponden a valores de  $\lambda$  igual a 3.078 y 2.986, para las metodologías [4] y [6], respectivamente.

Esta situación establece una limitación para determinar la cargabilidad de un SEP mediante la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{THd} \geq 1$ ) ante cargas que presenten variación de su factor de potencia.

En la Figura 2.17 se expone la trayectoria de la cargabilidad en el espacio de  $S_s$ . En esta figura se observa que durante el proceso de incremento de carga el desplazamiento de la cargabilidad (línea en verde) presenta una curvatura hasta llegar a su límite, esta condición se debe a que el incremento de carga se realiza a factor de potencia variable lo cual cambia el valor de  $m$  en cada incremento de carga.

Por su parte, la inadecuada determinación de la impedancia Thévenin  $Z_{THd}$  puede ser analizada considerando un punto inicial de carga trabajando a un factor de potencia identificado con el subíndice cero ( $m_0$ ). En este punto inicial, se determina el voltaje Thévenin desde la ecuación (2.23), tal como se indica en la ecuación (2.29).

$$E_{TH}^2 = V^2 \left( 1 + 2 m_0 \frac{Z_{THd}}{Z_L} + \frac{Z_{THd}^2}{Z_L^2} \right) \quad (2.29)$$



**Figura 2.17** Cargabilidad en el espacio de  $S_s$  - Carga con factor de potencia variable

Desde la ecuación (2.29) es posible establecer la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  como se detalla en la ecuación (2.30).

$$S_{SC} = \frac{E_{TH}^2}{Z_{THd}} = \frac{V^2}{Z_{THd}} \left( 1 + 2 m_0 \frac{Z_{THd}}{Z_L} + \frac{Z_{THd}^2}{Z_L^2} \right) \quad (2.30)$$

Se debe indicar que  $Z_{THd}$  corresponde a la impedancia Thévenin determinada en este punto inicial, es decir considerando seguir la trayectoria a factor de potencia constante. Por otra parte, la máxima cargabilidad se alcanza cuando la ecuación (2.20) llega a su límite evaluada en el factor de potencia que la carga finalmente presente, para este análisis se considera un valor de evaluación en el límite igual a  $m$ .

Bajo estas consideraciones, y reemplazando la ecuación (2.30) con la ecuación (2.20), se puede establecer la relación de impedancias cuando se considera variación del factor de potencia de la carga, como se indica en la ecuación (2.31).

$$Z_L / Z_{THd} \geq 1 + m - m_o \pm \sqrt{m_o^2 - 2 m_o (m - 1) + m(m - 2)} \quad (2.31)$$

Se observa que la ecuación (2.31), considerando un factor de potencia constante ( $m = m_o$ ), se reduce al criterio de igualdad de impedancias ( $Z_L / Z_{THd} \geq 1$ ).

Se debe señalar que debido a que el desplazamiento de la carga sigue una trayectoria no lineal, como se observa en la en la Figura 2.17, la aplicabilidad de la ecuación (2.31) dependerá de la linealidad de los incrementos del factor de potencia entre los puntos de evaluación. Sin embargo, esta ecuación permite visualizar los errores establecidos al presentarse cargas con factor de potencia variable.

Un análisis adicional permite establecer que al cambiar el factor de potencia, cambia el límite de cargabilidad como lo explica la ecuación (2.20), esto significa que el SEP se ha modificado ligeramente. Bajo esta consideración, se plantea establecer una metodología que realice la actualización hacia el nuevo valor de  $m$  previo a la reconstrucción del ET de tal manera que permita incluir estos ligeros cambios del SEP.

Por otra parte, el análisis de cargabilidad en base a la relación de potencias expresado en la ecuación (2.19) considera las no linealidades del SEP, incluyendo el factor de potencia de la carga, y permite establecer de

manera directa la cargabilidad como se detalla en el capítulo 3.

### **2.4.2 Modelación de generadores como fuentes reales**

Desde la perspectiva de simulación mediante flujos de carga, si se considera un SEP operando en un punto estable y se presenta un cambio de carga, el SEP establece un nuevo punto de operación mediante una redistribución de la potencia entre los generadores, esta distribución presenta un *comportamiento no lineal*.

La distribución de potencia activa, la misma que se realiza en función del esquema de reasignación de potencia aplicado [54] (barra slack, barra slack distribuida, en base a inercias, etc.), en conjunto con los valores de potencia iniciales de los generadores, inciden en los límites de cargabilidad. Esta condición denominada *efecto del despacho de potencia activa* se encuentra detallada en [15], [33] y [34].

Considerando la distribución de potencia reactiva, la misma se determina como resultado de los esquemas de control de voltaje de cada generador, los cuales establecen una regulación permanente del voltaje terminal del generador y determinan el soporte de reactivos requerido. Tanto para la potencia activa como para la reactiva, en caso de excederse en la capacidad del generador, se establece una disminución a la capacidad de soporte de reactivos del generador [24].

Adicionalmente, esta distribución no lineal de potencia activa y reactiva, entre los generadores de un SEP, se hace más presente cuando los generadores alcanzan sus límites, los cuales pueden ser visualizados en la curva de régimen de operación segura de las máquinas.

A continuación se expone una descripción de los límites de los generadores, su efecto sobre las metodologías de determinación del ET y algunas alternativas planteadas para abordar esta problemática.

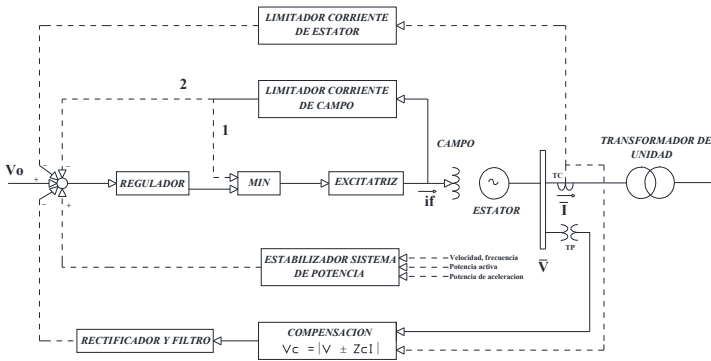
#### **2.4.2.1 Límites de los Generadores**

En la planificación de un SEP, la operación de los generadores se establece en base a consignas operativas y esquemas de control que mantienen las diferentes variables eléctricas y mecánicas del sistema de generación dentro de sus límites de capacidad preestablecidos. El sistema de generación generalmente comprende: turbina, generador y transformador de unidad.

Considerando únicamente al generador, la capacidad del mismo se define sobre la base de las máximas corrientes que circulan por sus componentes, para el caso: estator/armadura y rotor/campo.

En la Figura 2.18 se indica un diagrama de bloques de un regulador automático de voltaje (AVR por sus siglas en inglés) en el que se incluyen los correspondientes limitadores de corriente de estator y campo.

El efecto de una corriente eléctrica sobre cualquier elemento es función directa de su magnitud y del tiempo que demora en circular esta corriente, por lo tanto, los límites de capacidad permiten cierta flexibilidad en función de la magnitud de corriente existente y del tiempo [55].



**Figura 2.18** Diagrama de bloques de un AVR [24]

En este sentido, se establecen características de capacidad ante sobrecargas tanto para el estator como para el rotor, ambas definidas por el estándar IEEE Std C.50.13-2014 [56] y mostradas en la Figura 2.19. Estas características se consideran en los bloques correspondientes a los limitadores de corriente de rotor y de estator de la Figura 2.18.

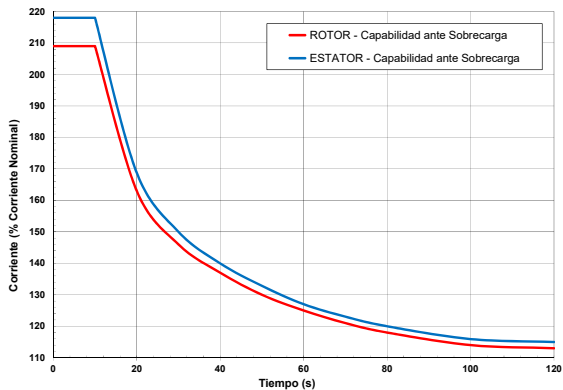
#### **2.4.2.1.1 Limitador de corriente de estator**

La utilización del limitador automático de corriente de estator no es muy común, debido a la gran inercia térmica del circuito del estator que permite que las



sobrecargas sean detectadas de forma manual. En caso de presentarse sobrecarga, la consigna operativa consiste en disminuir la corriente en el estator mediante la regulación manual del voltaje de referencia en el AVR lo que origina una disminución de potencia reactiva de la máquina.

Ante mayores sobrecargas es posible disminuir también la potencia activa de la máquina mediante regulación de la potencia mecánica. En [57] se describe el detalle de la inclusión de este limitador dentro del AVR.



**Figura 2.19** Capacidad normalizada ante sobrecargas, para estator y rotor [56]

#### **2.4.2.1.2 Limitador de corriente de campo**

El limitador de corriente de campo, conocido también como Limitador de Sobreexcitación (Overexcitation Limiter OXL), es el dispositivo de control que protege al devanado de campo ante sobrecalentamiento debido a

altas corrientes. La mayoría de OXLs están diseñados para seguir la curva de sobrecarga de la corriente de campo indicada en la Figura 2.19, con un margen de seguridad adecuado.

En sistemas antiguos la limitación de la corriente de campo es realizada mediante el cambio de control automático a control manual con voltaje de excitación constante. En sistemas modernos, generalmente se utilizan dos técnicas de control [24]:

- 1) La realimentación realiza un desvío del lazo de control del regulador de voltaje como indica el camino 1 en la Figura 2.18. En este caso la excitatriz escoge el mínimo entre el valor entregado por el regulador y el entregado por el OXL.
- 2) La realimentación se realiza al punto de suma total del AVR como indica el camino 2 en la Figura 2.18. Esta señal es igual a cero en condiciones normales y en caso de activarse esta señal obliga a que la corriente de campo se encuentre dentro de los límites mediante una disminución del voltaje de referencia hacia el regulador.

Los limitadores antes indicados así como los estabilizadores del sistema de potencia (PSS), se incluyen en un lazo de realimentación para el control de voltaje como se observa en la Figura 2.18. Se observa que el esquema de control de voltaje establece una regulación permanente del voltaje terminal del generador mediante el voltaje de campo y en caso de exceder la capacidad del generador se establece una limitación al voltaje de campo disminuyendo el soporte de reactivos de un generador.

### **2.4.2.1.3 Límites de un generador en estado estacionario**

La operación en estado estacionario de un generador es caracterizada por las siguientes variables eléctricas: potencia activa ( $P$ ), potencia reactiva ( $Q$ ) y voltaje en terminales ( $V$ ), por lo que es necesario trasladar los límites por corriente máxima que pueden soportar el estator y rotor, hacia un plano  $P$ - $Q$  conformando de esta manera la curva de régimen de operación segura (capability curve) de un generador.

Si se considera que el límite de corriente por el estator es  $I_{max}$  y de la definición de la potencia aparente se tiene la ecuación (2.32).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI_{max} \quad (2.32)$$

Ecuación que corresponde a una circunferencia de radio  $VI_{max}$  con centro en el origen del plano  $P$ - $Q$ , tal como se indica en la Figura 2.20.

Para considerar el límite de corriente del rotor generalmente se plantea trasladar la ecuación de voltaje en terminales  $V$  de un generador considerando al mismo como una fuente interna  $E_q$  en serie con una reactancia  $X$ , por lo que el voltaje interno viene definido por la ecuación (2.33), donde  $I$  corresponde a la corriente del estator.

$$\vec{E}_q = \vec{V} + jX\vec{I} \quad (2.33)$$

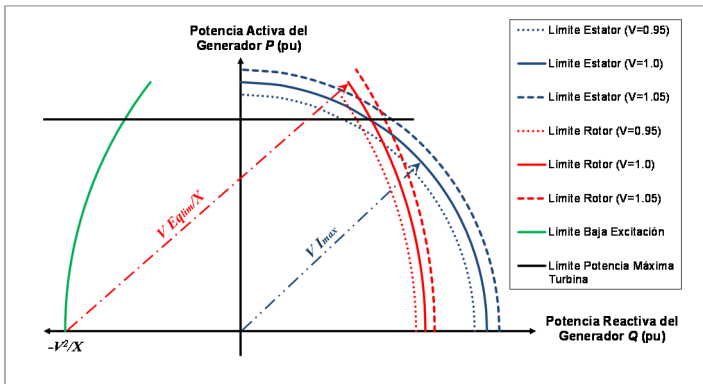
Considerando el módulo de  $E_q$  y multiplicando por el cuadrado de su voltaje terminal se tiene la ecuación (2.34).

$$V^2 E_q^2 = (V^2 + XQ)^2 + (XP)^2 \quad (2.34)$$

En por unidad, el voltaje interno generado  $E_q$  es igual al voltaje de campo y es directamente proporcional a la corriente de campo  $I_f$ . Si se considera que el límite de corriente por el rotor es  $I_{fmax}$  se tiene un valor límite de voltaje interno  $E_{qlim}$  como se observa en la ecuación (2.35).

$$V^2 E_{q\ lim}^2 = (V^2 + XQ)^2 + (XP)^2 \quad (2.35)$$

La ecuación (2.35), en el plano  $P$ - $Q$ , corresponde a una circunferencia de radio  $VE_{qlim}/X$  con centro en  $(P=0, Q=-V^2/X)$ , tal como se incluye en la Figura 2.20.



**Figura 2.20** Curva de régimen de operación de un generador

Adicionalmente a estos límites se agregan los correspondientes a la máxima potencia de la turbina y al límite de baja excitación cuando la potencia reactiva es importada desde el sistema, conformando de esta manera la curva de régimen de operación segura de un generador.

Como se observa de la Figura 2.20, esta curva resulta en un límite dinámico en función del voltaje terminal del generador [55].

### 2.4.2.2 Simulación considerando límites de los Generadores

A continuación se considera al sistema de la Figura 2.8, con los generadores modelados como fuentes reales, es decir, considerando sus límites asociados a los sistemas de control, tal como se indica en la Figura 2.21.

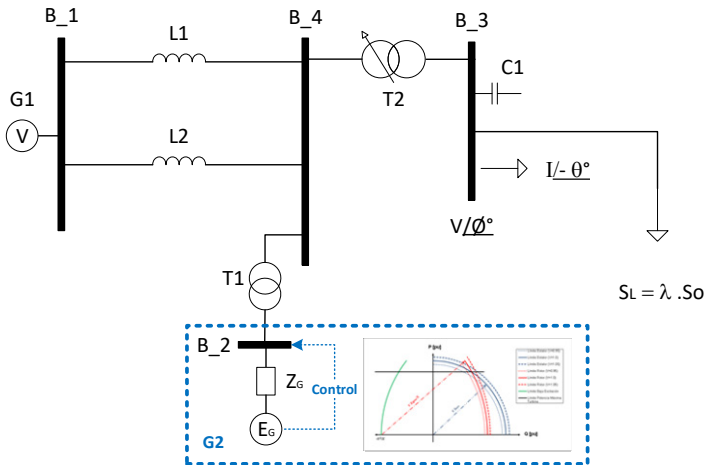
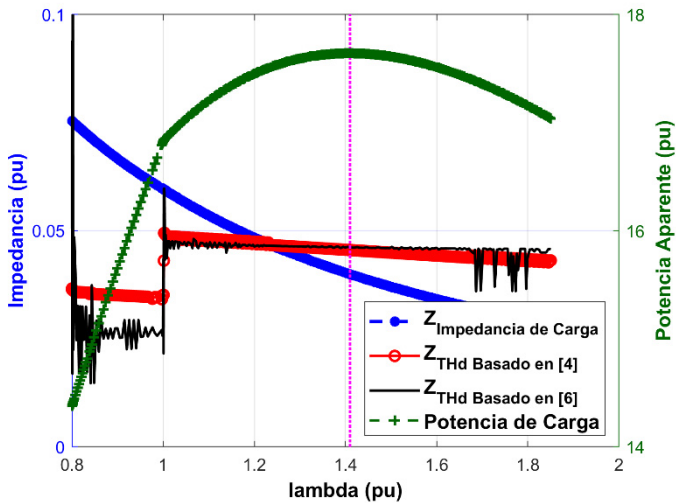


Figura 2.21 Modelo de SEP considerando G2 como fuente real

En la Figura 2.22 se detalla la respuesta de la determinación de la impedancia Thévenin considerando al generador G2 modelado como una fuente real, en esta figura se observa que para lambda

igual a 1 se presenta una discontinuidad en las impedancias determinadas. Efectivamente, en este punto el generador G2 alcanza sus límites y consecuentemente para valores superiores de cargabilidad el generador G2 ya no mantiene constante el voltaje en la Barra B2.



**Figura 2.22** Impedancia Thévenin y máxima cargabilidad - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable

Se observa también que la maximización de potencia ocurre en un valor de  $\lambda$  igual a 1.41, el mismo que es totalmente diferente al punto de igualdad de impedancias que corresponde a  $\lambda$  igual a 1.258, es decir, se observa nuevamente una limitación para

analizar la cargabilidad de un SEP mediante la relación de impedancias.

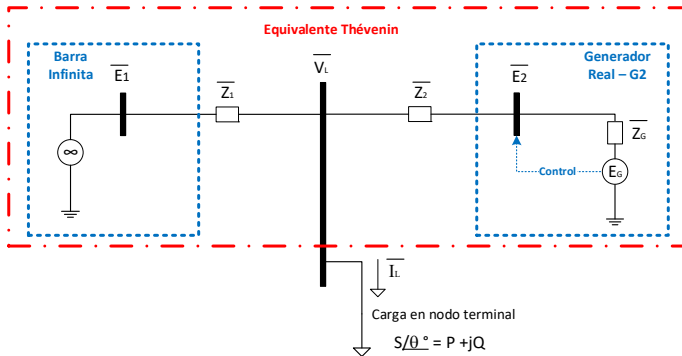
En resumen, el planteamiento del ET es válido para circuitos lineales o para rangos donde el circuito analizado se mantiene lineal, es decir que se cumple con el principio de superposición respecto a las variables de entrada analizadas dentro de un sistema [58].

Por su parte, la operación de los SEP presenta condiciones no lineales que se deben considerar a fin de viabilizar el análisis de cargabilidad de una manera adecuada. En este sentido, la distribución de potencia activa y reactiva se determinan como resultado de los esquemas de control de cada generador, envuelto en un entorno no lineal.

### **2.4.2.3 Efecto de los límites de generadores en la cargabilidad del SEP**

Para analizar el efecto de los límites de los generadores, se analiza el desempeño del SEP ante un cambio en la magnitud de la carga. Para este análisis se considera el SEP planteado en la Figura 2.23.

Inicialmente se considera que el generador G2 está trabajando dentro de sus límites de capacidad, por lo que el lazo de control del AVR permite mantener el control del voltaje de la barra 2 en un valor constante. Por su parte, el valor de potencia activa se considera que también se mantiene constante.



**Figura 2.23** Sistema con modelación de generador real

Como el generador G2 está dentro de sus límites de capacidad, el modelo del mismo puede plantearse como una fuente ideal de voltaje sin ninguna reactancia interna  $Z_G$ , i.e.  $Z_G=0$ .

Se considera inicialmente que la carga se modela mediante una impedancia, bajo esta premisa el voltaje equivalente  $E_{TH}$  del sistema en la barra de carga de la Figura 2.22 podría ser determinado mediante la ecuación (2.36).

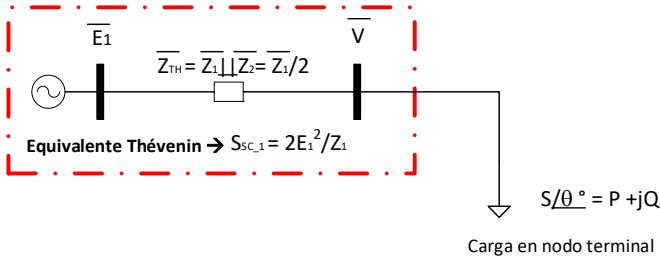
$$\bar{E}_{TH} = \frac{\bar{E}_1 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{E}_2 \cdot \bar{Z}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2} \quad (2.36)$$

Si se considera que las tensiones de las barras 1 y 2 son iguales a  $E_1$ , entonces, el voltaje  $E_{TH}$  es igual a  $E_1$ , por su parte la impedancia Thévenin corresponde al paralelo de las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$ , y en caso de ser iguales se establece el ET tal como se indica en la Figura 2.24.



La potencia de cortocircuito de este circuito equivalente

1 corresponde a  $S_{SC_1} = \frac{2E_1^2}{Z_1}$ .



**Figura 2.24** ET con G2 dentro de sus límites y bajo los supuestos considerados

Si se conoce esta potencia  $S_{SC_1}$ , la cargabilidad del sistema podrá ser determinada conforme lo establece la ecuación (2.20).

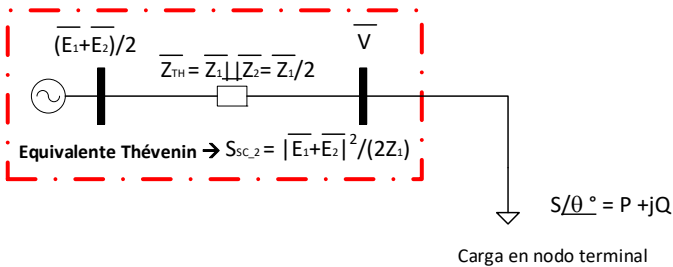
Por otra parte, se considera ahora lo que ocurre cuando los generadores alcanzan sus límites. Para el circuito analizado, se plantea que el generador G2 ha alcanzado alguno de sus límites por lo que el voltaje en sus terminales ya no puede mantenerse constante ante incrementos de carga.

Por lo tanto, ante un posterior incremento de carga, el voltaje  $E_2$  se reduce, esta condición genera que el ET se modifique. De igual manera, que para el caso del generador dentro de sus límites, la impedancia  $Z_{TH}$  corresponde al paralelo de las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$ , y en caso de ser iguales esta impedancia corresponde a la mitad de la impedancia  $Z_1$ .

Complementariamente, el voltaje  $E_{TH}$ , bajo esta misma consideración corresponde a  $(E_1 + E_2) / 2$ , tal como se indica en la Figura 2.25.

La potencia de cortocircuito de este circuito equivalente

2 corresponde a  $S_{SC_2} = \frac{|\overline{E}_1 + \overline{E}_2|^2}{2Z_1}$ .



**Figura 2.25** ET con G2 alcanzando sus límites y bajo los supuestos considerados

De la misma manera, que para el caso de G2 dentro de sus límites, la cargabilidad podrá ser determinada mediante la ecuación (2.20) si se conoce la potencia  $S_{SC_2}$ .

Como  $E_2 < E_1$  se tiene que  $S_{SC_2} < S_{SC_1}$  y, en consecuencia, la cargabilidad se ha incrementado por la disminución de la potencia de cortocircuito debido a que G2 alcanza sus límites. En este planteamiento, la impedancia Thévenin se mantiene constante, por lo que es evidente que la máxima cargabilidad no coincidirá cuando la impedancia de carga se iguale con la impedancia Thévenin.

Se debe señalar que un nuevo valor de  $S_{SC\_2}$  puede ser planteado considerando algunas opciones posibles de solución, para esto se considera que el generador G2 se encuentra representado por una fuente  $E_G$  en serie con una reactancia  $Z_G$  como se indicó en la Figura 2.23.

En base a esta modelación se puede considerar que la fuente  $E_G$  se mantiene constante y que la reactancia  $Z_G$  es variable en función de la condición operativa del generador, incluyendo sus límites, esta propuesta se encuentra detallada en [16].

Otra alternativa puede considerar que el voltaje interno del generador  $E_G$  cambie y la impedancia  $Z_G$  sea constante. Es viable también alternativas como cambios en las dos variables  $E_G$  y  $Z_G$  de manera simultánea.

Para el caso analizado en este apartado, al alcanzar los límites de G2 se presenta una disminución de  $S_{SC}$  y, en consecuencia, se presenta un aumento de la potencia  $S_S$  con la disminución del margen de cargabilidad, por lo que si se determina esta nueva potencia  $S_{SC}$  es posible reconstruir el ET sin mantener una consigna fija para  $E_G$  o para  $Z_G$ .

### **2.4.3 Limitaciones de las técnicas utilizadas para la determinación del Equivalente Thévenin**

Como se ha detallado en el presente capítulo, las técnicas utilizadas para la determinación del ET, parten de la ecuación (2.25), la cual establece la posibilidad

de plantear un circuito eléctrico lineal como un modelo equivalente de un SEP con características no lineales.

Bajo la perspectiva del circuito eléctrico, el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  debe cumplir con la ecuación del voltaje del ET expresada en (2.25), i.e.  $\overline{E_{TH}} = \overline{V} + \overline{I} \cdot (R_{TH} + jX_{TH})$ , donde se observa que el valor de la carga, expresada por la corriente  $I$ , incide directamente sobre el valor de  $E_{TH}$ , esto con la finalidad de alcanzar el valor de voltaje registrado en la carga  $V$ .

En este planteamiento se considera a la carga modelada como una impedancia. Sin embargo, la carga en un SEP es modelada en función de potencias y no de impedancias. En este sentido, ante una variación de la carga, las potencias activa y reactiva, requeridas por la carga son las que se redistribuyen entre los generadores siguiendo un comportamiento no lineal.

Independientemente de la alternativa de modelación escogida, el sistema alcanza un nuevo valor para la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$ . Por lo que el límite de cargabilidad se encuentra delimitado por la ecuación (2.20) la misma que está determinada en el espacio de potencias como se detalló en la sección 2.2.1.

Por otra parte, las técnicas existentes plantean la determinación de los parámetros del circuito eléctrico equivalente, Voltaje Equivalente  $E_{TH}$  e Impedancia Equivalente  $Z_{TH}$ , con la finalidad de establecer la máxima cargabilidad cuando la impedancia de carga se iguale con la impedancia Thévenin.

Sin embargo, estos planteamientos presentan algunas limitaciones cuando la carga presenta un factor de potencia variable y cuando los generadores alcanzan sus límites.

Generalizando este análisis, cualquier cambio que se presente en el SEP produce cambios en la  $S_{sc}$  y, en consecuencia, cambios en la potencia  $S_s$  que finalmente representa una modificación en el nivel de cargabilidad. Los cambios que se produzcan en el SEP y que modifican el valor de  $S_{sc}$  incluyen distribución de potencia entre generadores, generadores operando en sus límites, compensación reactiva, cambios topológicos de la red, movimientos de taps de transformadores, variación de factor de potencia de la carga, entre otros.

Bajo esta perspectiva se plantea la necesidad de determinar, en primera instancia, la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  y el nivel de cargabilidad para posteriormente reconstruir el ET. Este planteamiento se detalla a continuación en el capítulo 3.



### **3. DETERMINACIÓN DE LA CARGABILIDAD Y EQUIVALENTE THÉVENIN EN BASE A LA POTENCIA DE CORTOCIRCUITO**

El presente capítulo se inicia presentando un nuevo indicador de estabilidad de voltaje de largo plazo para un SEP, el cual es determinado en base a la correlación existente entre el voltaje  $V_s$  y la potencia  $S_s$ . Se expone también el análisis del indicador ante variaciones que se presenten en el SEP, permitiendo obtener una metodología de valoración de la cargabilidad del SEP mediante el monitoreo de la trayectoria del indicador propuesto.

A continuación se presentan los métodos obtenidos de los análisis del indicador para determinar tanto la Potencia de Cortocircuito como el Equivalente Thévenin. Se realiza un análisis de desempeño de los métodos propuestos con especial enfoque en la corrección de los problemas descritos en la sección final del capítulo 2.

Finalmente se realiza un análisis complementario de la aplicación de los métodos propuestos en el sistema de prueba de IEEE14 barras, permitiendo de esta manera determinar la aplicabilidad del mismo para SEPs de mayor tamaño.

#### **3.1 Indicador de Estabilidad del Sistema en base a la Relación Potencia-Voltaje ( $VPSI_s$ )**

Como se planteó en el capítulo 1, la propuesta de investigación establece determinar el ET y el nivel de

cargabilidad, en nodos terminales de un SEP, basado en las ecuaciones de potencia considerando la Potencia de Cortocircuito ( $S_{SC}$ ) como espacio paramétrico.

Complementariamente, y como se indicó en el capítulo 2, la estrategia planteada consiste en desarrollar una metodología para la determinación directa de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  de un SEP, en puntos terminales, utilizando mediciones locales. Para el cumplimiento de esta hipótesis se considera determinar nuevas relaciones entre las variables monitoreadas de manera local.

En este sentido, la relación propuesta en esta investigación se desarrolla en base a las variables: Voltaje de Carga Equivalente hacia el Sistema ( $V_S$ ) y Potencia de Carga Equivalente hacia el Sistema ( $S_S$ ) indicadas en la ecuación (2.9) en el capítulo 2.

Estas variables permiten establecer el Indicador de Estabilidad en base a la relación Potencia - Voltaje denominado  $VPS/S$  (por sus siglas en inglés: System Voltage-Power Stability Indicator), el cual será determinado por el procesamiento de mediciones locales consecutivas, tanto de magnitud de voltaje como de potencia de carga, las cuales serán tomadas en nodos terminales del SEP [37].

### **3.1.1 Valoración de la Cargabilidad de un SEP en base a $S_{SC}$**

La máxima cargabilidad de un SEP puede ser determinada considerando el límite de la ecuación (2.20), estableciendo de esta manera el máximo valor de la potencia  $S_{Smax}$  como lo indica la ecuación (3.1).



$$S_{S_{max}} = \frac{1}{2(m+1)} \quad (3.1)$$

Es posible plantear el valor de cargabilidad de un SEP en base a la variable  $x$ , la misma que representa, en por unidad, a la relación entre la potencia actual de un SEP ( $S_{S0}$ ) respecto a la máxima potencia ( $S_{S_{max}}$ ) tal como se indica en la ecuación (3.2).

$$x = \frac{S_{S0}}{S_{S_{max}}} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) permite determinar el valor de  $S_{S0}$  como un valor de potencia prestablecido en función de la cargabilidad, tal como se indica en la ecuación (3.3). Por su parte el término  $x$  varía entre 0 y 1, siendo 1 el valor de cargabilidad máxima como se indica en la ecuación (3.1).

$$S_{S0} = \frac{x}{2(1+m)} \quad (3.3)$$

En la Figura 3.1 se indican los valores de  $S_{S_{max}}$  y  $S_{S0}$  en función del factor de acoplamiento  $m$ , los mismos que corresponden a las ecuaciones (3.1) y (3.3), respectivamente. Para el caso de  $S_{S0}$  la evaluación se realiza para dos valores de  $x$ , los cuales corresponden a 0.3 y 0.8, es decir para el 30% y 80% de la máxima cargabilidad.

De la Figura 3.1, se observa que la evaluación de  $S_{S0}$  representa un lugar geométrico cuyo comportamiento depende del valor de cargabilidad evaluado.

Conforme la evaluación de  $S_{S0}$  se acerca a la máxima cargabilidad (p.ej.  $x=0.8$ ) la misma corresponde a una curva con un grado de concavidad semejante a la correspondiente a  $S_{Smax}$ . Por su parte, cuando la evaluación de  $S_{S0}$  se realiza para valores cercanos al origen (p.ej.  $x=0.3$ ) la misma presenta un comportamiento no lineal para diversos valores de  $m$ .

Esta característica permite obtener un comportamiento adaptativo de la evaluación de la cargabilidad conforme la carga se acerca a los límites del SEP.

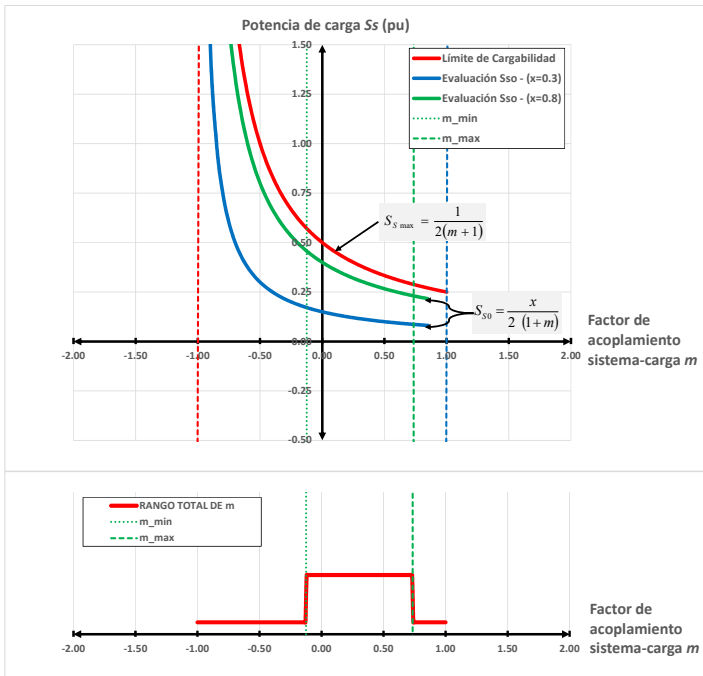


Figura 3.1  $S_{Smax}$  y  $S_{S0}$  para  $x=0.3$  y  $x=0.8$ , en función del factor  $m$

Como se había mencionado, la variable  $x$  tendrá un valor entre  $0 \leq x \leq 1$ . Esta variable determina de una manera directa el valor de cargabilidad de un SEP que abastece a una carga  $S$ , siempre que se conozca la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  y el factor  $m$  como se expresa en la ecuación (3.4). Esta ecuación corresponde a la ecuación (2.20) evaluada en un punto específico de potencia de carga  $S$ .

$$x = \frac{\frac{S}{S_{sc}}}{\frac{1}{2(m+1)}} = \frac{2(m+1)S}{S_{sc}} \quad (3.4)$$

### 3.1.2 Relación entre $S_s$ y $V_s$

Es posible establecer el punto de maximización del voltaje  $V_s$ , tomando la derivada de  $V_s$  desde la ecuación (2.11) con respecto a la potencia  $S_s$  e igualándola a cero como se plantea en la ecuación (3.5).

$$\frac{dV_s}{dS_s} = \frac{\sqrt{2}(A-1)}{4AS_s} \sqrt{A-2mS_s+1} = 0 \quad (3.5)$$

El término  $A$  se define como el discriminante de la ecuación (2.13) y se expresa en la ecuación (3.6).

$$A = \sqrt{1 + 4(m^2 - 1)S_s^2 - 4mS_s} \quad (3.6)$$

Desde la ecuación (3.5) es posible determinar el valor de la potencia  $S_s$  que permite maximizar el voltaje  $V_s$  como se indica en la ecuación (3.7).

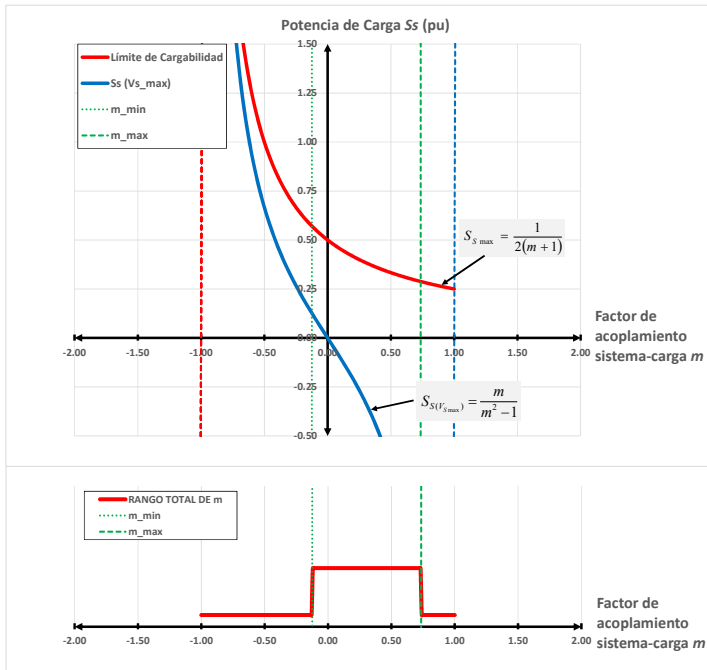
$$S_{S(V_{Smax})} = \frac{m}{m^2 - 1} \quad (3.7)$$

En la Figura 3.2 se exponen los valores de  $S_{Smax}$  y  $S_{S(V_{Smax})}$  en función del factor de acoplamiento  $m$ , los mismos que corresponden a las ecuaciones (3.1) y (3.7), respectivamente.

Como se detalló en la sección 2.3.1, las trayectorias verticales en este gráfico corresponden a las proyecciones de las curvas PV a factor de potencia constante, por lo que se concluye que sobre estas trayectorias la magnitud de  $V_S$  será decreciente desde  $S_{S(V_{Smax})}$  hasta el valor límite  $S_{Smax}$ .

Tomando en consideración el rango posible del factor  $m$  para los SEP ( $-0.12 \leq m \leq 0.73$ ), indicadas en el apartado 2.2.1, es posible determinar las siguientes conclusiones:

- Para el rango  $0 \leq m \leq 0.73$ , la maximización del voltaje  $V_S$  ocurre en valores de  $S_S$  negativos. Esto implica que para cualquier transferencia de potencia desde el sistema hacia la carga, las variables  $V_S$  y  $S_S$  presentan una correlación negativa.
- Para el rango  $-0.12 \leq m < 0$ , la maximización del voltaje  $V_S$  ocurre en valores de  $S_S$  positivos. Esto implica que existe un valor de transferencia de potencia desde el sistema hacia la carga, por sobre el cual las variables  $V_S$  y  $S_S$  presentan también una correlación negativa.



**Figura 3.2**  $S_{Smax}$  y  $S_S(V_{Smax})$  en función del factor  $m$

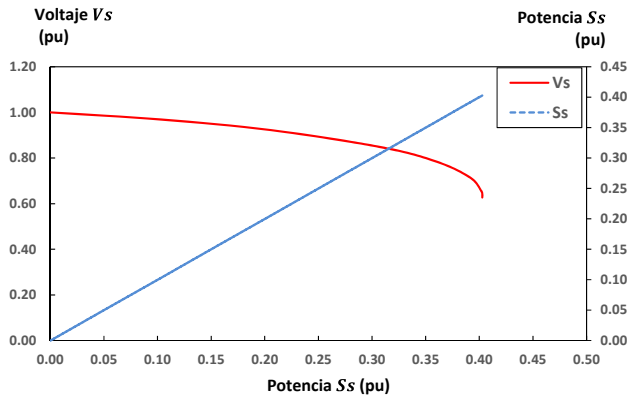
Se debe mencionar que para el rango negativo de  $m$ , que corresponde a cargas con factores de potencia capacitivos, la correlación negativa entre  $V_S$  y  $S_S$  se presenta a partir del 2% hasta el 21% de la máxima cargabilidad para valores de  $m$  de 0 y -0.12, respectivamente.

### 3.1.3 Definición y Maximización de $VPSI_S$

Como se indicó en la sección 3.1.2 las variables  $V_S$  y  $S_S$  están vinculadas mediante una correlación negativa, es decir si  $S_S$  se incrementa entonces  $V_S$  disminuye y

viceversa. Esta relación se mantiene para el mayor rango de valores de operación normales de un SEP.

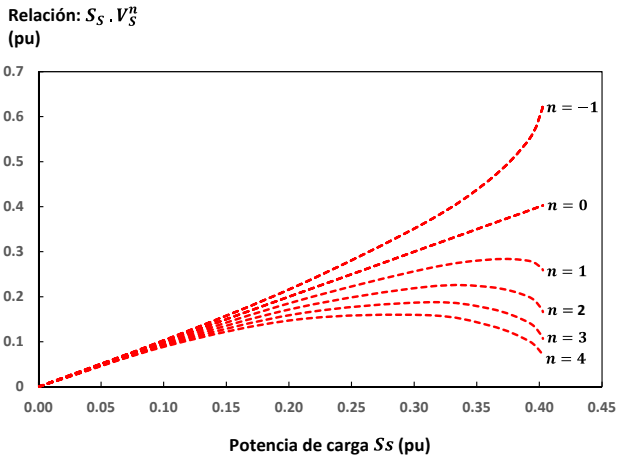
En la Figura 3.3 se muestra el perfil  $V_S$  y  $S_S$  que se obtiene desde el sistema de la Figura 2.2 considerando como ejemplo una carga con 0.97 de factor de potencia en atraso ( $\theta=14^\circ$ ), por simplicidad se desprecia  $R_{TH}$ . Efectivamente se observa la relación inversa entre  $V_S$  y  $S_S$  por lo que es posible establecer un control sobre el producto de estas variables mediante la variación de un exponente  $n$ , el cual se aplica a  $V_S$  únicamente, tal como se exponen en la Figura 3.4.



**Figura 3.3** Voltaje  $V_S$  y Potencia  $S_S$  para  $\theta=14^\circ$  (0.97 atraso)

En la Figura 3.4 se puede observar que para  $n \geq 0$ , la relación entre  $V_S$  y  $S_S$  produce una trayectoria cóncava hacia abajo con la presencia de un punto máximo. Si  $n$  se incrementa el valor máximo se traslada hacia la izquierda, en el valor límite ( $n \rightarrow \infty$ ) el máximo ocurrirá en el origen.

Por su parte si  $n$  es menor a cero la trayectoria presenta una concavidad hacia arriba como se observa en la misma figura. Este análisis se confirma mediante la evaluación de la segunda derivada indicada en el Apéndice 1, donde se expone que el signo de la misma es negativo para valores de  $n$  positivos.



**Figura 3.4** Producto entre  $V_S$  y  $S_S$  - Variación del exponente de voltaje  $n$

Esta característica puede ser usada para generar una relación matemática que presente un cambio en su dirección cuando la variable  $S_S$  se incremente sobre un determinado nivel. Esta relación denominada  $VPS|_S$  es definida como lo expresa la ecuación (3.8).

$$VPS|_S = S_S \cdot V_S^n \quad (3.8)$$

El indicador  $VPSI_s$  se establece como un indicador de Estabilidad en base a la relación Potencia – Voltaje normalizado respecto al Sistema y puede ser expresado considerando la definición de  $V_s$  desde la ecuación (2.11), como se indica en la ecuación (3.9).

$$VPSI_s = S_s \left( \frac{1}{2} - m S_s \pm \sqrt{\frac{1}{4} + (m^2 - 1) S_s^2 - m S_s} \right)^{\frac{n}{2}} \quad (3.9)$$

Es posible establecer el punto de maximización  $VPSI_s$ , tomando la derivada de  $VPSI_s$  desde la ecuación (3.9) con respecto a la potencia  $S_s$  e igualándola a cero como se plantea en la ecuación (3.10).

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \left[ \frac{n(A-1)}{2A} + 1 \right] \left[ \frac{A - 2mS_s + 1}{2} \right]^{\frac{n}{2}} = 0 \quad (3.10)$$

El factor  $A$  corresponde al discriminante de la ecuación de  $V_s$  y se definió en la ecuación (3.6). Resolviendo la ecuación (3.10) respecto a  $n$  se obtiene la ecuación (3.11).

$$n = \frac{2A}{1-A} \quad (3.11)$$

El exponente  $n$  permite generar un máximo  $VPSI_s$  en función del factor  $A$ , el mismo que depende de la potencia  $S_s$  y del factor  $m$ .



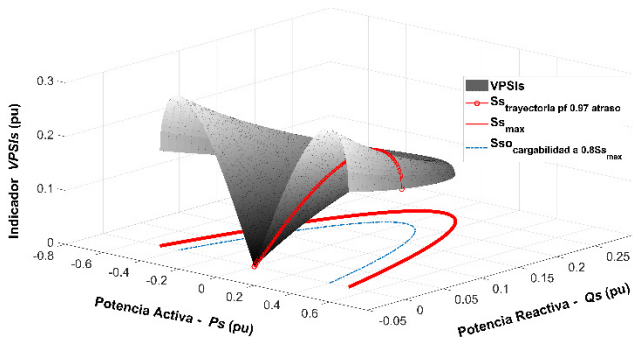
Bajo esta consideración, se determina que es posible generar un máximo  $VPSI_s$  en un valor de cargabilidad prestablecido  $x$ ; para esto se considera  $S_s$  igual a  $S_{s0}$  definido por la ecuación (3.3), posteriormente se calcula el factor  $A$  y el exponente de voltaje  $n$ , mediante las ecuaciones (3.6) y (3.11), respectivamente.

En conclusión, si se define un valor de cargabilidad  $x$ , es posible determinar el exponente  $n$  el cual maximiza al  $VPSI_s$  en este valor de cargabilidad. Esta condición se muestra en la Figura 3.5 donde se determina el lugar geométrico para el indicador  $VPSI_s$  para un valor de cargabilidad ejemplo del 80% y para sistemas eléctricos con valores de  $k$  igual a 0 y 0.3.

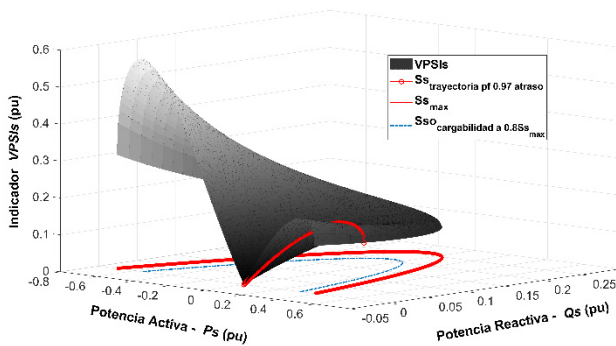
Adicionalmente, en la Figura 3.5 se exponen dos proyecciones en el plano  $P_s$ - $Q_s$ :

- Las proyecciones en línea continua roja, corresponden a la máxima cargabilidad del sistema y representan los máximos dominios de solución del flujo de potencia indicados en la Figura 2.3.
- Las proyecciones en línea entrecortada azul, corresponden a los puntos donde  $VPSI_s$  se maximiza y se encuentran al 80% de las máximas cargabilidades considerando una trayectoria a factor de potencia constante.

Finalmente en la Figura 3.5 se visualiza la trayectoria del  $VPSI_s$  para un factor de potencia de 0.97 de factor de potencia en atraso ( $\theta=14^\circ$ ) y efectivamente se observa la maximización del mismo al 80% de la máxima cargabilidad.



(a) SEP con  $k=0$



(b) SEP con  $k=0.3$

Figura 3.5 Lugar geométrico  $VPSIs$  para un 80% de cargabilidad

### 3.1.4 Indicador local *VPSI* y relación con *VPSI<sub>s</sub>*

Si se consideran valores reales del voltaje  $V$  y de la potencia de carga  $S$ , medidos en una barra terminal de un SEP; la ecuación (3.8) puede ser sobrescrita como se indica en la ecuación (3.12).

$$VPSI_s = \left( \frac{S}{S_{SC}} \right) \left( \frac{V}{E_{TH}} \right)^n = VPSI \frac{Z_{TH}}{E_{TH}^{n+2}} \quad (3.12)$$

En esta Ecuación se define el indicador local *VPSI* (por sus siglas en inglés Voltage-Power Stability Indicator) como se expresa en la ecuación (3.13).

$$VPSI = SV^n \quad (3.13)$$

El indicador *VPSI* se determina mediante los valores reales de las magnitudes de  $V$  y  $S$  en una barra de carga, de esta manera el mismo corresponde a un indicador que necesita únicamente magnitudes de mediciones locales.

Con la finalidad de establecer el análisis variacional de *VPSI<sub>s</sub>* y de *VPSI*, se plantea linealizar la ecuación (3.12) como se indica en la ecuación (3.14). La linealización planteada permite mejorar el desempeño de los indicadores ante pequeñas variaciones de carga en niveles bajos de cargabilidad.

$$\ln(VPSI_s) = \ln(VPSI) + \ln(Z_{TH}) - (n+2)\ln(E_{TH}) \quad (3.14)$$

### 3.1.5 Análisis variacional de $VPSI_s$ y $VPSI$

La ecuación (3.15) describe la trayectoria del  $\ln(VPSI_s)$ , considerando pequeños desplazamientos alrededor de un punto de operación. Los desplazamientos se consideran desde un punto inicial de operación asignado como 1, hacia un punto final 2.

$$\Delta \ln(VPSI_s) = \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial S} \Delta S + \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial Z_{TH}} \Delta Z_{TH} + \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial E_{TH}} \Delta E_{TH} \quad (3.15)$$

Las variables  $\Delta S$ ,  $\Delta Z_{TH}$  y  $\Delta E_{TH}$  se encuentran definidas como lo expresa la ecuación (3.16). La variable  $\Delta S$  corresponde a variaciones de la carga, mientras que las variables  $\Delta Z_{TH}$  y  $\Delta E_{TH}$  corresponden a variaciones en el SEP.

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_2 - S_1; \\ \Delta Z_{TH} &= Z_{TH2} - Z_{TH1}; \\ \Delta E_{TH} &= E_{TH2} - E_{TH1} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Las derivadas parciales de la ecuación (3.15) respecto a  $S$ ,  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$ , corresponden a las indicadas en la ecuación (3.17). En el Apéndice 1 se detalla el proceso para obtener estas derivadas parciales.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial S} &= \frac{E_{TH}^n}{VPSI} \frac{dVPSI_s}{dS} \\ \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial Z_{TH}} &= \frac{SE_{TH}^n}{Z_{TH} VPSI} \frac{dVPSI_s}{dS} \\ \frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial E} &= -\frac{2SE_{TH}^{n-1}}{VPSI} \frac{dVPSI_s}{dS} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Si se consideran estas derivadas parciales, la ecuación (3.15) puede ser replanteada como se indica en la ecuación (3.18).

$$\ln\left(\frac{VPSI_{S_2}}{VPSI_{S_1}}\right) = \frac{E_{TH1}^n S_1}{VPSI_1} \left( \frac{\Delta S}{S_1} + \frac{\Delta Z_{TH}}{Z_{TH1}} - 2 \frac{\Delta E_{TH}}{E_{TH1}} \right) \frac{dVPSI_s}{dS_s} \quad (3.18)$$

Desde la ecuación (3.18) es posible obtener una expresión para el término  $\frac{dVPSI_s}{dS_s}$  como se indica en la ecuación (3.19).

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{VPSI_1}{E_{TH1}^n S_1} \frac{\left[ \ln\left(\frac{VPSI_2}{VPSI_1}\right) + \ln\left(\frac{Z_{TH2}}{Z_{TH1}}\right) - (n+2) \ln\left(\frac{E_{TH2}}{E_{TH1}}\right) \right]}{\left( \frac{\Delta S}{S_1} + \frac{\Delta Z_{TH}}{Z_{TH1}} - 2 \frac{\Delta E_{TH}}{E_{TH1}} \right)} \quad (3.19)$$

Esta ecuación permite definir el comportamiento de  $VPSI_s$  para variaciones en la carga y para variaciones en el SEP, así como permite definir una nueva metodología para la determinación de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y del ET basado en la maximización de  $VPSI_s$  como se explicará en el apartado 3.2.

### 3.1.5.1 Análisis y comportamiento de $VPSI_s$ y $VPSI$ ante variaciones en la carga

Si se considera que se presenta un cambio en la carga y que el SEP se mantiene constante, i.e.  $\Delta S \neq 0$  y  $\Delta Z_{TH} = \Delta E_{TH} = 0$ , la ecuación (3.19) se reduce a la ecuación (3.20). Bajo estas consideraciones el sistema presenta un solo valor de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ .

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{VPSI_1}{E_{TH}^n \Delta S} \ln \left( \frac{VPSI_2}{VPSI_1} \right) \quad (3.20)$$

Se observa que la evaluación de la derivada en el punto de maximización del  $VPSI_s$ , es función directa de la relación logarítmica entre  $VPSI_2$  y  $VPSI_1$ , ambos determinados únicamente mediante magnitudes de variables locales. En este sentido, se determina que la maximización del  $VPSI_s$  se presenta cuando la diferencia del  $VPSI$  entre dos puntos de medición se aproxima a cero, i.e.  $VPSI_2 = VPSI_1$ , que por su parte corresponde a una condición de maximización del  $VPSI$ .

Es decir, que la maximización del  $VPSI_s$  ocurre cuando se produce la maximización de  $VPSI$ , esta condición se puede ratificar si se observa que la relación entre  $VPSI_s$  y  $VPSI$  indicada en la ecuación (3.12) se reduce a la relación lineal  $VPSI_s = C \cdot VPSI$ , con el término  $C$  representando al SEP que se mantiene constante, i.e.

$$C = \frac{Z_{TH}}{E_{TH}^{n+2}}.$$

### 3.1.5.2 Análisis y comportamiento de $VPSI$ y $VPSI_s$ ante variaciones en el SEP

Si se considera que la carga se mantiene constante y que se presenta un cambio en el SEP, i.e.  $\Delta S = 0$  y  $\Delta Z_{TH} \neq \Delta E_{TH} \neq 0$ , la ecuación (3.19) se reduce a la ecuación (3.21).

Estas variaciones producen un cambio en la potencia de cortocircuito desde un valor de  $S_{SC1}$  a  $S_{SC2}$ , afectando la cargabilidad del sistema.

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{VPSI_s}{E_{TH1}^n S_1} \left[ n \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) + \ln \left( \frac{Z_{TH2}}{Z_{TH1}} \right) - (n+2) \ln \left( \frac{E_{TH2}}{E_{TH1}} \right) \right] \quad (3.21)$$

$$\left( \frac{\Delta Z_{TH}}{Z_{TH1}} - 2 \frac{\Delta E_{TH}}{E_{TH1}} \right)$$

En este caso no se presenta la posibilidad de realizar una evaluación de manera directa de la maximización de  $VPSI_s$ . Esta limitación se produce porque el sistema presenta algunas opciones de solución para las variables  $E_{TH}$  y  $Z_{TH}$ , es decir que estas variables pueden cambiar de manera independiente o simultánea a fin de establecer el nuevo valor de potencia de cortocircuito  $S_{SC2}$ .

Se debe señalar que los cambios en la impedancia son menos comunes de suceder ya que generalmente la impedancia del sistema se mantiene relativamente constante, a menos que la operación de apertura de un interruptor dentro del SEP se haya presentado. [44]. Complementariamente, los cambios en los voltajes de generación, cuando suceden, son rápidos y se consideran que afectan en mayor proporción al voltaje Thévenin [44].

Esta condición permite plantear un análisis considerando dos posibles opciones de solución, la primera cuando  $E_{TH}$  se mantiene constante y la segunda cuando  $Z_{TH}$  se mantiene constante, como lo expresan las ecuaciones (3.22) y (3.23), respectivamente.

$$Z_{TH} = \frac{V}{S} \left[ -mV \pm \sqrt{(m^2 - 1)V^2 + E_{TH}^2} \right] \quad (3.22)$$

$$E_{TH} = \sqrt{V^2 + 2mSZ_{TH} + \left( \frac{SZ_{TH}}{V} \right)^2} \quad (3.23)$$

Sin embargo, como se detalla en la sección 3.3, donde se verifica el desempeño de la metodología planteada, se establece que las soluciones pueden encontrarse entre un rango delimitado por estas dos ecuaciones, por lo que la consideración de mantener constante a uno de los parámetros del ET no es totalmente adecuada.

## **3.2 Determinación de la potencia de cortocircuito $S_{SC}$ y Equivalente Thévenin en base a $VPSI_s$**

### **3.2.1 Determinación de $S_{SC}$ y el nivel de cargabilidad de un SEP**

Considerando que el exponente de voltaje  $n$  permite generar un  $VPSI_s$  máximo en un valor prestablecido de cargabilidad  $x$ , como se detalla en la sección 3.1.3, se plantea monitorear la derivada de  $VPSI_s$  en función de cambios en el nivel de cargabilidad del SEP, de tal manera que permita determinar la presencia del punto  $S_s$  en el que se presente la maximización del  $VPSI_s$ , y sobre esta maximización establecer el valor de la potencia de cortocircuito.

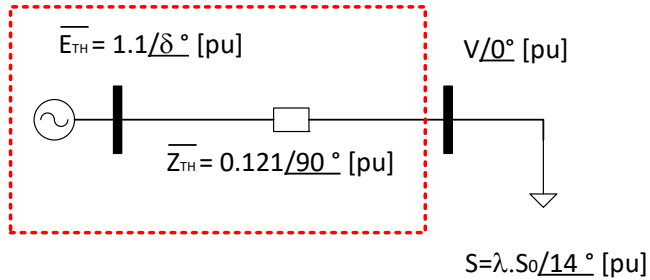


Para esto se considera que se presenta un cambio en la carga y que el SEP se mantiene constante, es decir que se realiza la evaluación de la maximización de  $VPS/S$  en base a la ecuación (3.20). Desde el punto de maximización determinado, la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  es directamente calculada en base a la ecuación (3.24), la cual se define desde la ecuación (2.9).

$$S_{sc} = \frac{S}{S_{s0}} \quad (3.24)$$

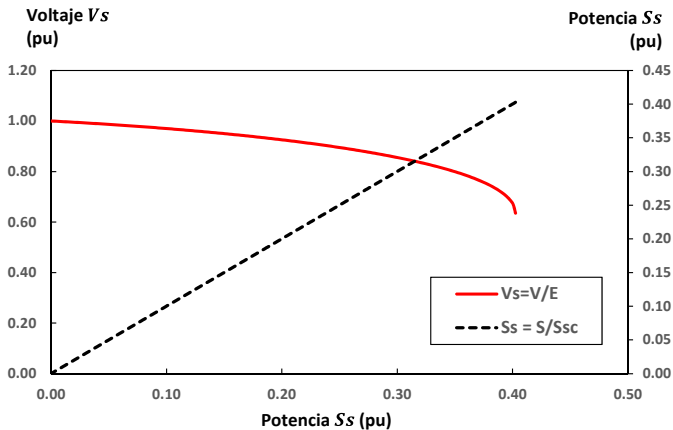
Con respecto al nivel de cargabilidad, se debe señalar que en el proceso de evaluación del máximo  $VPS/S$  considerando el barrido del valor de cargabilidad  $x$ , se requiere el cálculo del exponente de voltaje  $n$  y de la potencia  $S_{s0}$  de manera secuencial, por lo que de manera intrínseca se tiene el valor de cargabilidad en la que el SEP se encuentra evaluado. Sin embargo, en caso de requerirse una evaluación posterior de la cargabilidad una vez determinada la  $S_{sc}$ , la misma puede calcularse mediante la ecuación (3.4).

A continuación se detalla un ejemplo descriptivo del esquema planteado, para esto se considera el sistema de la Figura 2.2 trasladado a valores reales como se muestra en la Figura 3.6. Sobre este sistema se realiza un incremento progresivo de carga, mediante el factor  $\lambda$ , hasta llegar al punto de máxima cargabilidad.

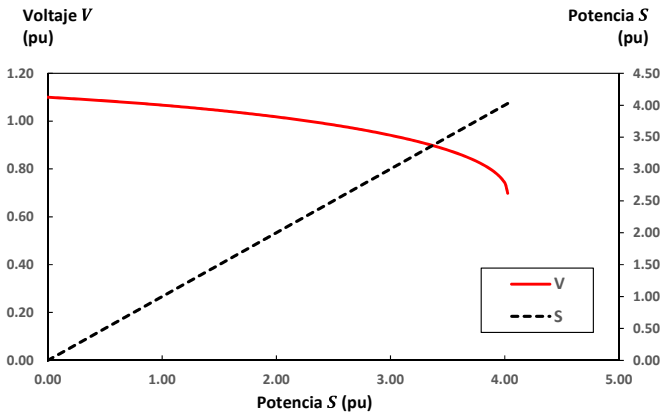


**Figura 3.6** Sistema de la Figura 2.2 con valores reales.

En la Figura 3.7 se exponen los perfiles de  $V_S$  y  $S_S$  en función de  $S_S$  así como los perfiles de  $V$  y  $S$  en función de  $S$ , determinados para el sistema planteado. Se debe indicar que la Figura 3.7(a) corresponde a la Figura 3.3.



**(a)**  $V_S$  y  $S_S$  – en base de  $S_{SC}$



(b)  $V$  y  $S$  – variables reales

**Figura 3.7** Perfiles de Voltaje y Potencia

Se debe recordar que las variables  $V_s$  y  $S_s$  se encuentran normalizadas respecto a la capacidad propia del SEP, mientras que las variables  $V$  y  $S$  se encuentran en por unidad del voltaje y potencia bases reales del SEP bajo análisis, como se indicó en la sección 2.1.2.

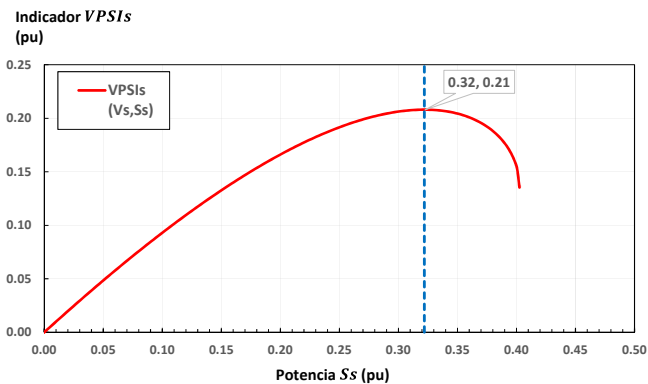
En el sistema planteado se consideran incrementos del nivel de cargabilidad y se realiza la evaluación de la derivada de  $VPS|_s$  entre dos puntos sucesivos. Mediante el monitoreo de la ecuación (3.20), se determina el punto de carga en el que se presenta la maximización de  $VPS|_s$ .

A continuación se reporta la evaluación realizada considerando que la carga se encuentra en los siguientes valores:  $S=3.23$  pu y  $V=0.92$  pu. Se determina que, para que en este punto se presente un máximo  $VPSI_S$ , se requiere de un valor de cargabilidad del 80% ( $x=0.8$ ) con el cual se presentan los siguientes valores:

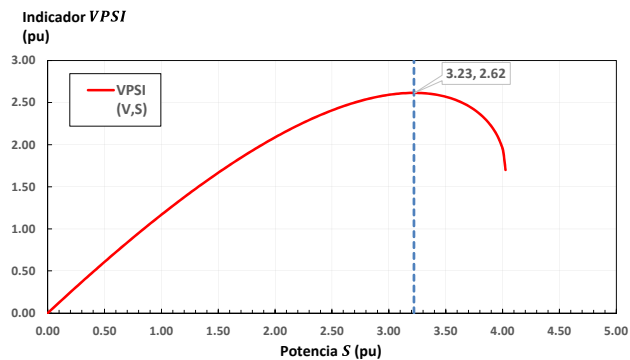
- $m = 0.242$ , en base a la ecuación (2.16).
- $S_{Smax} = 0.403$ , en base a la ecuación (3.1).
- $S_{S0} = 0.322$ , en base a la ecuación (3.3).
- $A = 0.546$ , en base a la ecuación (3.6).
- $n = 2.401$ , en base a la ecuación (3.11).

Como se analizó en la sección 3.1.5.1, para el caso de cambios en la carga con el SEP constante, la maximización del  $VPSI_S$  ocurre cuando se produce la maximización del  $VPSI$ , esta condición se observa en la Figura 3.8.

Se debe señalar que el perfil de la Figura 3.8.a. corresponde a la visualización de la trayectoria del  $VPSI_S$  indicado en la Figura 3.5.a, donde efectivamente se observa la maximización del mismo al 80% de la máxima cargabilidad.



(a)  $VPSI_s$  vs  $S_s$  – en base de  $S_{Sc}$



(b)  $VPSI$  vs  $S$  – valores reales

**Figura 3.8** Perfiles de indicadores en función de potencia

Es decir que si la carga presenta un valor de  $S = 3.23$  pu, se determina que el valor de potencia  $S_{S0}$  en el cual

se maximizarían  $VPSI$  y  $VPSI_s$ , corresponde a un valor de  $S_{S0} = 0.323$  pu.

Sobre este valor determinado y aplicando la ecuación (3.24) se establece que la potencia de cortocircuito es igual a  $S_{sc} = \frac{3.230}{0.323} = 10$  pu .

Por su parte, la cargabilidad en el punto de maximización corresponde al 80%.

### **3.2.2 Determinación del Equivalente Thévenin en base a $S_{sc}$**

Una vez que se conoce la potencia  $S_{S0}$  y la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$ , es posible determinar el ET. En primera instancia se evalúa el voltaje  $V_s$  mediante la ecuación (2.11), la misma que depende únicamente de los términos  $m$  y  $S_{S0}$ . Posteriormente se determina el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  en base a la ecuación (3.25), la cual se determina desde la ecuación (2.9).

$$E_{TH} = \frac{V}{V_s} \quad (3.25)$$

Para el caso planteado, aplicando la ecuación (2.11) se determina que el voltaje  $V_s$  corresponde a  $V_s = 0.834$ .

Como el voltaje de la carga corresponde a  $V = 0.92$ , mediante la ecuación (3.25) se establece que el voltaje equivalente Thévenin corresponde a un valor de

$$E_{TH} = \frac{0.92}{0.834} = 1.1 \text{ pu.}$$

Finalmente la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  es calculada desde la definición de la potencia de cortocircuito, tal como se indica en la ecuación (3.26).

$$Z_{TH} = \frac{E_{TH}^2}{S_{SC}} \quad (3.26)$$

Para el caso planteado se determina que la impedancia Thévenin corresponde a un valor de  $Z_{TH} = \frac{1.1^2}{10} = 0.121 pu$ .

### **3.2.3 Algoritmo para determinar el nivel de cargabilidad y Equivalente Thévenin en base a $S_{sc}$**

Como se analizó en la sección 3.2.1, para el caso de cambios en la carga con el SEP constante, la maximización  $VPSI_s$  ocurre cuando se produce la maximización de  $VPSI$ . Tomando en cuenta esta consideración, se plantea realizar un esquema de monitoreo del  $VPSI$  considerando un barrido del valor de cargabilidad  $x$  mediante la ecuación (3.20), *considerada como criterio de error*, para establecer el valor de potencia donde se presente un máximo  $VPSI$  y consecuentemente un máximo  $VPSI_s$ .

Una vez que se conoce la potencia  $S_{s0}$  donde se presenta la maximización del  $VPSI$ , se calcula la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  y finalmente es posible determinar el ET.

El algoritmo planteado trabaja en base proceso indicado en la Figura 3.9 y descrito a continuación:

---

**Algoritmo para determinar  $S_{sc}$  y el Equivalente Thévenin en nodos terminales de un SEP, considerando variables locales**

---

Acorde a la naturaleza del SEP bajo estudio se asume un valor  $\varphi_0$ , por ejemplo para sistemas EHV  $\varphi_0=90$ .

**Paso 1)** Tomar los valores de  $V^i, V^{i+1}, P^i, P^{i+1}, Q^i$  y  $Q^{i+1}$  desde dos mediciones:  $i, i+1$ .

Calcular el ángulo de la carga  $\theta^i, \theta^{i+1}$ .

**Paso 2)** Iniciar desde un valor de cargabilidad inicial  $x=x_0$  hasta  $x<1$ , y calcular los siguientes términos:

**Paso 2.1)**  $m^i, m^{i+1}, S_{s0}^i, S_{s0}^{i+1}, A^i, A^{i+1}, n^i$  y  $n^{i+1}$  aplicando las ecuaciones (2.16), (3.3), (3.6) y (3.11), respectivamente.

**Paso 2.2)**  $VPSI^i$  y  $VPSI^{i+1}$  aplicando la ecuación (3.13) y evaluar el error mediante la ecuación (3.20)  $\rightarrow$

$$e = \ln \left( \frac{VPSI^{i+1}}{VPSI^i} \right).$$

**Paso 2.3)** Incrementar el margen de cargabilidad  $x$  y retornar al paso 2.1.

**Paso 3)** Determinar el valor de  $S_{s0}$  en el punto donde se presenta el mínimo error y calcular  $S_{sc}$  mediante la ecuación (3.24). Este punto determina la cargabilidad del SEP.

**Paso 4)** Determinar  $V_s$  en función del valor de  $S_s$ , mediante la ecuación (2.11).

**Paso 5)** Determinar  $E_{TH}$  en función del valor de  $V_s$ , mediante la ecuación (3.25).

**Paso 6)** Determinar  $Z_{TH}$  en función del valor de  $E_{TH}$  y  $S_{sc}$ , mediante la ecuación (3.26).

---



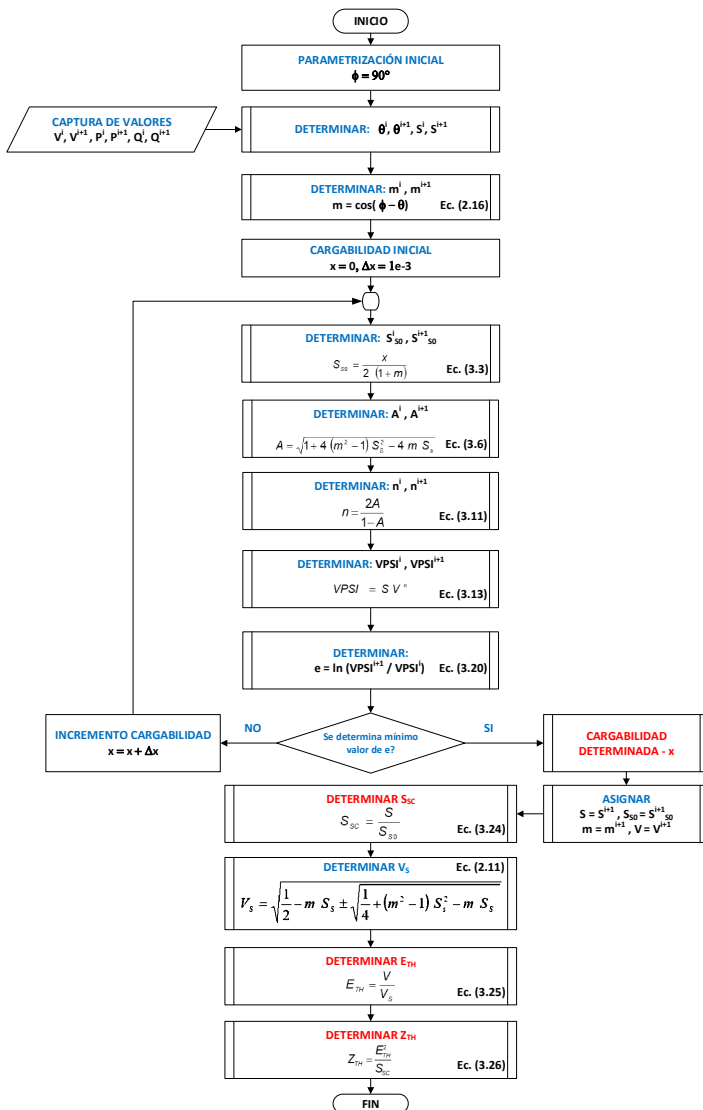


Figura 3.9 Diagrama de flujo de la metodología en base a  $S_{sc}$

### **3.3 Desempeño del algoritmo planteado**

A continuación se presenta la evaluación del algoritmo planteado en el apartado 3.2, con la finalidad de verificar el desempeño del mismo con respecto a los esquemas actualmente existentes, especialmente contrastando con los modelos planteados en [4] y [6], indicados en el capítulo 2.

En este sentido, se plantea la implementación del algoritmo propuesto con respecto al mismo SEP en el que se desarrollaron las metodologías antes mencionadas. El SEP corresponde al analizado en la sección 2.4, modelo que es tomado de la referencia [24] y detallado en el Anexo 1.

Sobre este modelo inicial, a continuación se desarrolla un análisis de flujos de continuación, de tal manera que permita observar que la metodología propuesta supera los problemas asociados en la determinación del ET detallados en las secciones 2.4.1 y 2.4.2. En este sentido, se plantean los siguientes análisis:

- Análisis con modelación de fuentes ideales y diversos modelos de carga, como se realizó en la sección 2.4.1 y se detalla en la Figura 2.13.
- Análisis con modelación de fuentes reales como se realizó en la sección 2.4.2 y se detalla en la Figura 2.21.
- Análisis del SEP ante cambios topológicos y contingencias sobre el sistema modelado en la Figura 2.21.

### **3.3.1 Análisis con variación de factor de potencia de la carga**

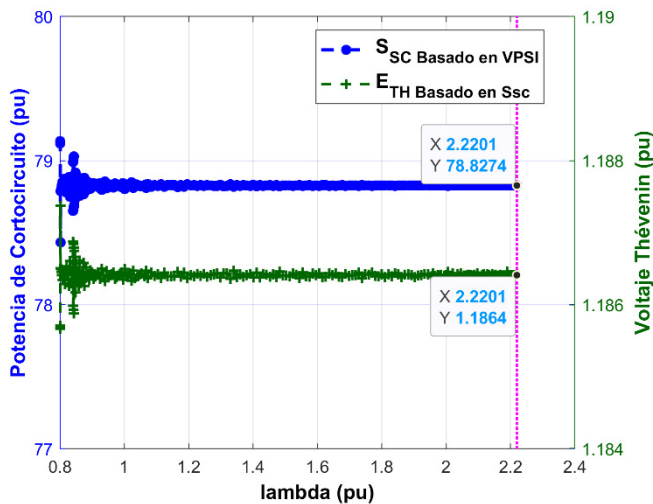
Al igual que se analizó en el apartado 2.4.1, se considera al SEP con los generadores modelados como fuentes ideales y se plantean los dos modelos de carga: modelo ZIP con factor de potencia constante y modelo exponencial con factor de potencia variable.

Se consideran también las mismas condiciones iniciales planteadas para la simulación, por lo que la máxima cargabilidad se alcanzará en los mismos valores ya indicados en la sección 2.4.1.

#### **Modelo ZIP – Factor de potencia constante**

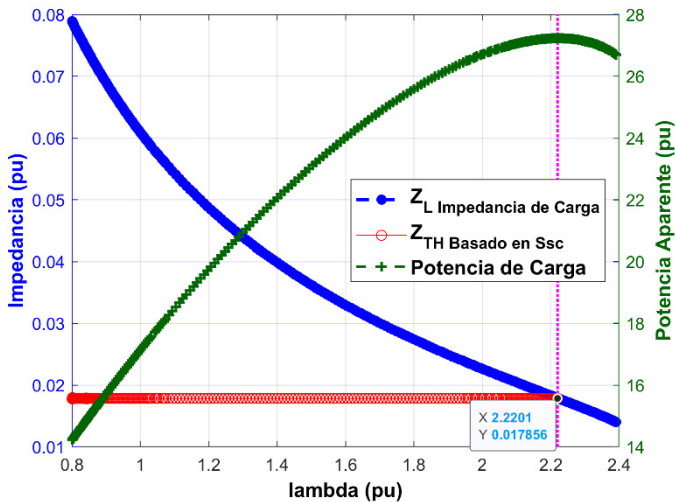
En la Figura 3.10 se presenta la evaluación de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  determinados mediante el algoritmo propuesto en la sección 3.2.3. En la Figura 3.11 se exponen la impedancia Thévenin determinada en base a la  $S_{SC}$ , en esta figura se visualizan también la potencia de carga y su impedancia reflejada en pu.

Como se observa en la Figura 3.10 la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ , determinada mediante la metodología planteada, entrega un valor constante de 78.83 pu. Consecuentemente se obtiene un voltaje Thévenin  $E_{TH}$  constante de 1.186 pu.



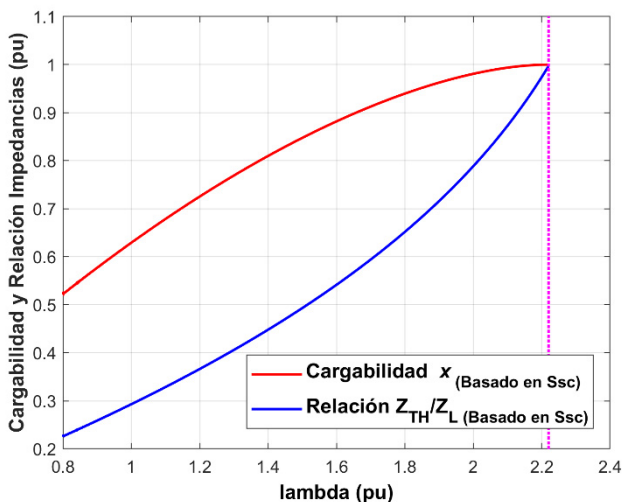
**Figura 3.10** Potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y voltaje Thévenin  $E_{TH}$  - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante

De la Figura 3.11 se observa que, al igual que lo obtenido con las metodologías propuestas en [4] y [6], expuestas en la Figura 2.14, la máxima potencia transferida hacia la carga coincide cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin, lo cual valida el planteamiento de establecer la máxima cargabilidad de un SEP mediante la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{TH} \geq 1$ ) para este modelo de carga. Por supuesto la impedancia Thévenin corresponde al mismo valor determinado mediante [4] y [6].



**Figura 3.11** Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y máxima cargabilidad - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante

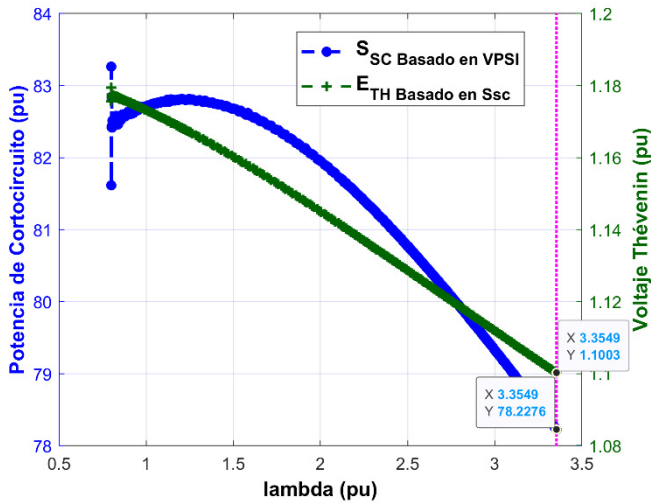
Por otra parte, en la Figura 3.12 se puede observar que la determinación del nivel de cargabilidad en base a  $S_{SC}$  varía dentro de un rango aproximado del 50-100% de la máxima cargabilidad, mientras que la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{TH}$ ) presenta un rango aproximado del 20-100%. Esto permite concluir que la relación de impedancias requiere un escalamiento adecuado, considerando el comportamiento no lineal de la potencia, con la finalidad de establecer el nivel de cargabilidad del SEP de manera apropiada.



**Figura 3.12** Cargabilidad  $x$  en base a  $S_{sc}$  y Relación de Impedancias - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia constante

### **Modelo Exponencial – Factor de potencia variable**

En la Figura 3.13 se presenta la evaluación de la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  y el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  determinados mediante el algoritmo propuesto en la sección 3.2.3. Complementariamente en la Figura 3.14 se exponen la impedancia Thévenin determinada en base a la  $S_{sc}$ , en esta figura se visualizan también la potencia de carga en pu.

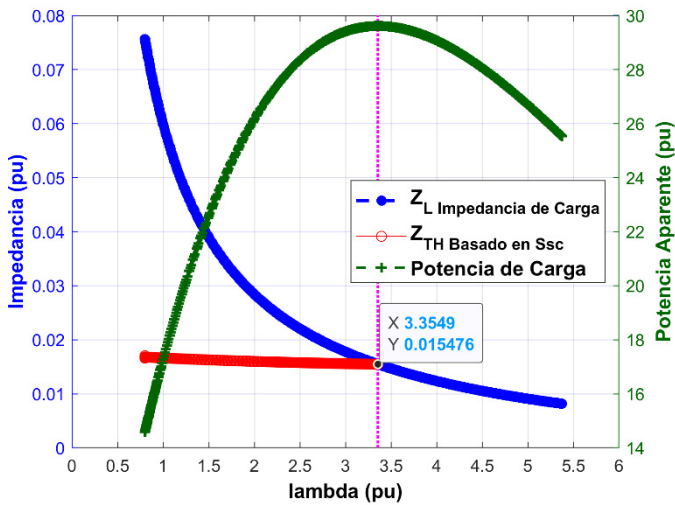


**Figura 3.13** Potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y voltaje Thévenin  $E_{TH}$  - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable.

Como se observa en la Figura 3.13 la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ , determinada mediante la metodología planteada, entrega un valor variable conforme se incrementa el factor lambda alcanzando un valor de 78.2 pu al alcanzar la máxima cargabilidad del SEP. Por su parte el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  es decreciente y tiene un valor de 1.1 pu en la máxima cargabilidad.

De la Figura 3.14 se observa que la máxima potencia transferida hacia la carga coincide cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin, contrario a lo determinado por las metodologías propuestas en [4] y [6] y expuestas en la

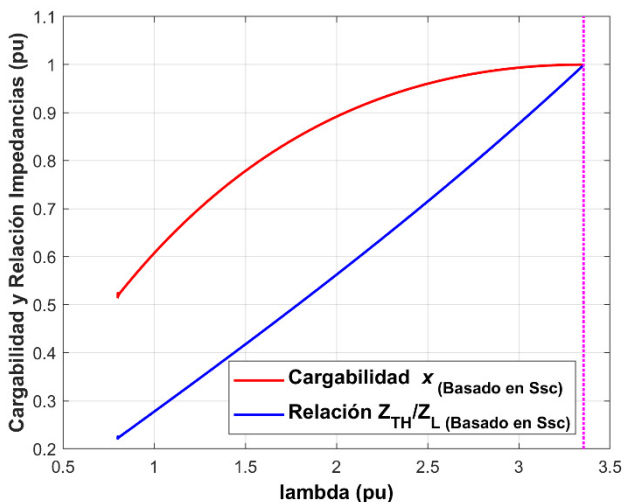
Figura 2.16, lo cual determina un mejor comportamiento de la determinación del ET mediante la metodología propuesta.



**Figura 3.14** Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y Potencia de Carga - generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable

Es decir que el algoritmo propuesto corrige de manera intrínseca el reajuste requerido en la relación de impedancias cuando se considere variaciones del factor de potencia de la carga, tal como se estableció en la ecuación (2.31).





**Figura 3.15** Cargabilidad  $x$  en base a  $S_{sc}$  y Relación de Impedancias – generadores como fuentes ideales y carga con factor de potencia variable

En la Figura 3.15 se puede observar la determinación del nivel de cargabilidad en base a  $S_{sc}$  y la relación de impedancias  $Z_L / Z_{TH}$ . El análisis es similar al realizado para el modelo de carga con factor de potencia constante, es decir que se observa una mejor determinación de la cargabilidad del SEP mediante la potencia de cortocircuito; más aún, se *observa un comportamiento casi lineal de la relación de impedancias lo cual contrasta con el nivel de cargabilidad que sigue un comportamiento no lineal conforme se incrementa el factor lambda.*

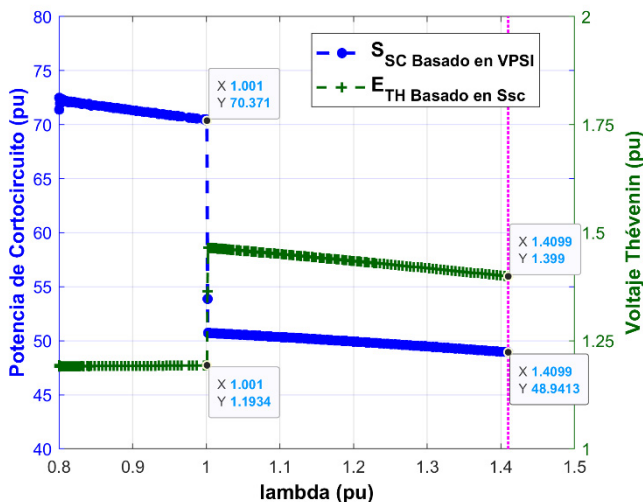
### **3.3.2 Análisis con modelación de generadores como fuentes reales**

Al igual que se analizó en el apartado 2.4.2, a continuación se considera a los generadores modelados como fuentes reales, es decir considerando sus sistemas de control asociados así como sus límites de equipamiento, tal como se indica en la Figura 2.21. La carga es planteada con el modelo exponencial utilizado en la sección 3.3.1.

En la Figura 3.16 se presenta la evaluación de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  determinados mediante el algoritmo propuesto en la sección 3.2.3. Complementariamente en la Figura 3.17 se expone la impedancia Thévenin determinada en base a la  $S_{SC}$ , en esta figura se visualizan también la potencia de carga y su impedancia reflejada en pu.

Se debe señalar que, como se observa en la Figura 3.17, la máxima potencia transferida hacia la carga coincide cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin, contrario a lo determinado por las metodologías propuestas en [4] y [6] y expuestas en la Figura 2.22, lo cual establece nuevamente un mejor comportamiento de la determinación del ET mediante la metodología propuesta.

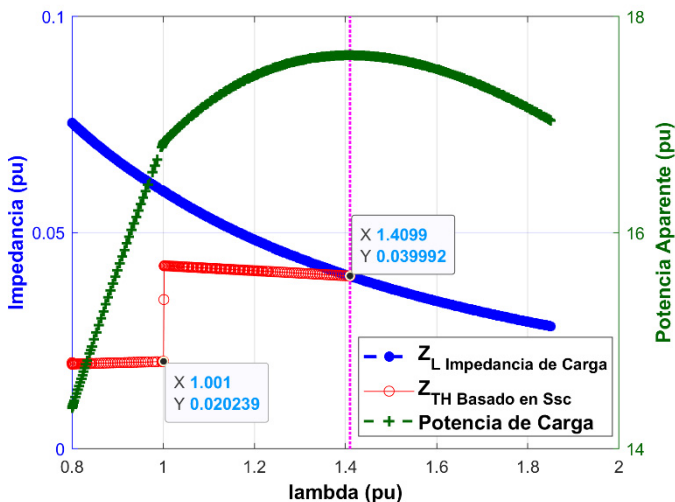
En las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18, se observa que para lambda igual a 1 se presenta una discontinuidad en los valores determinados, en este punto el generador G2 alcanza sus límites y consecuentemente para valores superiores de cargabilidad el generador G2 ya no mantiene constante el voltaje en la Barra B2.



**Figura 3.16** Potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y voltaje Thévenin  $E_{TH}$  - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable.

Considerando los valores determinados previo a la discontinuidad se observa que la potencia  $S_{SC}$  presenta un valor de 70.37 pu (ver Figura 3.16) y registra un valor de 48.92 pu al alcanzar la máxima cargabilidad; por su parte el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  inicia con un valor de 1.193 y presenta un valor de 1.398 pu en la máxima cargabilidad.

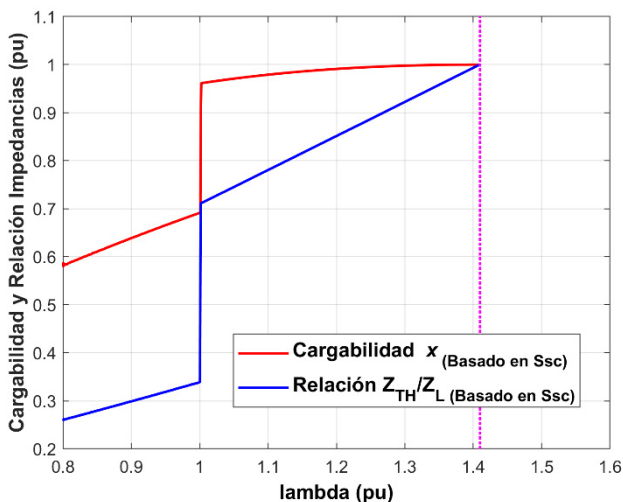
De la Figura 3.17 se observa que la impedancia Thévenin presenta un valor inicial de 0.02024 pu y se incrementa a 0.03996 pu en la máxima cargabilidad.



**Figura 3.17** Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y Potencia de Carga - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable

Es decir que, al alcanzar los límites de generación, se presenta un incremento en el voltaje  $E_{TH}$  con la finalidad de establecer el ET adecuado. Sin embargo, la impedancia  $Z_{TH}$  también se incrementa y en conjunto con  $E_{TH}$  establecen una disminución de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ , incrementando de esta manera la cargabilidad del SEP como era esperado.

En la Figura 3.18 se puede observar la determinación del nivel de cargabilidad en base a  $S_{SC}$  y la relación de impedancias  $Z_L / Z_{TH}$ .



**Figura 3.18** Cargabilidad  $x$  en base a  $S_{sc}$  y Relación de Impedancias - generadores como fuentes reales y carga con factor de potencia variable

De la misma manera, que para los casos anteriormente analizados, se observa una mejor determinación de la cargabilidad del SEP mediante la potencia de cortocircuito.

Se observa un comportamiento casi lineal de la relación de impedancias inclusive después de que el generador G2 ha alcanzado sus límites. Esta condición contrasta con el nivel de cargabilidad que siempre sigue un comportamiento en base a la distribución no lineal de potencia activa y reactiva entre los generadores de un SEP, lo cual se hace más presente cuando los generadores alcanzan sus límites.

### **3.3.3 Análisis ante cambios topológicos y contingencias en el SEP**

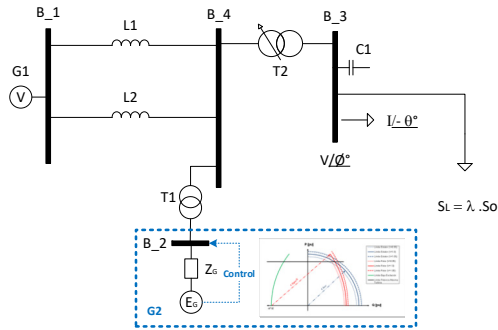
Como se planteó en la sección 2.4.3, cualquier cambio que se presente en el SEP produce cambios en la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  que finalmente representa una modificación en el nivel de cargabilidad conforme lo establece la ecuación (2.20). Los cambios que se produzcan en el SEP y que modifican el valor de  $S_{sc}$  incluyen variación de factor de potencia de la carga, compensación reactiva, distribución de potencia entre generadores, cambios topológicos de la red, movimientos de taps de transformadores, generadores operando en sus límites, entre otros.

Bajo el esquema del algoritmo propuesto en el apartado 3.2, se plantea determinar la potencia de cortocircuito  $S_{sc}$  y el nivel de cargabilidad para posteriormente reconstruir el ET, para diversos estados operativos del SEP de la Figura 2.21, la misma que para claridad de los eventos a simularse se muestra nuevamente.

En este sentido, se plantean simulaciones de flujos de potencia con la carga planteada mediante el modelo exponencial indicado en la sección 3.3.1 y considerando los siguientes eventos a ser simulados:

**E.1** Desconexión de la mitad de la compensación capacitiva C1, en la barra de carga.

**E.2** Incremento del voltaje de generación del Generador G2 desde 1 a 1.03 pu.

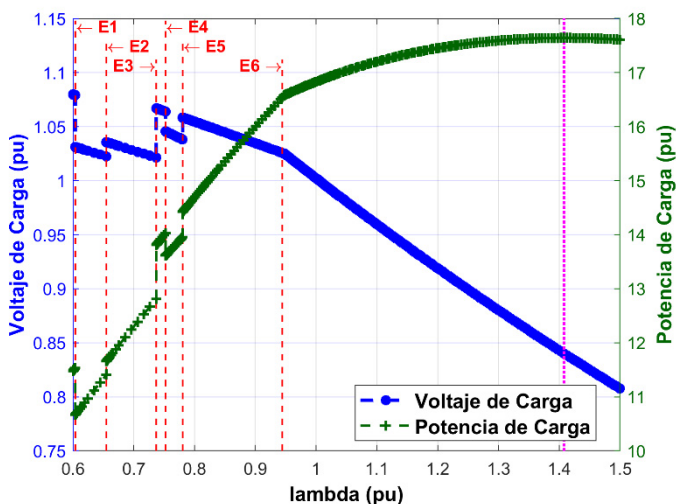


**Figura 2.17.** Modelo de SEP considerando G2 como fuente real

- E.3** Reconexión de la mitad de la compensación capacitiva C1, en la barra de carga.
- E.4** Disparo de la línea de Transmisión L2.
- E.5** Reconexión de la línea de Transmisión L2.
- E.6** Generador G2 alcanza sus límites.

El esquema de simulación considera realizar incrementos sucesivos de carga después de cada uno de los 6 eventos planteados, tal como se observa en la Figura 3.19. En esta figura se expone la máxima potencia transferida alrededor de  $\lambda = 1.4$  pu en color magenta.

Se debe señalar que, únicamente para fines de clarificación del presente análisis, no se considera el ajuste automático de taps de transformadores. Sin embargo, el análisis de este aspecto se presenta en [37], donde se verifica que esta dinámica finalmente produce, al igual que los eventos planteados en este apartado, una modificación en el valor de  $S_{sc}$ .



**Figura 3.19** Potencia y Voltaje de Carga considerando contingencias

Con respecto a la Figura 3.19, se pueden realizar las siguientes observaciones:

**Evento 1 - E1:** Al desconectar el 50% del soporte capacitivo en la barra de carga, entregado por C1, el voltaje en la barra de carga disminuye y el valor de la potencia de carga también disminuye producto de su dependencia con el voltaje. El SEP encuentra un nuevo punto de operación y posteriormente se continúa con el incremento de la carga.

**Evento 2 - E2:** Con la finalidad de recuperar el nivel de voltaje en la barra de carga, el generador G2 incrementa su soporte de reactivos mediante el control del voltaje terminal a 1.03 pu.



Este incremento recupera el voltaje en la barra de carga e incrementa la potencia de la misma. Nuevamente el SEP encuentra un nuevo punto de operación y posteriormente se continúa con el incremento de la carga.

**Evento 3 - E3:** Con la finalidad de recuperar el nivel de voltaje en la barra de carga, se procede a reconectar el 50% del soporte capacitivo en la barra de carga, entregado por C1, el voltaje en la barra de carga se incrementa y el valor de la potencia de carga aumenta también. El SEP encuentra un nuevo punto de operación y posteriormente se continúa con el incremento de la carga.

**Evento 4 - E4:** En este evento se simula la ocurrencia de una contingencia topológica en el SEP, para lo cual se considera la apertura de la línea de transmisión L2.

Al desconectarse este circuito, el voltaje en la barra de carga disminuye y el valor de la potencia de carga disminuye producto de su dependencia con el voltaje. El SEP encuentra un nuevo punto de operación y posteriormente se continúa con el incremento de la carga.

**Evento 5 - E5:** En este evento se simula la restauración de la topología en el SEP, para lo cual se considera la reconexión de la línea de transmisión 2. Al reconectarse este circuito, el voltaje en la barra de carga se recupera y el valor de la potencia de carga se incrementa también. El SEP encuentra un nuevo punto de operación y posteriormente se continúa con el

incremento de la carga hasta que el generador G2 alcanza sus límites.

**Evento 6 - E6:** El generador G2 alcanza sus límites y reduce su capacidad de soporte de reactivos. El voltaje en su barra terminal disminuye constantemente al igual que el voltaje en la barra de carga. La potencia por su parte continúa incrementándose hasta llegar a su magnitud máxima, este punto corresponde al de máxima cargabilidad del SEP.

En cada uno de los eventos propuestos se presenta una variación de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ , la misma que es determinada mediante la metodología propuesta en esta investigación, como se exponen en la Figura 3.20.

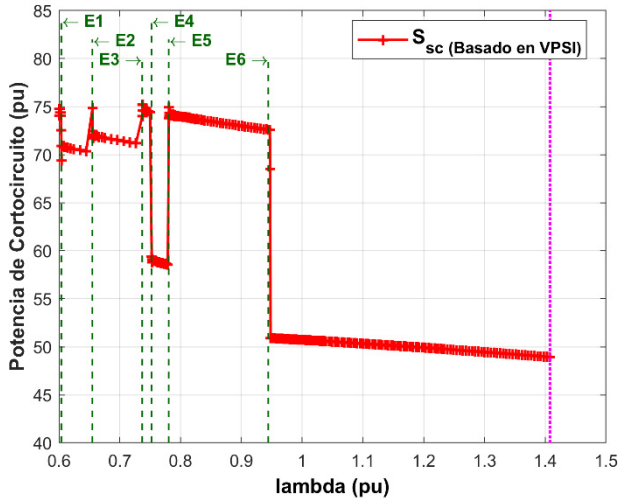
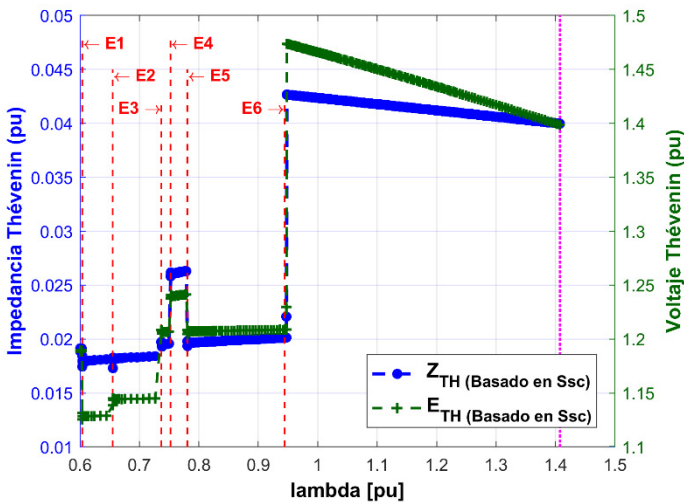


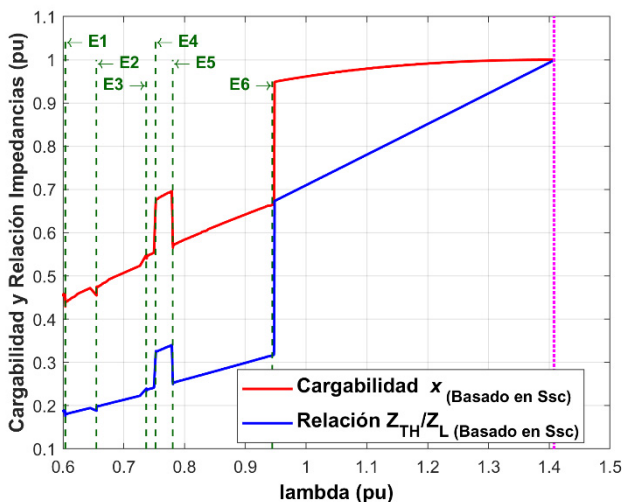
Figura 3.20 Potencia  $S_{SC}$  considerando los eventos simulados

Con la potencia de cortocircuito determinada, y continuando con el algoritmo indicado en la sección 3.2.3, se procede a determinar el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  y finalmente la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , como se muestra en la Figura 3.21. El nivel de cargabilidad determinado y la relación de impedancias se detallan en la Figura 3.22.



**Figura 3.21** Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y Voltaje Thévenin  $E_{TH}$  considerando los eventos simulados.

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos para cada evento simulado, los resultados para cada evento consideran dos evaluaciones: una antes y otra posterior a los mismos. Los resultados de la Tabla 3.1 corresponden al factor de incremento de carga  $\lambda$ , voltaje y potencia de carga.



**Figura 3.22** Cargabilidad  $x$  y Relación de Impedancias considerando los eventos simulados.

Por su parte, en la Tabla 3.2 se reportan los valores obtenidos mediante el algoritmo propuesto en la sección 3.2 para cada uno de los puntos indicados en la Tabla 3.1. Los valores presentados corresponden a: Potencia de Cortocircuito  $S_{SC}$ , Voltaje Thévenin  $E_{TH}$ , Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y el valor de cargabilidad del SEP  $x$ . Todos los resultados se encuentran en por unidad.

Tanto en la Tabla 3.1 como en la 3.2 se adicionan una evaluación inicial (E0) y otra en el punto de máxima cargabilidad (EF).

**Tabla 3.1** Resultados de Eventos Simulados en barra de carga

Evento	lambda	V (pu)	S (pu)
<b>E0</b>	0.6002	1.080	11.48
<b>E1</b>	0.6032	1.079	11.53
	0.6041	1.031	10.67
<b>E2</b>	0.6448	1.024	11.26
	0.6563	1.035	11.68
<b>E3</b>	0.7267	1.023	12.67
	0.7382	1.067	13.83
<b>E4</b>	0.7497	1.065	13.99
	0.7529	1.045	13.62
<b>E5</b>	0.7792	1.038	13.94
	0.7814	1.058	14.44
<b>E6</b>	0.9469	1.025	16.57
	0.9481	1.025	16.58
<b>EF</b>	1.4080	0.8403	17.64

### **Análisis de resultados**

**Evento 0- E0:** Se realiza una evaluación inicial, obteniéndose un nivel de cargabilidad del 45.3% con una  $S_{sc}$  de 74.77 pu, un voltaje  $E_{TH}$  de 1.189 pu y una impedancia  $Z_{TH}$  de 0.0189 pu. Se continúa con el incremento de carga hasta la desconexión del 50% de la compensación capacitiva C1.

**Evento 1- E1:** Previo a la desconexión del soporte capacitivo, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 45.74%.

Al desconectar el 50% del soporte capacitivo en la barra de carga, entregado por C1, se determina una

$S_{SC}$  de 70.92 pu, una disminución del voltaje  $E_{TH}$  y de la impedancia  $Z_{TH}$  hacia 1.128 pu y 0.0179 pu, respectivamente. Pese a esta disminución de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad se reduce hacia 44.87% debido a la reducción de la potencia carga por la disminución del voltaje de carga.

**Tabla 3.2** Resultados del algoritmo de la Sección 3.2 aplicado en los puntos simulados de la Tabla 3.1

Evento	lambda	$S_{SC}$	$E_{TH}$	$Z_{TH}$	$x$
E0	0.6002	74.77	1.189	0.0189	0.4530
E1	0.6032	74.40	1.189	0.0190	0.4574
	0.6041	70.92	1.128	0.0179	0.4487
E2	0.6448	70.35	1.129	0.0181	0.4720
	0.6563	72.07	1.144	0.0182	0.4735
E3	0.7267	71.20	1.145	0.0184	0.5235
	0.7382	74.60	1.207	0.0195	0.5456
E4	0.7497	74.45	1.207	0.0196	0.5539
	0.7529	59.09	1.239	0.0260	0.6749
E5	0.7792	58.56	1.241	0.0263	0.6961
	0.7814	74.36	1.207	0.0196	0.5701
E6	0.9469	72.59	1.209	0.0201	0.6651
	0.9481	50.92	1.474	0.0427	0.9486
EF	1.4080	48.93	1.399	0.0400	1.0000

**Evento 2- E2:** Previo al incremento del soporte de reactivos de G2, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 47.20%.

Al incrementar el soporte de reactivos de G2, se determina una  $S_{SC}$  de 72.07 pu y un incremento del voltaje  $E_{TH}$  hacia 1.144 pu, por su parte la impedancia

$Z_{TH}$  se mantiene aproximadamente constante. Pese a este incremento de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad presenta un ligero incremento hacia 47.35%, debido al incremento de la potencia carga por el aumento del voltaje de carga.

**Evento 3- E3:** Previo a la conexión del soporte capacitivo, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 52.35%.

Al conectar el 50% del soporte capacitivo en la barra de carga, entregado por C1, se determina una  $S_{SC}$  de 74.60 pu, un aumento del voltaje  $E_{TH}$  y de la impedancia  $Z_{TH}$  hacia 1.207 pu y 0.0195 pu, respectivamente. Pese a este aumento de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad se incrementa hacia 54.56% debido al incremento de la potencia carga por el aumento del voltaje de carga.

**Evento 4- E4:** Previo a la desconexión de la línea de transmisión L2, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 55.39%.

Al desconectar la L2, se determina una  $S_{SC}$  de 59.09 pu, un incremento del voltaje  $E_{TH}$  y de la impedancia  $Z_{TH}$  hacia 1.239 pu y 0.0260 pu, respectivamente. Debido a esta disminución de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad se incrementa hacia 67.49%.

**Evento 5- E5:** Previo a la reconexión de la línea de transmisión L2, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 69.61%.

Al reconectar la L2, se determina una  $S_{SC}$  de 74.36 pu, una disminución del voltaje  $E_{TH}$  y de la impedancia  $Z_{TH}$  hacia 1.207 pu y 0.0196 pu, respectivamente. Debido a este incremento de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad se reduce hacia 57.01%.

**Evento 6- E6:** Previo a que el generador G2 alcance sus límites, el SEP se mantiene prácticamente constante pero el nivel de cargabilidad se ha incrementado hasta el 66.51%.

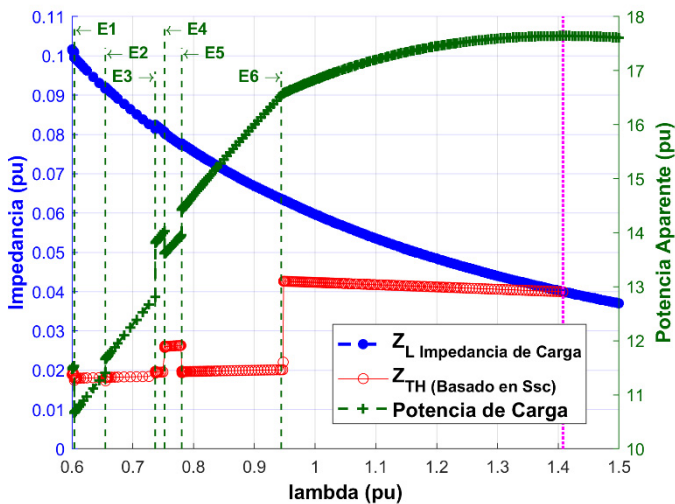
Al alcanzar sus límites G2, se determina una  $S_{SC}$  de 50.92 pu, un incremento del voltaje  $E_{TH}$  y de la impedancia  $Z_{TH}$  hacia 1.474 pu y 0.0427 pu, respectivamente. Debido a esta reducción de  $S_{SC}$ , el nivel de cargabilidad se incrementa hacia 94.86%.

**Estado Final- EF:** Se realiza una evaluación final en el punto de máxima cargabilidad 100%, obteniéndose un voltaje  $E_{TH}$  de 1.399 pu y una impedancia  $Z_{TH}$  de 0.04 pu. Se observa que el voltaje ha disminuido mientras que la impedancia prácticamente se mantiene constante.

Finalmente, y como se observa en la Figura 3.23, el criterio de maximización de la potencia de carga cuando la impedancia Thévenin se iguala a la impedancia de carga, se cumple de manera adecuada.

En resumen, del análisis del desempeño de la metodología propuesta en esta investigación y detallada en este apartado, se pueden determinar las siguientes conclusiones:





**Figura 3.23** Impedancia de Carga, Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y Potencia de Carga considerando los eventos simulados.

- Los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta son concordantes con los obtenidos por las metodologías existentes para el caso de modelación de carga con factor de potencia constante.
- La metodología propuesta entrega resultados adecuados en caso de modelación de carga con factor de potencia variable, permitiendo que la máxima potencia transferida hacia la carga coincida cuando la impedancia de carga se iguala con la impedancia Thévenin, lo cual convalida el planteamiento de establecer la máxima cargabilidad de un SEP mediante la relación de impedancias ( $Z_L / Z_{TH} \geq 1$ ).

- Para cada cambio que se presenta en el SEP, se produce una variación de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y en función de esta variable es posible establecer la cargabilidad del SEP. Una vez determinados el nivel de cargabilidad  $x$  y la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$ , es posible determinar el ET en una barra terminal del SEP.
- Cambios que se presenten en el SEP relacionados con el control de voltaje mediante el soporte de reactivos de los generadores tienen gran incidencia sobre el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  y no afectan sustancialmente a la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ .
- Cambios que se presenten en el SEP relacionados con el soporte de potencia reactiva de elementos de compensación reactiva/capacitiva tienen incidencia directa sobre el voltaje Thévenin  $E_{TH}$  y sobre la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ . Al respecto se debe mencionar que el mayor efecto se presenta sobre  $E_{TH}$  y que el cambio sobre  $Z_{TH}$  se debe a que la compensación representa la inclusión de un valor de susceptancia dentro del modelo de red del SEP.
- Cambios que se presenten en el SEP relacionados con cambios topológicos (conexión/desconexión de líneas de transmisión, transformadores) tienen incidencia directa sobre la impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  y afectan también el voltaje Thévenin  $E_{TH}$ . Al respecto se debe mencionar que el mayor efecto se presenta sobre  $Z_{TH}$  debido a que los cambios en la topología del SEP cambian directamente la matriz de impedancias del SEP. Un efecto similar se presenta cuando los generadores alcanzan sus límites.

- De los análisis realizados se observa un comportamiento casi lineal de la relación de impedancias lo cual contrasta con el nivel de cargabilidad que sigue un comportamiento no lineal conforme se incrementa el factor de crecimiento de la carga ( $\lambda$ ) y se hace más presente cuando los generadores alcanzan sus límites.

En base a estas consideraciones, se establece que la determinación de la cargabilidad en función de la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  presenta un mejor desempeño que el realizado en función de la relación de impedancias  $Z_L / Z_{TH}$ .

### **3.4 Evaluación de Cargabilidad y Equivalentes Thévenin en diversos puntos de un Sistema de Potencia**

A continuación se aplica la metodología propuesta en la sección 3.2 al sistema IEEE de 14 barras. La aplicación se realiza en cada una de las barra de carga, con la finalidad de establecer una adecuada interpretación de los resultados encontrados mediante esta metodología.

En la Figura 3.24 se expone la condición inicial del flujo de potencia inicial para el sistema IEEE 14 barras determinado mediante PowerFactory de DigSILENT. La información relacionada a los parámetros de cada uno de los componentes del sistema se detalla en el Anexo 2.

La modelación considera una potencia base de 100 MVA y voltajes base de 230, 60 y 46 kV.

Con respecto a la figura 3.24, la información indicada en las cajas de texto de los generadores, cargas y líneas de transmisión corresponde a potencias: activa (MW), reactiva (Mvar) y aparente (MVA), así como el valor de escalamiento en el caso de las cargas. Con respecto a la información de las barras éstas reportan el voltaje línea a línea en kV y en pu, así como su ángulo en grados eléctricos.

Se debe señalar que el modelo de carga utilizado corresponde al más desfavorable desde el punto de vista de estabilidad de voltaje, es decir, se considera una carga de potencia constante. Esta condición es planteada en los estudios [55] y [59] utilizados como referenciales para el presente análisis.

Se debe indicar que esta consideración para el modelo de carga, permite descartar la problemática de la variación del factor de potencia superada al aplicar la metodología propuesta en la sección 3.2, permitiendo concentrarse en la interpretación de resultados del ET determinado en cada barra de carga del sistema.

Adicionalmente, el flujo de potencia considera una barra oscilante distribuida entre las barras que conectan a los generadores 1 y 2, esta condición permite distribuir de una manera más realista la potencia generada y requerida por el SEP [59], para ello se utiliza la distribución de potencia indicada en el Anexo 2.

Se debe mencionar que se consideran los límites de potencia activa y reactiva de los generadores dentro del proceso de solución del flujo de potencia.

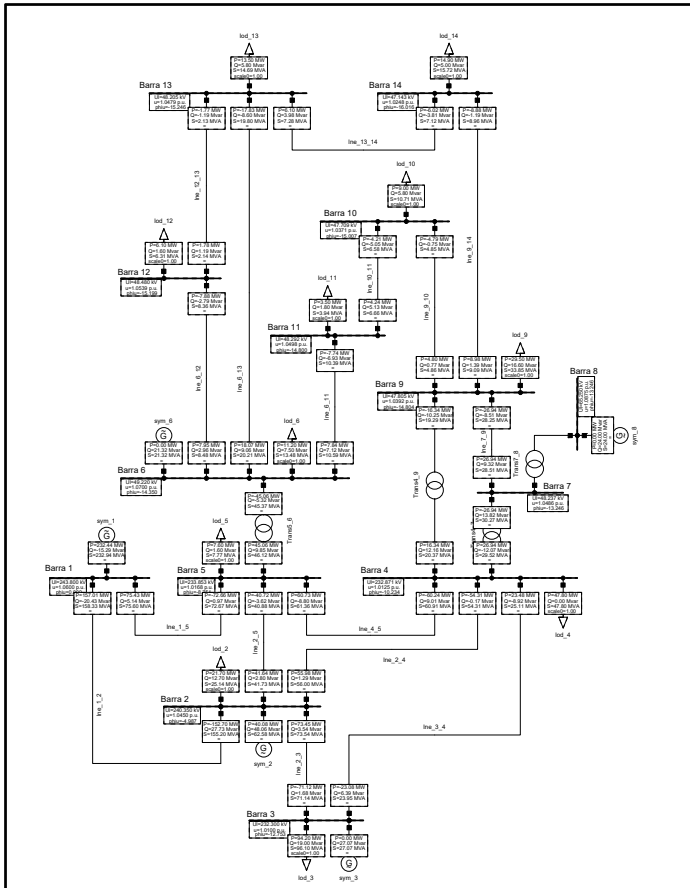


Figura 3.24 Flujo de potencia inicial del sistema IEEE 14 barras

### 3.4.1 Escenarios planteados

El sistema IEEE 14 barras ha sido estudiado por diversos autores desarrollando análisis completos desde el punto de vista de estabilidad de voltaje de

largo plazo. En las referencias [55] y [59] se exponen varios análisis de estabilidad de voltaje determinando las curvas PV para el caso base y simples contingencias más desfavorables.

Las curvas PV presentadas en estas referencias se determinaron mediante flujos de continuación considerando el escalamiento simultáneo de todas las cargas del SEP. Por otra parte, la definición de las contingencias se realizan considerando el voltaje en la barra más débil del sistema la cual corresponde a la barra 14 [59]. En este sentido, se determina como peor contingencia la desconexión de la línea 2-3.

En base a estos casos se establecen los siguientes escenarios a ser analizados:

- **E.1: Incremento de carga en todas las barras de carga de manera simultánea.**

E.1.1 Incremento sobre el Caso Base.

E.1.2 Incremento sobre el Caso Línea 2-3 desconectada.

- **E.2: Incremento de carga de la barra 14 de manera individual.**

E.2.1 Incremento sobre el Caso Base.

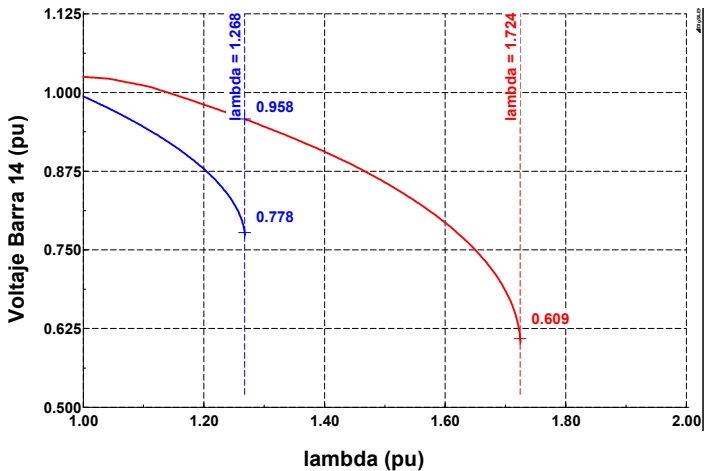
E.2.2 Incremento sobre el Caso Línea 2-3 desconectada.

En la Figura 3.25 se indican las curvas PV para los escenarios E.1.1 y E.1.2, con el eje x expresando el factor de incremento de carga  $\lambda$ .

En la Tabla 3.3 se exponen los máximos niveles de cargabilidad para estos mismos escenarios.

**Tabla 3.3** Máximos niveles de cargabilidad de los Escenarios E.1.1 y E.1.2

Casos	$\lambda_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)
E.1.1	1.724	0.609
E.1.2	1.268	0.778



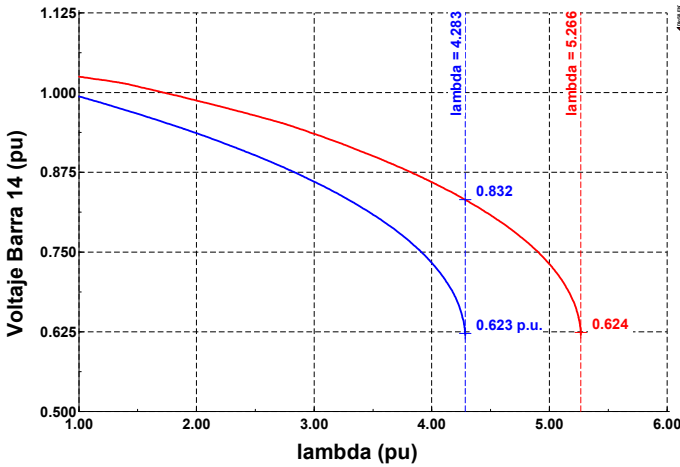
**Figura 3.25** Curvas PV de los Escenarios E.1.1 y E.1.2

Por su parte, en la Figura 3.26 se indican las curvas PV para los escenarios E.2.1 y E.2.2, con el eje x expresando el factor de incremento de carga lambda.

La Tabla 3.4 expone los máximos niveles de cargabilidad para estos escenarios.

**Tabla 3.4** Máximos niveles de cargabilidad de los Escenarios E.2.1 y E.2.2

Casos	$\lambda_{\max}$ (pu)	$V_{\min}$ (pu)
E.2.1	5.266	0.624
E.2.2	4.283	0.623



**Figura 3.26** Curvas PV de los Escenarios E.2.1 y E.2.2

Como se puede observar los niveles de cargabilidad alcanzados cambian no solo en función de las condiciones topológicas del sistema, sino también en función de la forma en que se incrementa la carga. En este sentido, existe un infinito número de opciones en los que se puede plantear escenarios de cambios de carga y, en consecuencia, diversos niveles de cargabilidad.

Esta situación ocurre debido a que la distancia a la máxima transferencia de potencia depende de cómo la



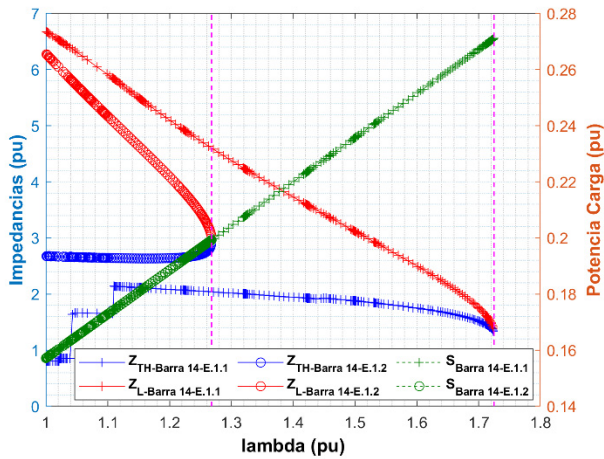
carga se incrementa, algunos autores recomiendan aumentar la carga de una manera predefinida representando el escenario de estrés más probable basado en datos históricos y de pronóstico [60]. Sin embargo, con los escenarios planteados para el presente análisis es posible abarcar un rango suficiente de soluciones sobre las cuales es posible establecer una interpretación adecuada de los resultados encontrados.

### **3.4.2 Aplicación de la metodología propuesta y análisis de resultados**

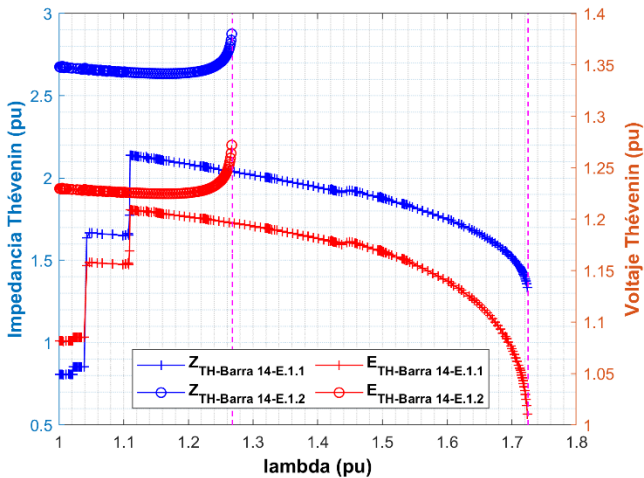
Como se había mencionado en la sección 3.4.1, la aplicación de la metodología se realiza considerando la información simulada en la barra 14. Para esta barra se determinan: potencia de cortocircuito  $S_{sc}$ , ET y cargabilidad.

**Escenarios E.1.1 y E.1.2:** En las Figuras 3.27, 3.28 y 3.29 se presentan los resultados para el caso E.1.1 y E.1.2.

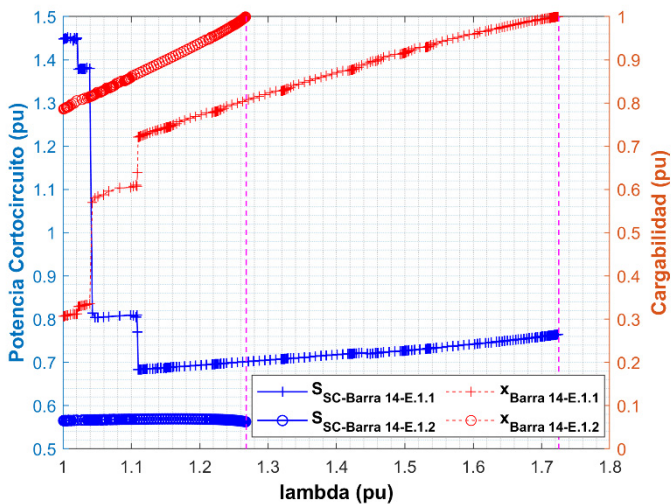
En la Figura 3.27 se observa que efectivamente las máximas potencias, para cada caso, ocurren cuando las impedancias de carga ( $Z_L$ ) y Thévenin ( $Z_{TH}$ ) se igualan.



**Figura 3.27** Impedancia Thévenin, Impedancia y Potencia de Carga para los Escenarios E.1.1 y E.1.2



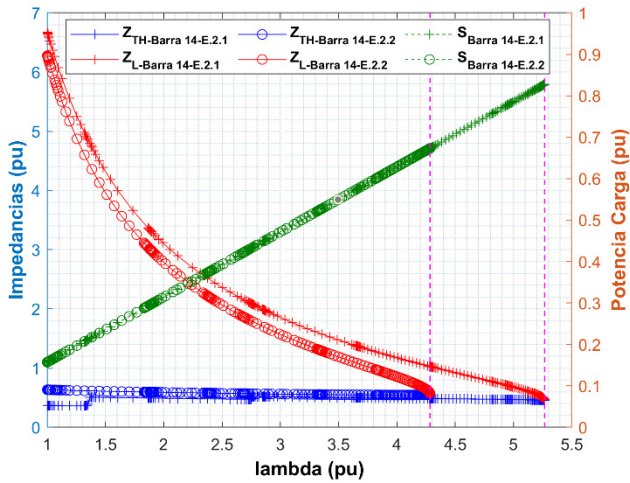
**Figura 3.28** ET para los Escenarios E.1.1 y E.1.2



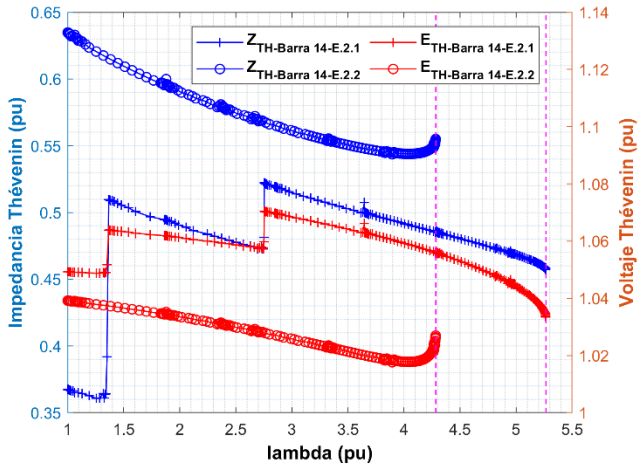
**Figura 3.29** Potencia de Cortocircuito y Cargabilidad para los Escenarios E.1.1 y E.1.2

**Escenarios E.2.1 y E.2.2:** En las Figuras 3.30, 3.31 y 3.32 se presentan los resultados para el caso E.2.1 y E.2.2.

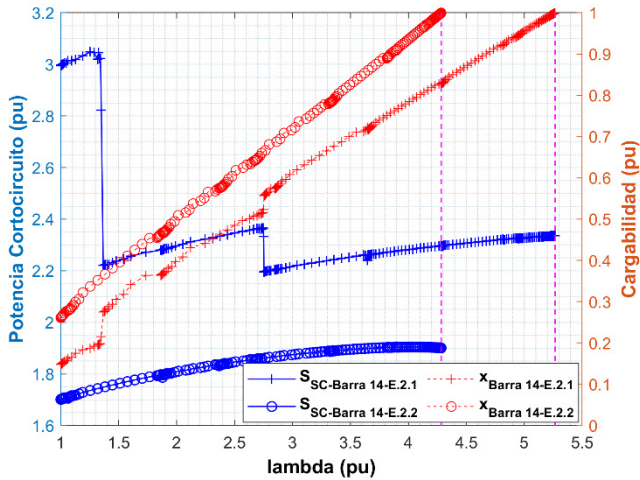
De igual manera, que para los escenarios E.1, en la Figura 3.30 se observa que efectivamente las máximas potencias, para cada caso, ocurren cuando las impedancias de carga ( $Z_L$ ) y Thévenin ( $Z_{TH}$ ) se igualan.



**Figura 3.30** Impedancia Thévenin, Impedancia y Potencia de Carga para los Escenarios E.2.1 y E.2.2



**Figura 3.31** ET para los Escenarios E.2.1 y E.2.2



**Figura 3.32** Potencia de Cortocircuito y Cargabilidad para los Escenarios E.2.1 y E.2.2

Los valores de  $S_{SC}$  y los parámetros del ET, en el punto de máxima cargabilidad, para todos los escenarios se detallan en la Tabla 3.5.

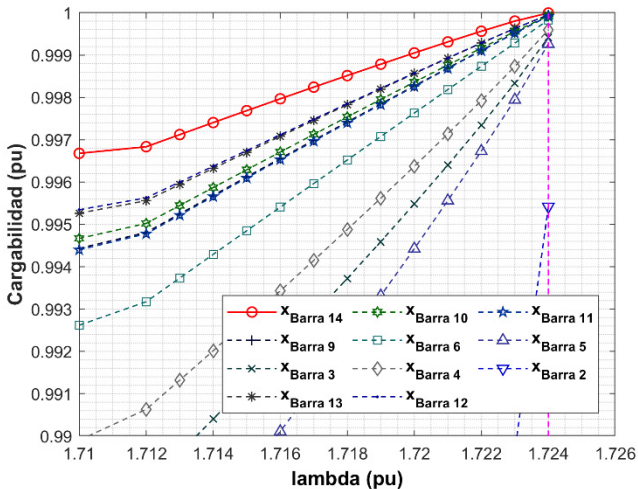
**Tabla 3.5**  $S_{SC}$  y ET en el punto de máxima cargabilidad

Casos	$\lambda_{max}$ (pu)	$S_{SC}$ (pu)	$E_{TH}$ (pu)	$Z_{TH}$ (pu)
E.1.1	1.724	0.765	1.010	1.335
E.1.2	1.268	0.563	1.272	2.875
E.2.1	5.266	2.335	1.033	0.457
E.2.2	4.283	1.900	1.027	0.555

Considerando los resultados encontrados se observa que aunque las condiciones topológicas sean las mismas, como sucede entre los escenarios E.1.1 y

E.2.1, así como entre E.1.2 con E.2.2, los valores determinados de  $S_{SC}$ ,  $E_{TH}$  y  $Z_{TH}$  cambian. Esta variación se debe a que el efecto de los cambios de todas las cargas queda implícito en la evaluación de la potencia de cortocircuito de cada barra y consecuentemente del ET.

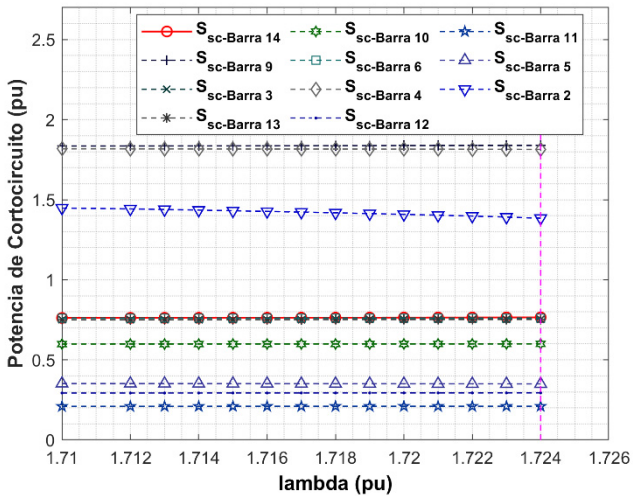
Finalmente, se presenta un análisis complementario para todas las barras de carga, para esto se considera el escenario E.1.1, es decir, con incremento de todas las cargas de manera simultánea. En la Figuras 3.33 y 3.34 se presentan los niveles de cargabilidad y potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  determinados mediante el método planteado en la sección 3.2.3, para cada una de las barra de carga.



**Figura 3.33** Cargabilidad en las barras de carga para el Escenario E.1.1

De la Figura 3.33, se puede observar que solo una barra alcanza la máxima cargabilidad (1.0 pu) y corresponde a la Barra 14, lo cual es concordante con los análisis desarrollados en [55] y [59], en los que se determina que esta barra corresponde a la más débil del sistema analizado.

Por su parte, las demás barras del sistema IEEE14, aunque se acercan a la máxima cargabilidad, no alcanzan el valor límite. Las barras con menores valores de cargabilidad corresponden a las barras 2 y 5.



**Figura 3.34** Potencia de Cortocircuito en Barras de carga para el Escenario E.1.1

Respecto a la Figura 3.34, se observa que la potencia de cortocircuito en todas las barras presentan valores que oscilan entre 0.1 y 1.8 pu.

Se debe indicar que, aunque la  $S_{SC}$  de la Barra 14 se encuentre en la mitad del rango indicado, esta ubicación no guarda relación con la cargabilidad de la misma. Esta situación se debe a que la evaluación de la cargabilidad se establece como una relación entre la potencia de cortocircuito y la potencia de carga, como se indica en la ecuación (3.2).

En base a los resultados encontrados, es posible establecer las siguientes conclusiones:

- Las barras con mayor cercanía al colapso de voltaje son las más cercanas a la máxima cargabilidad determinada mediante la presente metodología.
- El efecto de los cambios de todas las cargas del sistema se incluye de manera directa en la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  determinada en cada barra del sistema.
- La evaluación de la potencia de cortocircuito y de la cargabilidad, determinados mediante la presente propuesta, corresponden a evaluaciones locales pero consideran todos los efectos que se presenten en el sistema de potencia.
- El monitoreo permanente de la potencia de cortocircuito y de la cargabilidad, en cada barra de un sistema de potencia, permite establecer una determinación global de la cargabilidad del sistema en base a las barras que presente el mayor valor de cargabilidad local.



## **4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE REGISTROS REALES**

Este capítulo presenta la aplicación de la metodología propuesta en esta investigación sobre una zona del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano (SNT). En este sentido, el capítulo inicia con una descripción general del SNT y una exposición de los criterios establecidos a fin de delimitar una zona de estudio reducida.

Sobre esta zona de estudio, la misma que abarca diferentes niveles de voltaje, se presenta la aplicación de la metodología propuesta, tanto en la determinación de la cargabilidad como del ET, sobre los resultados de varias simulaciones realizadas.

A continuación se presentan los resultados que se obtienen al utilizar registros reales de la zona de estudio planteada, los cuales son obtenidos del sistema de monitoreo de tiempo real del SNT. Finalmente se expone el análisis y la discusión de los resultados obtenidos.

Es importante indicar que el objetivo de este capítulo no es desarrollar un estudio de estabilidad de voltaje en el que se detalle las barras que presentan inestabilidad, más bien el objetivo es viabilizar la aplicación de los métodos propuestos con la finalidad de determinar, mediante simulaciones, un posible rango para el ET y entregar valores referenciales para comparar con los resultados obtenidos mediante registros reales.

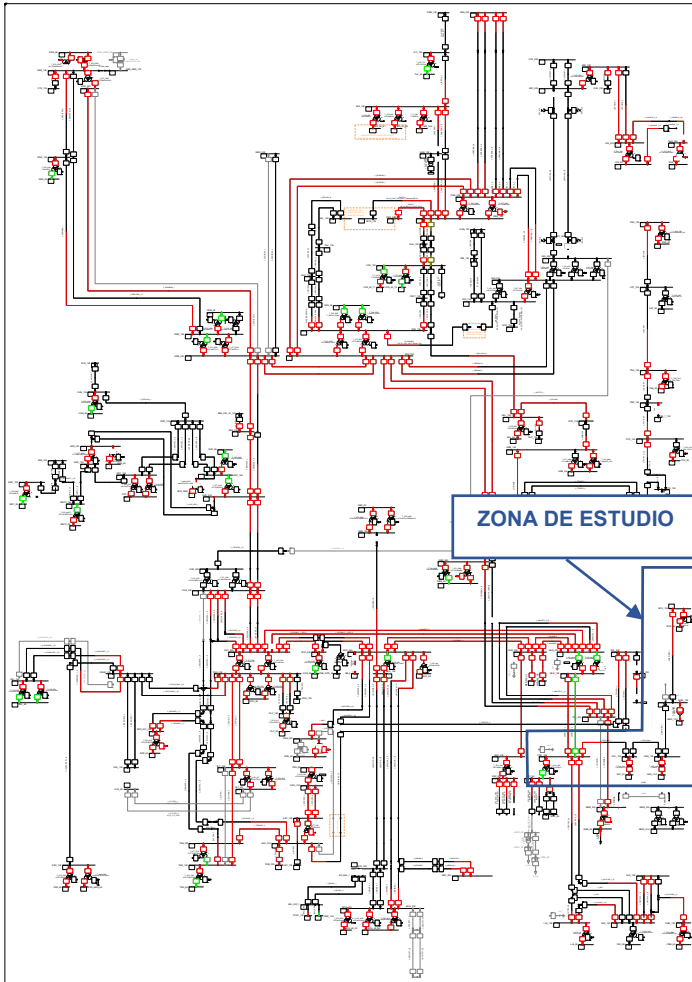
## **4.1 Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano (SNT) y zona de estudio planteada.**

En la Figura 4.1 se indica el diagrama unifilar del SNT modelado en el software DlgSILENT PowerFactory. Los parámetros de cada uno de los componentes del SNT han sido tomados de la información que maneja CELEC EP – Transelectric y se describe en el Anexo 3. Se debe indicar que la simulación es desarrollada considerando la modelación total de los sistemas ecuatoriano y colombiano, límites de potencia de los generadores y cargas con dependencia del voltaje.

El SNT comprende una red de topología mallada que contiene 234 barras, 345 líneas de transmisión, con voltajes desde los 13.8, 22, 69, 138, 230 and 500 kV. La carga máxima del sistema es aproximadamente 4.0 GW y es representada mediante un modelo exponencial de carga, como el indicado en la ecuación (2.17), con  $\alpha=0.65$  y  $\beta=3.0$ . Se debe indicar que la operación del mismo se realiza siguiendo los lineamientos indicados en los Procedimientos de Despacho y Operación [61].

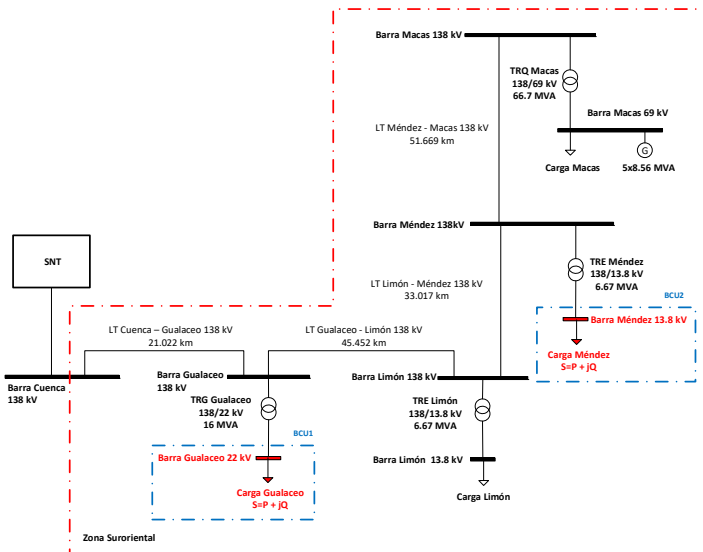
En la determinación del subsistema a ser analizado, se realizan las siguientes consideraciones:

- Establecer una zona con diferentes niveles de voltaje con puntos de carga terminales.
- Disponibilidad y calidad de la información tanto para reajuste del modelo de simulación como para procesamiento local.



**Figura 4.1** Diagrama unifilar del SNT

Tomando en cuenta estas consideraciones se define una subred de análisis la cual corresponde a la Zona Suroriental. Esta zona incluye las siguientes subestaciones: Gualaceo, Limón, Méndez y Macas, como se indica en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Detalle de la Zona Suroriental

Considerando el reajuste del modelo de simulación, se obtuvo la información topológica y de datos reales de voltajes y flujos de potencia de todo el SNT dentro de un día seleccionado de manera aleatoria, el cual corresponde al 22 de enero de 2019. Esta información se obtuvo desde el sistema SCADA de CELEC EP-Transelectric.

Complementariamente y considerando la información para procesamiento local, se verificó que para este día se encuentren disponibles registros válidos de voltaje, potencias activa y reactiva en algunos puntos de este subsistema.

Los datos considerados corresponden a las barras de Gualaceo 22 kV y Méndez 13.8 kV, y fueron obtenidos desde las unidades de control de bahía (BCUs por sus siglas en inglés) ubicados en estas barras como lo muestra la Figura 4.2.

## **4.2 Aplicación de la metodología propuesta a los resultados de simulación de la zona de estudio**

Como se indicó en la parte introductoria del presente capítulo, el objetivo de la aplicación de la metodología propuesta sobre una parte del SNT, no es desarrollar un estudio de estabilidad de voltaje sino más bien determinar, mediante simulaciones, un posible rango para el ET y entregar valores referenciales para compararlos con los resultados obtenidos durante la aplicación de la misma metodología sobre registros reales desde el SCADA del SNT.

En este contexto, es necesario ajustar el flujo de potencia inicial lo más cercano a las mediciones reales entregadas desde el SCADA. Esta condición se realizó para dos horas del día antes señalado (enero 22, 2019), generando dos escenarios: 03:00 y 20:00 como se detalla en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1** Potencia y voltaje en los puntos de carga analizados

Barra	Hora	S (MVA)	V (kV)
Gualaceo 22 kV	03:00	3.7497 + j0.0798	20.9585
	20:00	8.1290 + j0.3460	20.9413
Méndez 13.8 kV	03:00	1.6497 + j0.2263	13.8681
	20:00	2.6704 + j0.3665	13.8950

Tomando en cuenta el SNT ajustado para estas horas, se plantea la simulación de flujos de continuación considerando dos condiciones de incremento de la carga:

**Condición 1:** Incremento únicamente de la carga considerada bajo estudio.

**Condición 2:** Incremento de todas las cargas del SNT de manera simultánea.

Como se había señalado en la sección 3.4.1, debido a que la distancia al punto de máxima transferencia depende de la forma en cómo la carga es incrementada, es posible establecer muchos más escenarios y condiciones de incremento de carga cada uno con diferentes resultados.

Por otra parte, los registros reales contienen cierto grado de incertidumbre y afectan la definición de un escenario de simulación de incremento de carga completamente consistente con la realidad. En este sentido, si las diferencias entre lo simulado y los resultados reales del sistema son pequeñas, las mismas pueden ser utilizadas para modificar y mejorar la modelación, dentro de un proceso continuo de validación de modelos del SEP [62].

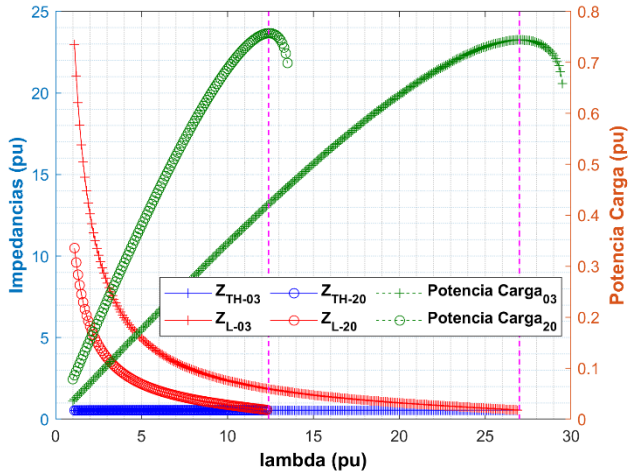
En base a estas premisas, se plantea un análisis inicial de las simulaciones de las dos condiciones de incremento de carga considerando la barra de Gualaceo 22 kV, entregando un posible rango del ET que se utiliza para comparar con los resultados obtenidos mediante registros reales en la sección 4.3.

#### **4.2.1 Condición 1: Incremento únicamente de la carga considerada bajo estudio – Gualaceo 22 kV**

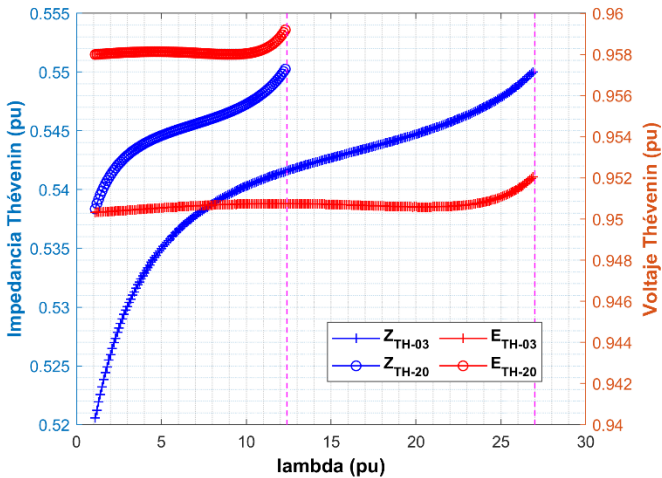
En la Figura 4.3 se presentan los resultados de la simulación considerando el incremento progresivo de la carga de la barra de Gualaceo 22kV. La potencia y el voltaje bases corresponden a 100 MVA y 22 kV, respectivamente.

La Figura 4.3.a muestra que la máxima cargabilidad es alcanzada cuando la impedancia de carga y la impedancia Thévenin se igualan en los dos escenarios planteados; en este sentido, es claro que mediante la presente metodología la impedancia Thévenin y la cargabilidad son correctamente determinadas.

Concordantemente, la Figura 4.3.b detalla los perfiles de los parámetros del ET, es decir  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$ , cuyos valores determinados presentan pequeñas diferencias para las dos horas consideradas durante todo el rango de simulación y las mismas se encuentran alrededor de 0.53 pu y 0.95 pu, respectivamente.

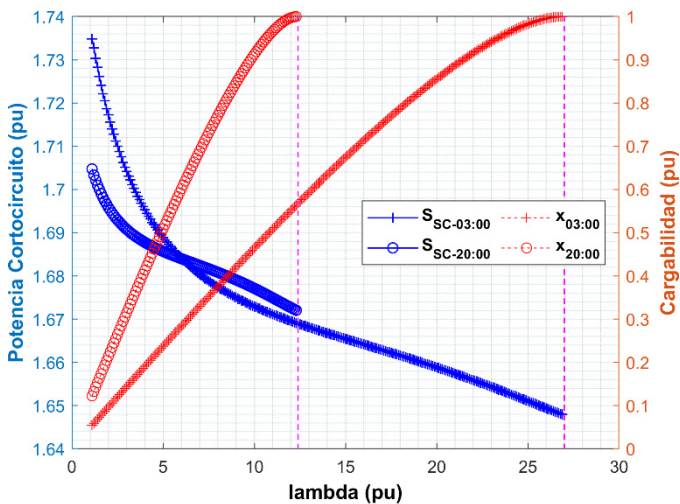


a) Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , Impedancia de Carga  $Z_L$ , Potencia de Carga – para 03:00 y 20:00.



b) Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , Voltaje Thévenin  $E_{TH}$  – para 03:00 y 20:00.





c) Potencia de Cortocircuito  $S_{sc}$ , Cargabilidad  $x$  – para 03:00 y 20:00.

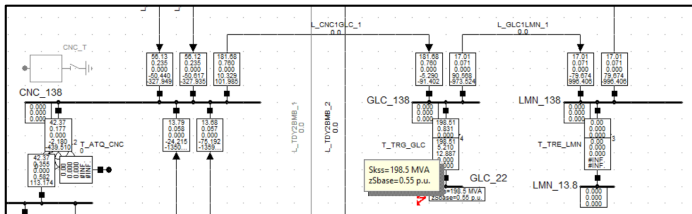
**Figura 4.3** Barra de Gualaceo 22 kV - Simulación en Condición 1

Finalmente, la Figura 4.3.c presenta el perfil de la  $S_{sc}$  y el valor de cargabilidad  $x$ . Durante el rango de simulación la  $S_{sc}$  se encuentra alrededor de 1.68 pu y la cargabilidad  $x$  se incrementa en un perfil no lineal desde menos de 0.1 pu hasta 1 pu.

Debido a que la mayor parte de generación se encuentra lejos de la barra de Gualaceo 22 kV, el valor de la  $Z_{TH}$  determinada mediante la presente metodología para las dos condiciones simuladas y en los puntos de máxima cargabilidad (0.55 pu ver Figura 4.3.b) corresponde a la impedancia de cortocircuito

obtenida directamente por medio de cualquier programa de cálculo de cortocircuito [32], [63].

En la Figura 4.4 se detalla el cálculo del cortocircuito trifásico en la barra de Gualaceo 22 kV según la norma IEC60909 [64] realizado mediante el software PowerFactory de DigSILENT, donde se observa que la impedancia de cortocircuito corresponde a  $z_{Sbase}=0.55$  pu en base 100 MVA y 22 kV.



**Figura 4.4** Cortocircuito trifásico en la Barra de Gualaceo 22 kV

Se debe señalar que la potencia de cortocircuito en condiciones de falla  $Sk_{ss}$ , indicada en la Figura 4.4 (1.985 pu en base 100 MVA), difiere de las determinadas mediante la presente metodología debido a que las normas de cálculo de cortocircuito consideran un voltaje equivalente de 1.0 pu. Para el caso de la norma IEC60909, el voltaje equivalente es afectado por un factor de voltaje  $C$  que depende del nivel de voltaje y de las condiciones de cálculo de máxima o mínima falla [64].

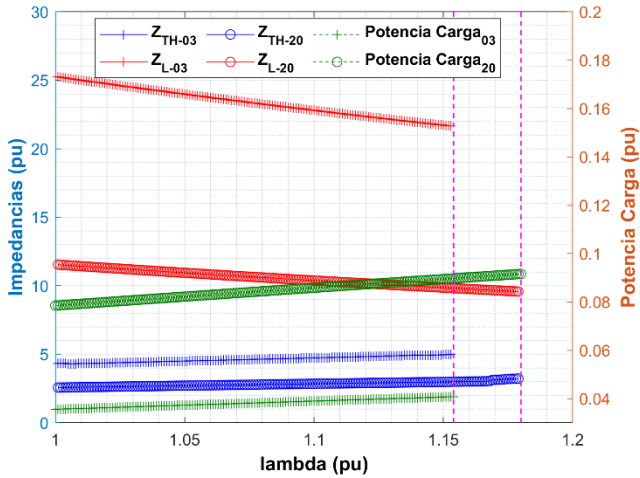
#### **4.2.2 Condición 2: Incremento de todas las cargas del SNT de manera simultánea**

En la Figura 4.5 se presentan los resultados determinados en la barra de Gualaceo 22kV obtenidos desde la simulación ante el incremento simultáneo de todas las cargas del sistema. La potencia y el voltaje bases corresponden a 100 MVA y 22 kV, respectivamente.

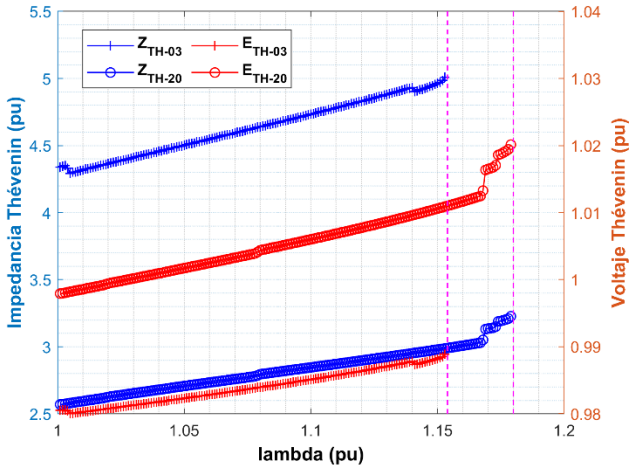
Como se había indicado al inicio de la presente sección, los resultados para la condición 2 son diferentes a los encontrados para la condición 1. La Figura 4.5.a muestra que la barra de Gualaceo 22 kV no alcanza su máxima cargabilidad, esto se debe a que otras barras del sistema son las que primero alcanzan dicho límite, tal como se había establecido en la sección 3.4.

La Figura 4.5.b detalla los perfiles de los parámetros del ET, es decir  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$ , mientras que la Figura 4.5.c presenta la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y la cargabilidad  $x$  para esta condición.

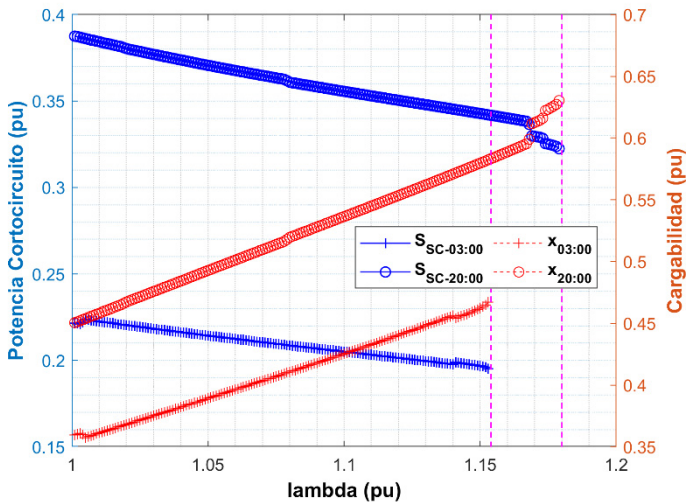
En la Tabla 4.2 se resumen los principales resultados para los escenarios de las dos condiciones simuladas, los valores reportados corresponden al punto inicial del flujo de potencia ajustado para las 03:00 y 20:00.



a) Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , Impedancia de Carga  $Z_L$ , Potencia de Carga – para 03:00 y 20:00.



b) Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , Voltaje Thévenin  $E_{TH}$  – para 03:00 y 20:00.



c) Potencia de Cortocircuito  $S_{sc}$ , Cargabilidad  $x$  – para 03:00 y 20:00.

**Figura 4.5** Barra de Gualaceo 22 kV - Simulación en Condición 2

Basado en los resultados de las simulaciones se confirma lo indicado en la sección 3.4, es decir que la cargabilidad depende de cómo la carga es incrementada. Para los casos analizados en este apartado los resultados muestran soluciones muy diferentes entre sí.

Por un lado, en la Condición 1 la carga es incrementada en una forma muy inusual. Sin embargo, esta condición permite validar la solución encontrada debido a que el flujo de potencia es maximizado cuando las impedancias Thévenin y de carga se igualan.

Por otra parte, en la Condición 2 el criterio de maximización de la potencia basado en impedancias también se cumple, pero en alguna de las barras del sistema en su conjunto como se detalló en la sección 3.4.2.

**Tabla 4.2** Resultados para la barra de Gualaceo 22 kV en el punto inicial del flujo de potencia

<b>Parámetro (pu)</b>	<b>Hora</b>	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>
$S_{SC}$	03:00	1.734	0.222
	20:00	1.705	0.387
$x$	03:00	0.055	0.360
	20:00	0.123	0.451
$E_{TH}$	03:00	0.950	0.981
	20:00	0.958	0.998
$Z_{TH}$	03:00	0.520	4.340
	20:00	0.538	2.570

En resumen, la cargabilidad es determinada en cada barra de manera local y dependerá de cómo la carga se incremente. En este sentido, mediante el contraste de los resultados de simulación con los que se obtengan mediante registros reales se puede determinar el escenario más probable de incremento de carga con el cual el sistema pueda ser simulado.

### **4.3 Aplicación de la metodología propuesta a registros reales de la zona de estudio planteada**

En este apartado se realiza la aplicación de la metodología propuesta en la sección 3.2.3 sobre registros reales del SNT, los cuales se obtienen mediante BCUs ubicados en los puntos indicados en la Figura 4.2 y que corresponden a las barras de Gualaceo 22 kV y Mendez 13.8 kV.

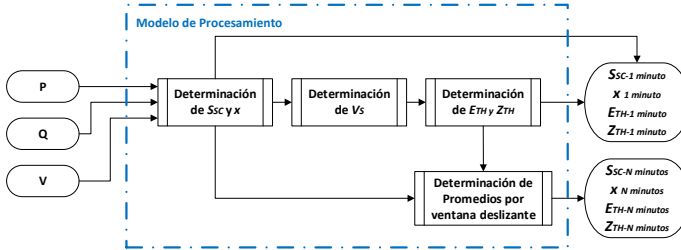
#### **4.3.1 Esquema de Procesamiento de Registros Reales**

Los BCUs se encuentran conectados a transformadores de voltaje y corriente con una precisión de 0.1% y reportan valores válidos muestreados por cada minuto, generando de esta manera 1440 puntos de datos por día. Los registros corresponden al voltaje y a las potencias activa y reactiva en las barras monitoreadas.

Estos registros son procesados como se indica en la Figura 4.6, en la que se presentan dos esquemas de procesamiento de los resultados obtenidos por la aplicación de la metodología propuesta en esta investigación.

El primer esquema de procesamiento es realizado mediante la determinación de las variables: Potencia de Cortocircuito  $S_{SC}$ , cargabilidad  $x$ , Voltaje de Carga normalizado  $V_S$ , Voltaje Thévenin  $E_{TH}$  e Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$  en cada punto de procesamiento, es decir, por cada minuto.

De esta manera se definen las variables por minuto:  $S_{SC-1\text{minuto}}$ ,  $X_{1\text{minuto}}$ ,  $E_{TH-1\text{minuto}}$  y  $Z_{TH-1\text{minuto}}$ .



**Figura 4.6** Modelo de Procesamiento para Registros Reales

El segundo esquema se realiza en base a la determinación de valores promedio de las variables por minuto, dentro de una ventana deslizando de  $N$  minutos como se indica en la ecuación (4.1) [65].

$$Z_{i\ N\text{minutos}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{i\ 1\text{minuto}} \quad (4.1)$$

Donde:  $Z_{i\ 1\text{minuto}}$  variables procesadas por minuto

$Z_{i\ N\text{minutos}}$  variables procesadas por  $N$  minutos

$N$  corresponde al ancho en minutos de la ventana de procesamiento.

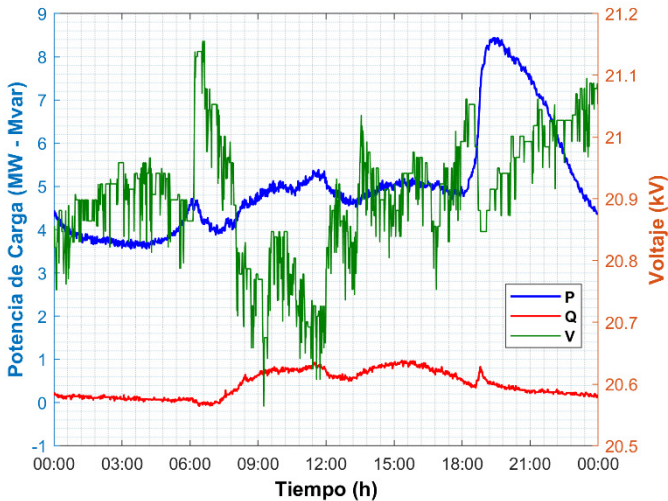
El esquema de procesamiento mediante ventana deslizando, permite determinar un perfil continuo para todas las variables de análisis, disminuyendo el efecto de algunas discontinuidades producto de cambios que ocurren al interior del SEP y que se presentan



simultáneamente ante el cambio de carga procesado [44].

### 4.3.2 Procesamiento de Registros Reales

La Figura 4.7 presenta los registros reales de voltaje, potencia activa y potencia reactiva de carga medidas en la barra de Gualaceo 22 kV.

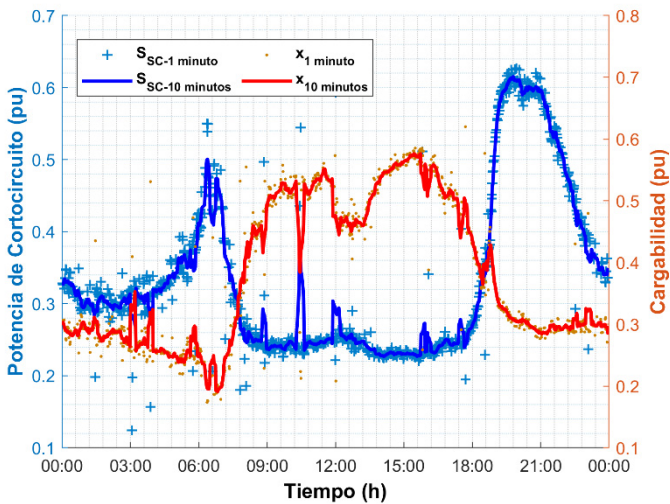


**Figura 4.7** Registros Reales: V, P y Q - Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019)

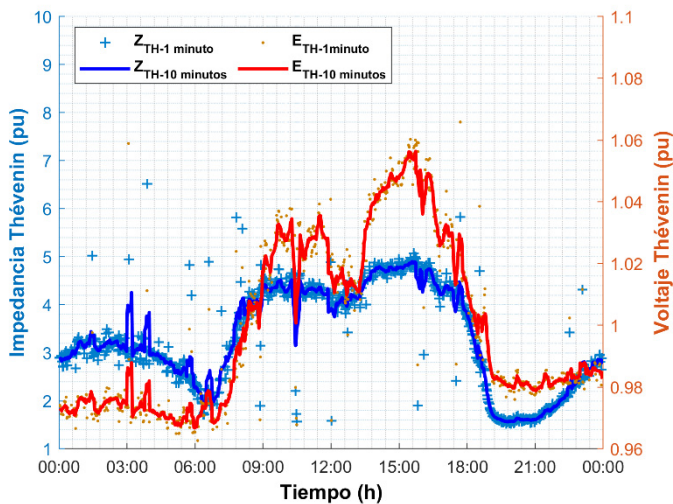
Una vez procesada esta información mediante el modelo de la Figura 4.6, se obtienen los resultados en los dos esquemas de procesamiento indicados en la misma figura. Con el primer esquema de procesamiento se obtienen las variables por cada minuto, las cuales corresponden a la potencia de

cortocircuito  $S_{SC-1 \text{ minuto}}$  y la cargabilidad  $x_{1 \text{ minuto}}$ , indicados en la Figura 4.8. Por su parte, la Figura 4.9 muestra los valores de los parámetros determinados del ET, que corresponden a  $Z_{TH-1 \text{ minuto}}$  y  $E_{TH-1 \text{ minuto}}$ .

Se debe señalar que, para el caso del segundo esquema de procesamiento, el ancho de la ventana  $N$  corresponde a 10 minutos, tiempo con el cual se obtienen perfiles continuos en todas las variables procesadas:  $S_{SC-10 \text{ minutos}}$ ,  $X_{10 \text{ minutos}}$ ,  $E_{TH-10 \text{ minutos}}$  y  $Z_{TH-10 \text{ minutos}}$ .



**Figura 4.8**  $S_{SC}$  y  $x$  – Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019)



**Figura 4.9**  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$  – Barra de Gualaceo 22 kV (22-enero-2019)

La Tabla 4.3 presenta los resultados para la barra de Gualaceo 22 kV, los mismos fueron determinados mediante la metodología propuesta para las dos horas planteadas en las simulaciones de la sección 4.2.

**Tabla 4.3** Resultados reales para la Barra de Gualaceo 22 kV

Hora	$S_{sc}$	$x$	$E_{TH}$	$Z_{TH}$
03:00	0.25	0.32	0.98	3.88
20:00	0.59	0.30	0.98	1.64

En base a un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por simulación con los encontrados mediante registros reales, indicados en las Tablas 4.2 y 4.3 respectivamente, se observa que los resultados reales se acercan en mayor proporción a los resultados simulados en la condición 2. Es decir que la condición de simulación considerando el incremento simultáneo en todas las cargas del SEP se puede considerar el más adecuado para determinar un rango para el ET de la barra analizada en el día bajo estudio.

De manera complementaria en la Tabla 4.4 se presentan los resultados, para las 03:00 y 20:00, simulados bajo la condición 2 así como los determinados mediante registros reales.

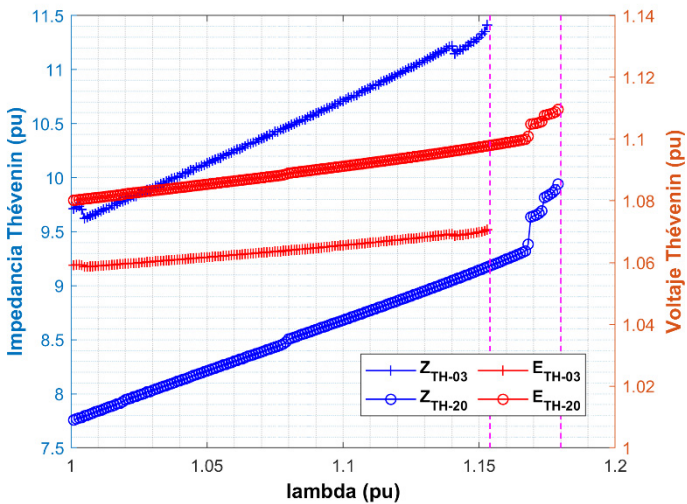
**Tabla 4.4** Resultados comparativos para la Barra de Gualaceo 22 kV (03:00 – 20:00)

Parámetro (pu)	Simulación Condición 2		Registros Reales	
	03:00	20:00	03:00	20:00
$S_{sc}$	0.22	0.39	0.25	0.59
$x$	0.36	0.45	0.32	0.30
$E_{TH}$	0.98	1.00	0.98	0.98
$Z_{TH}$	4.34	2.57	3.88	1.64

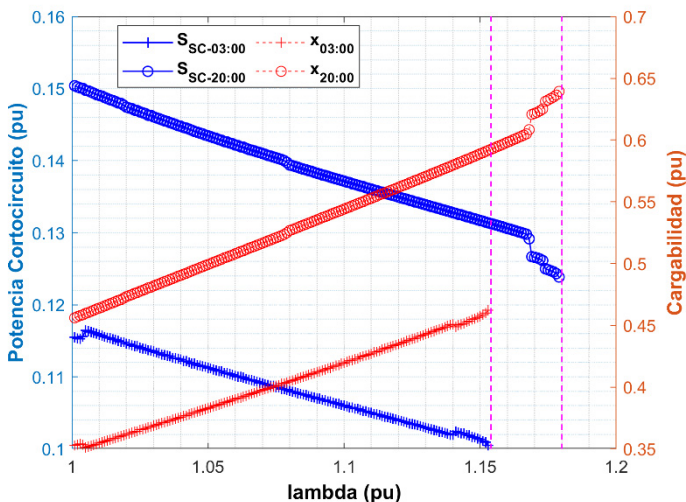
Se observa que los mismos se encuentran más cercanos para las 03:00 que para las 20:00, lo cual permite establecer que para las 03:00 la condición de simulación es bastante cercana a lo que se presentó en la realidad.

De manera complementaria y considerando el análisis realizado para la barra de Gualaceo 22 kV, a continuación se presentan los resultados obtenidos en la barra de Méndez 13.8 kV. Respecto a la simulación se considera realizarla bajo la Condición 2 (incremento de todas las cargas de manera simultánea).

La Figura 4.10.a presenta los perfiles de los parámetros del ET, es decir  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$ , mientras que la Figura 4.10.b presenta la potencia de cortocircuito  $S_{SC}$  y la cargabilidad  $x$  determinadas para esta condición de simulación.



a) Impedancia Thévenin  $Z_{TH}$ , Voltaje Thévenin  $E_{TH}$  – para 03:00 y 20:00.



b) Potencia de Cortocircuito  $S_{sc}$ , Cargabilidad  $x$  – para 03:00 y 20:00.

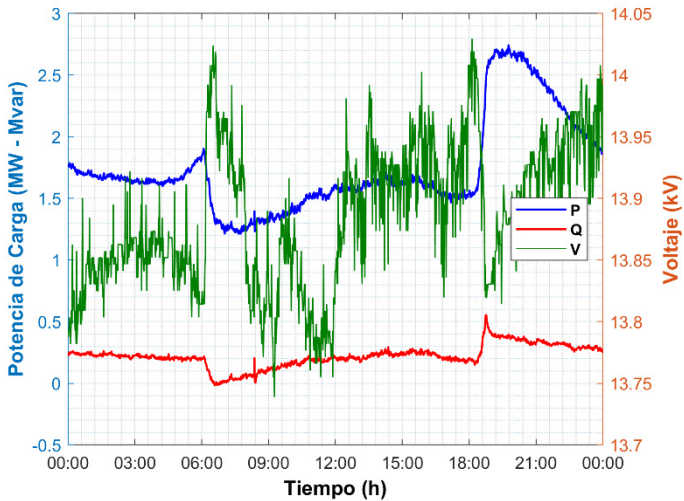
**Figura 4.10** Barra de Méndez 13.8 kV -Simulación en Condición 2

En la Tabla 4.5 se resumen los principales resultados de las simulaciones para el escenario de la Condición 2, los valores reportados corresponden al punto inicial del flujo de potencia ajustado para las 03:00 y 20:00.

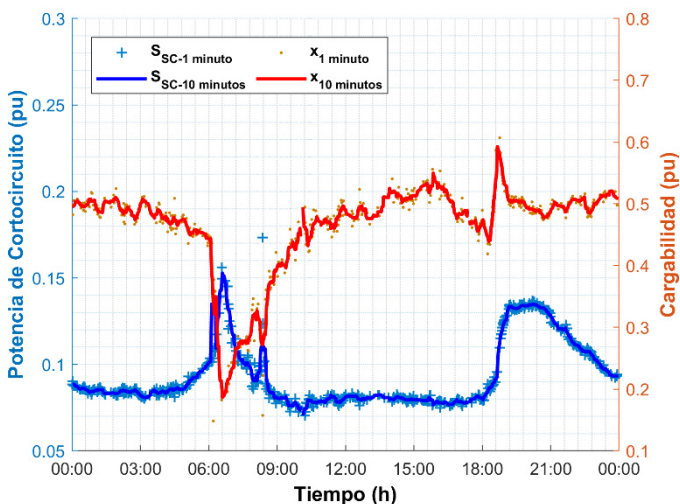
Por otra parte, en la Figura 4.11 se presentan los registros reales de voltaje, potencia activa y potencia reactiva de carga medidas en la barra de Méndez 13.8 kV. En la Figura 4.12 se detallan las potencias de cortocircuito  $S_{SC-1 \text{ minuto}}$  y  $S_{SC-10 \text{ minutos}}$ , así como las evaluaciones de cargabilidad  $X_{1 \text{ minuto}}$  y  $X_{10 \text{ minutos}}$ , determinadas mediante el modelo de la Figura 4.6.

**Tabla 4.5** Resultados para la Barra de Méndez 13.8 kV en el punto inicial del flujo de potencia en la Condición 2

Parámetro (pu)	Hora	Condición 2
$S_{SC}$	03:00	0.115
	20:00	0.150
$x$	03:00	0.353
	20:00	0.456
$E_{TH}$	03:00	1.060
	20:00	1.080
$Z_{TH}$	03:00	9.714
	20:00	7.758



**Figura 4.11** Registros Reales: V, P y Q - Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019)



**Figura 4.12**  $S_{sc}$  y  $x$  – Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019).

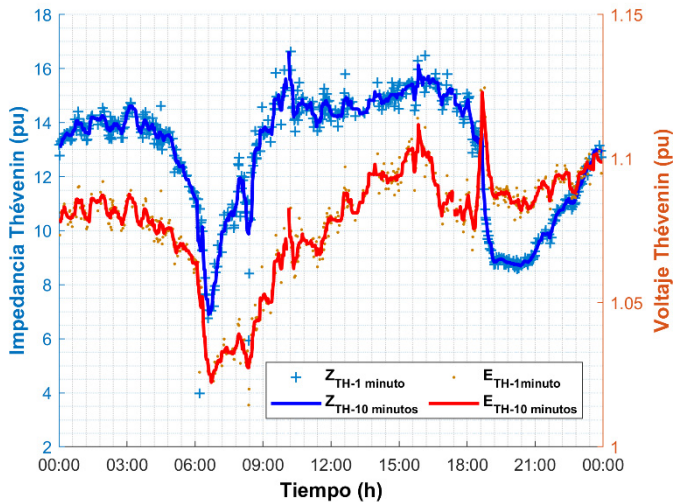
La Figura 4.13 muestra los valores del ET determinados para 1 y 10 minutos, los cuales corresponden a:  $Z_{TH-1\text{ minuto}}$ ,  $Z_{TH-10\text{ minutos}}$ ,  $E_{TH-1\text{ minuto}}$  y  $E_{TH-10\text{ minutos}}$ .

La Tabla 4.6 presenta los resultados para la barra de Méndez 13.8 kV, obtenidos mediante registros reales y correspondientes a las dos horas 03:00 y 20:00.

**Tabla 4.6** Resultados para la Barra de Méndez 13.8kV

Hora	$S_{sc}$	$x$	$E_{TH}$	$Z_{TH}$
03:00	0.08	0.49	1.08	14.34
20:00	0.14	0.49	1.09	8.78





**Figura 4.13**  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$  – Barra de Méndez 13.8 kV (22-enero-2019)

En base a un análisis comparativo de los resultados obtenidos por simulación y los encontrados mediante registros reales, indicados en las Tablas 4.5 y 4.6 respectivamente, se observa que efectivamente los resultados reales se acercan a los resultados simulados en la condición 2.

De manera complementaria en la Tabla 4.7 se presentan los resultados, para las 03:00 y 20:00, simulados bajo la condición 2 así como los determinados mediante registros reales.

**Tabla 4.7** Resultados comparativos para la Barra de Méndez 13.8 kV (03:00 – 20:00)

Parámetro (pu)	Simulación Condición 2		Registros Reales	
	03:00	20:00	03:00	20:00
$S_{sc}$	0.11	0.15	0.08	0.14
$x$	0.35	0.46	0.49	0.49
$E_{TH}$	1.06	1.08	1.08	1.09
$Z_{TH}$	9.71	7.76	14.34	8.78

Se observa que, para el caso de la Barra de Méndez 13.8 kV, los resultados se encuentran más cercanos para las 20:00 que para las 03:00, lo cual permite establecer que para las 20:00 la condición de simulación es bastante cercana a lo que se presentó en la realidad.

Considerando los resultados obtenidos y detallados en las Tablas 4.4 y 4.7, se observa que las horas de los escenarios simulados más cercanos a los registros reales para cada barra son diferentes.

En este sentido, es importante indicar que en la definición de los escenarios de cambios de carga para simulación, no solo se debe considerar su dirección (incrementos o decrementos), sino también las magnitudes de los cambios de carga, lo cual es una función de la potencia de cada carga analizada.

Finalmente, la Tabla 4.8 muestra los rangos totales para las variables de las barras de Gualaceo 22 kV y Méndez 13.8 kV determinados a partir de registros reales. Los valores máximos y mínimos de los registros de datos de todo el día, pueden considerarse como un rango de referencia para el ET en las barras analizadas para este día completo de estudio.

**Tabla 4.8** Rango del ET para las barras analizadas

<b>Parámetro (pu)</b>	<b>Barra Gualaceo 22 kV</b>	<b>Barra Méndez 13.8 kV</b>
<b><math>S_{SC}</math></b>	0.23 – 0.62	0.07 – 0.15
<b><math>x</math></b>	0.19 – 0.58	0.19 – 0.59
<b><math>E_{TH}</math></b>	0.97 – 1.06	1.02 – 1.12
<b><math>Z_{TH}</math></b>	1.56 – 4.89	6.90 – 16.64



## **5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

Este capítulo presenta las principales conclusiones extraídas de los resultados y contribuciones del proyecto realizado, las mismas que se han expuesto a lo largo de todos los capítulos de este documento. Además, también se discuten algunas ideas para trabajos futuros.

### **5.1 Conclusiones**

En este proyecto de investigación se han propuesto nuevos algoritmos para la determinación del nivel de cargabilidad y del ET en puntos terminales de un SEP utilizando mediciones locales. Estos algoritmos se desarrollan considerando un esquema metodológico de análisis basado en la determinación de la Potencia de Cortocircuito del ET.

Los algoritmos desarrollados han sido probados, mediante simulación en diversos sistemas de pruebas, verificándose un mejor desempeño que las técnicas existentes. Se destacan los casos en los que la carga presenta una modelación con factor de potencia variable lo cual genera errores en las metodologías existentes.

Se debe señalar que los métodos determinados en esta propuesta son simples y permiten ser aplicados tanto en un ambiente de simulación como con registros reales. En este sentido, los algoritmos desarrollados han sido probados mediante registros de mediciones reales del Sistema Nacional de Transmisión ecuatoriano en diferentes niveles de voltaje con resultados satisfactorios.

Las principales conclusiones obtenidas de este trabajo son las siguientes:

- La determinación de los niveles de cargabilidad en un SEP basada en la reducción del sistema original en un circuito reducido equivalente, para aplicar el teorema de máxima potencia transferible, es una propuesta válida. Sin embargo, se debe considerar que desde la perspectiva del circuito eléctrico reducido, las no linealidades que se presentan en los SEPs deben ser consideradas a fin de permitir la aplicación adecuada del criterio de maximización de potencia transferida en base a la impedancia del ET.
- El análisis de la maximización de la potencia transferida en el dominio de la Potencia de Cortocircuito, permite incluir las no linealidades del SEP de una manera inherente, logrando de esta manera mejorar la aplicación del criterio de maximización de potencia transferida en un SEP en base a la impedancia del ET.
- El nivel de cargabilidad y el ET, en los nodos terminales de un sistema eléctrico de potencia, pueden ser determinados considerando variables locales, en base al cálculo de la Potencia de Cortocircuito  $S_{sc}$ .
- Cuando el modelo de carga considera cambios en su factor de potencia, las metodologías de determinación del ET deben incluir la corrección por variación del factor de potencia, de manera que permitan cumplir el criterio de maximización de potencia cuando la impedancia de carga coincide con la impedancia equivalente de Thévenin.
- Mediante el uso de los algoritmos propuestos, basados en la Potencia de Cortocircuito, se supera el inconveniente del modelamiento de cargas con factores de potencia variables lo cual permite extender el criterio de maximización de transferencia de potencia cuando las impedancias Thévenin y de carga se igualen.

- El análisis de cargabilidad en base a la relación de potencias expresado en esta propuesta presenta un comportamiento más cercano a las no linealidades que presenta la operación de los SEP, en comparación al criterio de igualdad de impedancias.
- La evaluación de la potencia de cortocircuito y de la cargabilidad, determinados mediante la presente propuesta, corresponden a evaluaciones locales pero consideran todos los efectos y condiciones que se presenten en el SEP por medio de la Potencia de Cortocircuito determinada en cada barra evaluada.
- Dentro de los efectos y condiciones del SEP consideradas dentro de la Potencia de Cortocircuito, se incluyen: cambios de todas las cargas del sistema, cambios topológicos del sistema, movimiento de taps en transformadores, compensación reactiva, límites de generadores, entre otros.
- Desde la perspectiva del SEP en su conjunto, se determina que las barras con mayor cercanía al colapso de voltaje son las más cercanas a la máxima cargabilidad determinada mediante la presente metodología. En este sentido, el monitoreo permanente de la potencia de cortocircuito y de la cargabilidad, en cada barra de un sistema de potencia, permite establecer una determinación global de la cargabilidad del sistema en base a las barras que presenten el mayor valor de cargabilidad local.
- El esquema de determinación del ET presentado en este documento y su aplicación sobre registros reales, establece rangos de cargabilidad local que pueden ser consideradas como referencia para la definición de escenarios de incrementos de carga utilizados en estudios de planeamiento mediante simulación.

## 5.2 Trabajo Futuro

- Las metodologías presentadas en este proyecto requieren el procesamiento de dos conjuntos de mediciones consecutivas, tanto de voltaje como de potencias, realizadas en una misma barra del SEP. Es importante señalar que las mediciones utilizadas corresponden a las magnitudes de las mismas, por lo que las metodologías pueden ser compatibilizadas para utilizarse mediante esquemas de medición basados en PMUs.
- La corrección por variación del factor de potencia de las cargas, detallado en este documento, puede ser planteado como un trabajo futuro para incluirse en las metodologías existentes de determinación del ET basadas en el cálculo de la impedancia equivalente.
- En base a los resultados de la impedancia del ET y considerando la perspectiva del cálculo de cortocircuitos, es posible establecer un trabajo futuro que se enfoque en extender las metodologías planteadas para determinar los niveles de cortocircuito que van a presentarse en el SEP en caso de fallas. Este trabajo tiene una gran importancia para el campo de las protecciones eléctricas permitiendo establecer una mejor estimación de los niveles de corriente de falla basado en registros reales.
- Las metodologías planteadas pueden ser analizadas considerando su desempeño dentro del dominio del tiempo así como pueden ser incluidas dentro de los esquemas actuales de activación de acciones remediales ante escenarios de inestabilidad de SEPs.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Glavic and T. Van Cutsem, 'A short survey of methods for voltage instability detection', *2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. Detroit, USA*, pp. 1–8, 2011.
- [2] K. Vu, M. Begovic, D. Novosel, and M. Saha, 'Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1029–1035, 1999.
- [3] S. Soliman, H. Temraz, and S. El-Kodhari, 'Power system voltage stability margin identification using local measurements', *2003 Large Eng. Syst. Conf. Power Eng. Montr. Canada*, pp. 100–104, 2003.
- [4] I. Smon, S. Member, and G. Verbi, 'Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1267–1275, 2006.
- [5] S. Corsi and G. N. Taranto, 'A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1271–1279, 2008.
- [6] S. a. Arefifar and W. Xu, 'Online tracking of power system impedance parameters and field experiences', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 1781–1788, 2009.
- [7] W. Li, T. Chen, and W. Xu, 'On impedance matching and maximum power transfer', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 9, pp. 1082–1088, 2010.
- [8] C. Bai, M. Begovic, R. Nuqui, D. Sobajic, and Y. Song, 'On voltage stability monitoring with voltage instability predictors', *Proc. IREP Symp. Bulk Power Syst. Dyn. Control - IX, Crete, Greece*, pp. 1–8, 2013.
- [9] L. Ramirez and I. Dobson, 'Monitoring voltage collapse margin by measuring the area voltage across several transmission lines with synchrophasors', *2015 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. Denver, USA*, 2015.

- [10] M. Glavic, M. Lelic, D. Novosel, E. Heredia, and D. Kosterev, 'A simple computation and visualization of voltage stability power margins in real-time', *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf. Orlando, USA*, pp. 1–7, 2012.
- [11] S. C. Verma *et al.*, 'Short Circuit Current Estimation using PMU Measurements during Normal Load Variation', *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Eur. Berlin, Ger.*, pp. 1–5, 2012.
- [12] Y. Wang *et al.*, 'Voltage stability monitoring based on the concept of coupled single-port circuit', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2154–2163, 2011.
- [13] H. Y. Su and C. W. Liu, 'Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3221–3229, 2015.
- [14] D. T. Duong, K. Uhlen, G. N. Taranto, and S. Lovlund, 'A comparative case study of online voltage instability monitoring', *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015, Eindhoven, Netherlands*, pp. 1–6, 2015.
- [15] S. Polster, H. Renner, D. T. Duong, and K. Uhlen, 'Voltage stability monitoring using a modified Thévenin impedance', in *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017, 2017*, pp. 2–7.
- [16] D. T. Duong, 'Online Voltage Stability Monitoring and Coordinated Secondary Voltage Control', PhD. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [17] S. M. Burchett *et al.*, 'An Optimal Thévenin Equivalent Estimation Method and its Application to the Voltage Stability Analysis of a Wind Hub', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 3644–3652, 2018.
- [18] S. M. Abdelkader, A. A. Eladl, M. A. Saeed, and D. J. Morrow, 'Online Thévenin equivalent determination using graphical phasor manipulation', *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 97, pp. 233–239, Apr. 2018.

- [19] S. M. Burchett *et al.*, 'Voltage Stability Analysis of a Wind Hub using Thévenin Equivalent Models Estimated from Measured Data', *2017 IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1–6, 2017.
- [20] C. Taylor, 'Power System Voltage Stability'. 1994.
- [21] P. Kundur *et al.*, 'Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [22] Power System Dynamic Performance Committee, T. F. on S. definitions and characterization of Dynamic, behavior in systems with high penetration of power electronic Interfaced, and Technologies, 'Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies', *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. April, pp. 2108–2117, 2020.
- [23] C. Canizares (Editor/Coordinator), 'Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools', *IEEE PES Publ. Power Syst. Stab. Subcommittee*, no. 4, pp. 42–47, 2002.
- [24] T. Van Cutsem and C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Springer, 1998.
- [25] C. W. Taylor, 'Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, no. 2, pp. 480–488, 1992.
- [26] S. G. Ghiocel and J. H. Chow, 'A power flow method using a new bus type for computing steady-state voltage stability margins', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 958–965, 2014.
- [27] A. Wiszniewski, 'New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding', *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1367–1371, 2007.
- [28] P. Anderson, '05 System Characteristics', in *Power System Protection*, IEEE Press., Wiley Interscience, 1999, pp. 147–197.

- [29] C. Vournas, 'Maximum Power Transfer in the Presence of Network Resistance', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2014.
- [30] B. Milõsević and M. Begović, 'Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 121–127, 2003.
- [31] N. Tleis, *Power Systems Modelling and Fault Analysis*. Elsevier, 2008.
- [32] F. Chapi, 'Determination of Overcurrent Protection Settings Based on Estimation of Short-Circuit Currents by means of Local Measurements (in Spanish)', Master's Thesis, Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [33] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, 'Load representation for dynamic performance analysis', *IEEE Trans.on Power Syst.*, vol. 8, pp. 472–482, 1993.
- [34] W. U. Price, S. Uember, A. Uurdoch, J. V Uitsche, and S. Uember, 'Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 180–187, 1988.
- [35] CIGRE C4.605, 'Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks', 2014.
- [36] P. Thompson, *Dynamo Electric Machinery*, Second Edi. London, 2009.
- [37] A. Fonseca, F. Pérez-Yauli, and G. Salazar, 'Loadability analysis based on short-circuit power', *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 10, pp. 2540 – 2551, 2017.
- [38] B. Alinejad and H. Kazemi Karegar, 'On-Line Thevenin Impedance Estimation based on PMU data and Phase Drift Correction', *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.

- [39] S. M. Abdelkader and D. J. Morrow, 'Online Tracking of Thévenin Equivalent Parameters Using PMU Measurements', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 975–983, 2012.
- [40] M. Nakmali, D. Osipov, and K. Sun, 'A New Hybrid Approach to Thevenin Equivalent Estimation for Voltage Stability Monitoring', *2015 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. Denver, USA*, pp. 1–5, 2015.
- [41] M. N. Islam and W. Ongsakul, 'Thevenin Equivalent Parameter Tracking for On-line Voltage Stability Assessment', in *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia*, 2015.
- [42] H. Yuan and F. Li, 'A Comparative Study of Measurement-Based Thevenin Equivalents Identification Methods', *North Am. Power Symp. (NAPS), Washington, USA*, pp. 1–6, 2014.
- [43] J. E. Solås, 'A Wide Area Load Shedding Scheme to Prevent Voltage Instability', MSc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [44] S. M. Abdelkader and D. J. Morrow, 'Online Thevenin Equivalent Determination Considering System Side Changes and Measurement Errors', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2716–2725, 2014.
- [45] S.-J. S. Tsai and K.-H. Wong, 'On-line estimation of Thevenin equivalent with varying system states', *2008 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. Pennsylvania, USA*, pp. 1–7, 2008.
- [46] G. N. Taranto, C. Oyarce, and S. Corsi, 'Further investigations on a phasor measurement-based algorithm utilized for voltage instability awareness', *2013 IREP Symp. Bulk Power Syst. Dyn. Control - IX, Crete, Greece*, pp. 1–8, 2013.
- [47] A. Fonseca, 'Voltage stability analysis by monitoring voltage - Impedance Ratio applied to Ecuadorian power system', *2012 Sixth IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Montevideo, Uruguay*, no. 4, pp. 1–8, 2012.

- [48] S. Pérez-Londoño, L. F. Rodríguez, and G. Olivar, 'A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)', *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, vol. 63, pp. 806–813, 2014.
- [49] J. Esteban Tobón, J. M. Ramirez, and R. E. Correa Gutierrez, 'Tracking the maximum power transfer and loadability limit from sensitivities-based impedance matching', *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 355–363, 2015.
- [50] D. J. Douglas and S. Burchett, 'An On-line Thévenin Equivalent Estimation Algorithm and its Application to Condition Monitoring', *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*, pp. 295–300, 2018.
- [51] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, A. Safdarian, A. Davoudi, and M. Shahidehpour, 'Synchrophasor Measurement Technology in Power Systems: Panorama and State-of-the-Art', *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1607–1628, 2014.
- [52] C. D. Vournas, L. Ramirez, and I. Dobson, 'On Two-Bus Equivalents of Transmission Corridors', *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 3, pp. 2497–2498, 2016.
- [53] F. Hu, K. Sun, A. Del Rosso, E. Farantatos, and N. Bhatt, 'An adaptive three-bus power system equivalent for estimating voltage stability margin from synchronized phasor measurements', *2014 IEEE PES Gen. Meet. | Conf. Expo.*, pp. 1–5, 2014.
- [54] Digsilent, 'DigSILENT PowerFactory V14.1 User's Manual', vol. II, no. May, p. 575, 2011.
- [55] A. Fonseca, 'Análisis de Estabilidad de Voltaje mediante monitoreo conjunto de Voltaje - Impedancia', MSc. Tesis, Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [56] IEEE Std C50.13-2014 (Revision of IEEE Std C50.13-2005), 'IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above', pp. 1–63.

- [57] J. Stefan and S. Fredrik, 'Voltage collapse in power systems - The influence of generator current limiter, on-load tap changers and load dynamics', Chalmers University of Technology, 1995.
- [58] O. Wing, *Classical Circuit Theory*. New York: Springer, 2009.
- [59] S. Kodsí and C. Canizares, 'Modeling and simulation of IEEE 14-bus system with FACTS controllers', *Tech. Rep. 2003-3*, 2003.
- [60] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1994.
- [61] CONELEC, *Procedimiento de Despacho y Operación SNI*. 1999, p. 121.
- [62] S. Kunsman and G. Kobet, 'Processes , Issues , Trends and Quality Control of Relay Settings - IEEE PSRC Working Group', 2007.
- [63] F. Chapi and A. Fonseca, 'Determination of Overcurrent Protection Settings Based on Estimation of Short-Circuit Currents Using Local Measurements', *2019 IEEE Fourth Ecuador Tech. Chapters Meet.*, 2019.
- [64] IEC, 'Standard IEC 60909-0 Short-Circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems - Part 0', 2001.
- [65] MathWorks Inc., 'Matlab R2019a - academic use. Preprocessing Data'. 2019.





## **7. APÉNDICES**

En este apartado se detallan los apéndices señalados dentro del presente documento.

APÉNDICE 1. Análisis variacional y derivadas *VPS/s*

APÉNDICE 2. Cálculo numérico para Determinación del Equivalente Thevenin (DET)

## APÉNDICE 1: Análisis variacional y derivadas de VPSIs

El indicador  $VPSI_s$ , definido en la Ecuación 3.8, es reproducido nuevamente como lo indica en (A.1)

$$VPSI_s = S_s V_s^n = \frac{S V^n}{S_{sc} E_{TH}^n} \quad (A.1)$$

Un máximo  $VPSI_s$  ocurre cuando la derivada de  $VPSI_s$  respecto a  $S_s$  es igual a cero. Esta derivada puede ser reescrita considerando que los cambios en la carga y en el sistema se presentan de manera independiente como se indican en (A.2) y (A.3) respectivamente.

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{\partial VPSI_s}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial S_s} = \frac{\partial VPSI_s}{\partial S} S_{sc} \quad (A.2)$$

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{\partial VPSI_s}{\partial S_{sc}} \frac{\partial S_{sc}}{\partial S_s} = \frac{\partial VPSI_s}{\partial S_{sc}} \left( -\frac{S_{sc}^c}{S} \right) \quad (A.3)$$

Desde estas ecuaciones es posible obtener las derivadas parciales de  $VPSI_s$  respecto a  $S$  y  $S_{sc}$  como se exponen en (A.4) y (A.5).

$$\frac{\partial VPSI_s}{\partial S} = \frac{1}{S_{sc}} \frac{dVPSI_s}{dS_s} = \frac{Z_{TH}}{E_{TH}^2} \frac{dVPSI_s}{dS_s} \quad (A.4)$$

$$\frac{\partial VPSI_s}{\partial S_{sc}} = -\frac{S}{S_{sc}^c} \frac{dVPSI_s}{dS_s} = -\frac{S Z_{TH}^2}{E_{TH}^4} \frac{dVPSI_s}{dS_s} \quad (A.5)$$

Cuando se consideran valores reales para el voltaje  $V$ , y potencia aparente  $S$ , es posible definir al indicador  $VPSI$  como se indica en (A.6).

$$VPSI = S V^n = \frac{E_{TH}^{n+2}}{Z_{TH}} VPSI_s \quad (A.6)$$

### Derivadas parciales de $VPSI_s$

Las derivadas parciales de  $VPSI$  respecto a  $S$ ,  $Z_{TH}$  y  $E_{TH}$  pueden ser obtenidas y corresponden a (A.7 – A.9)

$$\frac{\partial VPSI}{\partial S} = E_{TH}^n \frac{dVPSI}{dS_s} \quad (A.7)$$

$$\frac{\partial VPSI}{\partial Z_{TH}} = \frac{1}{Z_{TH}} \left[ -VPSI + SE_{TH}^n \frac{dVPSI}{dS_s} \right] \quad (A.8)$$

$$\frac{\partial VPSI}{\partial E} = \frac{1}{E_{TH}} \left[ (n+2)VPSI + 2SE_{TH}^n \frac{dVPSI}{dS_s} \right] \quad (A.9)$$

Considerando el modelo linealizado indicado en la Ecuación 3.14 y las derivadas parciales de  $VPSI$  indicadas en (A.7), (A.8) and (A.9), es posible obtener las derivadas parciales de  $\ln(VPSI_s)$  respecto a  $S$ ,  $Z_{TH}$  and  $E_{TH}$  las cuales corresponden a (A.10), (A.11) y (A.12).

$$\frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial S} = \frac{1}{VPSI} \frac{\partial VPSI}{\partial S} = \frac{E_{TH}^n}{VPSI} \frac{dVPSI}{dS} \quad (A.10)$$

$$\frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial Z_{TH}} = \frac{1}{VPSI} \frac{\partial VPSI}{\partial Z_{TH}} + \frac{1}{Z_{TH}} = \frac{SE_{TH}^n}{Z_{TH} VPSI} \frac{dVPSI}{dS} \quad (A.11)$$

$$\frac{\partial \ln(VPSI_s)}{\partial E_{TH}} = \frac{1}{VPSI} \frac{\partial VPSI}{\partial E_{TH}} - \frac{n+2}{E_{TH}} = -\frac{2SE_{TH}^{n-1}}{VPSI} \frac{dVPSI}{dS} \quad (A.12)$$

### Segunda derivada de $VPSI_s$

El máximo  $VPSI_s$  se presenta cuando la derivada de  $VPSI_s$  con respecto a  $S_s$  es igual a cero, expresado en la Ecuación 3.10, la misma que es reproducida nuevamente como lo indica en (A.13)

$$\frac{dVPSI_s}{dS_s} = \left[ \frac{n(A-1)}{2A} + 1 \right] \left[ \frac{A-2mS_s+1}{2} \right]^{\frac{n}{2}} = 0 \quad (A.13)$$

Donde  $A$ , definido en la Ecuación 3.6, es reproducido nuevamente como lo indica en (A.14)

$$A = \sqrt{1 + 4(m^2 - 1)S_s^2 - 4mS_s} \quad (\text{A.14})$$

El máximo  $VPS|_S$  se presenta si  $n$  toma el valor definido en la Ecuación 3.11, la misma que es reproducida nuevamente como lo indica en (A.15)

$$n = \frac{2A}{1 - A} \quad (\text{A.15})$$

Entonces, la segunda derivada evaluada en el punto de máximo  $VPS|_S$  es detallado en (A.16).

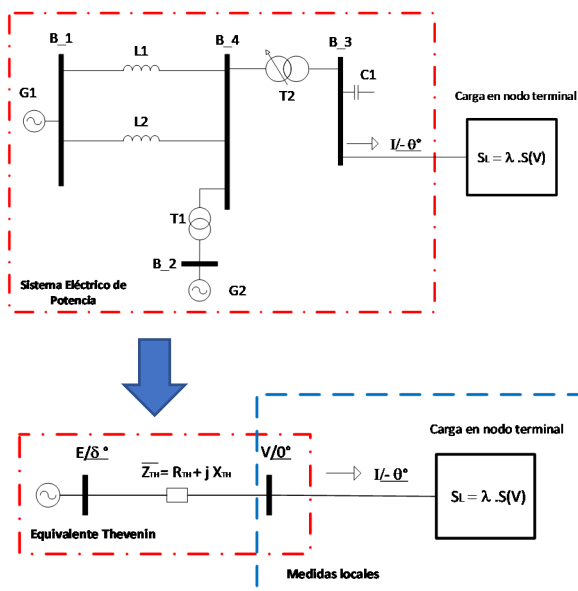
$$\begin{aligned} \frac{d^2 VPS|_S}{dS_s^2} = & -2n \left[ \frac{1}{|(n+2)^{11}} \right] \left[ \frac{\sqrt{4S_s^2 + A^2 + A}}{S_s |A^3| 2^{\frac{n+2}{2}}} \right]^{\frac{n-4}{2}} \\ & \left\{ (n+2)^4 \sqrt{4(n+2)^2 S_s^2 + n^2} \cdot [2(n+2)^6 S_s^2 + n(|n^2(n+2)^3| - n(n+2)^3(n^2 - 2))] \right. \\ & + 2(n+2)^8 [n^3 |n+2| - (n+2)(n^2 - n - 4)|n|] S_s^2 + n^5 |(n+2)^7| \\ & \left. - (n+2)^7 (n^2 - 2) |n^3| \right\} \end{aligned}$$

En esta ecuación, los dos términos entre corchetes son siempre positivos, por su parte el término final entre llaves es positivo para valores positivos de  $S_s$  y  $n$ . Entonces, el signo de la segunda derivada es definido por el término inicial:  $-2n$ .

Bajo esta condición, el signo negativo de la segunda derivada se presenta para valores positivos de  $n$  con lo que la función  $VPS|_S$  es convexa y contiene un punto máximo.

## APÉNDICE 2: Cálculo numérico para Determinación del Equivalente Thevenin (DET)

Para el presente análisis, se considera la reducción del sistema indicado en la Figura 2.21, de la sección 2.4.2.2, hacia un equivalente Thevenin.

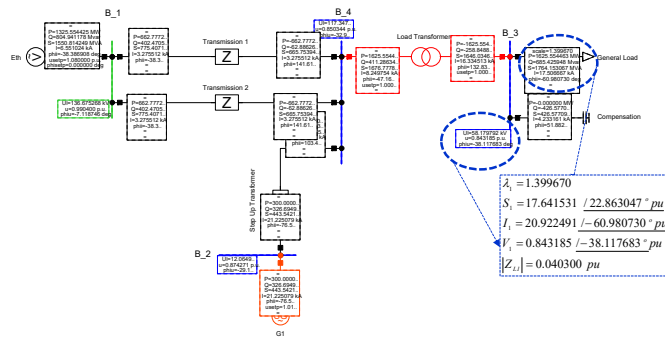


Si se realizan  $n$  incrementos sucesivos de carga en el tiempo, considerando el SEP constante se obtienen  $n$  mediciones como se indica en la siguiente ecuación:

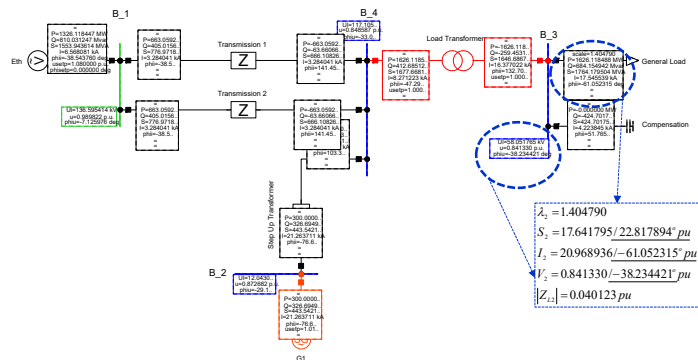
$$E/\delta = V_i / \varphi_i^\circ + I_i / -\theta_i \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

A continuación se presenta la respuesta del SEP considerando a los generadores como fuentes ideales y un modelo de carga exponencial. Se presentan tres puntos de simulación, siendo el último punto el correspondiente a la máxima cargabilidad del sistema.

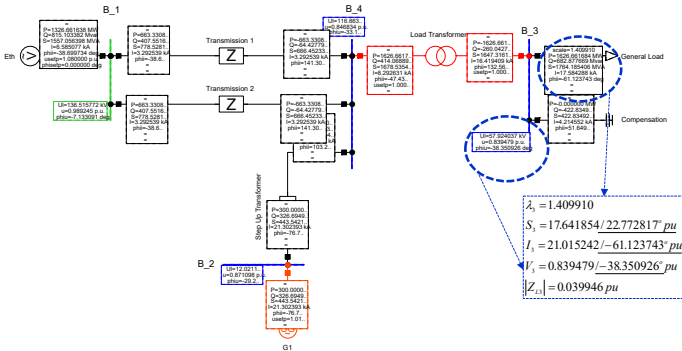
## Punto 1



## Punto 2



### Punto 3 – Máxima Cargabilidad



✓ **DET mediante 2 Puntos Sincronizados – Teorema de Tellegen – Referencia [4]**

Para este método se consideran 2 mediciones consecutivas que presentan una referencia constante en la fuente, i.e.  $\delta = 0^\circ$ .

Punto 1:  $E = V_1 / \varphi_1 + I_1 / \theta_1 \cdot (R_{TH} + jX_{TH})$

Punto 2:  $E = V_2 / \varphi_2 + I_2 / \theta_2 \cdot (R_{TH} + jX_{TH})$

Utilizando la metodología indicada en la Referencia [4]:

$$|Z_{TH}| = \left| \frac{V_1 / \varphi_1 - V_2 / \varphi_2}{I_1 / \theta_1 - I_2 / \theta_2} \right| = \left| \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta \vec{I}} \right|$$

#### Punto 1

$$\lambda_1 = 1.399670$$

$$S_1 = 17.641531 / 22.863047^\circ \text{ pu}$$

$$I_1 = 20.922491 / -60.980730^\circ \text{ pu}$$

$$V_1 = 0.843185 / -38.117683^\circ \text{ pu}$$

$$|Z_{L1}| = 0.040300 \text{ pu}$$

#### Punto 2

$$\lambda_2 = 1.404790$$

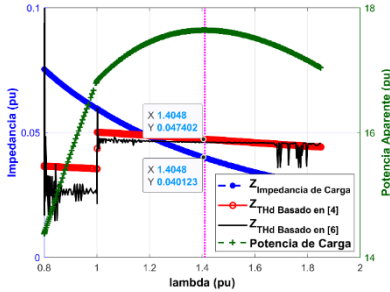
$$S_2 = 17.641795 / 22.817894^\circ \text{ pu}$$

$$I_2 = 20.968936 / -61.052315^\circ \text{ pu}$$

$$V_2 = 0.841330 / -38.234421^\circ \text{ pu}$$

$$|Z_{L2}| = 0.040123 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned} \Delta \vec{V}_{1-2} &= 0.002519 + j 0.000202 \\ \Delta \vec{I}_{1-2} &= 0.003867 + j 0.053309 \end{aligned} \Rightarrow |Z_{TH-1-2}| = \left| \frac{\Delta \vec{V}_{1-2}}{\Delta \vec{I}_{1-2}} \right| = 0.047402$$



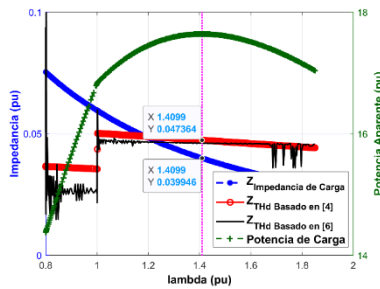
### Punto 2

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= 1.404790 \\ S_2 &= 17.641795 / 22.817894^\circ \text{ pu} \\ I_2 &= 20.968936 / -61.052315^\circ \text{ pu} \\ V_2 &= 0.841330 / -38.234421^\circ \text{ pu} \\ |Z_{L2}| &= 0.040123 \text{ pu} \end{aligned}$$

### Punto 3

$$\begin{aligned} \lambda_3 &= 1.409910 \\ S_3 &= 17.641854 / 22.772817^\circ \text{ pu} \\ I_3 &= 21.015242 / -61.123743^\circ \text{ pu} \\ V_3 &= 0.839479 / -38.350926^\circ \text{ pu} \\ |Z_{L3}| &= 0.039946 \text{ pu} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \vec{V}_{2-3} &= 0.002512 + j 0.000194 \\ \Delta \vec{I}_{2-3} &= 0.000521 + j 0.053186 \end{aligned} \Rightarrow |Z_{TH-2-3}| = \left| \frac{\Delta \vec{V}_{2-3}}{\Delta \vec{I}_{2-3}} \right| = 0.047364$$





✓ **DET mediante 3 Puntos No Sincronizados – Solución Analítica – Referencia [6]**

Se consideran 3 mediciones consecutivas y que la referencia se mantiene constante en la corriente de carga, i.e  $\theta=0^\circ$ . Adicionalmente, se establecen los voltajes de carga en términos real e imaginario.

Punto 1:

$$E/\underline{\delta} = V_1/\underline{\phi}_1 + I_1 \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \Rightarrow E = (R_{TH} \cdot I_1 + V_{x1})^2 + (X_{TH} \cdot I_1 + V_{y1})^2$$


Punto 2:

$$E/\underline{\delta} = V_3/\underline{\phi}_3 + I_3 \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \Rightarrow E = (R_{TH} \cdot I_3 + V_{x3})^2 + (X_{TH} \cdot I_3 + V_{y3})^2$$

Punto 3:

$$E/\underline{\delta} = V_3/\underline{\phi}_3 + I_3 \cdot (R_{TH} + jX_{TH}) \Rightarrow E = (R_{TH} \cdot I_3 + V_{x3})^2 + (X_{TH} \cdot I_3 + V_{y3})^2$$

Utilizando la metodología indicada en la Referencia [6]:

$A = I_1^2 - I_2^2$ $B = 2 \cdot (I_1 \cdot V_{x1} - I_2 \cdot V_{x2})$ $C = V_{x1}^2 - V_{x2}^2$ $D = 2 \cdot (I_2 \cdot V_{y2} - I_1 \cdot V_{y1})$ $E = V_{y2}^2 - V_{y1}^2$ $F = I_1^2 - I_3^2$ $G = 2 \cdot (I_1 \cdot V_{x1} - I_3 \cdot V_{x3})$ $H = V_{x1}^2 - V_{x3}^2$ $K = 2 \cdot (I_3 \cdot V_{y3} - I_1 \cdot V_{y1})$ $L = V_{y3}^2 - V_{y1}^2$		$M = \frac{BF - AG}{DF - AK}$ $N = \frac{AL + FC - AH - EF}{DF - AK}$ $T_{xa} = 1 + M^2$ $T_{xb} = B + 2AMN - DM$ $T_{xc} = C + AN^2 - DN - E$ $R_{TH} = \frac{-T_{xb} \pm \sqrt{T_{xb}^2 - 4T_{xa}T_{xc}}}{2T_{xa}}$ $X_{TH} = M \cdot R_{TH} + N$ $Z_{TH} = \sqrt{R_{TH}^2 + jX_{TH}^2}$
---	---	--

Para la aplicación de la metodología indicada en la Referencia [6], es necesario referenciar las mediciones hacia la corriente de carga.

### Punto 1

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 1.399670 \\ S_1 &= 17.641531 / 22.863047^\circ \text{ pu} \\ I_1 &= 20.922491 / 0^\circ \text{ pu} \\ V_1 &= 0.843185 / 22.863047^\circ = 0.776941 + j0.327602 \text{ pu} \\ |Z_{L1}| &= 0.040300 \text{ pu}\end{aligned}$$

### Punto 2

$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 1.404790 \\ S_2 &= 17.641795 / 22.817894^\circ \text{ pu} \\ I_2 &= 20.968936 / 0^\circ \text{ pu} \\ V_2 &= 0.841330 / 22.817894^\circ = 0.775489 + j0.326271 \text{ pu} \\ |Z_{L2}| &= 0.040123 \text{ pu}\end{aligned}$$

### Punto 3

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= 1.409910 \\ S_3 &= 17.641854 / 22.772817^\circ \text{ pu} \\ I_3 &= 21.015242 / 0^\circ \text{ pu} \\ V_3 &= 0.839479 / 22.772817^\circ = 0.775489 + j0.326271 \text{ pu} \\ |Z_{L3}| &= 0.039946 \text{ pu}\end{aligned}$$

$$A = I_1^2 - I_2^2 = -1.945648$$

$$B = 2 \cdot (I_1 \cdot V_{x1} - I_2 \cdot V_{x2}) = -0.01281$$

$$C = V_{x1}^2 - V_{x2}^2 = 0.002254$$

$$D = 2 \cdot (I_2 \cdot V_{y2} - I_1 \cdot V_{y1}) = -0.025420$$

$$E = V_{y2}^2 - V_{y1}^2 = -0.000871$$

$$F = I_1^2 - I_3^2 = -3.889748$$

$$G = 2 \cdot (I_1 \cdot V_{x1} - I_3 \cdot V_{x3}) = -0.022144$$

$$H = V_{x1}^2 - V_{x3}^2 = 0.004501$$

$$K = 2 \cdot (I_3 \cdot V_{y3} - I_1 \cdot V_{y1}) = -0.050966$$

$$L = V_{y3}^2 - V_{y1}^2 = -0.001735$$

$$M = \frac{BF - AG}{DF - AK} = -2.799896$$

$$N = \frac{AL + FC - AH - EF}{DF - AK} = 0.076319$$

$$T_{xa} = 1 + M^2 = -17.198403$$

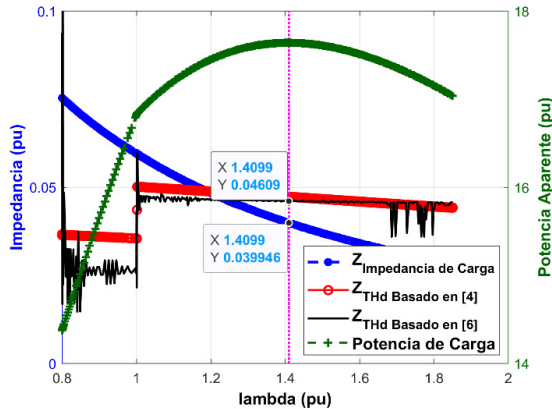
$$T_{xb} = B + 2AMN - DM = 0.749058$$

$$T_{xc} = C + AN^2 - DN - E = -0.006268$$

$$R_{TH} = \frac{-T_{xb} \pm \sqrt{T_{xb}^2 - 4T_{xa}T_{xc}}}{2T_{xa}} = 0.011299$$

$$X_{TH} = M \cdot R_{TH} + N = 0.044684$$

$$Z_{TH} = \sqrt{R_{TH}^2 + jX_{TH}^2} = 0.046090$$



✓ **DET mediante  $S_{sc}$  – Magnitudes de 2 Puntos No Sincronizados**

Se considera la aplicación de la metodología presentada en 3.2.3 de la Figura 3.9 se obtienen los siguientes resultados.

**Punto 2**

$$\lambda_2 = 1.404790$$

$$S_2 = 17.641795 / 22.817894^\circ pu$$

$$|V_2| = 0.841330 pu$$

$$|Z_{L2}| = 0.040123 pu$$

**Punto 3**

$$\lambda_3 = 1.409910$$

$$S_3 = 17.641854 / 22.772817^\circ pu$$

$$|V_3| = 0.839479 pu$$

$$|Z_{L3}| = 0.039946 pu$$

En el punto de mínimo error se reporta que  $x = 1$  y los siguientes valores en cada punto.

**Punto 2**

$$m_1 = 0.387803$$

$$S_{s01} = 0.360282$$

$$A_1 = 8.296615e-08$$

$$n_1 = 1.659323e-07$$

$$VPSI_1 = 17.641795$$

**Punto 3**

$$m_2 = 0.387078$$

$$S_{s02} = 0.360470$$

$$A_2 = 8.363256e-08$$

$$n_2 = 1.672651e-07$$

$$VPSI_2 = 17.641854$$

La evaluación del error corresponde a:

$$e = \ln \left( \frac{VPSI_2}{VPSI_1} \right) = 3.3447e-6$$

Se determina la Potencia de Carga Equivalente hacia el Sistema:

$$S_{s0} = 0.360469$$

En consecuencia, se determina la Potencia de Cortocircuito  $S_{sc}$  y el Voltaje de Carga normalizado  $V_s$ :

$$S_{sc} = \frac{S}{S_{s0}} = \frac{17.641854}{0.360469} = 48.9413$$

$$V_s = \sqrt{\frac{1}{2} - m_2 S_{s0} \pm \sqrt{\frac{1}{4} + (m_2^2 - 1) S_{s0}^2 - m S_{s0}}} = 0.600392$$

Finalmente, el equivalente Thévenin determinado corresponde a:

$$E_{TH} = \frac{V}{V_s} = \frac{0.839479}{0.600392} = 1.398218$$

$$Z_{TH} = \frac{E_{TH}^2}{S_{sc}} = \frac{(1.398218)^2}{48.9413} = 0.039946$$

