

**ANÁLISIS DEL ESTADO ESTACIONARIO DE LA CONEXIÓN DE
UN TURBOGENERADOR A LA SUBESTACIÓN SPLITTER DE LA
EMPRESA PROPILCO S.A., POR MEDIO DEL PROGRAMA
DIGSILENT POWER FACTORY**

**DÍAZ BERRIO JENNIFER PAOLA
BERRIO FLOREZ ADRIANA MARGARITA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA
2012**

**ANÁLISIS DEL ESTADO ESTACIONARIO DE LA CONEXIÓN DE
UN TURBOGENERADOR A LA SUBESTACIÓN SPLITTER DE LA
EMPRESA PROPILCO S.A., POR MEDIO DEL PROGRAMA
DIGSILENT POWER FACTORY**

**DÍAZ BERRIO JENNIFER PAOLA
BERRIO FLOREZ ADRIANA MARGARITA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO CON EL FIN
DE ALCANZAR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Director
LUIS EDUARDO RUEDA RINCÓN**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA
2012**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTO

Jennifer

A Dios principalmente por regalarme discernimiento para tomar las mejores decisiones y constancia para lograr mis objetivos.

A mi madre y mi madrina que siempre me han guiado por el camino ideal y que han estado presentes en mi crecimiento como mujer y como profesional.

Adriana

A mi Dios por brindarme la sabiduría espiritual y la inteligencia intelectual necesaria para alcanzar mis metas.

A mis padres que siempre han estado junto a mí, en mi crecimiento personal con su amor, apoyo incondicional, valores y buenas costumbres.

A Gustavo Gavis Navia que me ha apoyado y ayudado a lo largo de mi carrera.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	9
2. Objetivos.....	10
3. Marco Teórico	11
3.1 Estudios Eléctricos en un Sistema de Potencia	11
3.1.1 Estudios de Flujo De Potencia.....	11
3.1.2 Estudios de Cortocircuitos	12
4. Descripción General	15
5. Descripción Detallada	16
5.1 Sistema Eléctrico de PROPILCO	18
5.2 Demanda de PROPILCO	22
5.3 Alimentadores y Cables de Conexión de PROPILCO	23
5.4 Estudios de Estado Estacionario	25
5.4.1 Metodología para los estudios de Estado Estacionario	25
5.4.2 Criterios para los estudios de Estado Estacionario	25
5.5 Estudios de Cortocircuito	26
5.5.1 Metodología para los estudios Cortocircuito	26
5.5.2 Criterios para los estudios de Cortocircuito	27
6. Resultados y Análisis de Resultados	28
6.1 Resultados de Estado Estacionario	27
6.2 Resultados de Estudios de Cortocircuito	31
7. Conclusiones	33
8. Referencias	35
8.1 Bibliográficas	35
8.2 En línea	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros RED Equivalente	18
Tabla 2. Alimentadores por subestación de la planta PROPILCO	19
Tabla 3. Parámetros de alimentadores principales al interior de la planta	19
Tabla 4. Parámetros de alimentadores de la conexión del turbogenerador III	19
Tabla 5. Parámetros de transformadores de PROPILCO	20
Tabla 6. Parámetros de autotransformadores de PROPILCO	20
Tabla 7. Parámetros de Motores de PROPILCO subestación PP10	20
Tabla 8. Parámetros de Motores de PROPILCO subestación SPLITTER	20
Tabla 9. Parámetros de condensadores de PROPILCO	20
Tabla 10. Parámetros de generadores de PROPILCO	21
Tabla 11. Parámetros de generadores de PROPILCO	21
Tabla 12. Demanda de PROPILCO en cada subestación	23
Tabla 13. Parámetros de cables en la S/E Splitter	24
Tabla 14. Parámetros de cables en la S/E PP10	24
Tabla 15. Cargabilidad de los Transformadores	27
Tabla 16. Cargabilidad de los Alimentadores Principales	27
Tabla 17. Cargabilidad de las Líneas principales de cada Subestación	28
Tabla 18. Tensión en las Barras	29
Tabla 19. Resultados de Estudios de Corto Circuito Trifásico	30
Tabla 20. Resultados de Estudios de Corto Circuito Bifásico	30
Tabla 21. Resultados de Estudios de Corto Circuito Monofásico	30

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Ubicación PROPILCO en Cartagena	16
Figura 2. Configuración PROPILCO, sin la conexión del Turbogenerador III	17
Figura 3. Configuración PROPILCO con conexión Turbogenerador III	18

1. INTRODUCCIÓN

La monografía “ANÁLISIS DEL ESTADO ESTACIONARIO DE LA CONEXIÓN DE UN TURBOGENERADOR A LA SUBESTACIÓN SPLITTER DE LA EMPRESA PROPILCO S.A., POR MEDIO DEL PROGRAMA DIGSILENT POWER FACTORY”, estudia y determina el impacto que tiene sobre el sistema eléctrico de PROPILCO la conexión de un nuevo generador de 5,67 MW.

El estudio se realiza para diferentes escenarios operativos en los cuales se analizan los máximos niveles de cortocircuito en las barras del sistema eléctrico manteniendo como base la Norma IEC 60909^[3] titulada como “Cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos A.C.” y permite calcular dos corrientes de cortocircuito diferentes:

- La corriente de cortocircuito máxima, con la cual es posible determinar la capacidad del equipo eléctrico.
- La corriente de cortocircuito mínima, que se emplea como base para la selección de fusibles, calibración de protecciones y chequeo de arranque de motores.

Además se analizan los resultados en estado estacionario (cargabilidad de transformadores, de los alimentadores principales y el control de tensiones) para comprobar que todas las variables del sistema se encuentran dentro de los valores establecidos por la reglamentación vigente para sistemas eléctricos de potencia, como lo es la CREG 070 de 1998^[1] por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional y la CREG 025 de 1995^[2] por la cual se establece el Código de Redes como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional, sin dejar a un lado las restricciones operativas de cada uno de los elementos del sistema de potencia.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Efectuar los estudios eléctricos de estado estacionario (flujos de cargas) para diferentes escenarios operativos en demanda máxima, ante la entrada en operación del nuevo turbogenerador de 5,67 MW en la subestación Splitter, a fin de determinar el impacto que sobre el sistema eléctrico de PROPILCO, exactamente en los alimentadores PPCO4 y PPCO5, tiene este nuevo generador en diferentes escenarios operativos.

2.2. Específicos

- 3.2.1** Realizar el análisis de los máximos niveles de cortocircuito en las barras del sistema eléctrico de PROPILCO en los alimentadores PPCO4 y PPCO5, para diferentes escenarios operativos, en condición de máxima demanda en PROPILCO.
- 3.2.2** Mostrar por medio de simulaciones que la conexión del nuevo turbogenerador de 5,67 MW en PROPILCO, puede llegar a ser exitosa ya que las variables operativas del sistema eléctrico permanecerán dentro de los límites establecidos por la reglamentación vigente para sistemas de distribución.

3. MARCO TEÓRICO

Esta sección hace referencia a las definiciones y finalidades de cada uno de los estudios necesarios para determinar y garantizar el buen comportamiento de un Sistema Eléctrico de Potencia.

3.1 Estudios Eléctricos en un Sistema de Potencia

La planificación, el diseño y la operación de los sistemas eléctricos de potencia, requiere de fundamentales estudios para evaluar su comportamiento, confiabilidad y seguridad. Estudios típicos que se realizan son: flujos de potencia, estabilidad, coordinación de protecciones, cálculo de cortocircuito, etc.

Un buen diseño debe estar basado en un cuidadoso estudio en que se incluye la selección de voltaje, adecuado tamaño del equipamiento y selección apropiada de protecciones. La mayoría de los estudios necesita de un complejo y detallado modelo que represente al sistema de potencia, generalmente establecido en la etapa de proyecto^[a].

Los resultados obtenidos por cada uno de estos estudios son importantes, por medio de estos se pueden identificar y alertar sobre potenciales deficiencias en el sistema factibles de corregir o prevenir. Además, a través de estos estudios se puede evaluar el desempeño del sistema existente al calcular los índices de confiabilidad, seguridad y economía^[b].

3.1.1 Estudios de Flujo De Potencia.

Los estudios de flujo de potencia son una de las herramientas más utilizadas para el análisis de redes eléctricas en estado estable, tanto durante la fase de diseño como en la operación del sistema^[c]. Un análisis de flujo de carga se lleva a cabo para predecir las magnitudes del poder de carga, factor de potencia, niveles de tensión y pérdidas en las del sistema basado en las condiciones de funcionamiento especificadas^[d].

En este estudio se investiga el desempeño de corriente uniforme constante del sistema bajo condiciones de funcionamiento normales y anormales^[c] y se definen principalmente las potencias activa y reactiva y el vector de tensión en cada barraje del sistema, para ello se vale de las leyes de Kirchhoff y de un modelo matemático para calcular el flujo de potencia no lineal (los normalmente más usados son el método Gauss-Seidel y el método Newton-Raphson^[d]), sin embargo también se cuentan con muchas herramientas informáticas para calcular los flujos de potencias, una de ellas es el software DigSilent.

Por medio del software, se realiza una simulación del sistema de potencia y para ello todas las cargas del sistema son importantes, se deben modelar todos los componentes (Generadores, transformadores, líneas, motores, cargas, banco de condensadores, etc.) de manera detallada, aunque también en donde sea posible, se pueden desarrollar equivalentes del sistema para no tener un sistema tan extenso y simplificar el trabajo^[d]. Una vez modelado el sistema, se obtienen las variables deseadas utilizando como herramienta el cálculo del flujo de cargas del programa DigSilent^[d].

Los resultados finales del estudio se utilizan para determinar una o más de las siguientes opciones^[d]:

- Reguladores de tensión de transformadores recomendados para mantener un nivel de tensión apropiado.
- Tamaño del banco de condensadores o filtros para mantener un factor de potencia y/o nivel de tensión aceptable.
- Clasificación del equipo (Admisible)
- Análisis de Contingencia
- Pérdidas
- Para evaluar el funcionamiento del sistema de potencia, su control y planificación para expansiones futuras.

3.1.2 *Estudios de Cortocircuitos*^[e].

El cortocircuito en un sistema se manifiesta por la disminución repentina de la impedancia de un circuito determinado, lo que produce un aumento de la corriente^[a]. El hecho que se presenten fallas de cortocircuito es normal para todos los sistemas eléctricos, estos son susceptibles a fallas, las cuales pueden tener su origen en fenómenos naturales o en desperfectos en los elementos que componen el sistema^[e].

Los estudios de cortocircuito son realizados para determinar la magnitud de las corrientes que fluyen a través de los sistemas de potencia en distintos intervalos de tiempo después de ocurrir una falla. Esta magnitud varía con el tiempo hasta alcanzar su condición de estable, este comportamiento varía de acuerdo a las dinámicas y características del sistema^[b].

Por medios de este estudio, se puede determinar la adecuación disruptiva del equipo de sistemas eléctricos de potencia y los mecanismos protectores asociados, además proporciona una guía en la selección y clasificación o ajuste de mecanismos protectores, tales como interruptor de acción directa, fusibles, relés y bases para la clasificación de corrientes de cortocircuito requeridos por bancos de condensadores y filtros de armónicos^[d].

Al iniciar el estudio de cortocircuito es conveniente conocer algunas de las causas por las cuales se pueden producir fallas en los sistemas eléctricos de potencia, entre las causas más comunes se encuentran las siguientes:

- Falas en los elementos como aisladores, transformadores o generadores debido al envejecimiento del aislamiento por la exposición prolongada a altas temperaturas.
- Descargas a través de los aisladores debidos al efecto corona, sobre voltajes o aisladores defectuosos.
- Sobre voltajes transitorios debidos a maniobras en la red o por tormentas eléctricas.
- Accidentes comunes como caídas de árboles, aves que cortocircuitan las redes.

Cabe indicar que este tipo de fallas pueden producir cortocircuitos de corta duración o de larga duración en la red^[e], dependiendo de las características del sistema y del tipo de falla que se presente, los tipos de fallas se pueden clasificar de la siguiente manera:

Cada una de estas fallas genera una corriente de amplitud definida y características específicas. Para las fallas asimétricas, la razón de llamarse de esa forma es debido a que las corrientes post-falla son diferentes en magnitudes y no están desfasadas en 120 grados.

En el estudio de éstas corrientes, se utiliza generalmente el método de componentes simétricas, el cual constituye una importante herramienta para analizar sistemas desequilibrados.

En sistemas de distribución, para los efectos de evaluar las máximas corrientes de fallas, sólo se calculan las corrientes de cortocircuito trifásico y monofásico.

Las fallas monofásicas a tierra pueden generar corrientes de falla cuya magnitud pueden superar a la corriente de falla trifásica. Sin embargo, esto es más frecuente que ocurra en sistemas de transmisión o de distribución en media tensión, sobre todo cuando la falla se ubica cerca de la subestación. Es poco frecuente que la corriente de falla monofásica supere en amplitud la corriente generada por una falla trifásica. La magnitud de la falla monofásica puede superar a la generada por una falla trifásica en el mismo punto, en el caso de que la falla no involucre la malla de tierra^[a].

En el estudio de cortocircuito se simulan los diferentes tipos de fallas en diferentes sitios a lo largo del sistema, también, la herramienta a utilizar es el programa DigSilent, este realiza el cálculo de las corrientes de cortocircuito se basa en la norma IEC 60909 titulada como "Cálculo de corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos A.C."

Esta norma permite calcular dos corrientes de cortocircuito diferentes:

- La corriente de cortocircuito máxima, con la cual es posible determinar la capacidad del equipo eléctrico.
- La corriente de cortocircuito mínima, que se emplea como base para la selección de fusibles, calibración de protecciones y chequeo de arranque de motores.

Para cada falla se determina el valor de la corriente simétrica inicial de cortocircuito (I_k''), la cual es el valor RMS de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito esperada y que aparece en el instante de la falla, si la impedancia permanece en el valor que tiene en el tiempo cero.

También se presenta la potencia aparente inicial simétrica (S_k'') que corresponde a

$$S_k'' = 3 \cdot U_n \cdot I_k''$$

En esta fase del estudio se evalúan los niveles de cortocircuito trifásico y monofásico máximos, en los barrajes de interés^[1].

4. DESCRIPCIÓN GENERAL

PROPILCO S.A. se encuentra en proceso de conexión de un nuevo turbogenerador a la subestación Splitter, cuya potencia máxima será de 5,67 MW y que se interconectará con el sistema eléctrico de media tensión para abastecer, junto con los otros dos cogeneradores existentes, gran parte de la demanda total del sistema eléctrico de PROPILCO.

Para lograr una operación adecuada de este nuevo cogenerador dentro del sistema eléctrico, es necesario realizar estudios de flujo de cargas y cortocircuito, que permitan evaluar el impacto de este nuevo cogenerador sobre el sistema eléctrico existente.

Para lograr este cometido se realizarán los siguientes estudios técnicos:

- a. Estudios de flujo de cargas en operación normal.
- b. Estudio de cortocircuito en operación normal.

Todos los análisis eléctricos se realizan empleando el programa DIGSILENT Power Factory (DIGital SIMuLator and Electric NeTwork Calculation), el cual es un programa de simulación digital, especializado en el estudio de operación de sistemas de potencia y útil en análisis de sistemas eléctricos de transmisión y distribución de energía.

5. DESCRIPCIÓN DETALLADA

La planta de polipropileno PROPILCO está ubicada dentro del área industrial de Mamonal en la ciudad de Cartagena de Indias y se encuentra alimentada directamente a nivel de 13,8 kV desde la subestación Nueva Cospique, a través de un transformador 110/13,8 kV de 50 MVA que comparte con otras empresas industriales (MEXICHEM, ROYALCO y POLYBOL). A su vez, la subestación Nueva Cospique 110/13,8 kV está interconectada con la subestación Candelaria 110/220 kV mediante dos circuitos a 110 kV, de los cuales sobre un circuito se conecta también la planta Zona Franca Argos. Las subestaciones Nueva Cospique 110/13,8 kV y la subestación Candelaria 110 kV son operadas por ELECTRICARIBE y Candelaria 220 kV pertenece a TRANSELCA.

En la Figura 1, se ilustra la ubicación de la planta PROPILCO con respecto a las subestaciones del Sistema de Transmisión Regional (STR) del área de Cartagena y del Sistema de Transmisión Nacional (STN).

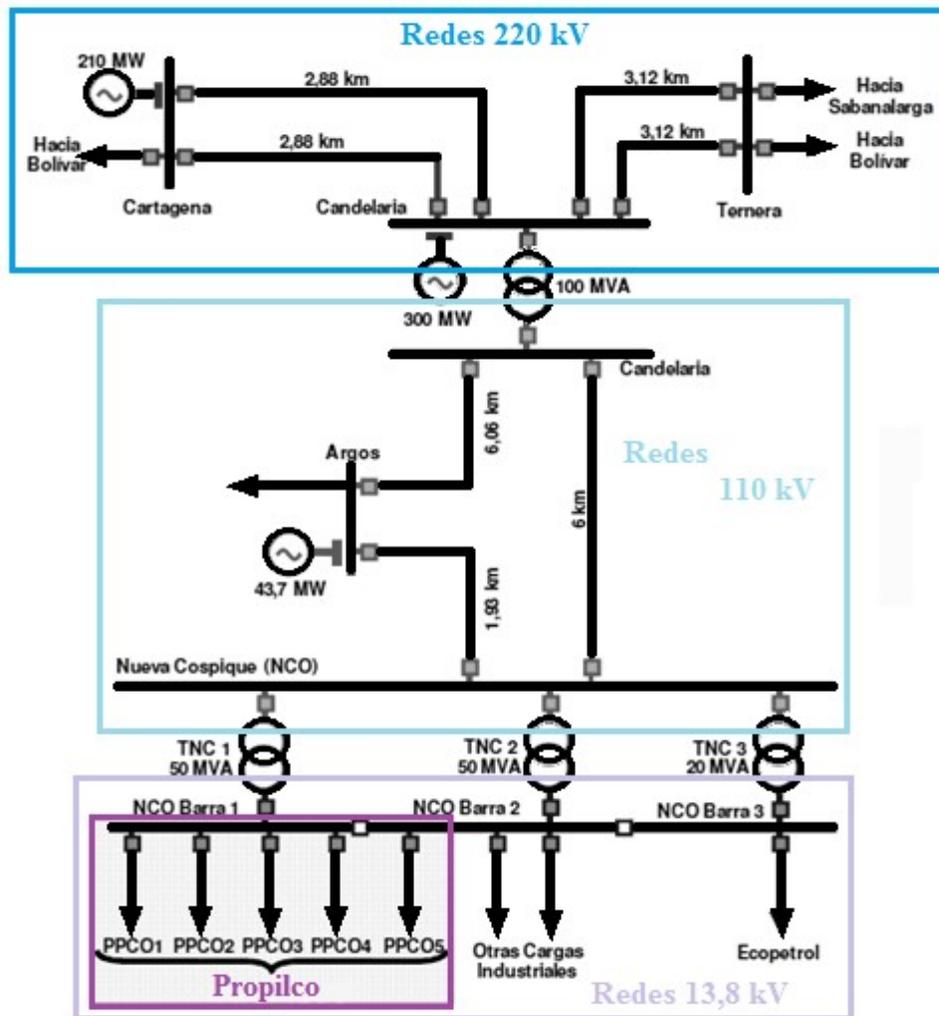


Figura 1. Ubicación de Propilco en Cartagena.

El nuevo turbogenerador de 5,67 MW estará localizado en las instalaciones de la planta de PROPILCO S.A. (subestación Splitter) en Mamonal (Cartagena) y para su conexión se realizará la reconfiguración del alimentador PPCO4, razón por la cual solo se estudiará el sistema eléctrico en los alimentadores PPCO4 y PPCO5 en detalle, el resto de la planta se considerará una carga existente y la alimentación desde Nueva Cospique por medio de un equivalente de Red.

En la Figura 2 se presenta la configuración del sistema eléctrico actual, mientras que en la Figura 3 se puede observar la reconfiguración del sistema eléctrico teniendo en cuenta la conexión del Turbogenerador III.

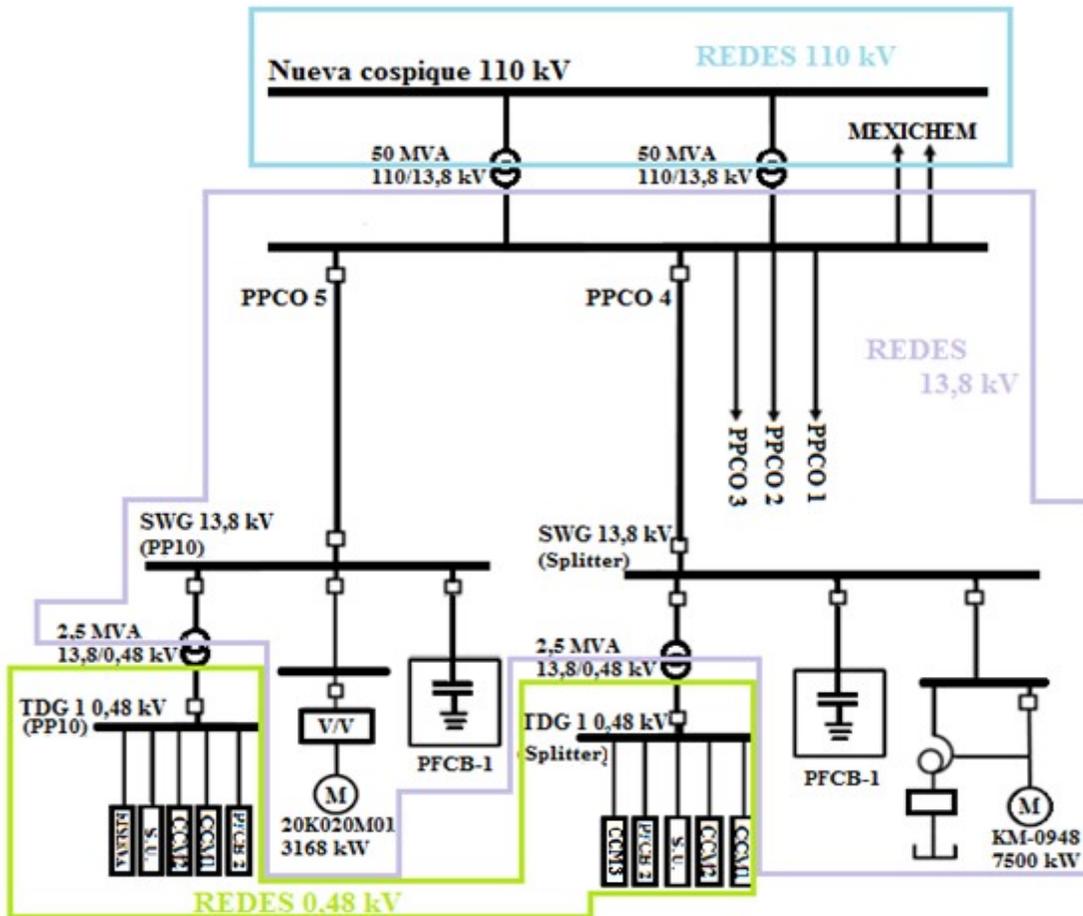


Figura 2. Configuración de Propilco sin la conexión de Turbogenerador III.

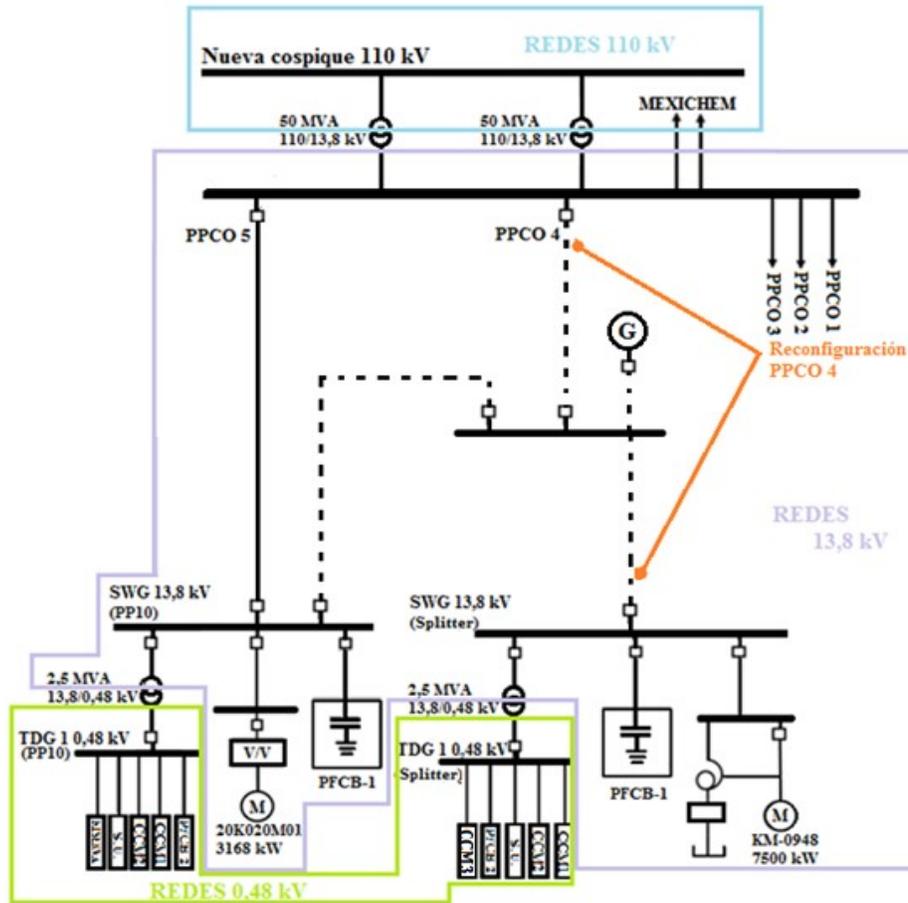


Figura 3. Configuración PROPILCO con Conexión de Turbogenerador III

Parámetros Barra	Cortocircuito Trifásico				Cortocircuito Monofásico			
	Scc (MVA)	Icc (kA)	R1 (Ohm)	X1 (Ohm)	Scc (MVA)	Icc (kA)	R0 (Ohm)	X0 (Ohm)
Barra 1 Nueva Cospique 13,8 kV	289,48	12,11	0,01	0,73	94,66	11,88	0,02	0,77
Barra 2	289,48	12,11	0,01	0,73	94,66	11,88	0,02	0,77

Tabla 1. Equivalente de Red.¹

¹ La información mostrada en la tabla 1 corresponde a estudios realizados al Sistema Eléctrico Regional por parte del operador de red ELECTRICARIBE año 2011.

5.1 Sistema Eléctrico de PROPILCO²

La planta PROPILCO cuenta con 5 alimentadores principales conectados a la barra Nueva Cospique 13,8 kV (Ver figura 1). La simulación del sistema eléctrico de la planta incluye un modelamiento detallado de las cargas conectadas a cada alimentador principal (en este estudio se analizarán solo las cargas de los alimentadores PPCO4 y PPCO5 en detalle), pasando desde 13,8 kV hasta los niveles de tensión menores (4,16 kV, 0,48 kV y 120 V).

Los parámetros de secuencia positiva y secuencia cero de estos alimentadores se muestran en la Tabla 3.

Alimentador Subestación	
PPCP1	Unipol I
PPCO2	PP3
PPCO3	Extruder Planta 2
<i>PPCO4</i>	<i>Splitter</i>
<i>PPCO5</i>	<i>PP10</i>

Tabla . Alimentadores porsubestación de la planta PROPILCO

Terminal i	Terminal j	Líneas en paralelo	Longitud [m]	Calibre [Kcmil]	Tensión [kV]	Corriente Nominal [kA]	R1 [Ω/Km]	X1 [Ω/Km]	R0 [Ω/Km]	X0 [Ω/Km]
Nueva Cospique 13,8 kV	Derivación en Unipol I	1	520	500	13,8	0,8	0,078	0,227	1,105	0,978
Derivación en Unipol I	Unipol II	1	150	500	13,8	0,8	0,078	0,227	1,105	0,978
Nueva Cospique 13,8 kV	PP3	1	530	500	13,8	0,6	0,063	0,240	0,546	0,904
Nueva Cospique 13,8 kV	Extruder Pta. 2	1	500	500	13,8	0,5	0,077	0,239	1,038	1,046
Nueva Cospique 13,8 kV	Splitter	3	360	250	13,8	0,5	0,163	0,086	2,417	0,147
Nueva Cospique 13,8 kV	PP10	2	430	250	13,8	0,5	0,163	0,086	2,417	0,147

Tabla . Parámetros de alimentadores principales al interior de la planta

Terminal i	Terminal j	Líneas en paralelo	Longitud [m]	Calibre [Kcmil]	Tensión [kV]	Corriente Nominal [kA]	R1 [Ω/Km]	X1 [Ω/Km]	R0 [Ω/Km]	X0 [Ω/Km]
PP10	N. T.	3	430	250	13,8	0,29	0,054	0,029	0,806	0,049
N. T.	New L.	3	360	250	13,8	0,5	0,163	0,086	2,417	0,147

Tabla . Parámetros de alimentadores de la conexión del turbogenerador

² Los datos mostrados en esta sección, los cuales fueron utilizados para modelar el sistema eléctrico de PROPILCO pertenecen a la base de datos del departamento de electricidad de PROPILCO año 2011.

Se utiliza esta y la información actualizada de la planta mostrada en las tabla desde la 5 a la tabla 11; correspondiente a parámetros de los componentes del sistema eléctrico de PROPILCO. La información general que se utiliza es la siguiente:

- a.** Parámetros de transformadores para las cargas y motores.
- b.** Parámetros de autotransformadores de arranque para grandes motores.
- c.** Parámetros de compensaciones capacitivas.
- d.** Parámetros de cogenerador.

Ubicación	Transformador	Potencia [MVA]	Tensión HV [kV]	Tensión LV [kV]	Tensión de Cortocircuito [%]	Grupo de Conexión	Resistencia de Puesta a Tierra [Ω]	
							HV	LV
Splitter	TRF - 1	2,5	13,8	0,48	6	Dyn1	---	28
	TRF LIGTH	0,1	0,48	0,12	3	Dyn1	--	--
PP10	TRF - 1	2,5	13,8	0,48	6	Dyn1	---	28
	TRF 5000 kVA	5	13,8	4,16	6	Dyn1	---	--
	TRF 2500 KVA	2,25	13,8	4,16	8	Dyn1	---	--
	TRF LIGTH	0,09	0,48	0,208	3	Dyn1	---	--

Tabla . Parámetros de transformadores de PROPILCO

Autotransformador	Ubicación	Potencia Nominal [MVA]	Tensión [kV]	Tensión de Cortocircuito [%]	Conexión	Motor de Arranque
Auto TRF KM-0948	Splitter	16	13,8	3	YNyn1	KM0948

Tabla . Parámetros de autotransformadores de PROPILCO

Motor	Potencia Nominal [KVA]	Potencia Despachada [MW]	Tensión [kV]	Factor de Potencia	Conexión	Frecuencia [Hz]	Eficiencia Nominal de Operación [%]
Motor CCM 1	232,900	0,15	0,48	0,9	Y	60	95
Motor CCM 2	330,8	0,2	0,48	0,83	Y	60	94,5
20K020M01	4224,8	2,3	4,16	0,94	Δ	60	99
20RN020M01	1272,3	0,84	4,16	0,83	Y	60	94,5

Tabla . Parámetros de Motores de PROPILCO subestación PP10

Motor	Potencia Nominal [KVA]	Potencia Despachada [MW]	Tensión [kV]	Factor de Potencia	Conexión	Frecuencia [Hz]	Eficiencia Nominal de Operación [%]
Motor CCM 1	585,27	0,46	0,48	0,83	Y	60	94,56
Motor CCM 2	407,98	0,381	0,48	0,94	Y	60	99,13
ASM. CCM3	200,00	0,2	0,48	0,90	Y	60	95,01
10.45 hp	381.30	0,01	0,48	0,94	Y	60	99,13
0.5 hp	200,00	0,005	0,48	0,90	Y	60	95,01
KM-0948	9681,42	4,12	13,8	0,82	Y	60	94,43

Tabla . Parámetros de Motores de PROPILCO subestación SPLITTER

Ubicación	Barra/Motor	Tensión [kV]	Potencia [Kvar]	Shunt type	Tecnología	Observación
Splitter	SWG - 1	13,8	1000	C	3PH - 'Y'	--
	TDG - 1	0,48	255	C	3PH - 'D'	Banco de condensadores
PP10	SWG - 1	13,8	170	C	3PH - 'Y'	--
	TDG - 1	0,48	190	C	3PH - 'Y'	Banco de condensadores
Extruder Pta. 2	Targor	13,8	710	C	3PH - 'D'	--

Tabla . Parámetros de condensadores de PROPILCO

Generador	Potencia Nominal [MVA]	Potencia Despachada [MW]	Tensión [kV]	Factor de Potencia	Conexión	Resistencia de Puesta a Tierra [Ω]	Reactancias Síncronas	
							Xd (p.u.)	Xq (p.u.)
Cogenerador 1	6	4,4	13,8	0,8	YN	3,350	1,936	1,570
Cogenerador 2	6,25	5	13,8	0,8	YN	35,350	2,130	1,280
Turbogenerador III	6,25	5	13,8	0,9	YN	35,350	1,890	1,130
Emergencia	0,75	0,6	13,8	0,9	YN	0,000	1,980	1,980

Tabla . Parámetros de generadores de PROPILCO

Generador	Secuencia Cero		Secuencia Negativa		Reactancia Subtransitoria		Reactancia transitoria		Acceleration time constant, Inertia (seg)
	R0	Xo	X2	R2	Xd' (p.u.)	Xq'' (p.u)	Xd' (p.u.)		
Cogenerador 1	0,010	0,022	0,190	0,000	0,193	0,134	0,004	0,251	4,618
Cogenerador 2	0,010	0,141	0,225	0,000	0,128	0,250	0,001	0,281	9,252
Turbogenerador III	0,000	0,136	0,212	0,000	0,119	0,200	0,001	0,273	10,000

					5				
emergencia	0,038	0,840	0,140	0,020	0,160	0,134	0,002	0,330	15,918

Tabla . Parámetros de generadores de PROPILCO

5.2 Demanda de Propilco

La demanda eléctrica de PROPILCO fue detallada por subestación a través de cargas generales, motores sincrónicos y motores asincrónicos. Algunas cargas fueron modeladas a partir de equivalentes de carga. Los valores de demanda de la subestación Splitter y PP10 y los equivalentes de las otras subestaciones son mostrados en la Tabla 12.

Barra
Carga/CCM
Potencia Activa [MW]
Factor de Potencia
PP10
CCM 1
02P050AM01
0,001
0,82
CCM 1
20K020M05
0,003
0,89
CCM 1
20RN20M02
0,006
0,89
CCM 1
20RZ20M1A
0,001
0,85
CCM 1
20P030AM01
0,003
0,89
CCM 1
20DN50M01
0,141
0,91
CCM 1
20DN50M02
0,001
0,85
CCM 1
40P030BM01
0,004

0,87

CCM 1
20H050M01

0,015
0,88

CCM 1
20H051M01

0,01
0,88

CCM 1
20H013A

0,001
0,87

CCM 1
UPS-AC BY PASS

0,026
0,85

CCM 2
01K030M01

0,068
0,86

CCM 2
20K020M02

0,009
0,89

CCM 2
20RG20M1A

0,005
0,87

CCM 2
20K050CM01

0,071
0,88

CCM 2
20K050CM02

0,001
0,83

CCM 2
OSBL

0,176
0,9

CCM 2
40P030AM01
0,004
0,87

CCM 2
DC SYSTEM
0,013
0,85

CCM 2
UPS AC MAIN
0,026
0,85

S.U. 1
WR
0,082
0,91

S.U. 1
Cargas Varias
0,195
0,95

S.U. 1
TRF-LGHT
0,068
0,85

SWG - 1
Motor 20K020M01
2,2
0,97

SWG - 1
Motor 20RN020M01
0,84
0,86

Splitter
CCM 1
GM-0901 A
0,05
0,7

CCM 1

GM-0901 B
0,05
0,7

CCM 1
GM-0905 B
0,07
0,86

CCM 1
GM-0909 A
0,01
0,85

CCM 1
GM-0942 B
0,02
0,8

CCM 1
GM-0945 A
0,09
0,89

CCM 1
GM-0991A
0,17
0,82

CCM 1
E-0962 (Heater)
0,11
1

CCM 1
UPS-AC MAIN
0,05
0,85

CCM 2
GM-0905 A
0,07
0,86

CCM 2
GM-0909 B
0,01
0,85

CCM 2
GM-0942 A
0,02
0,8

CCM 2
GM-0945 B
0,09
0,89

CCM 2
K0948-GM1 A
0,01
0,8

CCM 2
GM-09916
0,17
0,82

CCM 2
E-0967 (Heater)
0,24
1

CCM 2
DC SYSTEM
0,02
0,85

CCM 2
SH-001
0,05
1

CCM 3
GM-0926 A
0,030
0,86

CCM 3
GM-0926 B
0,030
0,86

CCM 3
KM-0993
0,120
0,84

CCM 3
GM-0994
0,020
0,80

S.U. 1
WR
0,05
0,85

S.U. 1
Cargas Varias
0,03
0,97

S.U. 1
TRF-LGHT
0,07
0,85

S.U. 1
GEA
0,03
0,93

S.U. 1
TBM
0,15
0,96

SWG – 1
KM-0948
4,12
0,91

PP3
PP3
Equi. PP3
8,427
0,87

Unipol I
Unipol I
Equi. Unipol I
5,676
0,91

Unipol II
Unipol II
Equi. Unipol II
4,178

0,86
Extruder Pta. 2
 Ext. Pta 2
 Equi. Extruder
 22,544
 0,87

Total
34,881

Tabla . Demanda de PROPILCO en cada subestación³

La demanda máxima total diversificada de PROPILCO que debe ser suministrada por ELECTRICARIBE (desde la subestación Nueva Cospique 13,8 kV), sin incluir las pérdidas técnicas, es de 20,48 MW. Esto es, 34,88 MW totales de carga, menos 14,40 MW totales de los cogeneradores (incluido el turbogenerador III). Se debe tener en cuenta que esta demanda es máxima diversificada y aproximada a la demanda real de la planta.

5.3 Alimentadores y Cables de Conexión de PROPILCO⁴

La conexión de los elementos a través de cables se hizo en forma detallada, incluyendo en el modelo la longitud, conductores en paralelo, calibre, parámetros de secuencia positiva y secuencia cero de los cables de cada subestación, tal y como se muestra en la Tabla 13 y 14.

Nombre	Terminal i	Terminal j	Longitud [m]	Tensión [KV]	Cap. [KA]	R1 [Ω/Km]	X1 [Ω/Km]	R0 [Ω/Km]	X0 [Ω/Km]
PFCB-1	SWG 1	Condensador 1 Mvar	12	13,8	0,35	0,1926	0,0876	2,6905	0,15
L 30	SWG 1	L30	70	13,8	0,355	0,1634	0,0857	2,4171	0,14
L. TRF-1	SWG 1	Lado Alta TRF 1	12	13,8	0,29	0,1926	0,0876	2,6905	0,15
PFCB-2	TDG 1	Banco de capacitores	15	0,48	0,308	0,1181	0,0783	2,3177	0,13
A. S. U.	TDG 1	S.U. 1	15	0,48	0,335	0,1031	0,0771	2,1189	0,11
L. CCM 1	TDG 1	CCM 1	15	0,48	0,335	0,1031	0,0771	2,1189	0,11
L. CCM 2	TDG 1	CCM 2	15	0,48	0,335	0,1031	0,0771	2,1189	0,11
L. CCM 3	TDG 1	CCM 3	15	0,48	0,40	0,0395	0,026	0,7725	0,04
C. 120V	S.U. 1	Cargas varias en S/E	20	0,12	0,65	0,1634	0,0857	2,4171	0,14

Tabla . Parámetros de cables en la S/E Splitter

³ La información expuesta en la tabla 12 corresponde a la base de datos del departamento de electricidad de PROPILCO año 2011.

⁴ Los datos de las tablas mostradas en esta sección pertenecen a la base de datos del departamento de electricidad de PROPILCO año 2011.

Nombre	Terminal i	Terminal j	Longitud [m]	Tensión [KV]	Cap. [KA]	R1 [Ω /Km]	X1 [Ω /Km]	R0 [Ω /Km]	X0 [Ω /Km]
TRF 5000 KVA	SWG 1	Lado Alta TRF 5000 kVA	20	13,8	0,250	0,1926	0,0876	2,6905	0,1025
TRF 2250 KVA	SWG 1	Lado Alta TRF 2250 kVA	20	13,8	0,259	0,1926	0,0876	2,6905	0,1025
A. PFCB-1	SWG 1	Capacitor 170 kvar	20	13,8	0,275	6,1500	1,8400	67,3600	3,2000
L. A. M.	Lado Baja TRF 5 MVA	Motor 20K020M01	90	4,16	0,445	0,1181	0,0826	2,0567	0,1025
L. A. M.	Lado Baja TRF 2,25 MVA	Motor 20RN020M01	90	4,16	0,355	0,1634	0,0857	2,4171	0,1025
A. CCM1	TGD 1	CCM1	20	0,48	0,550	0,0415	0,0380	0,9665	0,0380
A. CCM2	TGD 1	CCM2	20	0,48	0,300	0,1181	0,0783	2,3177	0,1025
A. PFCB-2	TGD 1	Banco Capacitores	20	0,48	0,524	0,1926	0,0876	2,6905	0,1025
A. SU-1	TGD 1	SU-1	20	0,48	0,291	0,1031	0,0771	2,1189	0,1025
L. A. TRF L.	S. U.	Lado de Alta TRF LIGTH	20	0,48	0,1523	0,3865	0,1025	2,9764	0,1025
L. B. TRF L.	Lado Baja TRF LIGTH	LPI-34	20	0,208	0,5734	0,3865	0,1025	2,9764	0,1025

Tabla . Parámetros de cables en la S/E PP10

5.4 Estudios de Estado Estacionario

5.4.1 Metodología para los estudios de Estado Estacionario.

Con el fin de observar las tensiones en las barras, la distribución de flujos de potencia y la cargabilidad de los elementos de potencia en el sistema eléctrico de PROPILCO, se efectúan flujos de cargas en demanda máxima diversificada y para los cinco escenarios operativos que se describen a continuación:

- a. *Escenario 0 (E0)*: Sistema eléctrico actual* en operación normal. Sin el turbogenerador III.
- b. *Escenario 1 (E1)*: Alimentador PPCO 4 en sincronismo con el turbogenerador III, para atender solamente las cargas de la subestación Splitter.
- c. *Escenario 2 (E2)*: Subestación Splitter y cargas de la subestación PP10 alimentadas desde PPCO 4, ya que el alimentador PPCO 5 permanece fuera de servicio. Este escenario operativo considera el turbogenerador III en línea.
- d. *Escenario 3 (E3)*: Turbogenerador III operando en isla eléctrica, atendiendo las cargas menores de la subestación Splitter (excepto motor KM-0948 de 7,5 MW) y las cargas de la subestación PP10. El total de la demanda de la subestación Splitter para este escenario operativo es de 0,6 MW.
- e. *Escenario 4 (E4)*: Escenario operativo sin turbogenerador III y cargas de las subestaciones Splitter y PP10 alimentadas desde PPCO 4, ya que el alimentador PPCO 5 permanece fuera de servicio.

* Para los estudios eléctricos, se entiende por "sistema eléctrico actual", a la alimentación de PROPILCO tal y como se muestra en la Figura 1, es decir, cuatro alimentadores (PPCO 1 a PPCO 4) desde la Barra de Nueva Cospique 13,8 kV y un alimentador (PPCO 5) conectado a la Barra de la misma subestación de ELECTRICARIBE.

5.4.2 Criterios para los estudios de Estado Estacionario.

Se adoptan criterios ceñidos a la reglamentación vigente [1] y [2], a las prácticas nacionales para sistema de transmisión y distribución. En el comportamiento de estado estacionario la calidad del sistema eléctrico de PROPILCO está definida por los siguientes criterios:

- a. En estado estacionario las tensiones en las barras de 13,8 kV, 4,16 kV y 480 V, no deben ser inferiores al 90%, ni superiores al 110% del valor nominal.
- b. Para el control de tensiones se procede con el ajuste de cambiadores de Taps en los transformadores, con compensación capacitiva en barras de carga o con ajuste de reactivos en los cogeneradores.
- c. Para los alimentadores (líneas o cables) y transformadores se consideran flujos aceptables, en caso normal de operación cuando sean iguales o menores del 100% de su capacidad portadora.

5.5 Estudios de Cortocircuito

5.5.1 Metodología para el Cálculo de Cortocircuito

Se definen niveles de cortocircuito para falla trifásica, bifásica y de una fase a tierra (monofásica), con evaluaciones determinadas por la norma IEC-60909 [3], según la cual los resultados entregados corresponden a corrientes subtransitorias (o instantáneas) simétricas (sin componente cd) en amperios RMS.

Los cálculos de cortocircuito se efectúan para todos los escenarios operativos planteados.

Con las simulaciones de cortocircuito, se puede predecir el comportamiento transitorio más severo para la red y la soportabilidad requerida por el equipo de interrupción (tableros y celdas) encada una de las subestaciones pertenecientes al sistema eléctrico de PROPILCO.

Para el cálculo de los niveles de cortocircuito se considera que la tensión en el punto de falla, en el momento que ocurre ésta es de 1,10 p.u.

Los resultados de los cálculos de cortocircuito se presentan en diagramas unifilares y contienen, para cada falla, el valor de la corriente simétrica inicial de cortocircuito ($I_{K''}$), la cual es el valor RMS de la componente simétrica de la corriente de cortocircuito esperada y que aparece en el instante de la falla. También se presenta la potencia aparente inicial simétrica ($S_{K''}$).

5.5.2 *Criterios en el Cálculo de Cortocircuito*

Una vez obtenidos los niveles máximos de cortocircuito (trifásico, bifásico y de una fase a tierra) en cada barra del sistema eléctrico actual de PROPILCO, se verificará si estos valores exceden o no la capacidad máxima de interrupción para la cual fueron diseñados los equipos en cada una de las subestaciones existentes.

Por otro lado, los niveles máximos de cortocircuito calculados bajo la norma IEC-60909 [3], para los diferentes tipos de falla (trifásica, bifásica y monofásica), servirán como base para la selección de los nuevos equipos en un futuro, en lo que a capacidad de cortocircuito se refiere.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Resultados y Análisis de Estado estacionario⁵

A continuación se presentan las tablas que contienen los resultados más relevantes para cada uno de los escenarios planteados, correspondientes a la cargabilidad de los transformadores (tabla 15), cargabilidad en los alimentadores principales (tabla 16), cargabilidad en las líneas principales de cada subestación (tabla 17) y las tensiones de las barras principales (tabla 18) con sus respectivos análisis.

Subestación	Transformador	Cargabilidad (%)				
		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
PP10	TRF 1	33,86	33,86	33,86	33,86	33,87
	TRF 2250 KVA	42,76	42,76	42,75	42,74	42,78
	TRF 5000 KVA	47,59	47,59	47,57	47,54	47,61
	TRF LIGHT 120 V	43,51	43,51	43,52	43,52	43,5
SPLITTER	TRF 1	67,17	67,16	67,18	31,19	67,2
	TRF LIGHT	34,98	34,98	34,97	35,53	34,95

Tabla 15. Cargabilidad de los Transformadores.

De la tabla anterior donde se presenta la cargabilidad de los transformadores de PROPILCO, se observa que la máxima cargabilidad se presenta en el transformador TRF 1 de la subestación eléctrica Splitter, el cual alcanza el 67,18% en el escenario 2 (E2). Para los escenarios operativos 0, 1, 4 se presentan valores cercanos a dicha cargabilidad y para el escenario 3 la cargabilidad máxima es del 31,19%, reducción que se atribuye a la disminución de carga en la subestación Splitter para dicho escenario.

Alimentador	Tensión (KV)	Cargabilidad (%)				
		Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
PPCO4	13,8	15,58	12,31	13,59	---	26,64
PPCO 5	13,8	17,12	17,12	---	---	---
N. L.	13,8	---	---	19,67	19,66	19,68

Tabla 16. Cargabilidad en los Alimentadores Principales.

La cargabilidad máxima en los alimentadores principales se presenta en el alimentador PPCO4, alcanzando un valor de 26,64% en el escenario 4 (E4), debido a que en este escenario el alimentador suministra la potencia para satisfacer no solo las cargas la subestación PP10 también las de la subestación Splitter, ocasionando calentamiento en el conductor lo que repercute en la cargabilidad de este.

Para los otros escenarios operativos de los alimentadores analizados se observa un rango de cargabilidad desde 12,31% hasta 19,68%, partiendo con la cargabilidad más

⁵Los resultados del cálculo de flujo de carga arrojados por DigSilent para cada uno de los estados se encuentra anexo en la carpeta llamada: Resultados de flujo de carga.

baja en el escenario operativo 1 (E1) del alimentador PPCO4 donde el generador está en línea con el alimentador, hasta la cargabilidad más alta para el alimentador N.L. en el escenario operativo 4 (E4). Se observa que los porcentajes de cargabilidad de los alimentadores son parecidos en los diferentes escenarios operativos.

Subestación	Línea	Tensión (KV)	Cargabilidad (%)				
			Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
PP10	L PCBF-1	13,8	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
	A. TRF 2250 KVA	13,8	5,58	5,58	5,58	5,58	5,59
	A. TRF 5000 KVA	13,8	13,27	13,27	13,27	13,26	13,28
	A. M.	4,16	37,12	37,12	37,11	37,09	37,13
	L. A. M.	4,16	19,59	19,59	19,58	19,58	19,5
	A. CCM1	0,48	26,19	26,19	26,19	26,18	26,2
	A. CCM2	0,48	40,28	40,28	40,27	40,26	40,29
	A. PCFB-2	0,48	43,40	43,40	43,42	43,43	43,39
	A. S. U.	0,48	77,66	77,66	77,68	77,71	77,64
	A. L. A. TRF L.	0,12	61,86	61,86	61,87	61,89	61,84
	A. L. B. TRF L.	0,12	37,92	37,92	37,92	37,93	37,91
SPLITTER	New L.	13,8	---	16,23	16,23	4,7	16,24
	L 30	13,8	24,39	24,39	24,4	---	24,42
	A. KM0948	13,8	26,78	26,78	26,79	---	26,81
	A. PCBF-1	13,8	12,53	12,53	12,53	12,54	12,52
	A. TRF	13,8	24,22	24,22	24,23	11,67	24,24
	A. CCM1	0,48	84,69	84,68	84,71	19,58	84,75
	A. CCM2	0,48	84,70	84,70	84,71	37,55	84,72
	A. CCM3	0,48	27,31	27,30	27,32	2,03	27,34
	A. PCBF-2	0,48	85,53	85,55	85,51	86,89	85,44
	A. S. U.	0,48	27,90	27,10	27,90	28,19	27,89
	A. C. V.	0,48	16,00	16,00	15,99	16,16	15,99
	A.A	0,12	48,95	48,95	48,94	49,45	48,91

Tabla 17. Cargabilidad en las Líneas Principales de cada Subestación.

En cuanto a los cables de cada una de las subestaciones, se observa que la cargabilidad máxima es la del alimentador del banco de capacitores a 13,8 kV (A. PCBF-2 de subestación eléctrica Splitter), alcanzando el 86.89% en el escenario 3 (E3), la cargabilidad de los demás cables del sistema de potencia se encuentra en un rango desde 2,63% (para el cable L PCBF1 en todos los escenarios operativos de la subestación PP10) hasta 85,55% (en el escenario operativo 2 (E2) de cable del banco de capacitores 2 de la subestación Splitter)

Subestación	Barra	Tensión (KV)	Tensión (p.u.)				
			Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
PP10	PP10	13,8	1	1	1	1	1
	TGD1	0,48	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	CCM-1-PP10	0,48	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

	CCM-2-PP10	0,48	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	SU-1	0,48	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
	PFCB-2	0,48	1	1	1	1	0,99
SPLITTER	Splitter	13,8	1	1	1	1	1
	N. T.	13,8	---	1	1	1	1
	TGD1-Splitter	0,48	0,99	1	0,99	1,01	0,99
	CCM 1	0,48	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99
	CCM 2	0,48	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99
	CCM 3	0,48	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99
	S. U.	0,48	0,99	0,99	0,99	1,01	0,99
	PFCB	0,48	0,99	1	1	1,01	1
	120 V	0,12	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99

Tabla 18. Tensiones de las Barras.

Los niveles de tensión del sistema de potencia se encuentran dentro de los rangos establecidos por la reglamentación vigente (del 90% al 110% del valor nominal^[2]) y cercanos a una tensión de 1,00 p.u.

Los resultados de estado estacionario para el sistema eléctrico en demanda máxima diversificada muestran un comportamiento adecuado, sin sobrecargas en transformadores, alimentadores principales o en cables de cada subestación, y con rangos aceptables de niveles de tensión en p.u.

En el Anexo A se presentan los diagramas unifilares con el flujo de cargas detallado en cada subestación de PROPILCO para cada uno de los escenarios operativos analizados.

6.2 Resultados y Análisis de Estudios de Cortocircuito

En la Tabla 19, Tabla 20 y la Tabla 21 se muestra los niveles máximos de cortocircuito trifásico, bifásico y monofásico para las principales barras de las subestaciones PP10 y Splitter respectivamente.

Subestación	Barra	Capacidad (kA)	Tensión (KV)	Niveles de Cortocircuito Trifásico. Valores en I''k (kA)				
				Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Nueva Cospique	Nueva Cospique 13,8 kV	25	13,8	18,72	20,13	20,11	14,97	18,68
PP10	PP10	31,5	13,8	16,96	19,25	19,743	2,795	18,32
	TGD1	65	0,48	53,19	53,52	53,62	35,35	53,27
Splitter	Splitter	25	13,8	18,45	19,55	19,61	2,785	18,22
	TGD1-Splitter	65	0,48	61,59	61,89	51,9	35,37	61,55
	N.T	---	13,8	---	19,88	19,94	2,79	18,49

Tabla 19. Resultados Cortocircuito Trifásico.⁶

Para los escenarios analizados y ante una falla trifásica se observa que ninguna barra supera la capacidad de interrupción, sin embargo se acercan un poco las barras de Nueva Cospique 13,8 kV en el escenario 1 (E1) con 20,13 kA y en el escenario 2 (E2) con 20,11 kA, además la barra TGD1-Splitter en el escenario 0, 1 y 4 con 61,59 kA, 61,89 kA y 61,55 kA respectivamente.

Para el caso de la barra N.T. (Barra de la nueva conexión) se observa que ante una falla trifásica el mayor valor de $I''k$ obtenido es de 19,94 kA en el escenario 2 (E2)

Subestación	Barra	Capacidad (kA)	Tensión (KV)	Niveles de Cortocircuito Bifásico. Valores en I''k (kA)				
				Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Nueva Cospique	Nueva Cospique 13,8 kV	25	13,8	16,15	17,32	17,31	12,91	16,12
PP10	PP10	31,5	13,8	15,51	16,58	16,99	2,37	15,81
	TGD1	65	0,48	46,05	46,33	46,41	30,34	46,12
Splitter	Splitter	25	13,8	15,93	16,83	16,88	2,36	15,73
	TGD1-Splitter	65	0,48	53,32	53,57	53,58	30,32	53,29
	N.T	---	13,8	---	17,11	17,16	2,37	15,96

Tabla 20. Resultados Cortocircuito Bifásico.⁷

⁶ La documentación completa de los resultados para el cortocircuito trifásico se encuentra anexa en la carpeta llamada: Resultados de cortocircuito trifásico.

⁷ La documentación completa de los resultados para el cortocircuito bifásico se encuentra anexa en la carpeta llamada: Resultados de cortocircuito bifásico.

Para la falla bifásica se encuentran valores aceptables en cuanto a capacidad de barras se refiere, es decir, ninguna barra supera la capacidad de corte de la misma. El escenario con mayor nivel de I''_k es el escenario 2 (E2) en la barra TGD1-Splitter con 53,58 kA que corresponde al 82,43% de la capacidad de corte de dicha barra.

Para el caso de la barra N.T. (Barra de la nueva conexión) se observa que ante una falla bifásica la mayor corriente de cortocircuito es de 17,16 kA en el escenario (E2).

Subestación	Barra	Capacidad (kA)	Tensión (KV)	Niveles de Cortocircuito Monofásico. Valores en I''_k (kA)				
				Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Nueva Cospique	Nueva Cospique 13,8 kV	25	13,8	15,87	16,52	16,51	13,94	15,85
PP10	PP10	31,5	13,8	13,96	14,42	15,12	0,28	14,53
	TGD1	65	0,48	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Splitter	Splitter	25	13,8	14,98	14,32	14,35	0,28	13,84
	TGD1-Splitter	65	0,48	40,61	40,69	40,69	30,47	40,60
	N.T	---	13,8	---	15,61	15,64	0,28	15,01

Tabla 21. Resultados Cortocircuito Monofásico.⁸

Para falla monofásica se observa que ninguno de los valores arrojados por la simulación sobrepasa el nivel de corte de las barras, la barra con mayor nivel de cortocircuito es la barra de la subestación Splitter TGD1-Splitter con 40,69 kA en el escenario 1 (E1).

Para el caso de la barra N.T. (Barra de la nueva conexión) se observa que ante una falla monofásica la mayor corriente de cortocircuito es de 15,64 kA en el escenario (E1).

⁸La documentación completa de los resultados para el cortocircuito monofásico se encuentra anexa en la carpeta llamada: Resultados de cortocircuito monofásico.

7. CONCLUSIONES

7.1 Acerca de los estudios de estado estacionario

Los resultados de estado estacionario para el sistema eléctrico actual de PROPILCO en demanda máxima diversificada muestran un comportamiento adecuado, sin sobrecargas en transformadores, alimentadores principales o cables. Además, niveles de tensión dentro de los rangos establecidos por la reglamentación vigente y cercanos a una tensión de 1,00 p.u.

La cargabilidad máxima en los alimentadores principales se presenta en el alimentador PPCO4, alcanzando un valor de 26,64% en el escenario 4 (E4), debido a que en este escenario el alimentador suministra la potencia para satisfacer no solo las cargas de la subestación PP10 también las de la subestación Splitter, ocasionando calentamiento en el conductor lo que repercute en la cargabilidad de este. Para los otros escenarios operativos analizados se presentan valores cercanos a dicha cargabilidad.

En los transformadores de PROPILCO, la cargabilidad máxima se presenta en el transformador TRF 1 de la subestación eléctrica Splitter, el cual alcanza el 67,18% en el escenario 2 (E2). Para los escenarios operativos 0, 1, 4 se presentan valores cercanos a dicha cargabilidad y para el escenario 3 la cargabilidad máxima es del 31,19%, reducción que se atribuye a la disminución de carga en la subestación Splitter para dicho escenario.

En cuanto a los cables de cada una de las subestaciones, se observa que la cargabilidad máxima es la del alimentador del banco de capacitores a 13,8 kV (A. PCBF-2 de subestación eléctrica Splitter), alcanzando el 86,89% en el escenario 3 (E3), la cargabilidad de los demás cables del sistema de potencia se encuentra en un rango desde 2,63% (para el cable L PCBF1 en todos los escenarios operativos de la subestación PP10) hasta 85,55% (en el escenario operativo 2 (E2) de cable del banco de capacitores 2 de la subestación Splitter)

En general el comportamiento del Sistema Eléctrico de Potencia de Propilco en estado estacionario se encuentra dentro de la reglamentación vigente, manteniendo control de tensiones dentro de rango admisibles, sin tener la máxima cargabilidad en cada uno de los elementos del sistema.

7.2 Acerca de los estudios de cortocircuito

Para los escenarios analizados y ante una falla trifásica se observa que ninguna barra supera la capacidad de interrupción, sin embargo se acercan un poco las barras de Nueva Cospique 13,8 kV en el escenario 1 (E1) con 20,13 kA y en el escenario 2 (E2) con 20,11 kA, además la barra TGD1-Splitter en el escenario 0, 1 y 4 con 61,59 kA, 61,89 kA y 61,55 kA respectivamente.

Para la falla bifásica se encuentran valores aceptables en cuanto a capacidad de barras se refiere, es decir, ninguna barra supera la capacidad de corte de la misma. El escenario con mayor nivel de I''_k en kA es el escenario 2 (E2) para la barra TGD1-Splitter con 53,58 kA partiendo que la capacidad de corte de esta barra es de 65 kA.

Para falla monofásica se observa que ninguno de los valores arrojados por la simulación sobrepasa el nivel de corte de las barras, la barra con mayor nivel de cortocircuito es la barra de la subestación Splitter TGD1-Splitter con 40,69 kA.

Para el caso de la barra N.T. (Barra de la nueva conexión) se observa que ante una falla trifásica presenta valores de I_k'' de 19,94 kA, ante una falla bifásica 17,16 kA y ante una falla monofásica 15,64 kA, por lo que se puede inferir que esta barra debe tener una capacidad de interrupción de 30 kA a fin de soportar futuras expansiones internas.

Analizando los resultados de simulación arrojados por el programa DigSilent Power Factory del Sistema de Potencia de Propilco se puede concluir que la interconexión de las subestaciones PP10 y Splitter por medio de un nuevo turbogenerador de 5,67 MW puede ser exitosa considerando cada una de las variables del sistema dentro de los rangos admisibles desde el punto de vista de restricciones operativas y reglamentación vigente.

8. REFERENCIAS

8.1 Bibliográficas

[1] Resolución CREG 070 de 1998. Por la cual se establece el Reglamento de Distribución de Energía Eléctrica, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.

[2] Resolución CREG 025 de 1995. Por la cual se establece el Código de Redes, como parte del Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional.

[3] IEC 60909. Short circuit current calculation in three phase A.C. systems: part 1, factors for the calculation of short circuit currents in three phase A.C. systems.

8.2 En Línea

- a. http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_electrica_y_electronica/calculocorrientecortocircuito/
- b. http://www.giaelec.org.ve/fglongatt/files/files_SP2/Capitulo1.pdf
- c. http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020112146/1020112146_03.pdf
- d. <http://www.nepsi.com/es/sysstudies.htm>
- e. http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020112146/1020112146_03.pdf
- f. http://www.siel.gov.co/Siel/Documentos/documentacion/Informes/2009/OPORTUNIDADES_2009-2013_Transelca.pdf.