

## Análisis de la Energización de la Línea Eléctrica Enterrada de 69 kV entre CPF (Bloque 15) y Sacha (Bloque 60) en el Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero - Extendido

R. Cela M. Chamba R. Sanguil M. Solís

PETROAMAZONAS EP

E-mail: Rommel\_Cela@petroamazonas.ec; Santiago\_Chamba@petroamazonas.ec;  
Ramiro\_Sanguil@petroamazonas.ec; Marcelo\_Solis@petroamazonas.ec

### Resumen

En el marco de la política del Gobierno Nacional del Cambio de la Matriz Energética, PETROAMAZONASEP (PAMEP) se encuentra desarrollando el Proyecto OPTIMIZACIÓN GENERACIÓN ELÉCTRICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA (Proyecto OGE&EE). El Proyecto OGE&EE tiene la misión de cambiar la Matriz Energética del Sector Petrolero Ecuatoriano mediante el diseño y desarrollo de Facilidades de Generación, Sistemas de Distribución/Transmisión y Sistemas de Captación, Transporte y Manejo de Gas Asociado. En este contexto, Petroamazonas EP ha construido la primera línea de transmisión enterrada de 40 km a nivel de 69 kV entre CPF (Bloque petrolero 15) y Sacha (Bloque petrolero 60), la cual por su nivel de voltaje y longitud presenta desafíos *técnicos* importantes que deben superarse. Con este antecedente, el objetivo de este artículo es difundir los resultados de los estudios eléctricos realizados y la experiencia en la energización y operación de la línea de transmisión enterrada CPF – Sacha de 69 kV.

**Palabras clave**— Líneas de transmisión enterradas, transitorios electromagnéticos, sincronización.

### Abstract

According to the National Government policy's related to the Energy Matrix Revolution; PETROAMAZONAS EP is developing the Program called as "Optimización Generación Eléctrica y Eficiencia Energética" (OGE&EE Program). The mission of the OGE&EE Program is change the Energy Matrix of Ecuadorian Oil Industry through the design and implementation of Gas gathering and transportation systems, Power Generation, Transmission and Distribution Systems. In this context, Petroamazonas EP has built the first underground transmission line of 40 km. and 69 KV between CPF (Petroleum block 15) and Sacha (Petroleum block 60), which by its voltage level and length has important technical challenges that must be overcome. With this background, the objective of this article is to broadcast the results of the electric studies and the experience in the energization and operation of the underground transmission line CPF - Sacha 69 KV.

**Index terms**— Underground transmission lines, electromagnetic transients, synchronization.

Recibido: 23-10-2015, Aprobado tras revisión: 24-12-2015.

Forma sugerida de citación: Cela, R.; Chamba, M.; Sanguil, R.; Solís, M. (2016). "Análisis de la energización de la línea eléctrica enterrada de 69 kV entre CPF (Bloque 15) y Sacha (Bloque 60) en el Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero - Extendido". Revista Técnica "*energía*". No 12, Pp. 47-55. ISSN 1390-5074.

## 1. INTRODUCCIÓN

La visión de la Unidad de Gestión del Proyecto OPTIMIZACIÓN GENERACIÓN ELÉCTRICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA (Proyecto OGE&EE) desarrollado por Petroamazonas EP es garantizar el uso eficiente de recursos naturales renovables y NO renovables en el sector petrolero, mediante el desarrollo e implementación de un modelo de gestión innovador. Este modelo de gestión tiene la finalidad de reducir el impacto ambiental, generar riquezas y bienestar para el país; y, fijar nuevos estándares y referencias para la industria petrolera nacional e internacional.

Uno de los componentes del Proyecto OGE&EE es el desarrollo de un Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero – Extendido (SEIP-E) con el fin de:

- i.* Incrementar el factor de utilización de las facilidades eléctricas (con lo cual se reduce considerablemente el requerimiento de capacidad instalada para atender la demanda);
- ii.* Desplazar diésel como combustible para generación eléctrica (optimizando Gas Asociado y petróleo como combustible);
- iii.* Habilitar un sistema de despacho por méritos económicos;
- iv.* Aprovechar excedentes de energía hidroeléctrica del Sistema Nacional Interconectado (desplazando crudo como combustible para generación eléctrica);
- v.* Generar ahorros económicos para el país y las empresas petroleras;
- vi.* Disponer de un sistema eléctrico robusto para entregar energía confiable y de menor costo para las poblaciones aledañas; y,
- vii.* Reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

En el contexto de la consecución del SEIP-E por medio de un sistema eléctrico de transmisión robusto y confiable, Petroamazonas EP por medio del Proyecto OGE&EE, ha culminado la construcción y puesta en operación de su primera línea de transmisión enterrada de 40 km a nivel de 69 kV, 3x1/C 500MCM, entre las locaciones CPF (Bloque petrolero 15) y Sacha (Bloque petrolero 60). Cabe indicar que en el Sector Petrolero Ecuatoriano, es la primera vez que se instala y se pone en operación una línea de transmisión de estas características, la cual por su nivel voltaje y longitud producen fenómenos eléctricos que deben considerarse para su energización y operación.

Petroamazonas EP, ha venido implementando líneas de sub-transmisión/distribución enterradas

en menores niveles de voltaje y longitud, principalmente por los siguientes argumentos: 1) conseguir una alta confiabilidad, 2) las facilidades petroleras generalmente se encuentran interconectadas por oleoductos, brindando derechos de vía que pueden ser compartidos con cables eléctricos, y 3) disminuir el impacto ambiental.

Este documento tiene la finalidad de difundir la experiencia en torno a la energización y operación de la línea de transmisión enterrada CPF – Sacha de 69 kV, exponer sus efectos transitorios y dinámicos y las herramientas para mitigarlos. Además, identificar los estudios eléctricos necesarios para la energización de líneas eléctricas enterradas y sincronización de los sistemas a interconectar.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

La puesta en servicio de la línea de transmisión enterrada CPF - Sacha 69 kV ha permitido la exportación de energía eléctrica de bajo costo, confiable y amigable con el medio ambiente, desde CPF (generación con gas asociado y crudo) hacia el SEIP-E (generación diésel predominante). Esta interconexión constituye el primer hito hacia la conformación del Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero Extendido (SEIP-E), el cual permitirá *interconectar* campos petroleros privados, estatales y de economía mixta; y a su vez, con el Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.).

### 2.1. Sistema Eléctrico CPF – Bloque 15

El sistema eléctrico Bloque 15 ha estado caracterizado por su operación técnica y económica de forma aislada al SEIP-E. Además, en los últimos años por iniciativa del Proyecto OGE&EE, Bloque 15 ha tenido un crecimiento importante de su parque generador, el cual utiliza el gas asociado y crudo (habiendo desplazado diésel) como principales combustibles para generación eléctrica de bajo costo.

El sistema eléctrico Bloque 15 cuenta con 6 centrales de generación: 4 ubicadas en el Campo CPF, 1 ubicada en el Campo Limoncocha y 1 en el Campo Yamanunka. Estas centrales suman una potencia nominal de 41,93 MW.

Este sistema suministra Energía Eléctrica a las locaciones Indillana, Limoncocha, Yamanunka, Yanaquincha y Jivinos, mediante un sistema de

transmisión/distribución a 34,5 kV y 13,8 kV. La demanda total es de aproximadamente 21 MW.

Con el fin de interconectar el Sistema Eléctrico Bloque 15 con el SEIP, el Proyecto OGE&EE construyó la subestación CPF 69 kV, utilizando tecnología GIS (*Gas Insulated Substation*). La subestación CPF 69 kV dispone de 1 bahía de línea, 2 bahías de transformador y 1 bahía para compensación reactiva.

## 2.2. Sistema Eléctrico Interconectado Petrolero – Extendido (SEIP-E)

El SEIP-E está conformado por las instalaciones que fueron desarrolladas y operadas por la ex Gerencia de Producción y Explotación de PETROECUADOR EP. El sistema consta de 10 subestaciones principales a 69/13,8 kV más las subestaciones de interconexión de las centrales de generación.

El sistema troncal de transmisión está compuesto por 9 líneas aéreas de transmisión a 69 kV de circuito simple, y se entrega energía a las Estaciones de Producción mediante alimentadores de distribución de 13,8 kV. Los Campos Petroleros interconectados corresponden a los Bloques 56, 57, 60 y 61 operados por PETROAMAZONAS EP, abastecidos principalmente por generación diésel.

Con el fin de interconectar el SEIP-E con el Sistema Eléctrico CPF, el Proyecto OGE&EE construyó la subestación Sacha 69 kV, ubicada en el cantón Joya de los Sachas, provincia Francisco de Orellana, utilizando tecnología HIS (*Hybrid Insulated Substation*). La subestación Sacha 69 kV consta de 3 bahías de línea y 4 bahías de transformador.

## 2.3. Características de la Línea de transmisión CPF – Sacha 69 kV y compensación reactiva

La construcción de la línea de transmisión CPF - Sacha 69 kV se caracteriza por utilizar:

- Cable LS CABLE monofásico de tecnología XLPE (Ver Tabla 1).
- Configuración enterrada triangular (trefoil)
- Longitud total de 40 km.

**Tabla 1: Características Eléctricas L/T Sacha – CPF 69 kV**

Tecnología	Calibre [mm <sup>2</sup> ]	Inom [A]	R [Ω/km]	X [Ω/km]	C [uF/km]
XLPE	240	236	0,049	0,054	0.136

Con el fin de reducir sobrevoltajes en los extremos de la pantalla (chaqueta) del cable y la circulación de corrientes parásitas en el conductor se usa la técnica de Cross-bonding.

Este método consiste en dividir la longitud del cable en un número múltiplo de tres, cruzando y conectando a tierra las pantallas del cable, de esta manera la suma de los voltajes inducidos en la pantalla es prácticamente nula, el punto donde se implementa el cross bonding es en los empalmes de la línea [1].

La naturaleza del cable enterrado y su configuración de construcción hace que el efecto capacitivo propio de los cables sea de 15 a 20 veces más elevado que el de las líneas aéreas [2].

Esta característica tiene una influencia fundamental sobre las longitudes admisibles para construcción de líneas aéreas y/o cables. En efecto, al nivel de altos voltajes, las líneas aéreas pueden tener longitudes de varios centenares de kilómetros (100 a 300) sin que surjan problemas ni de nivel ni de perfil de voltaje. Por el contrario, en el caso de los cables con aislamiento sintético, los parámetros eléctricos limitan la longitud a algunas decenas de kilómetros. El proceso de carga y descarga continuo de la capacidad de los cables requiere la circulación de potencia “reactiva”, la cual limita la capacidad de potencia “activa” en el cable y mejora los perfiles de voltaje [3].

Más allá la longitud de cable es necesario prever sistemas de compensación reactiva; y para ello, se utilizan “estaciones de compensación” instaladas en subestaciones o en derivación conectadas a los terminales de los cables con la finalidad de mitigar localmente el efecto de esta alta capacitancia, permitiendo reducir las limitaciones de capacidad de transporte de los cables y mejorando los perfiles de voltaje.

La potencia reactiva generada en los cables puede ser absorbida en la red por medio de la regulación de los generadores de las centrales eléctricas. La posibilidad de compensación por

medio de las centrales depende de las características de la red local (en particular, la potencia de cortocircuito local y curva de capacidad de las maquinas) y los procedimientos de operación del sistema de potencia.

A continuación se detalla el análisis para compensación reactiva de la línea de transmisión; así como también se muestran los resultados de los estudios eléctricos necesarios para la operación confiable del SEIP-E.

### 3. ESTUDIOS ELÉCTRICOS DEL SEIP-E

#### 3.1. Análisis de Compensación Reactiva

Se ha determinado que en condiciones normales de operación, el sistema eléctrico CPF exportará potencia activa hacia el SEIP-E. La máxima transferencia de potencia activa por la línea de transmisión CPF-Sacha 69 kV, dado por su límite térmico (90°C), es de 20.9 MW.

Como se observa en la Tabla 2, para dimensionar los reactores se realizó un análisis de sensibilidad del flujo de potencia activa y reactiva considerando: 1) perfiles de voltaje, 2) niveles de sub-excitación de las unidades de generación y, 3) diferentes niveles de potencia activa transferida por la línea.

Cada caso de análisis considera cuatro flujos de potencia activa tal como se muestra en la Fig. 1. Se observa que la línea de transmisión CPF – Sacha 69 kV, sin compensación reactiva y con un flujo de potencia activa de 20 MW, genera 9,2 MVar.

Tabla 2: Descripción de casos – Análisis de sensibilidad

CASO	DESCRIPCIÓN
0%-0%	Sin reactor Sacha - Sin reactor CPF
100%-0%	100% (9,2 MVar) reactor Sacha - Sin reactor CPF
50%-0%	50% (4,6 MVar) reactor Sacha - Sin reactor CPF
50%-50%	50% (4,6 MVar) reactor Sacha - 50% (4,6 MVar) reactor CPF
0%-50%	Sin reactor Sacha - 50% (4,6 MVar) reactor CPF
0%-100%	Sin reactor Sacha - 100% (9,2 MVar) reactor CPF

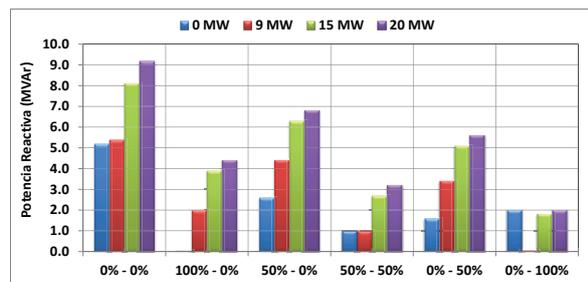


Figura 1: Potencia Reactiva generada por la línea

En la Fig. 2 se muestra la sensibilidad del voltaje de la subestación CPF en función de la compensación reactiva y flujo de potencia activa. Se observa que los voltajes se incrementan hasta 1,04 p.u. debido a la potencia reactiva generada por el cable.

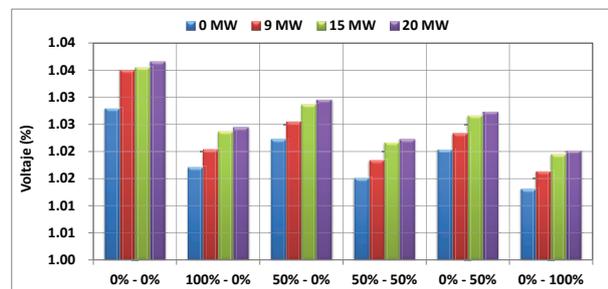


Figura 2: Sensibilidad de voltaje en función de la compensación reactiva

La potencia reactiva generada por el cable sobrecarga la línea, aumenta los voltajes en las subestaciones y producen la sub-excitación de las unidades de generación a límites máximos de sus curvas de capacidad. Por lo tanto, es necesaria la compensación del efecto capacitivo de la línea por medio de reactores conectados en los extremos de la línea.

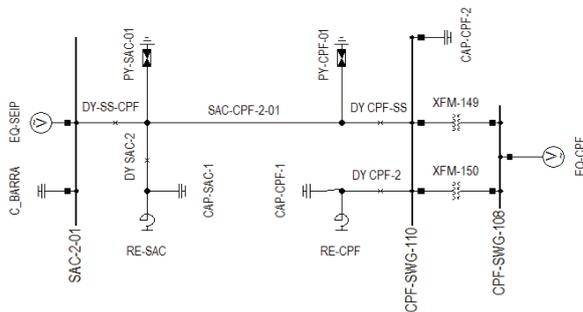
Con la finalidad de flexibilizar la operación del SEIP-E se compensó la potencia reactiva generada por la línea cuando el flujo de potencia activa es de 20 MW. Esta compensación se realizó por medio de la instalación de reactores a ambos lados de la línea de transmisión, logrando: 1) un valor máximo de potencia reactiva de 3,2 MVar; y, 2) disminuir los voltajes a valores de 1,02 p.u.

#### 3.2. Transitorios Electromagnéticos

El análisis de transitorios electromagnéticos que se producen en la apertura y cierre de equipamiento eléctrico tiene el objeto de identificar

los sobre voltajes de corta duración (maniobra) que pueden afectar su aislamiento. Estos niveles de sobre voltaje son siempre superiores a los niveles presentados en estado estable y dinámico.

El análisis de transitorios electromagnéticos se realiza mediante el módulo EMTP del software DigSilent Power Factory 15.2.1 considerando un esquema reducido del SEIP-E. En la Fig. 3 se muestra el sistema reducido que considera los equivalentes de thevenin del SEIP-E en la subestación Sacha de 69 kV y del sistema eléctrico CPF en la barra de 13.8 kV del Switchgear 108.



+Figura 3: Esquema reducido – Análisis de Transitorios Electromagnéticos

Las simulaciones consideran el cierre y apertura del disyuntor de Sacha “DY SACHA” para la energización y des-energización de la línea CPF – Sacha 69 kV. Las maniobras se realizaron desde la subestación Sacha debido a que en este punto se interconecta el SEIP-E, el cual por sus características de regulación de voltaje y frecuencia (sistema más robusto) ayuda a mitigar los efectos capacitivos del cable.

Los transitorios electromagnéticos generados por maniobras de operación de la línea de transmisión deben limitarse a respetar los datos técnicos del equipamiento eléctrico instalado en la subestación. Particularmente, se debe considerar los datos técnicos de los pararrayos, los cuales disipan la energía generada por los transitorios electromagnéticos de maniobras, fallas eléctricas y rayos.

Los pararrayos instalados en las bahías de la línea de transmisión CPF - Sacha de 69 kV son de marca Tyco Electronics, modelo BOW-PCA358L1E1M8-5, cuyas principales características técnicas se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos Técnicos - Pararrayos

Característica Técnica	Valor
Voltaje Nominal (Ur)	58 kV
Voltaje de Operación Continuo	46 kV
Máxima Sobretensión Temporal (TOV) (Transitorio a 1 seg.)	67 kV
Máxima Sobretensión que Soporta el Pararrayo	1.62 pu
Corriente Nominal de Descarga	10 kA

El disyuntor “DY SACHA” tiene la característica de operación tripolar asincrónica, por lo cual la respuesta transitoria de voltaje dependerá del valor de la onda de voltaje en el que se produzca el cierre o apertura del disyuntor.

Por lo tanto, es necesario realizar el análisis estadístico del cierre del disyuntor “DY SACHA” con el objetivo de determinar cuáles son los sobre voltajes con mayor probabilidad de ocurrencia durante la energización de la línea CPF- Sacha 69 kV.

A continuación, se presentan los resultados de transitorios electromagnéticos que se producen en la energización de la línea de transmisión CPF – Sacha de 69 kV SIN y CON compensación reactiva.

### 2.2.1. Energización SIN compensación reactiva

Se modelan mil (1,000) cierres del disyuntor “DY SACHA” en diferentes instantes de tiempo, cuyos resultados estadísticos se presentan en la Tabla 4. En esta tabla se detalla el número de muestras que exceden el sobre voltaje tolerable por el pararrayos y su probabilidad de ocurrencia en los disyuntores de las subestaciones Sacha y CPF.

Tabla 4: Sobre voltajes temporales – Energización Sin Compensación

Fase	Sacha		CPF	
	No. X>1,62	Pr (X>1,62)	No. X>1,62	Pr (X>1,62)
A	104	6,6%	356	32,6%
B	48	6,6%	280	24,7%
C	112	7,1%	367	33,6%

Los resultados muestran que en todas las fases existe una alta probabilidad de sobrepasar el voltaje tolerable de los pararrayos. En este caso, los voltajes en la subestaciones Sacha y CPF pueden incrementarse hasta valores de 1,66 p.u. y 1,83 p.u., respectivamente. Los voltajes en CPF son mayores debido al efecto capacitivo del cable al final de la línea de transmisión energizada.

Las probabilidades de que los voltajes, en CPF y Sacha, alcancen valores por encima del valor tolerable de los pararrayos son del orden de 7,1 % y 33,6 %, respectivamente.

Además, es importante mencionar que la corriente máxima esperada de energización (corrientes inrush) a través del cable esta alrededor de 536 Amperios. Esta corriente representa 2,27 veces la corriente nominal del cable; sin embargo, esta magnitud no afecta la integridad del elemento por su corta duración. La corriente se estabiliza en 175 Amperios, luego de transcurridos dos ciclos (33,3 ms) de la energización, lo que representa 0.74 veces de su corriente nominal.

### 2.2.2. Energización CON compensación reactiva

Como se mencionó en el acápite 3.1, con la finalidad de flexibilizar la operación del SEIP-E, la potencia reactiva generada por el cable se ha compensado por medio de la instalación de reactores a ambos lados de la línea de transmisión.

El análisis de transitorios electromagnéticos considero diferentes compensaciones de potencia reactiva generada por el cable, con la transferencia de potencia activa máxima de 20 MW.

En la Tabla 5 se muestran las probabilidad de ocurrencia de sobre voltajes por encima del voltaje tolerable de los pararrayos ( $Pr(X>1,62)$ ).

Tabla 5: Probabilidad de ocurrencia de sobre voltajes – Energización CON Compensación

Fase	Compensación 9,2 MVAR en Sacha		Compensación 4,1 MVAR en Sacha, 4,1 MVAR en CPF		Compensación 9,2 MVAR en CPF	
	Sacha	CPF	Sacha	CPF	Sacha	CPF
A	0,0%	11,2%	0,0%	0,0%	9,6%	0,0%
B	0,0%	1,6%	0,0%	0,0%	6,9%	0,0%
C	0,0%	10,2%	0,0%	0,0%	8,5%	0,0%

Se observa que la compensación reactiva del cable en uno de los extremos no mitiga el efecto capacitivo de la línea de transmisión en el otro extremo. Las probabilidades de sobrepasar el voltaje tolerable en CPF y Sacha están en el orden de 11,2% y 8,5%, respectivamente.

Caso contrario sucede, cuando los reactores se modelan a ambos lados de la línea de transmisión, donde se observa que la probabilidad de superar el voltaje tolerable son de 0,0%.

En las Fig. 4 y 5 se muestran las formas de onda de los máximos voltajes en Sacha y CPF.

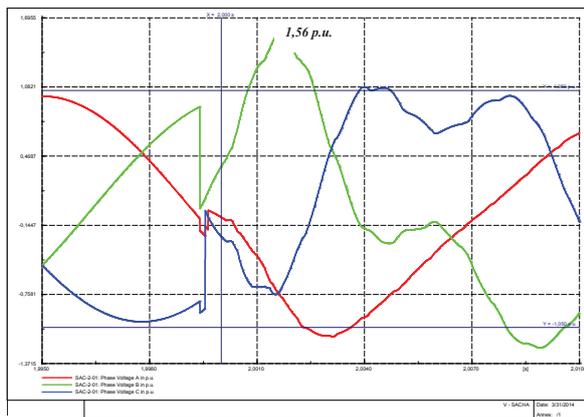


Figura 4: Sobre voltaje máximo en Sacha - Fase B

La compensación en ambos lados de la línea permite anular los riesgos de sobre voltaje, alcanzando voltajes máximos de hasta 1,56 p.u. en Sacha y 1,4 p.u. en CPF.

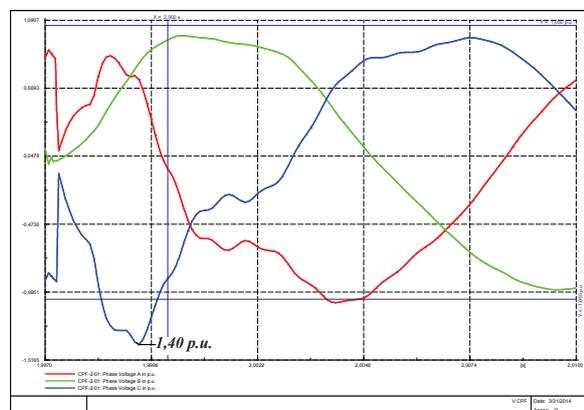


Figura 5: Sobre voltaje máximo en CPF - Fase C

En la Fig. 6 se muestran las corrientes de magnetización del cable, las cuales por efecto de la compensación reactiva disminuyen de 536 Amperios a 490 Amperios. Este valor de corriente se reduce a 160 Amperios, después de transcurridos dos ciclos (33.3 milisegundos) del cierre del disyuntor.

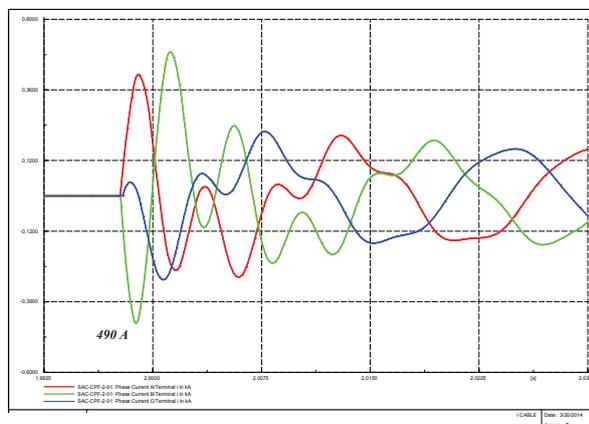


Figura 6: Corriente de magnetización del cable monopolar enterrado de 69 kV

### 2.3. Análisis Dinámico del Sistema

En la presente sección se analizará las señales de voltaje, frecuencia y el comportamiento dinámico de las máquinas generación considerando la energización de la línea de transmisión CPF – Sacha de 69 kV SIN y CON compensación reactiva.

El análisis dinámico del sistema se realizó en el software ETAP 12.6 considerando el SEIP-E y el sistema eléctrico CPF. En la Fig. 7 se muestra el sistema reducido SEIP-E y del sistema eléctrico CPF.

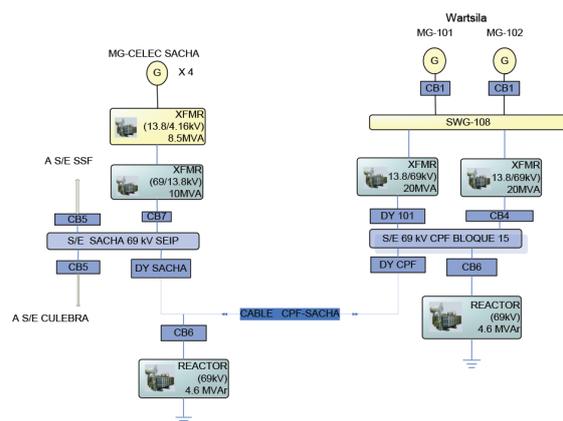


Figura 7: Diagrama Simplificado del SEIP-E – Análisis Dinámico

Cabe señalar que las respuestas dinámicas de mayor impacto en el SEIP-E se dan en el sistema eléctrico de Sacha. Esto debido a que la energización de la línea de transmisión se realizó desde la subestación Sacha. Por esta razón, a continuación se presentan los resultados dinámicos de los generadores conectados en Sacha.

#### 2.3.1. Energización SIN compensación reactiva

En la Fig. 8 se muestra el voltaje en la subestación Sacha durante la energización del cable. El voltaje se estabiliza en 77,28 kV (1,12 p.u.) en alrededor de 2 segundos; luego el voltaje decae a un valor permanente de 73,14 kV (1,06 p.u.).

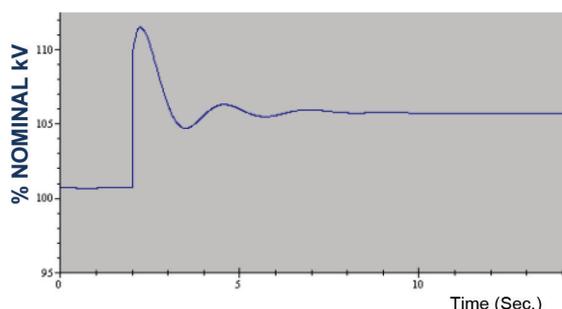


Figura 8: Voltaje en Sacha durante la energización del Cable – SIN Compensación

En la Fig. 9 se muestran las respuestas dinámicas de la excitatriz, de la potencia reactiva generada y el voltaje de los generadores de CELEC Sacha. Se observa que se produce un decremento en la corriente de excitatriz con la finalidad de reducir la generación de reactivos y disminuir los voltajes en bornes de los generadores de CELEC Sacha. En este caso, los reguladores de voltaje reducen el voltaje de regulación a 0 voltios durante 0,5 segundos.

Tanto los generadores de CELEC Sacha como los generadores de otras locaciones se encuentran operando en puntos de sub-excitación de sus curvas de capacidad. Estos puntos se encuentran cerca de los límites de estabilidad de los generadores dado por la corriente de magnetización del campo. Por esta razón, se requiere de compensación reactiva adicional para operar y energizar la línea de transmisión CPF Sacha de 69 kV. Por ejemplo, los generadores de CELEC Sacha se encuentran absorbiendo 360 kVAR, cuyo punto de operación está muy cerca del límite de subexcitación de 400 kVAR.

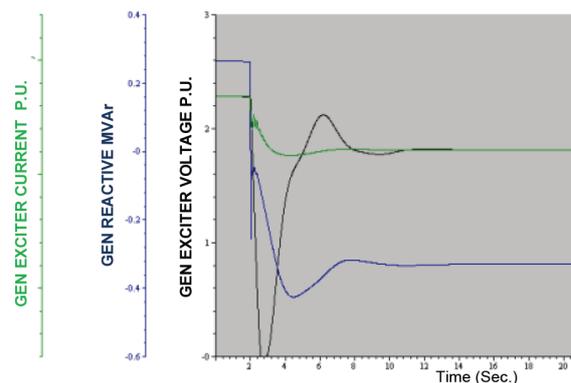


Figura 9: Respuesta de Controladores de Voltaje de los generadores CELEC Sacha - SIN Compensación

En la Fig. 10 se muestran las respuestas dinámicas de la potencia activa generada, velocidad y ángulo de operación de los generadores de CELEC Sacha.

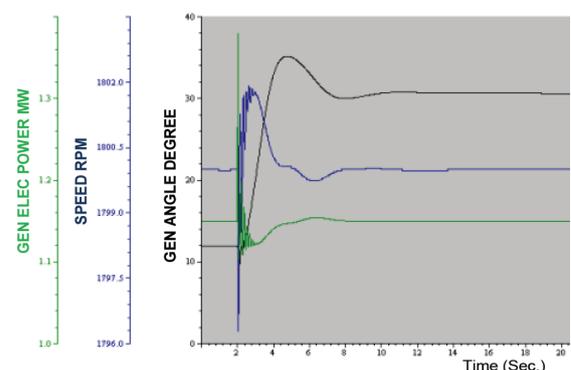


Figura 10: Respuesta de Controladores de Velocidad de los generadores CELEC Sacha – SIN Compensación

La zona de funcionamiento estable (desplazamiento angular) de un generador antes de que pierda sincronismo está delimitada entre  $0 \leq \delta \leq 90^\circ$  [3]. El margen de estabilidad máximo definido para el SEIP-E es de  $60^\circ$ .

Con la energización de la línea de transmisión CPF-Sacha de 69 kV, el ángulo del rotor de los generadores de la central CELEC Sacha se incrementa a  $24^\circ$ , manteniendo el margen estabilidad.

### 2.3.2. Energización con compensación reactiva

En la Fig. 11 se muestra el voltaje en la subestación Sacha durante la energización del cable. El voltaje se estabiliza en 71,7 kV (1,03 p.u.) en alrededor de 2 segundos; luego, el voltaje disminuye a un valor permanente de 70,38 kV (1,02 p.u.).

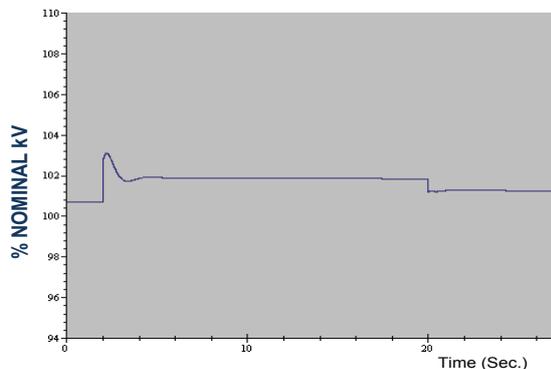


Figura 11: Voltaje en Sacha durante la energización del Cable – CON Compensación

En la Fig. 12 se muestran las respuestas dinámicas de la excitatriz, de la potencia reactiva generada y el voltaje de los generadores de CELEC Sacha. Se observa que los reguladores de voltaje de los generadores CELEC Sacha actúan reduciendo la corriente de la excitatriz para controlar los voltajes en bornes del generador.

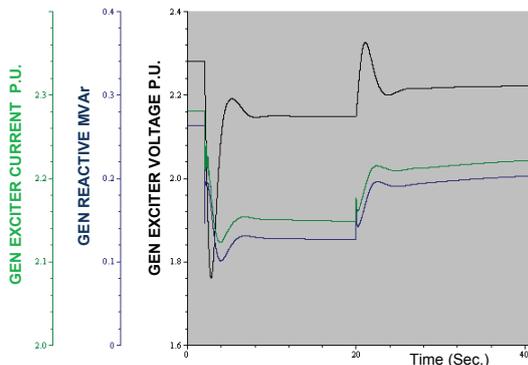


Figura 12: Respuesta de Controladores de Voltaje de los generadores CELEC Sacha - CON Compensación

En la Fig. 13 se muestran las respuestas dinámicas de la potencia activa generada, velocidad y ángulo de operación de los generadores de CELEC Sacha.

Durante la energización del cable, los generadores de CELEC Sacha presentan oscilaciones amortiguadas de potencia de  $\pm 80$  kW, las cuales debido a su característica amortiguada no presentan riesgo al sistema. Además, los generadores incrementan el ángulo del rotor en  $4^\circ$ , cuyo valor de desplazamiento angular es bajo y no afecta la estabilidad transitoria del sistema.

Con respecto al sincronismo de los sistemas eléctricos CPF y SEIP-E, los generadores de CELEC Sacha presentan oscilaciones de  $\pm 10$  kW; mientras que, los generadores Wartsila de CPF presentan oscilaciones amortiguadas de  $\pm 60$  kW. Estas oscilaciones se deben a la diferencia angular de  $4^\circ$  entre las ondas de voltaje de cada sistema, las cuales por su característica amortiguada no presentan riesgo a la estabilidad transitoria de los dos sistemas interconectados.

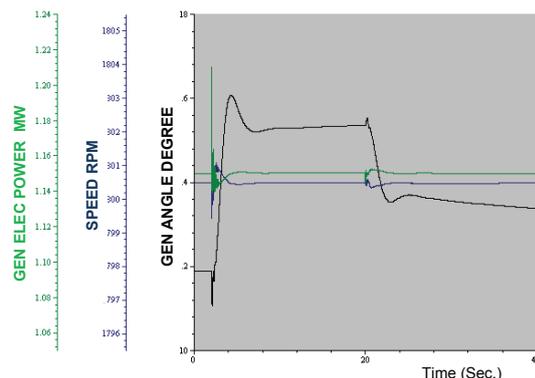


Figura 13: Respuesta de Controladores de Velocidad de los generadores CELEC Sacha – CON Compensación

## 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente artículo muestra los estudios realizados para la energización y operación de la línea de transmisión enterrada CPF – Sacha de 69 kV. Esta línea de transmisión por su nivel de voltaje y extensión produce efectos eléctricos que son necesarios estudiarlos para el correcto funcionamiento de los sistemas a integrase.

Los estudios muestran que para la energización de la línea de transmisión CPF – Sacha de 69 kV se requirió compensar los efectos capacitivos producidos por el cable de potencia subterráneo. Con la finalidad de flexibilizar las maniobras y operación del SEIP-E se compensó la potencia reactiva generada por el cable mediante la

instalación de dos reactores de 4.6 MVAR en los extremos de la línea.

Los reactores instalados permitieron compensar la potencia reactiva generada por el cable, disminuir los voltajes en las subestaciones Sacha y CPF, y evitar que las unidades de generación se sub-exciten en valores cerca de sus límites del margen de estabilidad permanente.

En el periodo transitorio de energización y desenergización, la compensación reactiva permitió anular la probabilidad de sobre voltajes por encima de los voltajes tolerables de los equipos de protección y seccionamiento.

Además, la compensación reactiva mejora la estabilidad transitoria del SEIP-E debido a que la oscilación de los ángulos de los rotores de las unidades de generación disminuye de 24° a 4°.

La línea de transmisión enterrada CPF – Sacha de 69 kV fue energizada el 22 de diciembre de 2014, y actualmente se encuentra operativa con una transferencia de potencia de 5MW aproximadamente

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen y felicitan a todo el personal del *Proyecto Optimización Generación y Eficiencia Energética (OGE&EE) de PETROAMAZONAS EP* por la culminación de su primera línea de transmisión enterrada CPF – Sacha de 69 kV. Esta línea permitió interconectar el Bloque 15 al SEIP-E, generando ahorros al estado ecuatoriano por la disminución de costos operativos y mejorando la confiabilidad del sistema.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] A. Sobral, A. Moura, and M. Carvalho, “Technical implementation of cross bonding on underground high voltage lines projects,” CIREN: 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 2011.

[2] CIGRE WG B1.07 Brochure 338: “Statistics of AC underground cables in power networks,” Diciembre, 2007.

[3] European Commission, “Análisis de la necesidad de una nueva interconexión entre Francia y España – Documento n° 2”, Barcelona, España, Marzo, 2008, disponible en la página web: [http://ec.europa.eu/spain/barcelona/images/documents/informe\\_2\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/spain/barcelona/images/documents/informe_2_es.pdf).

[4] CENACE, “Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia”, Quito, Ecuador, Julio, 2001, disponible en la página web: <http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/52/estabilidad.pdf>.

[5] DIGSILENT Power Factory, “User’s Manual Version 15.2.1”, DIGSILET GmbH, Gomaringen, Germany, 2013.



**Rommel Cela.-** Nació en Quito en 1980. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2005. Actualmente trabaja en Petroamazonas EP en el Centro de Estudios Eléctricos y Centro de Gerenciamiento Energético del Proyecto OGE&EE.



**Ramiro Sanguil.-** Nació en Ambato en 1985. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en 2012. Actualmente trabaja en Petroamazonas EP en el Centro de Estudios Eléctricos y Centro de Gerenciamiento Energético del Proyecto OGE&EE.



**Marlon Santiago Chamba.-** Nació en Loja, Ecuador en 1982. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en el 2007, y es candidato doctoral del Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San

Juan, Argentina. Actualmente trabaja en el Centro de Estudios Eléctricos y Centro de Gerenciamiento Energético del Proyecto OGE&EE, Petroamazonas EP.



**Marcelo Solís.-** Nació en Ambato en 1984. Obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en la Escuela Politécnica del Ejército en 2009. Actualmente trabaja en Petroamazonas EP como Coordinador del Centro de

Estudios Eléctricos y Centro de Gerenciamiento Energético del Proyecto OGE&EE.