

Criterios económicos y de estabilidad para diseñar un futuro cable submarino HVDC en el Ecuador

Andrés Jacho^a, Hugo Barrera^a, Juan Plazarte^b, Javier Urquizo^a

^a Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, FIEC, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador,

ajacho@espol.edu.ec, hfbarrer@espol.edu.ec, jurquizo@espol.edu.ec

^b TRANSELECTRIC, Departamento de Planificación de la Expansión, Avenida 6 de Diciembre y Orellana, Quito, Ecuador, juan.plazarte@celec.gob.ec

Resumen –El propósito de este artículo es proponer un enlace de transmisión de energía eléctrica entre dos subestaciones que pertenecen al Sistema Nacional Interconectado (SNI) en la República del Ecuador. Las subestaciones se encuentran en las provincias del Guayas (subestación Posorja) y El Oro (subestación Pasaje). Se proponen dos alternativas, la primera la convencional en corriente alterna (AC) o también llamada “High Voltage Alternate Current” (HVAC) y la segunda, una innovadora en corriente directa (DC) o más conocida como “High Voltage Direct Current” (HVDC). Este artículo incluye como elementos de decisión los resultados de la aplicación de modelos de estabilidad relativa en el SNI ante la incorporación de este enlace de transmisión de energía eléctrica y la valoración económica el valor presente neto. Nuestros resultados demostraron cuál de las dos propuestas de transmisión de energía eléctrica es la más factible técnica y económica. Los elementos técnicos corresponden a los voltajes de las barras, porcentaje de cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica, potencia activa, reactiva y ángulo de los generadores eléctricos pertenecientes al SNI y que se encuentran alrededor del enlace que se va a estudiar. Además, procuramos mejorar los perfiles en por unidad del voltaje de las subestaciones eléctricas que se encuentran alrededor del enlace HVDC, así como también la capacidad de transmitir potencia activa del sistema, manteniendo constante e independiente de la distancia es uno de los temas a discutir en este artículo, finalmente, este artículo demuestra en los resultados que la tecnología HVDC-VSC con configuración Monopolar predomina en viabilidad técnica respecto a la HVAC, sin embargo, respecto al análisis económico que también es parte de este artículo; predomina la tecnología HVAC y esto debido a los costos que involucra implementar un enlace HVDC, la teoría afirma que se mejoran los niveles de voltaje en por unidad de las redes eléctricas que se encuentran alrededor del enlace de transmisión DC, y lo confirmamos mediante simulaciones corriendo flujos de potencia eléctrica, y observando que se mejoran los niveles de voltaje en las subestaciones vecinas a los dos puntos de interconexión de Pasaje y Posorja. Este trabajo es importante porque contribuye al campo de la investigación e ingeniería cuando se requiere buscar un diseño de cable submarino con tecnología HVDC.

Palabras clave – Análisis de Estabilidad, Análisis de dominio de tiempo, Dinámica del Sistema de potencia, Estabilidad del Sistema de potencia, Modelado del Sistema de Potencia, Simulación del Sistema de potencia, Transmisión HVDC y Voltaje.

I. INTRODUCCIÓN

La transmisión de grandes cantidades de potencia y en efecto con las menores pérdidas eléctricas ha sido siempre lo ideal para realizar enlaces de transmisión eléctrica, estos enlaces son necesarios cuando se necesita transportar grandes bloques de potencia en términos de centrales construidas, sin embargo, en el Ecuador tendríamos satisfecho un balance generación – carga hasta el año 2022 con las centrales actualmente construidas y en operación. Sin embargo, en las centrales construidas en la región suroriental del país, se presenta un fenómeno recurrente que es el estiaje del viento y de la lluvia, especialmente en las centrales de Villonaco y Minas de Huacachaca, la causa de este trabajo es la entrada de una carga importante en Posorja cuya demanda es de 900/1000 MW (siderúrgica / Aluminio), en efecto para cubrir esta demanda de energía eléctrica es necesario evacuar la energía generada por el proyecto Hidroeléctrico Zamora Santiago, se necesita un sistema de transmisión con un nivel de tensión de 500kV, se eleva a este nivel de tensión para evitar pérdidas en la transmisión de energía eléctrica, el tendido del cableado eléctrico va hasta la subestación Pasaje para lograr cubrir esta demanda, debido a las condiciones geográficas de estas dos subestaciones eléctricas, el escenario por donde tiene que recorrer el cableado eléctrico de manera óptima y evitando largas distancias es submarino, es allí donde el propósito de este trabajo consiste en proponer como escenarios de interconexión dos alternativas para la transmisión de energía eléctrica, la primera la convencional HVAC y la segunda usando tecnología HVDC. El enfoque de este artículo es demostrar que al incorporar un enlace de transmisión eléctrica usando HVDC al SNI se puede conseguir una mejor estabilidad en el sistema eléctrico de potencia y mejorar los niveles de voltajes en por unidad de las subestaciones que se encuentren alrededor del enlace de transmisión tal como lo indica la teoría, esto lo demostramos en este artículo con las simulaciones realizadas.

La primera transmisión de energía eléctrica comercial en HVDC se la realizó en el año 1954, a diferencia de la transmisión de energía eléctrica convencional en AC, se utiliza corriente continua lo que da ventajas técnicas de acuerdo con [1], entre aquellas ventajas la que es de nuestro interés es que puede enviar

grandes bloques de potencia eléctrica entre dos sistemas AC que se encuentren a distancias largas y tenga largos cruces de cables submarinos. Estos sistemas HVDC están compuestos básicamente por estaciones convertidores de señal de voltaje AC/DC (llamada estación Rectificadora) y DC/AC (llamada estación Inversora), unidos mediante una línea aérea o cable (subterráneo o submarino), dentro de las estaciones se encuentran otros componentes necesarios para el correcto funcionamiento del enlace de acuerdo con [2], para realizar este proyecto de incorporar una línea de transmisión eléctrica usando HVDC al SNI, hemos investigado acerca de proyectos de transmisión eléctrica que tengan similares características al escenario que tenemos, pues como resultado de la investigación hemos escogido el proyecto Rómulo y NorNed según [3,4] nos servirán para tener un referente a nuestra propuesta de interconexión de energía eléctrica usando HVDC, pues de los proyectos con el cual vamos a comparar el escenario (interconexión entre Pasaje y Posorja atravesando el golfo de Guayaquil) en el cual involucra realizar el cableado submarino es el proyecto Rómulo, realizado por la Red Eléctrica de España [5], y es que debido a las ubicaciones geográficas de las subestaciones eléctricas anteriormente mencionadas se presentan dos alternativas posibles para realizar la interconexión; la primera es la interconexión realizando un recorrido cuya distancia es 312 kilómetros y la segunda opción es la interconexión cuyo recorrido tiene una distancia de 100 kilómetros y atraviesa el golfo de Guayaquil, ambas alternativas de interconexión se procederá a realizar un análisis de estabilidad, flujo de potencia, cargabilidad de las líneas de transmisión del SNI y cortocircuito mediante simulaciones, dentro del enfoque de este artículo se encuentra el análisis económico de cada propuesta de interconexión; pues se detallaron los costos de acuerdo con [6] y que involucran implementar al SNI ambos tipos de interconexión eléctrica incluyendo las subestaciones eléctricas en función de la tecnología, con los resultados del análisis económico tenemos que es factible económicamente realizar la interconexión HVAC, pero sin embargo, si discutimos la viabilidad técnica que ofrecen estas dos alternativas de interconexión; tenemos como mejor alternativa la interconexión HVDC, esta última fue seleccionada de acuerdo a los resultados de estabilidad obtenidos en las simulaciones respectivas, dejamos al lector que tenga la decisión de seleccionar a primera instancia la alternativa que tenga factibilidad técnica – económica y que optimizará la construcción de nuevas líneas del tipo convencional aérea.

II. METODOLOGÍA

Para detallar el proceso de la obtención de resultados y selección de una alternativa de transmisión de energía eléctrica propuesta en este artículo, hemos recurrido a realizar el siguiente diagrama de flujo lógico que se muestra a continuación, pues nos detalla

cómo se realizó este artículo. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo lógico.

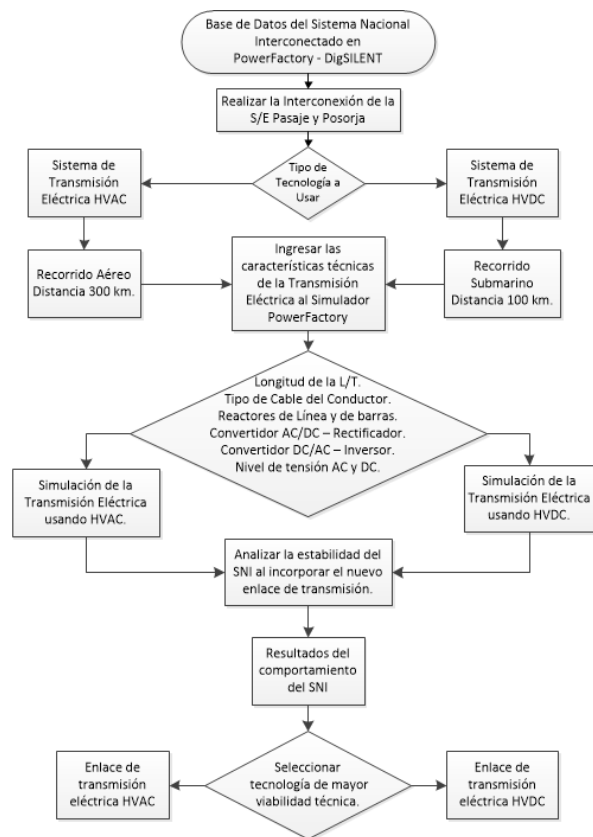


Figura 1 Diagrama de Flujo Lógico.

Empezaremos primero en obtener una Base de datos en Powerfactory DIGSILENT en donde se encuentra detallado el SNI del Ecuador, esta información fue obtenida por medio del convenio de Espol-Transelectric EP, como observación a esta Base de datos se sugiere que la versión del programa sea la más actual, en nuestro fue la versión 2018 de Powerfactory, luego se procedió a ingresar al programa las dos alternativas propuestas de transmisión de energía eléctrica, para aquello fue necesario previamente conocer las características técnicas, parámetros y tipos de conductores eléctricos, niveles de tensión de operación de los equipos y elementos necesarios que en conjunto forman parte de un sistema de transmisión de energía eléctrica, el siguiente cuadro del diagrama de flujo lógico corresponde a seleccionar el tipo de tecnología a usar, pues para detalles empezaremos por la parte izquierda de la Figura 1, que es el sistema de transmisión eléctrica convencional HVAC, donde se detallan características técnicas de equipos y elementos que necesitamos para ingresarlas al programa.

Las características técnicas de los elementos que forman parte de la línea de transmisión eléctrica AC que se necesitaron para poder interconectar la subestación de Pasaje – Chorrillos y Posorja a un nivel de tensión de 500kV, la información acerca de estos equipos y elementos fue obtenida por Transelectric-EP,

en las siguientes secciones hemos destacado los elementos de mayor importancia que conforman una línea de transmisión de energía eléctrica, indicamos al lector que este artículo no tiene el enfoque al diseño detallado y construcción de líneas de transmisión AC, sino que estos elementos y sus características técnicas nos servirán para poder ingresarlas como parámetros a la herramienta computacional Powerfactory para luego realizar la respectiva simulación.

Las características técnicas de los equipos, elementos y recorrido de la línea de transmisión AC que interconecta Chorrillos y Pasaje. Este primer tramo de la interconexión tiene una extensión aproximada de 211 kilómetros, con estructuras metálicas de doble terna. El primer circuito se tenderá con un haz de 4 cables ACAR 750 MCM por fase, en esta etapa de construcción de la línea. La línea de transmisión emprende su trayectoria desde la subestación eléctrica Chorrillos 500kV, localizada en la provincia de Guayas, pasa por las poblaciones de Guayaquil, Daule, Milagro, El Triunfo, Naranjito, Naranjal, Camilo Ponce Enríquez, Santa Rosa, hasta llegar a la subestación de Pasaje, la altitud media es de 57 metros

Las características básicas de la línea son las siguientes:

- Tensión de operación: 500 kV.
- Tensión máxima de servicio: 525 kV.
- Potencia transmitida en operación normal: 1500 MVA.
- Potencia transmitida en operación en emergencia: 2000 MVA.
- Longitud: 210,5 kilómetros.
- Cantidad de circuitos: 2 (tendido solo de uno).
- Disposición: vertical.
- Numero de cables conductores por fase: 4.
- Distancia entre conductores en el haz: 457 milímetros.
- Disposición del haz: 'Cuadrado'.
- Cable conductor: ACAR 750 MCM (18/19).
- Resistencia media de los pies de torre de proyecto: 10 ohmios.
- Aisladores de vidrio templado recubiertos con silicona (paso 159 milímetros, diámetro 330 milímetros, distancia de fuga 620 milímetros).
- Suspensión: 27 aisladores.
- Anclaje: 2 x 28 aisladores.
- Temperatura de ubicación: 75°C
- Ancho de la franja de servidumbre: 60 metros.

La Figura 2 muestra una torre de transmisión la cual tiene una configuración haz cuadrado y además es doble circuito, estas características técnicas son correspondientes a la línea de transmisión eléctrica que recorre desde Chorrillos hasta Pasaje.

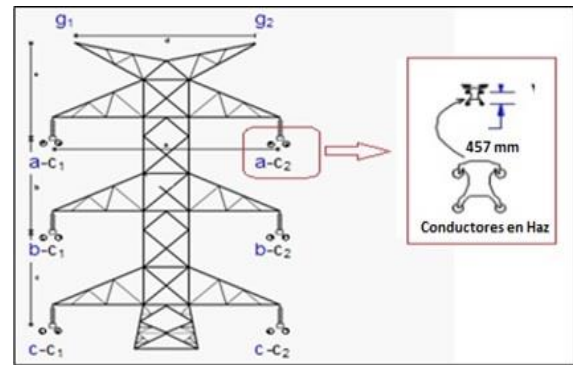


Figura 2 Torre de transmisión con configuración haz cuadrado.

Las características técnicas de los equipos, elementos y recorrido de la línea de transmisión AC que interconecta Chorrillos y Posorja. Este segundo tramo de la interconexión tiene una extensión aproximada de 90 kilómetros, con estructuras metálicas de doble terna. El primer circuito se tenderá con un haz de 3 cables ACAR 1100 MCM por fase en esta etapa de construcción de la línea. La línea de transmisión emprende su trayectoria desde la subestación eléctrica Chorrillos 500 kV, localizada en la provincia de Guayas, para por las poblaciones de Guayaquil, Chongón, Cerecita, Progreso, San Antonio, hasta llegar a la subestación de Posorja

Las características básicas de la línea son las siguientes:

- Tensión de operación: 500 kV.
- Tensión máxima de servicio: 525 kV.
- Longitud: 90 kilómetros.
- Cantidad de circuitos: 2 (tendido solo de uno).
- Disposición: vertical.
- Numero de cables conductores por fase: 3.
- Distancia entre conductores en el haz: 457 milímetros.
- Disposición del haz: 'Triangulo'.
- Cable conductor: ACAR 1100 MCM (54/7).
- Temperatura de ubicación: 75°C
- Ancho de la franja de servidumbre: 60 metros.

Continuando con el diagrama de flujo lógico desde la parte derecha de la Figura 1, tenemos al sistema de transmisión eléctrica usando tecnología HVDC, donde se detallan características técnicas de equipos y elementos que necesitamos para ingresarlas al programa.

A continuación, se describen las características técnicas de los equipos y elementos que forman parte de la línea de transmisión eléctrica DC de acuerdo con [4,5] que van a interconectar la subestación de Pasaje y Posorja a un nivel de tensión de 500kV en corriente continua, en las siguientes secciones hemos destacado los elementos de mayor importancia que conforman una línea de transmisión de energía eléctrica, indicamos al lector que este artículo no tiene el enfoque al diseño detallado y construcción de líneas de transmisión DC, estos elementos cuyas características nos servirán para poder ingresarlas como parámetros a la herramienta computacional Powerfactory DIGSILENT para luego realizar la respectiva simulación.

Las características técnicas de los elementos y recorrido de la línea de transmisión DC que interconecta Pasaje y Posorja. Este tramo de la interconexión tiene una extensión aproximada de 90 kilómetros, con configuración Monopolar de acuerdo con [7]. El circuito se tenderá con 2 cables del tipo Masa Impregnada cable submarino de acuerdo con [8], en esta etapa de construcción de la línea.

Las características básicas de la línea son las siguientes:

- Tensión DC de operación: 500 kV.
- Potencia transmitida en operación normal: 900 MVA.
- Longitud: 90 kilómetros.
- Cantidad de circuitos: 2 (tendido solo de uno).
- Numero de cables conductores por fase: 2.
- Tipo de Cable conductor: Masa impregnada.
- Resistencia: 0,0122 ohmios/km.
- Corriente nominal: 1,485 kA.
- Material: Cobre.
- Sección nominal: 790 mm².
- Capa aisladora de 20 mm.
- Peso: 90 Kg/metro.

En la Figura 3 se muestra un cable MI, estos cables usan un fluido dieléctrico para impregnar el papel, comúnmente se emplea; (i) aceite viscoso, (ii) aceite viscoso con resinas refinadas, (iii) aceite de baja viscosidad entre otros.



Figura 3 Cable del tipo masa impregnada – doble conductor por fase.

La configuración que tendrá la línea de transmisión DC es Monopolar con retorno metálico, la cual se muestra en la siguiente Figura 4

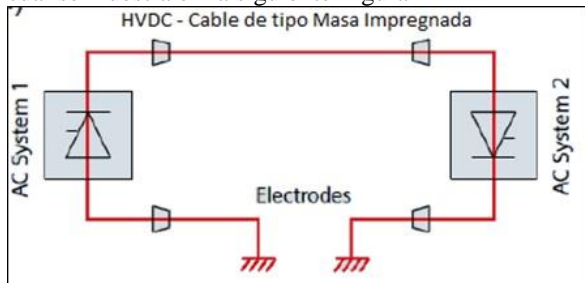


Figura 4 Configuración HVDC Monopolar.

La Figura 4 muestra la conexión Monopolar con retorno metálico, empezando desde la parte izquierda de la figura tenemos un cuadrado de color gris el cual representa el Rectificador que se encuentra conectado a una red llamada ‘AC System 1’, la línea de color rojo

representa el cable de transmisión submarina la cual conecta el rectificador e inversor, el inversor está representando también por un cuadrado de color gris el cual está conectado a una red llamada ‘AC System 2’. A continuación, describimos el ingreso de esta información al programa.

Los equipos y parámetros técnicos correspondientes a la línea de transmisión eléctrica y los reactores de línea al programa Powerfactory DigSILENT, luego procedimos a mostrar un flujo de potencia con la finalidad de observar los niveles de voltaje en por unidad de las barras y cargabilidad en las líneas de transmisión pertenecientes al SNI.

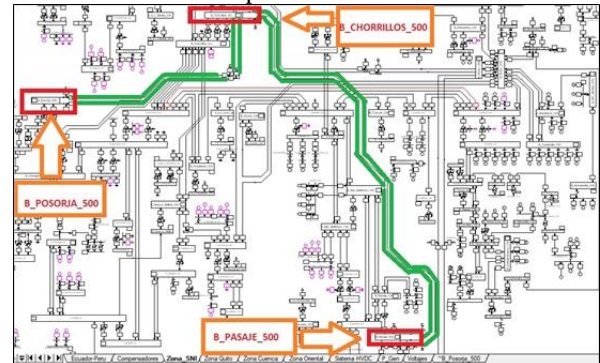


Figura 5 Simulación de la transmisión HVAC DigSILENT.

La Figura 5; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el SNI, las líneas de color verde representan el enlace HVAC y las líneas de transmisión eléctrica las cuales interconectan las S/E de Pasaje, Chorrillos y Posorja; estas S/E se las ha representado encerrándolas en un rectángulo de color rojo, mientras que la flecha de color naranja indica el nombre de la S/E.

Los datos de la línea de transmisión que conecta la subestación eléctrica de Pasaje con Chorrillos, tomando en cuenta la distancia que es aproximadamente 210 kilómetros y con estructuras metálicas de doble terna, tenemos a continuación la Figura 6 que nos indica las características técnicas de la línea de transmisión las cuales son el cable conductor 4x750 MCM ACAR, nivel de tensión, resistencia entre otros parámetros.

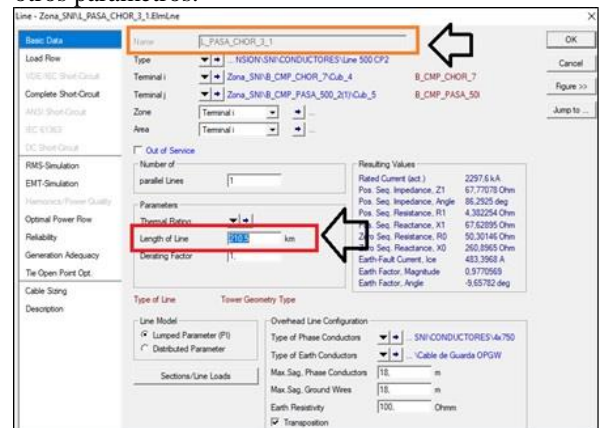


Figura 6 Características técnicas de la línea de transmisión Pasaje - Chorrillos.

La Figura 6 muestra encerrado en un rectángulo de color naranja el nombre que le hemos puesto a la

línea de transmisión, también tenemos un rectángulo de color rojo el cual nos indica la longitud de la línea de transmisión, allí es donde ingresamos la distancia de 210,5 kilómetros. Debido a que es doble circuito la transmisión eléctrica desde Pasaje hasta Chorrillo, el procedimiento para ingresar los parámetros de la otra línea de transmisión será igual que los pasos anteriormente mencionados en esta sección.

Los datos de la línea de transmisión que conecta la subestación eléctrica de Chorrillos con Pasaje, tomando en cuenta la distancia que es aproximadamente 90 kilómetros y con estructuras metálicas de doble terna, tenemos a continuación la Figura 7 que nos indica las características técnicas de la línea de transmisión que tenemos que completar, características que son el cable conductor 3x1100 MCM ACAR, nivel de tensión, resistencia entre otros parámetros.

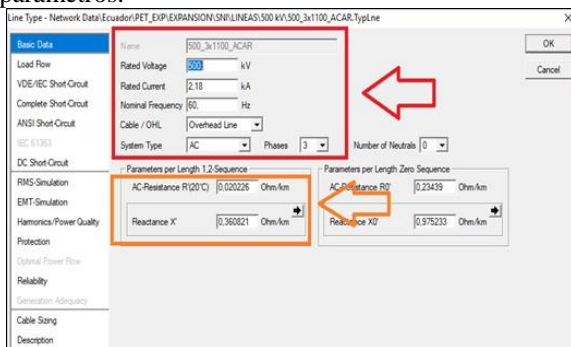


Figura 7 Configuración del cable tipo 3x100 MCM ACAR.

Los equipos y parámetros técnicos correspondientes a la línea de transmisión eléctrica usando tecnología HVDC al programa Powerfactory DigSILENT luego procedimos a mostrar un flujo de potencia con la finalidad de observar los niveles de voltaje en por unidad de las barras y cargabilidad en las líneas de transmisión pertenecientes al SNI.

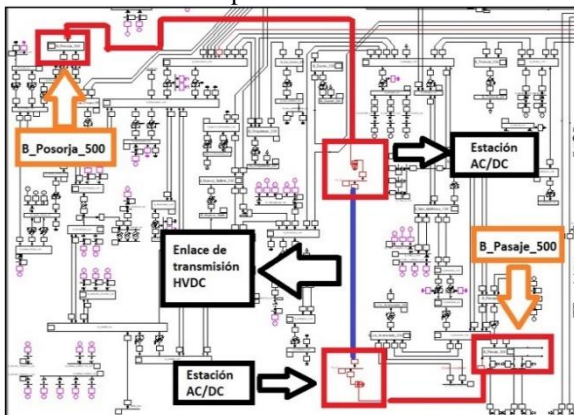


Figura 8 Simulación de la transmisión HVDC DigSILENT.

La Figura 8 muestra el SNI, las líneas de color morado representan el enlace HVDC es decir las líneas de transmisión eléctrica las cuales interconectan las S/E de Pasaje con Posorja; estas S/E se las ha representado encerrándolas en un rectángulo de color rojo e indicando su nombre con una flecha de color naranja, las flechas de color negro indican las estaciones de conversión de AC/DC y el enlace de transmisión HVDC, cabe recalcar que las estaciones de conversión

AC/DC son parte de la S/E eléctrica correspondiente a Pasaje y Posorja, debido a esto es que se las representa también dentro de un cuadrado de color rojo. Los datos de la línea de transmisión que conecta la subestación eléctrica de Pasaje con Posorja, tomando en cuenta la distancia que es aproximadamente 90 a 100 kilómetros en recorrido submarino. Tenemos a continuación la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 9 que nos indica las características técnicas de la línea de transmisión configuración Monopolar, el circuito se tenderá con 2 cables del tipo Masa Impregnada cable submarino, resistencia eléctrica, tensión de operación DC, número de cables conductores por fase, corriente nominal entre otros entre otros parámetros.

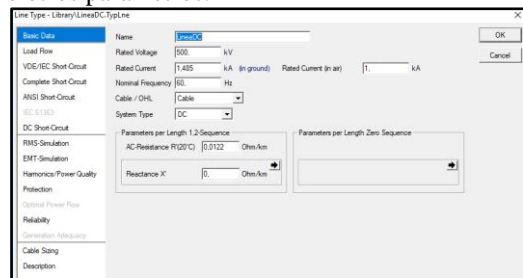


Figura 9 Características técnicas de línea DC.

La Figura 10 muestra encerrado en un rectángulo de color naranja el nombre que le hemos puesto a la línea de transmisión, también tenemos un rectángulo de color rojo el cual nos indica la longitud de la línea de transmisión, allí es donde ingresamos la distancia de 100 kilómetros.

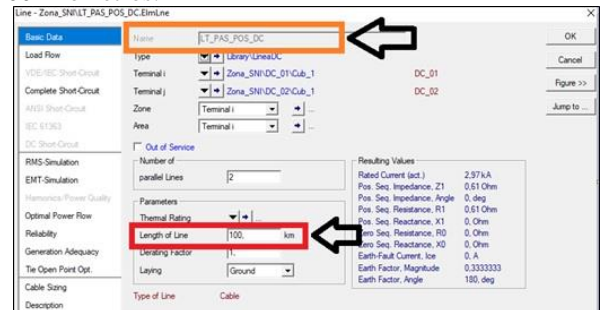


Figura 10 Características técnicas de la línea de transmisión Pasaje - Posorja.

La configuración de las estaciones de conversión AC/DC de las subestaciones eléctricas de Pasaje y Posorja. Como nuestra configuración es Monopolar, hemos escogido el convertidor de la interfaz de elementos de DigSilent para realizar la simulación, ver Figura 11.

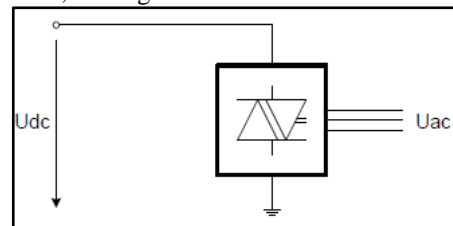


Figura 11 Convertidor AC/DC con PWM DigSILENT.

La siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 12 muestra los parámetros que ingresamos datos de nuestra estación convertidora llamada 'Inversor' la cual se encuentra en

la S/E de Posorja; tiene como parámetros a completar el voltaje de operación AC, potencia nominal del convertidor, voltaje de operación DC y entre otros parámetros

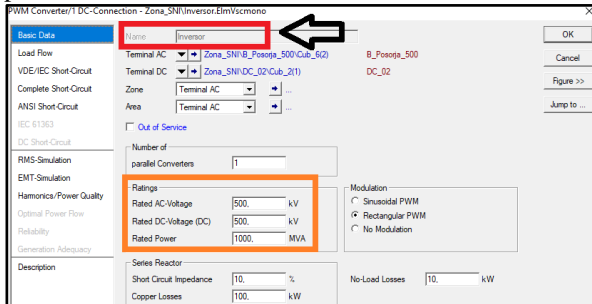


Figura 12 Características técnicas del Inversor AC/DC.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 12 muestra de color rojo un rectángulo que indica el nombre que le hemos puesto a la estación convertidora, mientras que el rectángulo de color naranja, nos indica a completar los parámetros eléctricos de la convertidora AC/DC, luego tenemos la configuración de la parte del control de potencia que se muestra en la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 13.

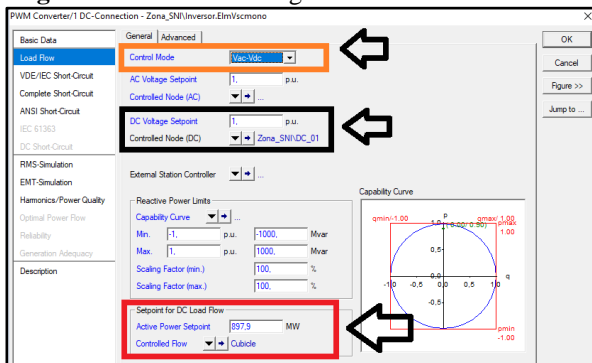


Figura 13 Configuración del Control de Potencia.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 13 nos muestra un rectángulo de color naranja que indica el modo de control escogido 'Vac-Vdc', tenemos un rectángulo de color negro que indica el nodo de control DC, finalmente un rectángulo de color rojo donde ingresamos el nivel de potencia activa que se va a transferir, en nuestro caso 900 MW.

La siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 14 muestra los parámetros que ingresamos datos de nuestra estación convertidora llamada 'Rectificador' la cual se encuentra en la S/E de Pasaje; tiene como parámetros a completar el voltaje de operación AC, potencia nominal del convertidor, voltaje de operación DC y entre otros parámetros.

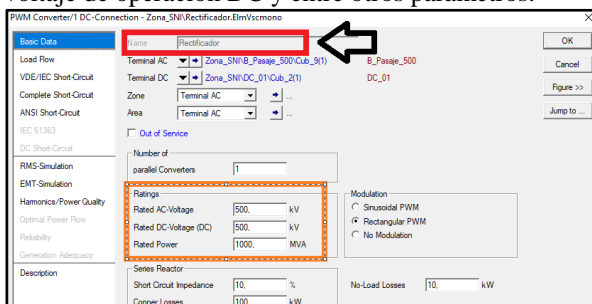


Figura 14 Características técnicas del Rectificador AC/DC.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 14 muestra de color rojo un rectángulo que indica el nombre que le hemos puesto a la estación convertidora, mientras que el rectángulo de color naranja, nos indica a completar los parámetros eléctricos de la convertidora AC/DC, luego tenemos la configuración de la parte del control de potencia que se muestra en la siguiente Figura 15.

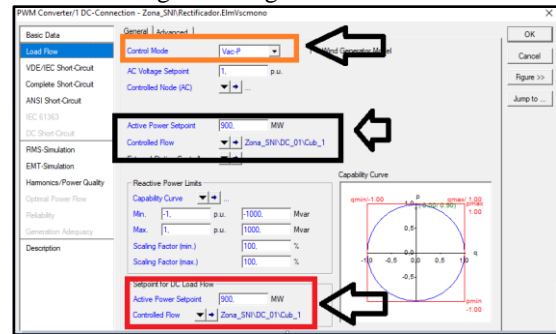


Figura 15 Configuración del control Rectificador.

La Figura 15 nos muestra un rectángulo de color naranja que indica el modo de control escogido 'Vac-P', tenemos un rectángulo de color negro que indica el nodo de control AC, finalmente un rectángulo de color rojo donde ingresamos el nivel de potencia activa que se va a transferir, en nuestro caso 900 MW.

Luego de haber realizado la incorporación de estos dos enlaces de transmisión de energía eléctrica en el programa DlgSILENT procedemos en la siguiente sección a presentar objetivamente los resultados obtenidos en una secuencia ordenada y lógica como se ha detallado el ingreso de los equipos y parámetros técnicos de cada enlace de transmisión visto en esta sección 2.

III. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En esta sección, damos los resultados obtenidos de la simulación del flujo de potencia, la estabilidad permanente y transitoria, pues además se mostrará el comportamiento de las diferentes señales eléctricas cuando se incorpora al SNI las alternativas de interconexión planteadas en este artículo, los resultados gráficos de los estudios de estabilidad transitoria consistieron en realizar fallas trifásicas en líneas de transmisión eléctrica las cuales se encuentran cercanas a los puntos de conexión de ambas S/E, el objetivo de los estudios de estabilidad transitoria de este artículo consistió en analizar el comportamiento de la estabilidad de tensión en las barras, el porcentaje de la cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica, la potencia activa, reactiva en los generadores pertenecientes al SNI al entrar en operación los enlaces de transmisión eléctrica planteados, tanto en HVAC como en HVDC, que interconectan las S/E de Pasaje y Posorja.

Nivel de Tensión: 230 kV.	Nivel de Tensión: 138 kV.
Chorrillos.	Chongón
Dos Cerritos.	Esclusas
Durán.	Trinitaria
Esclusas.	Machala
La Troncal.	Milagro
Machala.	Caraguay
Milagro.	Pascuales
Pascuales.	Policentro
Posorja.	Sta. Elena
Sta. Elena	Posorja.

Tabla 3.1: Barras del SNI para niveles 230kV y 138kV.

En la tabla 3.1 se muestra un listado de barras que pertenecen al sistema nacional interconectado, en las siguientes secciones se mostrará los niveles de voltaje en por unidad, obtenidos durante un flujo de potencia realizado en DIgSILENT.

A. Flujos de potencia, alternativa de transmisión eléctrica HVAC

En esta sección se incorpora el enlace HVAC Pasaje-Chorrillos y Posorja al SNI y se realiza el flujo de potencia. Para tener una mejor visualización de cómo se encuentra el enlace de transmisión eléctrica AC desde Pasaje hasta Posorja en el simulador DIgSILENT, se muestra la siguiente Figura 16; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

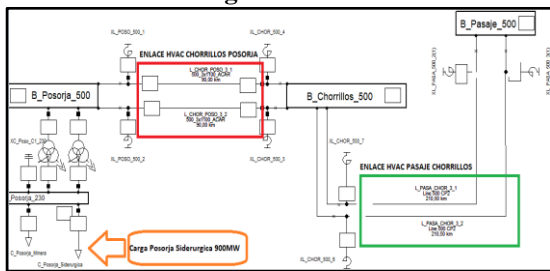


Figura 16 Sistema de transmisión eléctrica usando HVAC.

La **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 16 muestra encerrado en un rectángulo de color rojo las líneas de transmisión eléctrica que conecta las subestaciones eléctricas de Chorrillos con Posorja, el rectángulo de color verde indica las líneas de transmisión eléctrica que conectan las subestaciones eléctricas de Pasaje con Chorrillos, la flecha de color naranja nos indica la carga que se encuentra instalada en Posorja y cuya potencia activa es de 900 MW.

A continuación, se muestran los valores del análisis de flujo de potencia para el año 2023.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Pasaje_500	503,82	1,01
B_Piura_500	505,00	1,01
B_Posorja_500	487,67	0,98
B_Zamora_500	505,14	1,01

Tabla 3.2: Niveles de tensión en las barras de 500 kV.

En la tabla 3.2 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 0.98 a 1.01 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Chorrillos_230	230,00	1,00
B_Dos_Cerritos_230	227,85	0,99
B_Duran_230	226,12	0,98
B_Esclusas_230	228,75	0,99
B_Guaranda_230	227,59	0,99
B_La_Avanzada_230	225,66	0,98
B_Lago_Chongon_230	230,09	1,00
B_Machala_230	226,24	0,98
B_Mazar_U1_230	237,50	1,03

Tabla 3.3: Niveles de tensión en las barras de 230 kV.

En la tabla 3.3 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 0.98 a 1.03 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Caraguay_138	139,35	1,01
B_Cedege_Pascuales_138	140,00	1,01
B_Chongon_138	138,21	1,00
B_Cuenca_138	136,63	0,99
B_Electroquil_138	136,86	0,99
B_Esclusas_138	139,91	1,01
B_Intervisa_138	139,91	1,01
B_Jaramijo_138	136,62	0,99

Tabla 3.4: Niveles de tensión en las barras de 138 kV.

En la tabla 3.4 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 0.98 a 1.01 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

LINEAS	% CARGA
L_CHOR_POSO_3_1	27,74
L_PASA_CHOR_3_1	0,02
L_PIUR_PASA_3_1	0,01
L_TADA_CHOR_3_1	18,72
L_ZAMO_PASA_3_1	10,07
L_ZAMO_TADA_3_1	5,68
L_ZAMO_TADA_3_2	5,68

Tabla 3.5: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 500 kV.

En la tabla 3.5 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 0.01 al 27.74% en operación.

LINEAS	% CARGA
L_CHNG_POSO_2_1	14,22
L_CHOR_LCHO_2_1	19,02
L_CHOR_NPRO_2_1	46,90
L_CHOR_NSAL_2_1	30,00
L_CHOR_PASC_2_1	16,53
L_ESCL_TRIN_2_1	20,03
L_LAVA_FRON_2_1	2,64
L_MACH_LAVA_2_1	13,76
L_MAZA_ZHOR_2_1	23,60
L_MILA_DURA_2_1	11,61
L_MILA_ESCL_2_1	36,84

Tabla 3.6: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 230 kV.

En la tabla 3.6 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 7.27 al 47.11% en operación.

LINEAS	% CARGA
L_CARA_ESCL_1_1	56,81
L_CEDE_PASC_1_1	9,97
L_CHNG_POSO_1_1	35,06
L_EQUI_CHNG_1_1	40,95
L_INTE_ESCL_1_1	0,30
L_JARA_MANT_1_1	23,13
L_JARA_MONT_1_1	23,11

Tabla 3.7: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 138 kV.

En la tabla 3.7 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 9.87 al 76.24% en operación

B. FLUJOS DE POTENCIA, ALTERNATIVA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA HVDC

En esta sección se incorpora al SNI el enlace HVDC que interconecta la S/E de Pasaje y Posorja, y se realiza el flujo de potencia. Para tener una mejor visualización de cómo se encuentra el enlace de transmisión eléctrica DC desde Pasaje hasta Posorja en el programa DIgSILENT, se muestra la siguiente Figura 17.

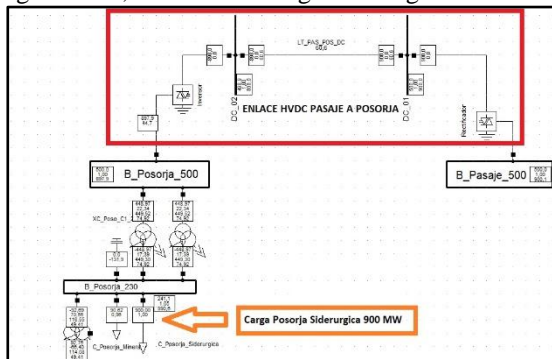


Figura 17 Sistema de transmisión eléctrica HVDC.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 17 muestra encerrado en un rectángulo de color rojo las líneas de transmisión eléctrica y estaciones convertidoras de voltaje AC/DC

que conectan las subestaciones eléctricas de Pasaje con Posorja, la flecha de color naranja nos indica la carga que se encuentra instalada en Posorja y cuya potencia activa es de 900 MW.

A continuación, se muestran los valores del análisis de flujo de potencia para el año 2023.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Pasaje_500	500,00	1,00
B_Piura_500	505,00	1,01
B_Posorja_500	500,00	1,00
B_Zamora_500	505,48	1,01

Tabla 3.8: Niveles de tensión en las barras de 500 kV

En la tabla 3.8 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 1.00 a 1.01 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Chorrillos_230	232,42	1,01
B_Dos_Cerritos_230	231,07	1,00
B_Duran_230	229,41	1,00
B_Esclusas_230	230,80	1,00
B_Guaranda_230	232,10	1,01
B_La_Avanzada_230	232,64	1,01
B_Lago_Chongon_230	232,42	1,01
B_Machala_230	232,95	1,01
B_Mazar_U1_230	236,98	1,03

Tabla 3.9: Niveles de tensión en las barras de 230 kV.

En la tabla 3.9 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 1.00 a 1.03 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

BARRAS	VOLTAJE	V (p.u)
B_Caraguay_138	138,36	1,00
B_Cedege_Pascuales_138	141,43	1,02
B_Chongon_138	140,26	1,02
B_Cuenca_138	138,02	1,00
B_Electroquil_138	139,04	1,01
B_Esclusas_138	138,95	1,01
B_Intervisa_138	138,95	1,01
B_Jaramijo_138	134,06	0,97
B_Machala_138	139,55	1,01
B_Manta_138	133,75	0,97

Tabla 3.10: Niveles de tensión en las barras de 138 kV

En la tabla 3.10 podemos observar las barras pertenecientes al SNI y sus niveles de voltaje en por unidad, los cuales varían de 0.97 a 1.02 p.u. dentro de los rangos permitidos de operación.

LINEAS	% CARGA
LT_PAS_POS_DC	60,61
L_PASA_CHOR_3_1	0,01
L_PIUR_PASA_3_1	0,01
L_TADA_CHOR_3_1	13,50
L_ZAMO_PASA_3_1	15,26
L_ZAMO_TADA_3_1	3,77
L_ZAMO_TADA_3_2	3,77

Tabla 3.11: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 500 kV

En la tabla 3.11 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 3.77 al 60.61% dentro de los rangos permitidos de operación.

LINEAS	% CARGA
L_CHNG_POSO_2_1	31,23
L_CHOR_LCHO_2_1	28,12
L_CHOR_NPRO_2_1	49,74
L_CHOR_NSAL_2_1	33,99
L_CHOR_PASC_2_1	21,94
L_DCER_MILA_2_1	28,15
L_DCER_ORQU_2_1	9,82

Tabla 3.12: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 230 kV.

En la tabla 3.12 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 7.27 al 49.74% dentro de los rangos permitidos de operación.

LINEAS	% CARGA
L_CARA_ESCL_1_1	58,71
L_CEDER_PASC_1_1	9,87
L_CHNG_POSO_1_1	76,24
L_EQUI_CHNG_1_1	35,13
L_INTE_ESCL_1_1	0,30

Tabla 3.13: Cargabilidad en las líneas de transmisión eléctrica 138 kV.

En la tabla 3.13 podemos observar las cargabilidades de las líneas pertenecientes al SNI, los cuales varían de 9.87 al 76.24% dentro de los rangos permitidos de operación.

En resumen, con estos valores obtenidos de los flujos de potencia, se puede comentar que los niveles de voltaje en por unidad mejoran a igual que la cargabilidad de las líneas de transmisión eléctrica cuando se emplea un enlace de transmisión eléctrica con tecnología HVDC.

C. Estabilidad del SNI, enlace HVAC entre S/E Pasaje, Chorrillos y Posorja

En esta sección se muestran los resultados del estudio de estabilidad y el comportamiento de las señales eléctricas; voltajes en por unidad, cargabilidad de líneas de transmisión y potencia activa de los generadores.

El tipo de falla eléctrica que se va a simular en Powerfactory es de las siguientes características: (i) falla de cortocircuito trifásico, (ii) tiempo de duración de la falla 100 mili- segundos, (iii) tiempo inicial de la falla en 2 segundos y (iv) tiempo de despejar la falla 2,1 milisegundos. La carga denominada ‘Carga Siderúrgica’ ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 18 ubicada en Posorja y conectada a un nivel de tensión de 230 kV tiene un valor de potencia nominal de 900 MW, la transferencia de potencia a través del enlace de transmisión HVAC tendrá que transmitir desde Pasaje este nivel de potencia para abastecer la carga.

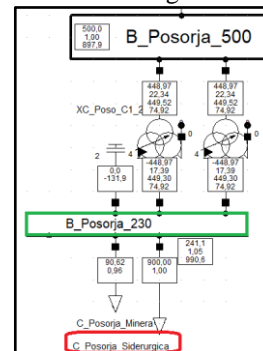


Figura 18 Representación de la S/E Posorja.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 18 se muestra un rectángulo de color verde el cual indica la barra de voltaje a 230 kV de la S/E Posorja, es allí donde se va a conectar la carga denominada ‘C. Posorja Siderúrgica’, que está encerrada en un rectángulo de color rojo. Comportamiento del voltaje (unidad en kilovoltios) de las barras pertenecientes al SNI, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Posorja, como indica la Figura 19.

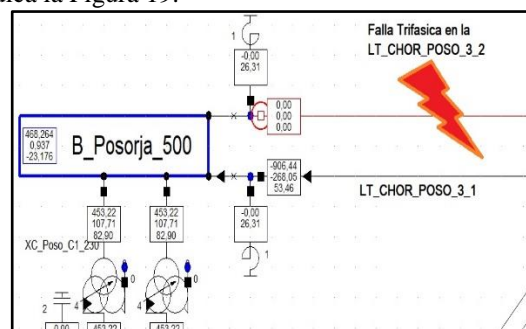


Figura 19 Simulación de una Falla Eléctrica Trifásica.

Durante esta falla eléctrica trifásica, se realiza el estudio de la estabilidad de voltajes, cargabilidad, potencia activa, reactiva y ángulo de rotor de generador. Los resultados de la simulación y graficas de las señales eléctricas se muestra a continuación;

- Niveles de tensión en las barras de 230 kV:

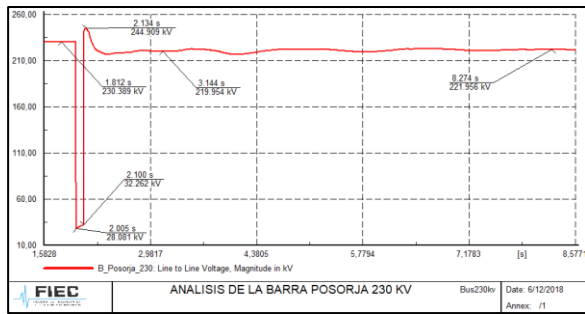


Figura 20 Análisis de la Barra Posorja 230 kV

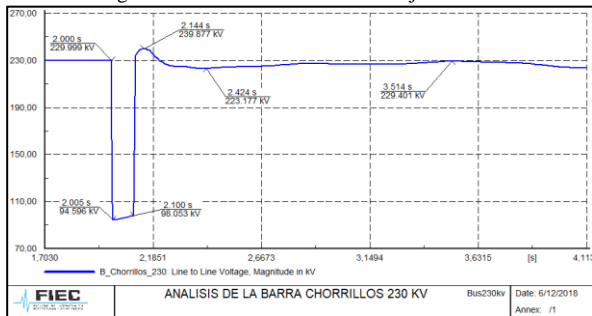


Figura 21 Análisis de la Barra Chorrillos 230 kV

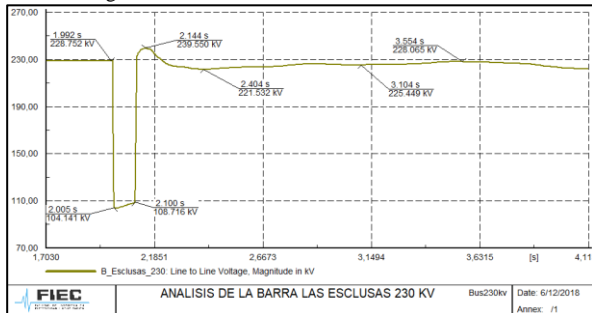


Figura 22 Análisis de la Barra Esclusas 230 kV

Desde la Figura 20 hasta la Figura 22 se muestra el comportamiento de la señal de voltaje en las barras pertenecientes al SNI, al momento del corto circuito los voltajes tienen una tendencia a un valor de cero, pero transcurrido un tiempo de 100 miliegs se abren los interruptores y se recupera la señal de tensión a su valor de operación.

- Niveles de tensión en las barras de 138 kV:

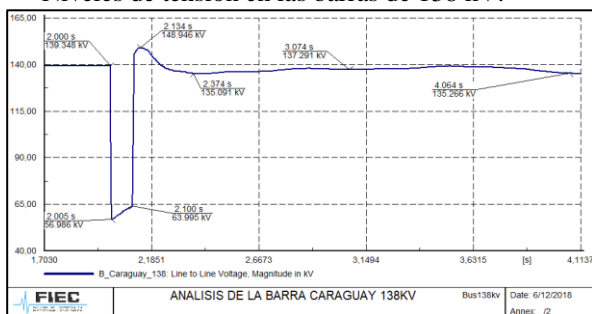


Figura 23 Análisis de la Barra Caraguay 138 kV.

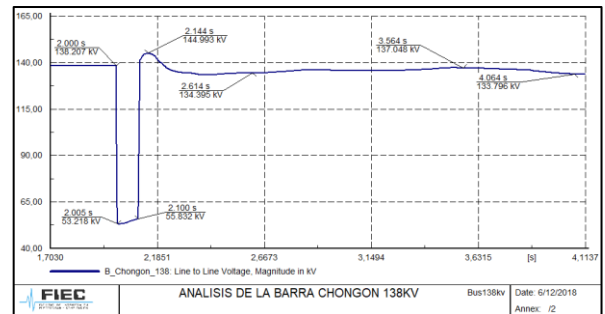


Figura 24 Análisis de la Barra Chongon 138 kV

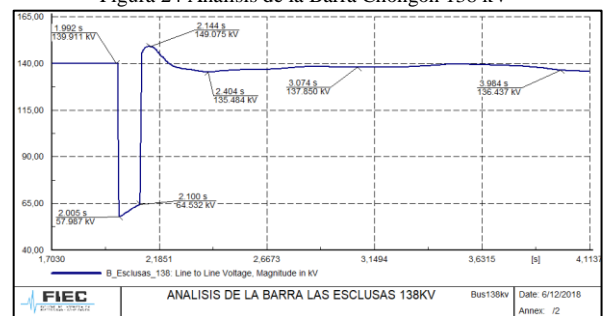


Figura 25 Análisis de la Barra Esclusas 138 kV

Desde la Figura 23 hasta la Figura 25 muestra el comportamiento de la señal de voltaje en las barras pertenecientes al SNI, al momento del corto circuito los voltajes tienen una tendencia a un valor de cero, pero transcurrido un tiempo de 100 miliegs se abren los interruptores y se recupera la señal de tensión a su valor de operación.

Los resultados del comportamiento de la cargabilidad en porcentaje de las líneas de transmisión pertenecientes al SNI, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Posorja.

Obtenemos los siguientes gráficos del porcentaje de cargabilidad en las Líneas de transmisión eléctrica:

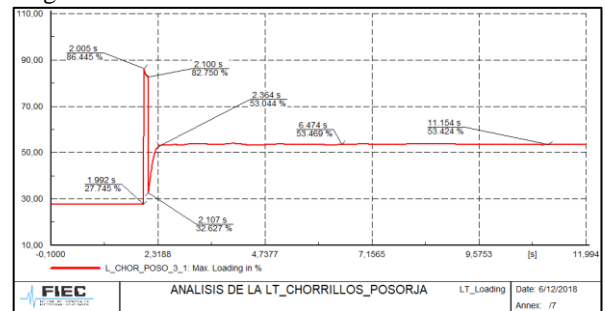


Figura 26 Análisis de la LT_Chorrillos_Posorja.

En la **Figura 26** podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Chorrillos a Posorja se encuentra en 27,74%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito tiene un pico de 86,44%, valor que no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión, luego busca a restaurarse a un nuevo porcentaje que es de 53,4% aproximadamente.

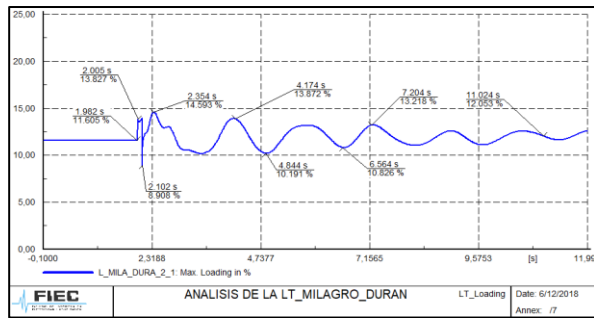


Figura 27 Analisis de la LT_Milagro_Duran.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 27 podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Milagro a Durán se encuentra en 11,60%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito tiene un pico de 13,82%, valor que no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión, luego busca a restaurarse a un nuevo porcentaje que es de 12,05% aproximadamente.

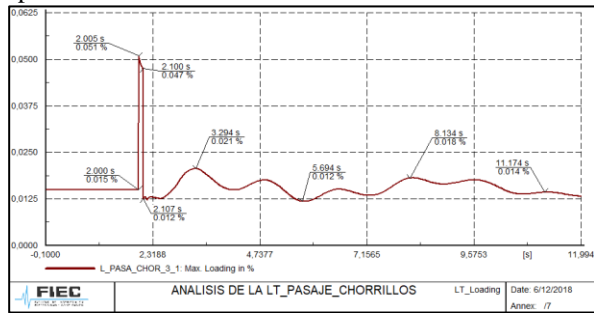


Figura 28 Analisis de la LT_Pasaje_Chorrillos.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 28 podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Pasaje a Chorrillos se encuentra en 0,015%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión.

Los resultados del comportamiento de la potencia activa de los generadores eléctricos; Daule Peripa, HidroPaute y Coca Codo Sinclair que pertenecen al SNI, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Posorja.

Obtenemos los siguientes gráficos de las señales de potencia activa de los generadores eléctricos:

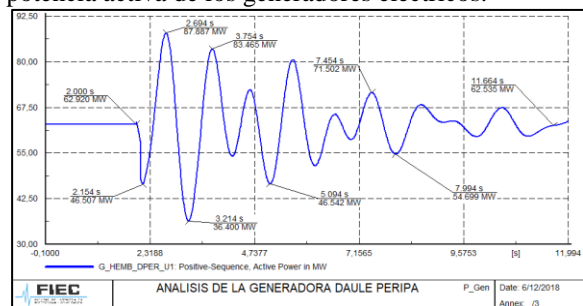


Figura 29 Analisis de la Generadora Daule Peripa.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 29 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de operación normal tiene un valor de 62,92 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 87,88 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma alrededor de casi 8 segundos para tomar un valor de 62,53 MW.

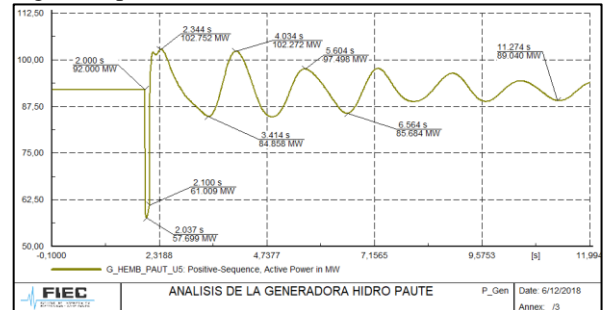


Figura 30 Analisis de la Generadora Hidro Paute.

En la Figura 30 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de operación normal tiene un valor de 92 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 102,75 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma un tiempo de casi 8 segundos para tomar un valor de 89,04 a 92 MW.

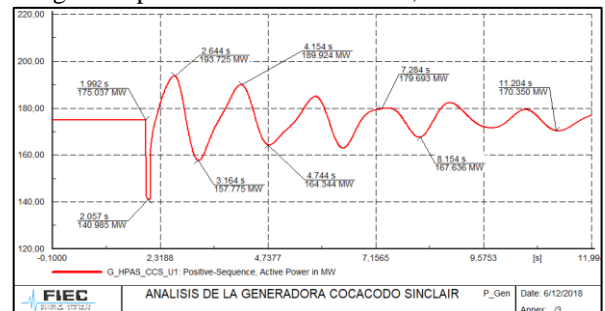


Figura 31 Analisis de la Generadora Coca Codo Sinclair.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 31 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de operación normal tiene un valor de 175 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 193,72 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma alrededor de casi 8 segundos para tomar un valor de 170,35 a 175 MW.

D. Estabilidad del SNI, enlace HVDC entre S/E Pasaje y Posorja

En esta sección se muestran los resultados del estudio de estabilidad y el comportamiento de las señales eléctricas; voltajes en por unidad, cargabilidad de líneas de transmisión y potencia activa de los generadores.

El tipo de falla eléctrica que se va a simular en Powerfactory es de las siguientes características: (i) falla de cortocircuito trifásico, (ii) tiempo de duración de la falla 10 mili- segundos, (iii) tiempo inicial de la falla en 2 segundos y (iv) tiempo de despejar la falla 2,01 milisegundos. La falla se la va a realizar en la interconexión de Tisaleo y Chorrillos ver Figura 32, hemos escogido esta línea de transmisión porque la

consideramos que su aporte de cortocircuito es bien severo al SNI.

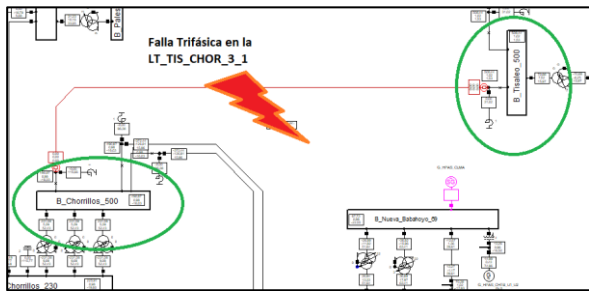


Figura 32 Falla eléctrica trifásica sobre línea de transmisión.

En la Figura 32 se muestra en la parte izquierda un círculo de color verde el cual indica la barra de voltaje a 500 kV de la S/E Chorrillos y a la derecha se muestra encerrada la S/E Tisaleo, de color rojo se representa la falla eléctrica del tipo trifásica sobre la interconexión de Chorrillos con Tisaleo.

Los resultados del comportamiento del voltaje (unidad en kilovoltios) de las barras pertenecientes al SNI, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Tisaleo. Durante esta falla eléctrica trifásica, se realiza el estudio de la estabilidad de voltajes en barras, cargabilidad en líneas de transmisión y potencia activa de generador. Los resultados de la simulación y graficas de las señales eléctricas se muestra a continuación;

- Niveles de tensión en las barras de 230 kV:

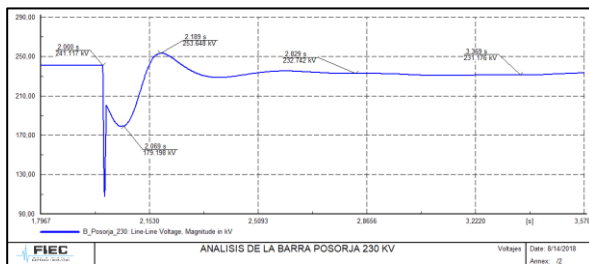


Figura 33 Análisis de la Barra Posorja 230 kV

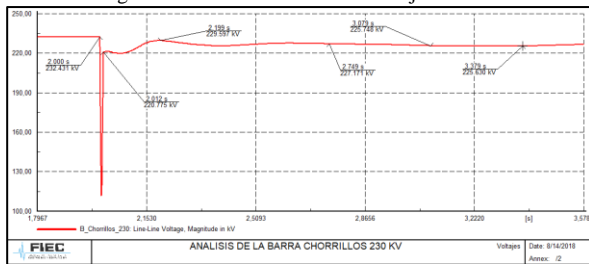


Figura 34 Análisis de la Barra Chorrillos 230 kV

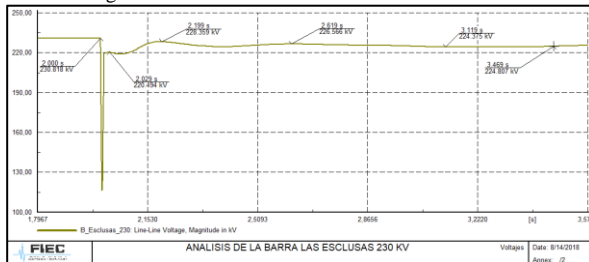


Figura 35 Análisis de la Barra Esclusas 230 kV

Desde la Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**33 hasta la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 35 nos muestra el

comportamiento de la señal de voltaje en las barras pertenecientes al SNI, al momento del corto circuito los voltajes tienen una tendencia a un valor de cero, pero transcurrido un tiempo de 100 milisegundos la señal de voltaje intenta recuperarse a su valor de operación.

Los resultados del comportamiento de la cargabilidad en porcentaje de las líneas de transmisión pertenecientes al SIN, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Tisaleo. Obtenemos los siguientes gráficos del porcentaje de cargabilidad en las Líneas de transmisión eléctrica:

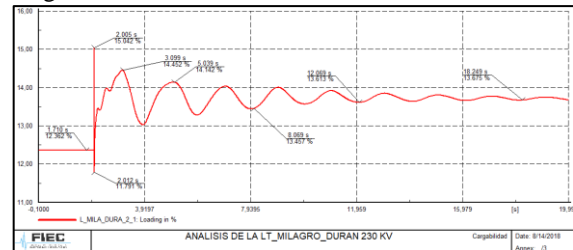


Figura 36 Análisis de la LT_Milagro_Duran

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 36 podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Milagro a Durán se encuentra en 12,36%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito tiene un pico de 15,04%, valor que no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión, luego busca a restaurarse a un nuevo porcentaje que es de 13,67% aproximadamente.

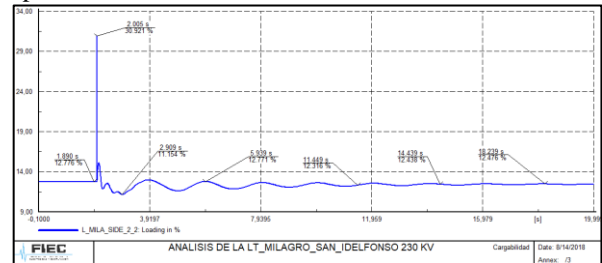


Figura 37 Análisis de LT_San Idelfonso_Milagro

En la Figura 37 podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Milagro a San Idelfonso se encuentra en 12,76%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión.

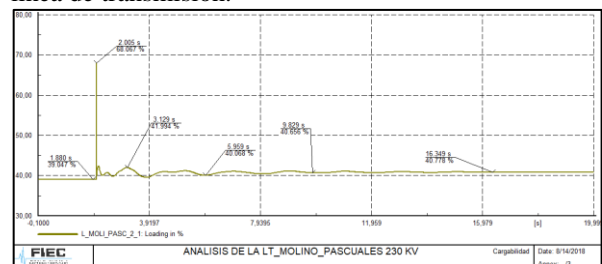


Figura 38 Análisis de LT_Molino_Pascuales.

En la Figura 38 podemos observar que la cargabilidad en estado de operación normal de la línea de transmisión eléctrica que va de Molino a Pascuales

se encuentra en 39,04%; sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito no supera el 100% lo cual indica que no existe una sobrecarga en la línea de transmisión, luego se trata de estabilizar en 40,77%.

Los resultados del comportamiento de la potencia activa y reactiva de los generadores eléctricos; Daule Peripa, HidroPaute, Coca-Codo Sinclair que pertenecen al SNI, simulando una falla eléctrica del tipo trifásico en una línea de transmisión que interconecta la S/E de Chorrillos con Tisaleo. Obtenemos los siguientes gráficos de las señales de potencia activa y reactiva de los generadores eléctricos:

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 39 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de operación normal tiene un valor de 51,07 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 58,74 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma alrededor de casi 13 segundos para tomar un valor de 50,50 MW.

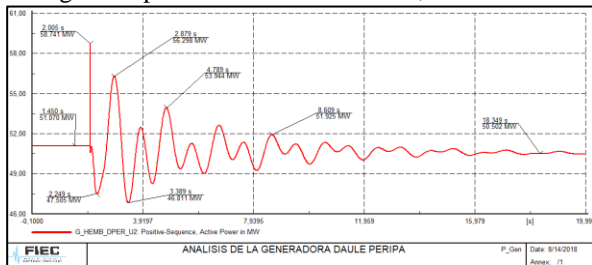


Figura 39 Análisis de la Generadora Daule Peripa.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 40 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de operación normal tiene un valor de 90 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 70,41 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma un tiempo de casi 12 segundos para tomar un valor de 89,86 a 90 MW.

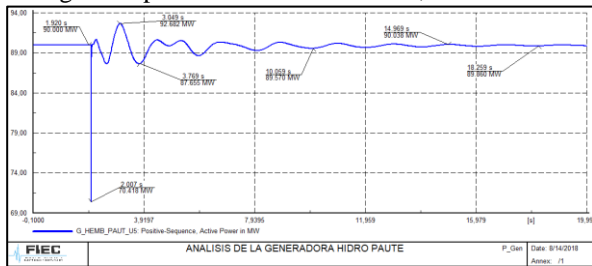


Figura 40 Análisis de la Generadora Hidro Paute

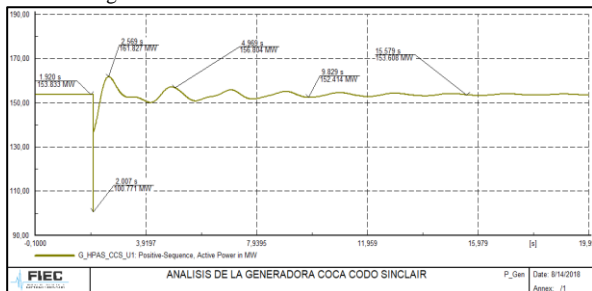


Figura 41 Análisis de la Generadora Coca Codo Sinclair.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 41 podemos observar el comportamiento de la potencia activa en estado de

operación normal tiene un valor de 153 MW, sin embargo, cuando se realiza la simulación de cortocircuito alcanza un valor de 100,77 MW, luego la señal trata de estabilizarse y le toma alrededor de casi 12 segundos para tomar un valor de 153,60 MW.

E. Análisis económico

Esta sección describe un análisis económico entre las dos tecnologías planteadas como solución a nuestro problema de interconexión; los costos de los elementos del sistema principal van a ser desarrollados para cada una de las tecnologías propuestas en cuestión, con la finalidad de dar un resumen completo de los costos totales de las alternativas de interconexión planteadas, permitiendo una comparación informada de las dos tecnologías. Los costos de los componentes de una línea de transmisión de energía eléctrica con tecnología convencional AC predominan y los costos de una subestación eléctrica AC son relativamente pequeños, mientras que para un sistema de transmisión de energía eléctrica con tecnología HVDC los costos de las convertidoras pueden predominar e incluso llegar a compararse con los costos de una línea de transmisión convencional.

Los costos totales de dos subestaciones eléctricas que son requeridas para realizar el enlace con tecnología convencional AC, se indica en la siguiente Tabla 1 un resumen de los costos correspondientes a la subestación eléctrica de Pasaje y en la Tabla 2 un resumen de costos correspondientes a la subestación eléctrica de Chorrillos.

Descripción	AC
Potencia Nominal [MW]	1200
Costo de Subestación [M\$]	80,76
Longitud de la línea [Km]	90
Costo de la línea de transmisión [M\$/Km]	0,31
Costo de la línea de transmisión [M\$]	27,72
Inversión Total [M\$]	108,48

Tabla 3.14: Tabla de Costos S/E Posorja

La línea de transmisión considerada en la Tabla 3.14 corresponde a la interconexión que va desde Chorrillos hasta Posorja con una distancia de 90 kilómetros.

Descripción	AC
Potencia Nominal [MW]	900
Costo de Subestación [M\$]	67,06
Longitud de la línea [Km]	211,00
Costo de la línea de transmisión [M\$/Km]	0,31
Costo de la línea de transmisión [M\$]	64,99
Inversión Total [M\$]	132,05

Tabla 3.15: Tabla de Costos S/E Pasaje

La línea de transmisión considerada en la Tabla 3.15 corresponde a la interconexión que va desde Pasaje hasta Chorrillos con una distancia de 211 kilómetros.

El total de los costos para la construcción de estas dos subestaciones eléctricas incluido las líneas de transmisión en 500 kV son de aproximadamente \$ 240,53 Millones de dólares, cabe recalcar que estos cálculos han sido realizados usando las tablas que

estiman valores de acuerdo a proyectos ya realizados anteriormente.

Los costos totales de la subestación eléctrica y la interconexión requerida para hacer el enlace con tecnología HVDC, se indica en la siguiente Tabla que muestra un resumen de los costos de una estación convertidora y la línea de transmisión HVDC.

Descripción	DC
Potencia Nominal [MW]	900
Costo de Subestación [M\$]	210,1
Longitud de la línea [Km]	90
Costo de la línea de transmisión [M\$/Km]	0,99
Costo de la línea de transmisión [M\$]	89,4
Inversión Total [M\$]	299,5

Tabla 3.16: Costos de inversión para la alternativa DC.

Esta es la tabla 3.16 para la alternativa DC de 500 kV los costos son elevados por las estaciones convertidoras; sin embargo, el peso de la diferencia de precio es irrelevante respecto a los beneficios que otorga este sistema. El total de los costos para la construcción de estas dos subestaciones eléctricas DC incluido las líneas de transmisión es de aproximadamente \$ 300 Millones de dólares, cabe recalcar que estos cálculos han sido realizados usando las tablas que estiman valores de acuerdo a proyectos ya realizados anteriormente, como el Proyecto de interconexión Rómulo citado en la sección 1 esta cotizado en 420 millones de euros; esto quiere decir 492 millones de dólares, es decir que esta opción saldría mucho más costoso puesto que se hablando de distancia casi 3 veces mayor. Por otra parte, si se desea saber con exactitud el precio actual de alguna de las tecnologías expuestas, se tendría que pedir un análisis de costos directamente a las empresas que realiza estos tipos de proyectos.

En resumen, con estos resultados dejamos al lector que pueda apreciar como destaca en viabilidad técnica y económica usar la transmisión HVDC, además se demostró que mejora la estabilidad del voltaje de las barras que se encuentran cercanas al punto de conexión pero también se pueden generar resonancias o pequeñas distorsiones cuando está mal controlado el HVDC, ante estos escenarios de incertidumbre se requiere hacer una nueva investigación que lleve a cabo el estudio del control de cada estación convertidora AC/DC.

IV. DISCUSIÓN Y ALGUNAS OBSERVACIONES FINALES

En esta sección, se realiza la discusión de los resultados obtenidos en este artículo, pues el propósito es interpretar los resultados y describir aquellas experiencias que se obtuvieron durante el proceso de realizar el estudio de estabilidad, la simulación de las alternativas de interconexión eléctrica, el ingreso de parámetros y características técnicas al programa DIgSILENT. Durante el proceso de investigación se logró conocer el principio de operación de un sistema de transmisión eléctrica con tecnología HVDC, pues esta investigación nos llevó a conocer también el elemento principal que hace posible la conversión de la

señal eléctrica de corriente alterna a corriente continua, elemento cuyo nombre es Transistor IGBT, también al efectuarse la correspondiente investigación acerca de los tipos de convertidores AC/DC encontramos que existen dos, el primero de cuya tecnología es usando tiristores mientras que el otro tipo de convertidor es usando IGBT.

Este artículo muestra en la sección Metodología un diagrama de flujo lógico, en donde la base de la información tiene contenido muy importante acerca de cómo se encuentra configurado el sistema nacional interconectado del Ecuador, pues sin esta base de datos muy difícilmente hubiéramos mostrado estos resultados, además cabe recalcar que para realizar la investigación tuvo que tener como base proyectos referentes ya en operación como se indicaba en la sección de Introducción, previo a obtener una base de datos se recomienda al lector realizar un listado de los datos, en donde cada uno de ellos posee características, parámetros técnicos, número de elementos, servicios y configuraciones que serán necesarias para luego ingresarlos al programa de simulación DIgSILENT, es muy relevante indicar al lector que se recomienda tener un sólido conocimiento del uso de este programa, pues es una apreciación que consideramos aunque no es una variable de dato pero si es una recomendación previo a realizarlo.

Realizar una investigación respectiva al tema de conversión de la energía eléctrica en corriente alterna a corriente continua, para así poder tener los conocimientos del tipo y características técnicas del convertidor que usamos en este artículo. Una de las limitaciones que tuvo esta investigación fue tratar de hallar un proyecto que se encuentre con las mismas características de operación al de nuestro trabajo, es por esto por lo que; los proyectos que se muestran en la Sección 1 fueron elegidos como resultados de la investigación, en donde cumplen con similares características de diseño de transmisión HVDC-VSC y distancias de recorrido eléctrico submarino al de este proyecto, en este trabajo se realizó la configuración Monopolar, sin embargo, se sugiere que también se realice la propuesta de emplear un sistema de transmisión eléctrica HVDC-VSC con configuración Bipolar, para así poder observar que datos de salida se pueden obtener luego de una simulación, se recomienda usar esta misma herramienta computacional Powerfactory con la finalidad de comparar resultados con la configuración Monopolar.

La finalidad de este artículo fue obtener el estudio de estabilidad y el comportamiento del Sistema Nacional Interconectado cuando se emplean dos diferentes tipos de tecnologías de transmisión eléctrica de las cuales hemos mencionado en los secciones anteriores, simular líneas de transmisión eléctrica mediante el programa Powerfactory DIgSILENT ha permitido estudiar la estabilidad del SNI ante las principales fallas eléctricas que podrían afectar al sistema eléctrico, este artículo se lo puede categorizar en cuatro etapas; una etapa de introducción al problema

de interconexión y a la teoría HVDC junto sus componentes, una etapa acerca de la metodología que es donde se indica como fue el ingreso de estos datos y parámetros técnicos al programa de simulación Powerfactory previo a su simulación y finalmente una etapa donde se analizan los resultados obtenidos de la simulación, y de ambos enlaces de transmisión de energía eléctrica.

Al incorporar un enlace HVDC, realizar flujos de potencia y el análisis de la estabilidad transitoria y dinámica simulando las peores fallas eléctricas que se describen en la sección de Resultados, se pudo mostrar el comportamiento de las señales eléctricas del SNI, el sistema HVDC muestra un comportamiento aceptable, con los resultados obtenidos podemos destacar que aporta en la rápida recuperación de las señales eléctricas a sus valores de operación nominal o nuevo valor de operación ante fallas eléctricas del tipo trifásica, siendo considerada que una falla trifásica es la peor falla que pueda someterse un sistema eléctrico de potencia.

La literatura teórica general sobre la modelización de los elementos de una línea HVDC no es concluyente en varias cuestiones vitales dentro del discurso de la estabilidad, nuestro artículo demuestra lo siguiente.

Debido a que para el año 2023 se va a incorporar una nueva carga de consumo eléctrico con una potencia de 900 MW denominada carga Siderúrgica en Posorja, lo cual obliga a buscar una solución de tal manera que se pueda transmitir esta potencia eléctrica requerida hasta Posorja, la dificultad y motivo de realizar este proyecto se presenta cuando tenemos que definir la trayectoria óptima de la línea de transmisión, debido a la ubicación geográfica de dichas subestaciones se usó el sistema de transmisión eléctrica HVDC con un recorrido submarino de 100 km.

Para la transmisión HVDC el circuito se tenderá con 2 cables del tipo Masa Impregnada cable submarino la línea de transmisión DC que interconecta Pasaje y Posorja, tiene una extensión aproximada de 90 a 100 kilómetros, con configuración Monopolar. Para la transmisión HVAC el circuito se tenderá con un haz de 4 cables ACAR 750 MCM por fase en esta etapa de construcción de la línea, la línea de transmisión AC que interconecta Chorrillos y Pasaje. Este primer tramo de la interconexión tiene una extensión aproximada de 211 kilómetros, con estructuras metálicas de doble terna.

Mejorar los perfiles en por unidad del voltaje de las subestaciones eléctricas que se encuentran alrededor del enlace HVDC, así como también la capacidad de transmitir potencia activa del sistema, manteniendo constante e independiente de la distancia, también tiene la posibilidad de realizar una interconexión entre dos redes eléctricas en AC que se encuentran operando en distinto valor de frecuencia eléctrica. Al usar una línea de transmisión HVDC no tenemos problemas en la transferencia de potencia entre dos nodos en una red AC.

Existen muchos proyectos que ya se encuentran en operación normal, pero hemos escogido dos que usan

tecnología HVDC; son el proyecto Rómulo (España, 2012) y NorNed (Worzyk & Skog, 2007), los cuales nos servirán para tener una referencia a nuestro proyecto que vamos a realizar con tecnología HVDC.

Las limitaciones y recomendaciones para próximas investigaciones y proyectos a realizar usando tecnología HVDC, el uso de la herramienta computacional como Powerfactory DIGSILENT ha sido de una gran ayuda y brinda también una opción de verificar las simulaciones y no existan errores de simulación. Esta base de datos que se le ha implementado un sistema de transmisión eléctrica DC, servirá como un referente guía para próximos proyectos o realizarlos en otra plataforma de simulación, es importante mencionar que estos resultados no pueden ser tomados como definitivos puesto que es recomendable realizar una comparación de estos con otros programas de análisis de estabilidad y contingencias, para poder comparar el comportamiento de la señal de voltaje en por unidad, la cargabilidad de las líneas de transmisión eléctricas, las potencias activa, reactiva y ángulo de rotor de los generadores eléctricos pertenecientes al SNI.

En resumen, al principio de este trabajo fue necesario adquirir la información del sistema eléctrico de potencia, esta información fue facilitada por Transelectric, así como también la base de datos para importarla en Powerfactory, la debilidad de esta base de datos fue la versión del software, pues para solucionarla se tuvo que obtener una base de datos para la versión del simulador que teníamos disponible. Finalmente, este trabajo ha podido demostrar que realizar una transmisión de energía eléctrica usando tecnología HVDC-VSC con configuración Monopolar es factible para un SEP, pues la teoría afirma que se mejoran los niveles de voltaje en por unidad de las redes eléctricas que se encuentran alrededor del enlace de transmisión DC, y lo confirmamos mediante el programa Powerfactory DIGSILENT corriendo flujos de potencia eléctrica, y observando como las subestaciones vecinas a los dos puntos de interconexión de Pasaje y Posorja, se mejoraban esto lo vimos en la Sección Resultados, nuestro trabajo selecciona como mejor alternativa el tipo de transmisión eléctrica la que tenga la mejor viabilidad técnica y que contribuya a mejorar el SNI sin tomar en cuenta el costo que implica adquirir esta tecnología, en este caso nuestra selección será por escoger la transmisión eléctrica HVDC, destacamos también que este estudio ha sido realizado con la ayuda del programa Powerfactory DIGSILENT que es una herramienta interesante en cuanto al análisis de señales eléctricas y otras operaciones.

AGRADECIMIENTOS

Queremos reconocer la ayuda recibida por la Unidad de Negocios CELEC EP Transelectric, quienes nos permitieron usar sus conjuntos de datos. Esto fue único e invaluable en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. G. Johansson, "Tecnología HVDC". Características y Beneficios, p.4, 2013.

- [2] J. Plazarte y L. Pesantez, “Transmisión de energía con esquema HVDC”, Quito, 2015.
- [3] R.E.D España, “Red Eléctrica de España”, Agosto 2012.[En línea]. Disponible en: <http://www.ree.es/es/actividades/proyectos-singulares>
- [4] T. Worzyk and J.E Skog, “The NorNed HVDC Link Cable Design and Performance”, Jicable, página 1,2007
- [5] R.E.D. España, “Operación de sistemas HVDC. Particularidades”, Red Eléctrica de España, página 36,2012.
- [6] CONELEC, “Plan Maestro de Electrificación 2013-2022”, en Perspectiva y Expansión del sistema eléctrico ecuatoriano, Quito, CELEC EP, 2013.
- [7] W. R. Aguirre Zambrano y L.A Escobar Quishpe, “Estudio de las ventajas y desventajas de usar HVDC sobre sistemas de generación eólica”, Quito, 2013.
- [8] N. Noticias, “Evalúan construcción de línea eléctrica submarina para abastecer de energía renovable a BCS”, 2016. [En Línea]. Disponible: <http://www.bcsnoticias.mx>.