

PROYECTO DE GRADO

Presentado a

**LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

Para obtener el título de

INGENIERO ELÉCTRICO

por

Carlos Santiago Osorio Arias

*Evaluación de Confiabilidad N-1 para una red MTDC: Caso propuesto
MTDC Colombia con interconexión a Venezuela y Panamá*

Sustentado el 16 de diciembre del 2020 frente al jurado:

Composición del jurado

Asesor: Mario Alberto Ríos Mesías, PhD, Profesor Titular, Universidad de Los Andes

Jurados: Paulo Manuel De Oliveira De Jesús, PhD, Profesor Asociado, Universidad de Los Andes

RESUMEN

El presente proyecto de grado presenta un análisis de confiabilidad que evalúa la factibilidad de una red MTDC de 500 kV utilizando sistemas de energía basados en estaciones convertidoras de fuentes de tensión (VSC) para una interconexión entre Colombia, Venezuela y Panamá. Por medio del software NEPLAN se realizó simulaciones entre los nodos de Colectora II, Hidrosogamoso, la Tasajera y Quimbo en Colombia, una interconexión entre Colombia con Panamá entre el nodo de la Tasajera con llano Sánchez y Colombia con Venezuela entre el nodo de Cuatricentenario con Hidrosogamoso. Se evaluará el uso de estaciones de conversión VSC bipolares y VSC monopolar simétrica en el sistema de interconexión nacional.

Contenido

RESUMEN	2
LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	4
1 INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVOS GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
2 MARCO TEORICO.....	7
REDES MTDC.....	7
EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC	8
3 CASO DE ESTUDIO.....	9
4 EVALUACION DE DESEMPEÑO DE LA MTDC	13
ESTACION VSC MONOPOLAR.....	17
5 CONCLUSIONES	22
6 AGRADECIMIENTOS	23
7 REFERENCIAS	24
8 ANEXOS.....	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama Unifilar con estación VSC bipolar	6
Figura 2 Diagrama Unifilar con estación VSC monopolar simétrica.....	6
Figura 3 Modelo de red MTDC NEPLAN	10
Figura 4 DNS VSC bipolar caso base	14
Figura 5 DNS VSC bipolar caso 2.....	15
Figura 6 DNS VSC bipolar caso 3.....	15
Figura 7 LOLP VSC bipolar caso base	16
Figura 8 LOLP VSC bipolar caso 2.....	17
Figura 9 LOLP VSC bipolar caso 3.....	17
Figura 10 DNS VSC monopolar caso base	19
Figura 11 DNS VSC monopolar caso 2	19
Figura 12 DNS VSC monopolar caso 3	20
Figura 13 LOLP VSC monopolar caso base	21
Figura 14 LOLP VSC monopolar caso 2.....	21
Figura 15 LOLP VSC monopolar caso 3.....	22

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Distancias y resistencia de las líneas	9
Tabla 2 Enumeración de estados VSC bipolar	11
Tabla 3 Datos de confiabilidad de los sistemas VSC y las líneas	11
Tabla 4 FOR y 1-FOR de las líneas y estaciones VSC	12
Tabla 5 Potencias y tensiones red MTDC caso base	12
Tabla 6 Potencias y tensiones red MTDC caso 2	12
Tabla 7 Potencias y tensiones red MTDC caso 3	13
Tabla 8 DNS para una estación VSC bipolar por nodo.....	13
Tabla 9 ENS para una estación VSC bipolar por nodo	14
Tabla 10 LOLP para una estación VSC bipolar por nodo.....	16
Tabla 11 LOLE para una estación VSC bipolar por nodo.....	16
Tabla 12 Enumeración de estados VSC monopolar	18
Tabla 13 DNS para una estación VSC monopolar por nodo.....	18
Tabla 14 ENS para una estación VSC monopolar por nodo	19
Tabla 15 LOLP para una estación VSC monopolar por nodo.....	20
Tabla 16 LOLE para una estación VSC monopolar por nodo.....	20
Tabla 17 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso base.....	25
Tabla 18 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso 2.....	25
Tabla 19 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso 3.....	26
Tabla 20 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso base.....	26
Tabla 21 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso 2.....	27
Tabla 22 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso 3.....	27

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día se ha dedicado mucho en la elaboración y diseño para el transporte eficiente de energía eléctrica a largas distancias, debido al crecimiento de la demanda eléctrica. En Colombia a causa de que las fuentes de energía no se encuentran cerca de los consumidores se buscan nuevas tecnologías capaces de transportar en alta tensión con menor pérdidas. Por ende, se ha incurrido en la transmisión en DC en alta tensión, ya que, en comparación con la transmisión en AC la DC es más eficiente en largas distancias. Esto ha generado nuevos retos y a la planeación del uso de redes multiterminal MTDC con estaciones VSC bipolares.

Se utilizan principalmente estaciones VSC debido a que ofrecen más flexibilidad para controlar el flujo de potencia y las perturbaciones en el sistema, para seleccionar flexiblemente el modo de control [1]. Existen dos configuraciones de estaciones VSC la bipolar y monopolar, donde la bipolar tiene una mayor capacidad de potencia y este compuesto por dos sistemas monopolares. Además, al estar compuestas las estaciones VSC bipolares de dos estaciones monopolares se minimiza el riesgo de interrupción del sistema. Para este proyecto se utilizó como caso base las estaciones VSC bipolares.

La red MTDC que se analiza consta de seis nodos, donde 2 son de generación (Colectora II y Cuatricentenario), otros 3 nodos son de carga (Hidrosogamoso, la Tasajera y Quimbo) y uno de los nodos puede ser de carga o de generación (LL. Sánchez). Cada uno de los nodos esta interconectado por estaciones VSC bipolares de 500 kV que cuentan con dos polos. Para esto se cuenta con los datos las distancias de las líneas y potencia entregada en cada nodo de acuerdo con [3]. Se realizó la simulación entre los nodos de Colectora II, Hidrosogamoso, la Tasajera y Quimbo en Colombia, una interconexión entre Colombia con Panamá entre el nodo de la Tasajera con llano Sánchez y Colombia con Venezuela entre el nodo de Cuatricentenario con Hidrosogamoso. Por medio del software NEPLAN se modelo el sistema para observar los flujos de carga en condiciones normales de operación y en otros escenarios.

Para el análisis de confiabilidad se realizó un estudio que implica contingencias N-1, en el cual consiste en poner en falla las estaciones VSC de cada nodo, al igual que las líneas de transmisión en cada uno de los estados.

A continuación, se presentan los diagramas unifilares con las estaciones VSC bipolares y monopolar simétrica:

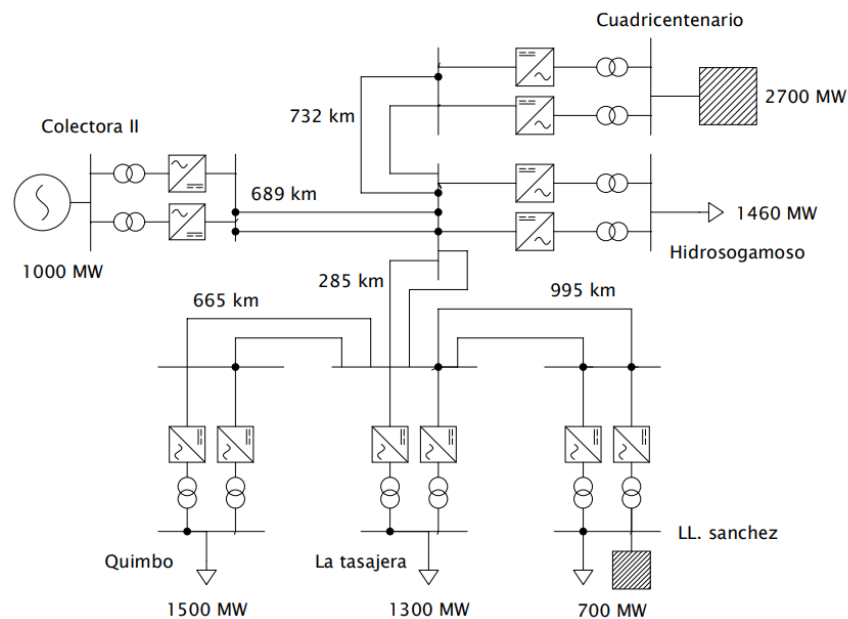


Figura 1 Diagrama Unifilar con estación VSC bipolar

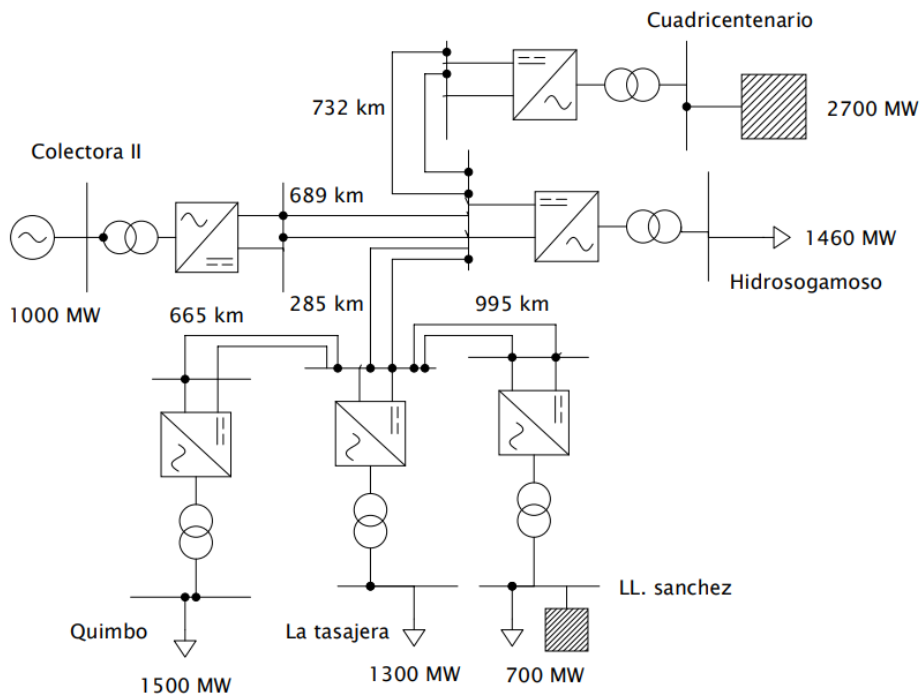


Figura 2 Diagrama Unifilar con estación VSC monopolar simétrica

Por estas razones, este proyecto pretende evaluar la confiabilidad de redes MTDC en dos configuraciones diferentes con una estación VSC bipolar y monopolar simétrica, para analizar cuál de las dos es más viable en la red colombiana. Donde, los objetivos generales y específicos del proyecto son:

OBJETIVOS GENERAL

Se tiene como objetivo general evaluar y comparar la confiabilidad de una red MTDC de 500kV usando las configuraciones de estaciones VSC bipolar y monopolar simétrica entre una interconexión de Colombia, Panamá y Venezuela.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar los estudios pertinentes para comparar cada una de las alternativas y facilitar su comprensión.
- Comparar las dos alternativas de estaciones VSC de configuración monopolar simétrica y bipolar en términos de confiabilidad.
- Realizar un análisis de confiabilidad por enumeración de estados considerando solo contingencias N-1.
- Realizar un análisis de un escenario de interconexión de Colombia con Panamá y Venezuela.
- Elaborar un artículo de difusión del trabajo de los resultados obtenidos.

2 MARCO TEORICO

El marco teórico consiste en una descripción teórica sobre la red multiterminal en corriente continua (MTDC) con convertidores de voltaje (VSC), y sobre la evaluación de confiabilidad en una red MTDC.

REDES MTDC

La corriente continua de alta tensión (HVDC) corresponde a una tecnología que ha sido utilizadas durante los últimos 50 años para aplicaciones específicas de larga distancia y submarinas, así como para acoplar sistemas asincrónicos mientras se evita la propagación de grandes perturbaciones. No obstante, nuevas tecnologías basadas en convertidores de fuente de voltaje proporcionarán importantes ventajas para los próximos años [2]. Las HVDC cuentan con dos tipos de tecnologías los LCC basadas en tiristores y los VSC en IGBT's, para el caso de estudio se utilizaron los sistemas VSC.

Las estaciones VSC cuentan con dos tipos de configuraciones que se analizaron en el caso de estudio: la bipolar y la monopolar simétrica. Donde, la monopolar simétrica cuenta con dos polos con tensión positiva y negativa en una misma estación VSC. Mientras que la bipolar cuenta con dos estaciones VSC y cada una se encarga de un polo, por ende, en caso de falla la línea puede operar con un solo polo.

La red multiterminal en corriente continua (MTDC) consiste en un sistema compuesto por más de dos terminales DC sin malla en las líneas de transmisión asociadas, y la MTDC enmallada denota un sistema de transmisión DC de más de dos terminales con al menos una ruta DC en malla [5]. Donde existen dos tipos de configuración para las MTDC, que son en serie y en paralelo. En el sistema MTDC con estructura en serie, el control de flujo de potencia bidireccional se puede ejecutar fácilmente con la tecnología VSC-HVDC. Mientras

que en la estructura paralela que usa estaciones VSC-HVDC la inversión del flujo de energía se puede lograr fácilmente mediante el control de corriente [2].

Durante una falla en una estación VSC de un sistema MTDC con la estructura paralela, la estación VSC dañada puede ser apagada por el sistema de control. Simultáneamente, las otras estaciones VSC en el sistema MTDC pueden mantenerse en el estado operativo aprovechando la capacidad de sobrecarga de la estación VSC y de la línea de transmisión. Por el contrario, con la estructura en serie, una falla en una estación VSC conduce a una interrupción en todo el sistema MTDC [2].

Un sistema MTDC podría ser una solución para el creciente incremento de la comercialización de energía dentro de las redes eléctricas que cada día requiere más capacidad de transmisión, en numerosos casos a largas distancias.

EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC

Para realizar la evaluación de confiabilidad del proyecto, se modelan dos estados para los polos de las líneas y de las estaciones VSC el cual define si el componente funciona o no funciona y está ligado con una tasa de salida y una tasa de reparación. Con esto se calcula el FOR (Forced Outage Rate) el cual nos indica la probabilidad de salida forzada de cada uno de los componentes del sistema, por medio de la siguiente ecuación:

$$FOR = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

Donde,

λ es la tasa de salida

μ es la tasa de reparación

La tasa de salida de las líneas de transmisión tiene un valor por cada 100 km de línea, por ende, se debe calcular los valores de las líneas con las distancias del sistema. Con el FOR y 1-FOR se calcula la probabilidad de estado de los elementos en falla, y con esta probabilidad de se pueden obtener los índices de confiabilidad del sistema, tales como el de demanda no suministrada (DNS), energía no suministrada (ENS) y en pérdida de carga.

$$ENS = DNS * 8760 [MWh/años]$$

Para el caso de pérdida de carga se utilizó la probabilidad de cada uno de los estados para calcular y analizar en cuales no se supe la carga por completo y con esto hallar la probabilidad total de pérdida de la carga del sistema descrito en [4], así el LOLP está definido por la siguiente expresión:

$$LOLP = \sum_{i=1}^M P_i$$

Con el LOLP podemos estimar el tiempo de pérdida total de carga en el sistema en un espacio de tiempo definido, este se le conoce como LOLE el cual corresponde a la pérdida de carga esperada en el sistema y se especifica en la siguiente ecuación:

$$LOLE = LOLP * 365 \text{ [días al año]}$$

3 CASO DE ESTUDIO

A partir de los trabajos pasados realizados por Fredi Acero [3], Carlos Junco [4] y Guillermo Mendoza [5] se planteó una red MTDC de 500 kV en Colombia interconectada con Venezuela y Panamá. Se adquirieron los datos de las líneas de transmisión y de la potencia entregada de cada uno de los nodos de la red MTDC descritos en el artículo [3]. Los cuales se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 1 Distancias y resistencia de las líneas

Desde	Hasta	Distancia	Resistencia	Conductores	
		km	Ω	Referencia	n
COLECTORA II	HIDROSOGAMOSO	689	5,51	Thrasher	3
HIDROSOGAMOSO	LA TASAJERA	285	2,28	Thrasher	3
CUADRICENTENARIO	HIDROSOGAMOSO	732	5,85	Thrasher	3
LA TASAJERA	QUIMBO	665	5,32	Thrasher	3
LL. SANCHEZ	LA TASAJERA	995	7,96	Thrasher	3

Se asumió todas las líneas de la red MTDC del mismo calibre de conductor (Thrasher con 3 sub-conductores) y una vez con los datos se procedió a realizar el modelamiento de la red a través del software NEPLAN para el caso base, el cual consiste en el uso de estaciones VSC bipolares. A continuación, se presenta el modelo realizado:

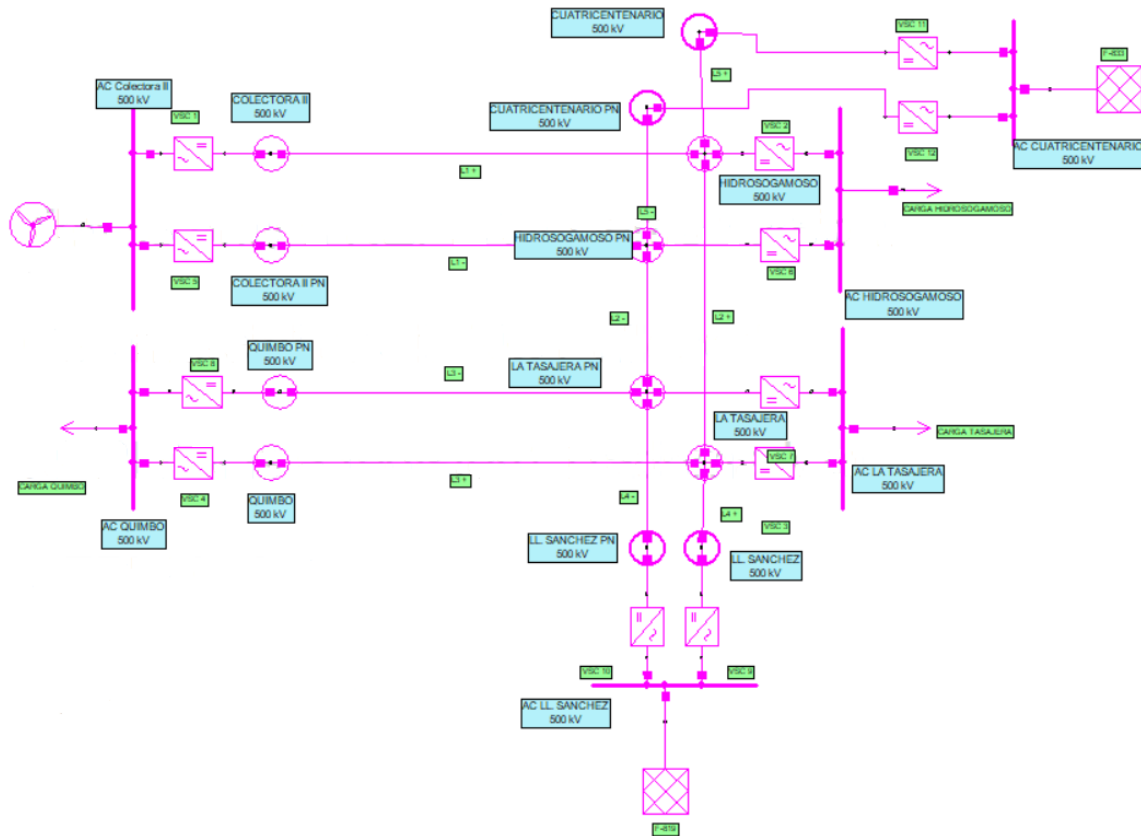


Figura 3 Modelo de red MTDC NEPLAN

Para evaluar la confiabilidad se realizó un análisis de contingencias N-1 el cual se coloca en falla las estaciones VSC de cada nodo y las líneas de transmisión. Se realizó una enumeración de estado y se vincula la probabilidad de falla de cada uno de los estados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2 Enumeración de estados VSC bipolar

Estado	Elemento en falla	Probabilidad del Estado
1	Condiciones normales de operación	92,313%
2	Línea polo positivo Colectora II- Hidrosogamoso	0,697%
3	Línea polo positivo Hidrosogamoso- La Tasajera	0,288%
4	Línea polo positivo La Tasajera- Quimbo	0,673%
5	Línea polo positivo La Tasajera- LL. Sánchez	1,007%
6	Línea polo positivo Hidrosogamoso- Cuatricentenario	0,741%
7	Línea polo negativo colectora II- Hidrosogamoso	0,697%
8	Línea polo negativo Hidrosogamoso- La Tasajera	0,288%
9	Línea polo negativo La Tasajera- Quimbo	0,673%
10	Línea polo negativo La Tasajera- LL. Sánchez	1,007%
11	Línea polo negativo Hidrosogamoso- Cuatricentenario	0,741%
12	VSC polo positivo Colectora II	0,050%
13	VSC polo positivo La Tasajera	0,050%
14	VSC polo positivo Quimbo	0,050%
15	VSC polo positivo LL. Sánchez	0,050%
16	VSC polo positivo Hidrosogamoso	0,050%
17	VSC polo positivo Cuatricentenario	0,050%
18	VSC polo negativo Colectora II	0,050%
19	VSC polo negativo La Tasajera	0,050%
20	VSC polo negativo Quimbo	0,050%
21	VSC polo negativo LL. Sánchez	0,050%
22	VSC polo negativo Hidrosogamoso	0,050%
23	VSC polo negativo Cuatricentenario	0,050%

Con el objetivo de evaluar la confiabilidad del sistema se analizó únicamente contingencias N-1 y se realizó enumeración de estados para cada uno de los estados que compone la red MTDC. Para encontrar las probabilidades de cada uno de los estados de los elementos en falla se utilizó los datos de tasa de salida y de reparación, se usó como referencia los datos descritos en la CIGRE [6]. Los cuales se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 3 Datos de confiabilidad de los sistemas VSC y las líneas

Datos de confiabilidad	VSC	líneas
λ	0,082 fallas/año	0,4 fallas/100km/año
μ	151,05 Rep./año	365 Rep./año

Se definió un valor diferente en la tasa de salida de las líneas, esto debido a que las líneas DC tienen un riesgo de que por una descarga eléctrica ocurra flameo inverso por los aisladores en uno de los polos según la CIGRE [6]. Con las tasas de salida y de recuperación se calculó el FOR y 1-FOR para las estaciones VSC y todas las líneas de la red MTDC. Los valores se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4 FOR y 1-FOR de las líneas y estaciones VSC

Elementos	FOR	1-FOR
VSC	0,000542572	0,99945743
línea colectora II- Hidrosogamoso	0,007494099	0,9925059
línea Hidrosogamoso-La tasajera	0,003113563	0,99688644
línea Hidrosogamoso-Cuatricentenario	0,007958079	0,99204192
línea La tasajera -Quimbo	0,007234945	0,99276505
línea La tasajera -LL. Sánchez	0,010786492	0,98921351

Con las probabilidades de estado y los datos de confiabilidad de los elementos, se procede a calcular los índices de confiabilidad del sistema que son el DNS (Demanda no suministrada), ENS (Energía no suministrada), LOLP (Probabilidad de pérdida de carga) y LOLE (pérdida de carga esperada).

Se definió el caso base con los siguientes valores de potencia entregada y consumida y las tensiones en los nodos de la red MTDC, donde se observa el tipo si es de generación o de carga. Los cuales se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 5 Potencias y tensiones red MTDC caso base

NODOS	TIPO DE NODO	Potencia total (MW)	Tensión (kV)
COLECTORA II	GENERACIÓN	1000	500
HIDROSOGAMOSO	CARGA	1460	500
LA TASAJERA	CARGA	1300	500
QUIMBO	CARGA	1500	500
LL. SANCHEZ	GENERACIÓN	700	500
CUADRICENTENARIO	GENERACIÓN	2700	500

Como se muestra en la Tabla 5, el caso base de la red MTDC está conformado por 3 nodos de generación y 3 de carga. En vista de que Colectora II corresponde a un parque eólico se creó el caso 2, esto con el fin de analizar el comportamiento de la red cuando Colectora II se encuentra generando media de su capacidad máxima. Como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 6 Potencias y tensiones red MTDC caso 2

NODOS	TIPO DE NODO	Potencia total (MW)	Tensión (kV)
COLECTORA II	GENERACIÓN	500	500
HIDROSOGAMOSO	CARGA	960	500
LA TASAJERA	CARGA	1300	500
QUIMBO	CARGA	1500	500
LL. SANCHEZ	GENERACIÓN	700	500
CUADRICENTENARIO	GENERACIÓN	2700	500

Como se aprecia en la Tabla 6, la generación en Colectora II es la mitad de la potencia generada en el caso base como se muestra en la Tabla 5. A causa de que hubo una

disminución en la potencia generada en la red MTDC se empleó una política de deslastre en el nodo más cercano a Colectora II el cual es Hidrosogamoso, esto con el fin de mantener los valores de los voltajes en rangos normales (95% y 105%) y cumplir los criterios de operación.

Se creó un caso en el cual el nodo de LL. Sánchez (Panamá) ya no sería un nodo de generación sino ahora uno que consume carga, esto solo cuando Colectora II se encuentre en su demanda pico. Como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 7 Potencias y tensiones red MTDC caso 3

NODOS	TIPO DE NODO	Potencia total (MW)	Tensión (kV)
COLECTORA II	GENERACIÓN	1000	500
HIDROSOGAMOSO	CARGA	980	500
LA TASAJERA	CARGA	820	500
QUIMBO	CARGA	1020	500
LL. SANCHEZ	CARGA	700	500
CUADRICENTENARIO	GENERACIÓN	2700	500

Como se muestra en la Tabla 7, se cambió el tipo de nodo en LL. Sánchez de generación a carga y se empleó una política de deslastre en donde se redujo la potencia entregada en Hidrosogamoso, La tasajera y Quimbo. Con el fin de mantener los valores de los voltajes en rangos normales (95% y 105%) y cumplir los criterios de operación.

4 EVALUACION DE DESEMPEÑO DE LA MTDC

En este estudio se utilizó el software NEPLAN con el cual se realizaron los análisis de contingencia N-1 para los diferentes casos de carga y para las diferentes estaciones VSC. Con los valores de probabilidad de estado presentados en la Tabla 2 y los datos de confiabilidad mostrados en la Tabla 3 y las ecuaciones descritas en EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC se calculó el DNS Y ENS, como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 8 DNS para una estación VSC bipolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	E(DNS) MW	E(DNS) MW	E(DNS) MW
Hidrosogamoso	15,038	9,672	12,557
La Tasajera	18,612	21,205	7,677
El Quimbo	21,983	24,576	15,216
Llano Sánchez	0,000	0,000	14,950
Total	55,633	55,454	50,400

Tabla 9 ENS para una estación VSC bipolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	ENS (MWh/año)	ENS (MWh/año)	ENS (MWh/año)
Hidrosogamoso	131736	84728	109999
La Tasajera	163040	185757	67252
El Quimbo	192571	215288	133292
Llano Sánchez	0	0	130959
Total	487348	485774	441501

Se puede observar de la Tabla 8 y Tabla 9 los resultados de DNS y ENS respectivamente para cada nodo y el total del sistema, en cada uno de los casos propuestos. Donde se obtuvieron resultados menores en los casos 2 y 3 en comparación con el caso base, esto se debe porque no se refleja la potencia que se dejó de suministrar en los nodos para cumplir los criterios de operación.

Se realizó un análisis de sensibilidad para obtener una mayor perspectiva de la confiabilidad del sistema, por ende, se realizó un estudio variando la tasa de salida de las líneas (λ) desde 0,4 a 3 fallas /100 km / año. A continuación, se presentan las gráficas de DNS vs Tasa de salida del total de las líneas HVDC en los 3 casos:

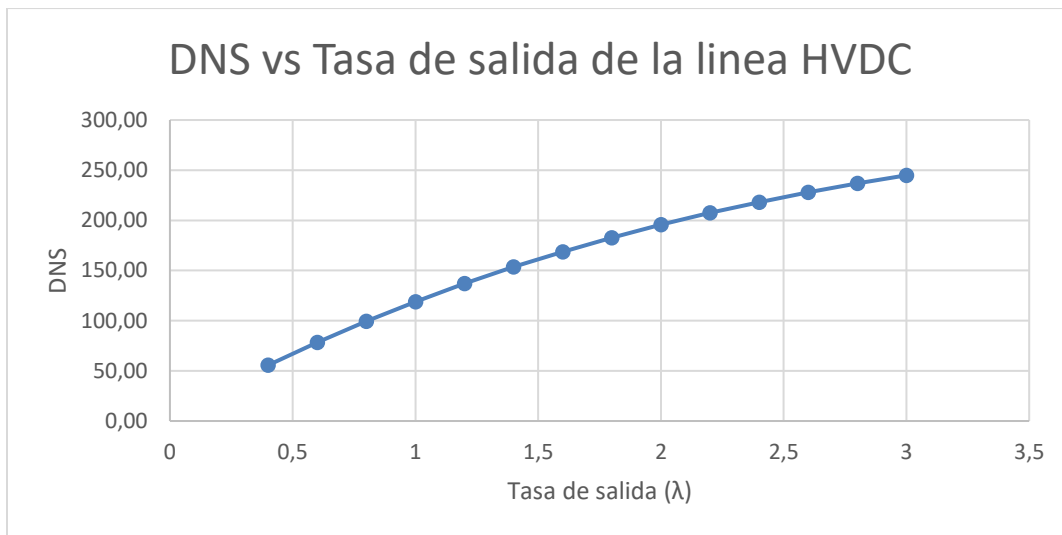


Figura 4 DNS VSC bipolar caso base

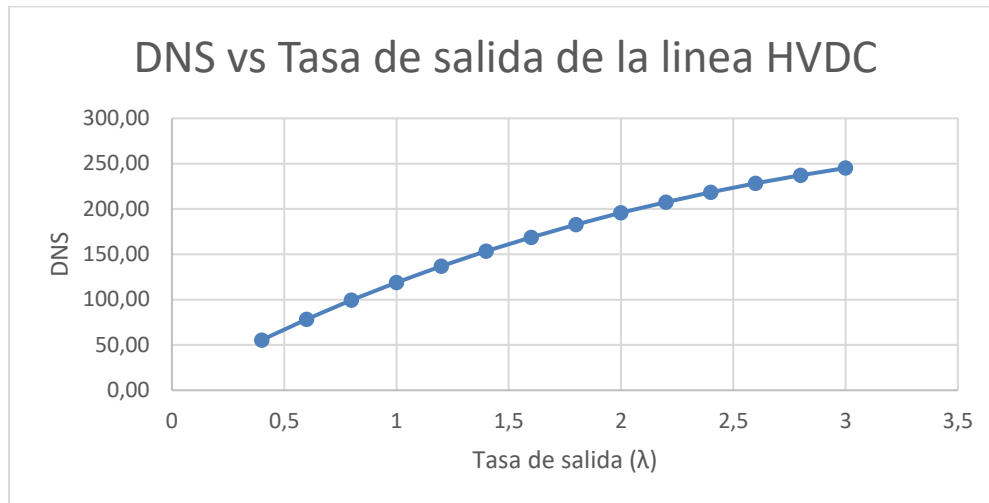


Figura 5 DNS VSC bipolar caso 2

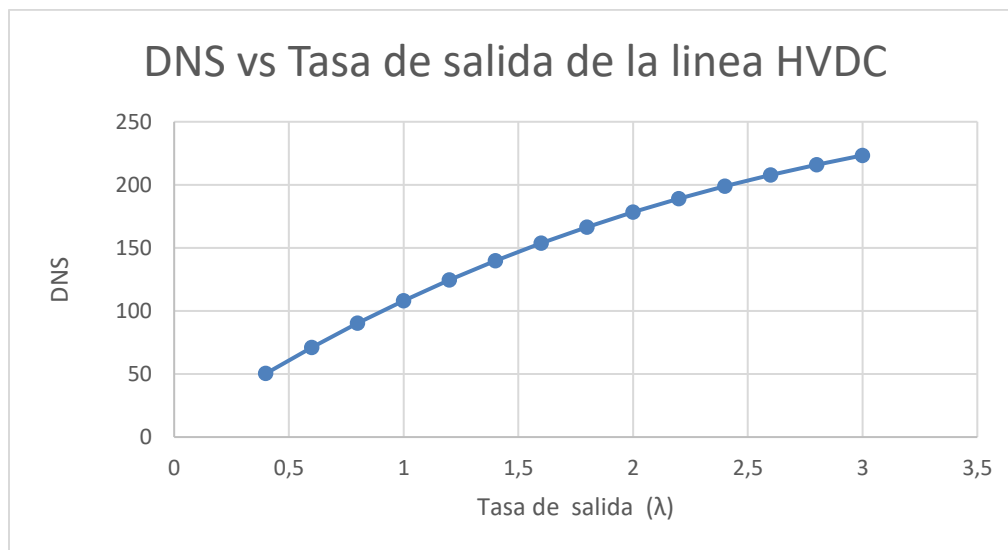


Figura 6 DNS VSC bipolar caso 3

Se puede observar que en las Figura 4, Figura 5 y Figura 6 que, con pequeños aumentos en la tasa de salida, la demanda no suministrada (DNS) aumente en gran medida. Para observar más a detalle los resultados ir a ANEXOS.

Con los valores de probabilidad de estado presentados en la Tabla 2 y los datos de confiabilidad mostrados en la Tabla 3 y las ecuaciones descritas en EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC se calculó el LOLP Y LOLE, como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 10 LOLP para una estación VSC bipolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	LOLP (%)	LOLP (%)	LOLP (%)
Hidrosogamoso	3,18%	3,18%	3,18%
La Tasajera	4,37%	4,37%	2,26%
El Quimbo	3,60%	3,60%	3,60%
Llano Sánchez	0,00%	0,00%	4,27%
Total	7,41%	7,41%	7,41%

Tabla 11 LOLE para una estación VSC bipolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	LOLE (días al año)	LOLE (días al año)	LOLE (días al año)
Hidrosogamoso	11,592	11,592	11,592
La Tasajera	15,956	15,956	8,242
El Quimbo	13,153	13,153	13,153
Llano Sánchez	0,000	0,000	15,590
Total	27,053	27,053	27,053

Se puede observar de la Tabla 10 y Tabla 11 los resultados de LOLP y LOLE respectivamente para cada nodo y el total del sistema, en cada uno de los casos propuestos. Donde se puede ver que la probabilidad de perdida de carga es las misma en los 3 casos.

Se realizo un análisis de sensibilidad para obtener una mayor perspectiva de la confiabilidad del sistema, por ende, se realizó un estudio variando la tasa de salida de las líneas (λ) desde 0,4 a 3 fallas /100 km / año. A continuación, se presentan las gráficas de LOLP vs Tasa de salida del total de las líneas HVDC en los 3 casos:

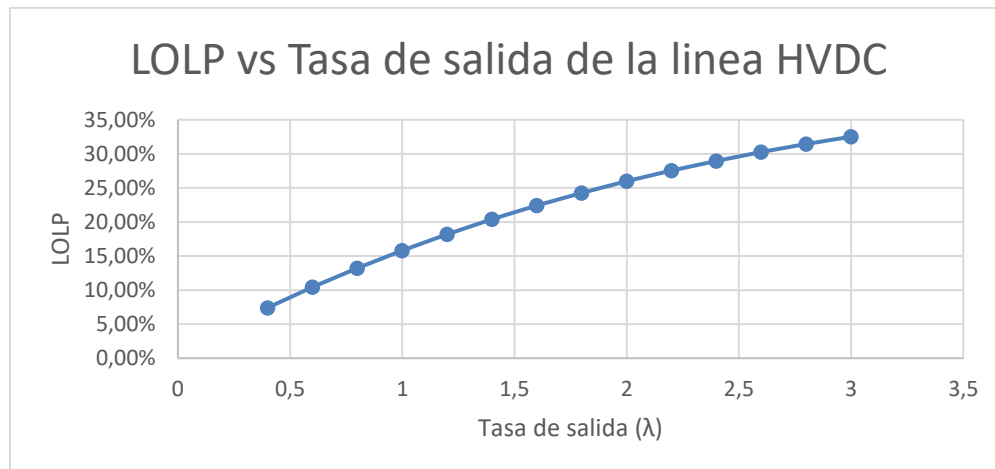


Figura 7 LOLP VSC bipolar caso base

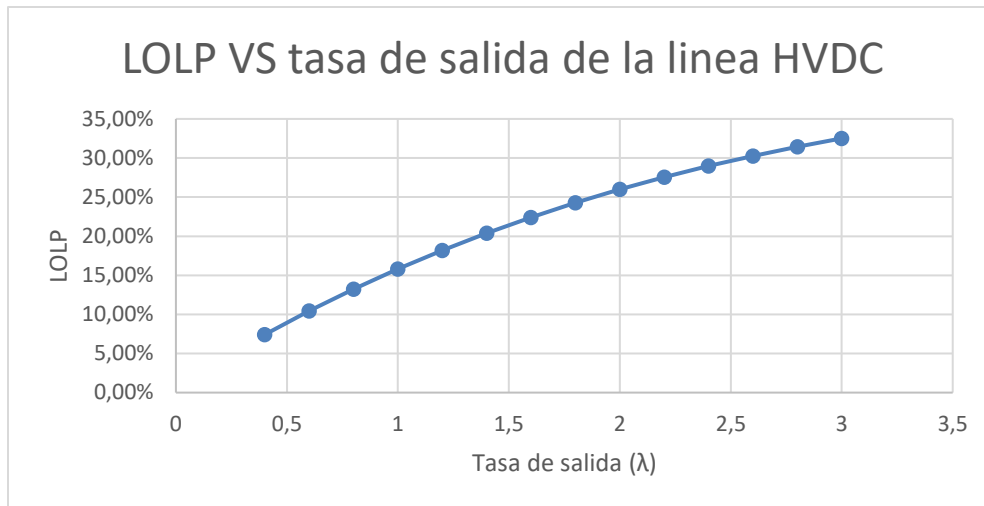


Figura 8 LOLP VSC bipolar caso 2

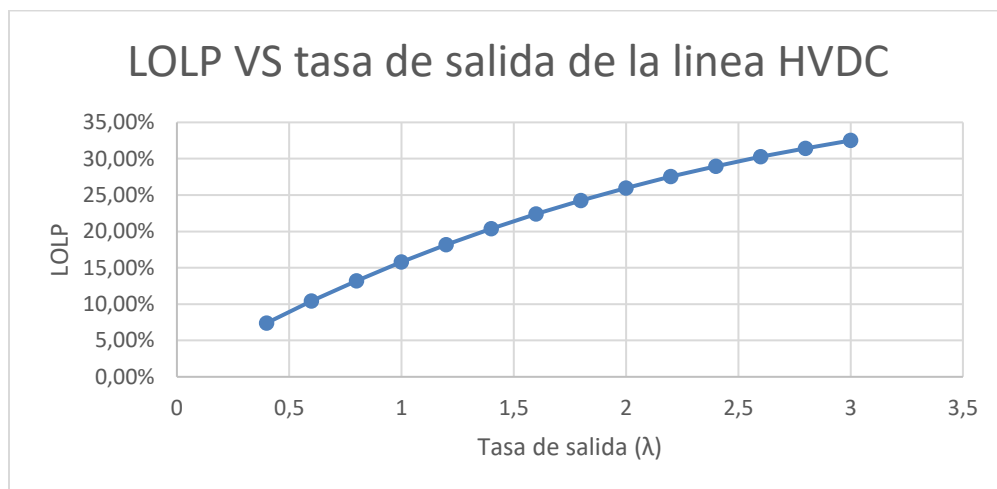


Figura 9 LOLP VSC bipolar caso 3

Se puede observar que en las Figura 7, Figura 8 y Figura 9 que a medida que aumenta la tasa de salida, la probabilidad de pérdida de carga (LOLP) también incrementa. Para observar más a detalle los resultados ir a ANEXOS.

ESTACION VSC MONOPOLAR

Se realizó el mismo estudio de confiabilidad que se realizó con estaciones VSC bipolares, pero ahora utilizando estaciones VSC monopolar simétrica.

Para evaluar la confiabilidad se realizó un análisis de contingencias N-1 el cual se coloca en falla las estaciones VSC de cada nodo y las líneas de transmisión. Se cuentan con 6 estaciones VSC donde se ubicarán en cada uno de los nodos de la red MTDC, esta cuenta con sus respectivos polos positivos y negativos. Se realiza una enumeración de estado y se vincula la probabilidad de falla de cada uno de los estados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 12 Enumeración de estados VSC monopolar

Estado	Elemento en falla	Probabilidad del Estado
1	Condiciones normales de operación	92,614%
2	Línea polo positivo Colectora II- Hidrosogamoso	0,699%
3	Línea polo positivo Hidrosogamoso- La Tasajera	0,289%
4	Línea polo positivo La Tasajera- Quimbo	0,675%
5	Línea polo positivo La Tasajera- LL. Sánchez	1,010%
6	Línea polo positivo Hidrosogamoso- Cuatricentenario	0,743%
7	Línea polo negativo colectora II- Hidrosogamoso	0,699%
8	Línea polo negativo Hidrosogamoso- La Tasajera	0,289%
9	Línea polo negativo La Tasajera- Quimbo	0,675%
10	Línea polo negativo La Tasajera- LL. Sánchez	1,010%
11	Línea polo negativo Hidrosogamoso- Cuatricentenario	0,743%
12	VSC polo Colectora II	0,050%
13	VSC polo La Tasajera	0,050%
14	VSC polo Quimbo	0,050%
15	VSC polo LL. Sánchez	0,050%
16	VSC polo Hidrosogamoso	0,050%
17	VSC polo Cuatricentenario	0,050%

Con los valores de probabilidad de estado presentados en la Tabla 12 y los datos de confiabilidad expuestos en la Tabla 3 y las ecuaciones descritas en EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC se calculó el DNS Y ENS, como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 13 DNS para una estación VSC monopolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	E(DNS) MW	E(DNS) MW	E(DNS) MW
Hidrosogamoso	15,087	9,704	12,598
La Tasajera	18,673	21,274	7,702
El Quimbo	22,055	24,656	15,266
Llano Sánchez	0,000	0,000	15,00
Total	55,815	55,635	50,564

Tabla 14 ENS para una estación VSC monopolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	ENS (MWh/año)	ENS (MWh/año)	ENS (MWh/año)
Hidrosogamoso	132166	85005	110357
La Tasajera	163572	186363	67471
El Quimbo	193199	215991	133727
Llano Sánchez	0	0	131386
Total	488937	487359	442941

Se puede observar de la Tabla 13 y Tabla 14 los resultados de DNS y ENS respectivamente para cada nodo y el total del sistema, en cada uno de los casos propuestos. Analizando los datos que se obtuvieron en la Tabla 13 con los obtenidos en la Tabla 8 se ve un incremento de 0,33% en la demanda no suministrada (DNS) utilizando estación VSC monopolar, al igual con la energía no suministrada (ENS).

Se realizó un estudio variando la tasa de salida de las líneas (λ) desde 0,4 a 3 fallas /100 km /año. A continuación, se presentan las gráficas de DNS vs Tasa de salida del total de las líneas HVDC en los 3 casos:

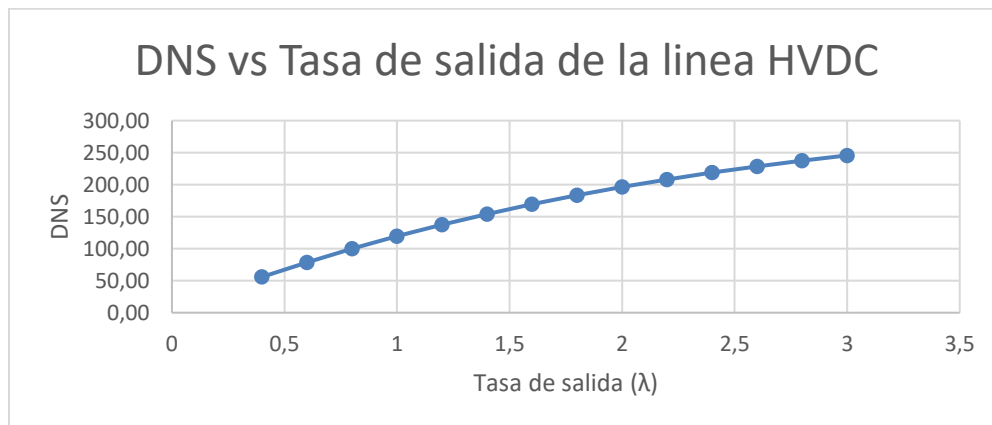


Figura 10 DNS VSC monopolar caso base

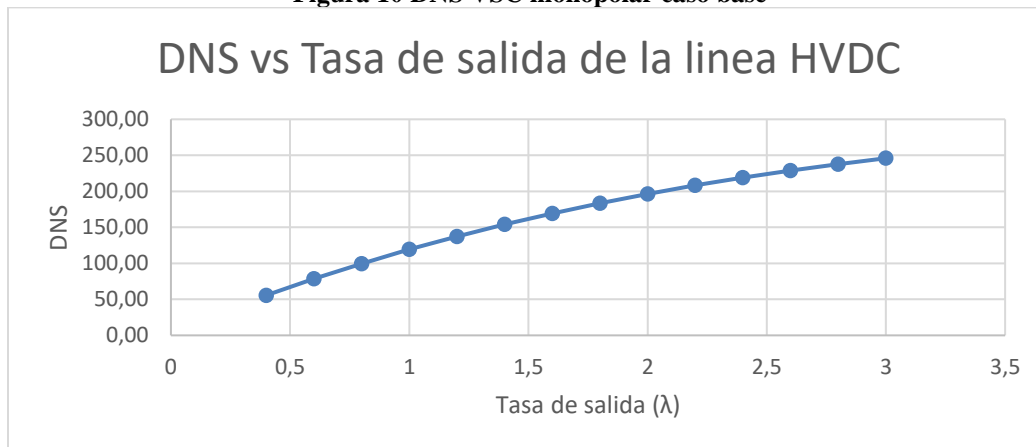


Figura 11 DNS VSC monopolar caso 2

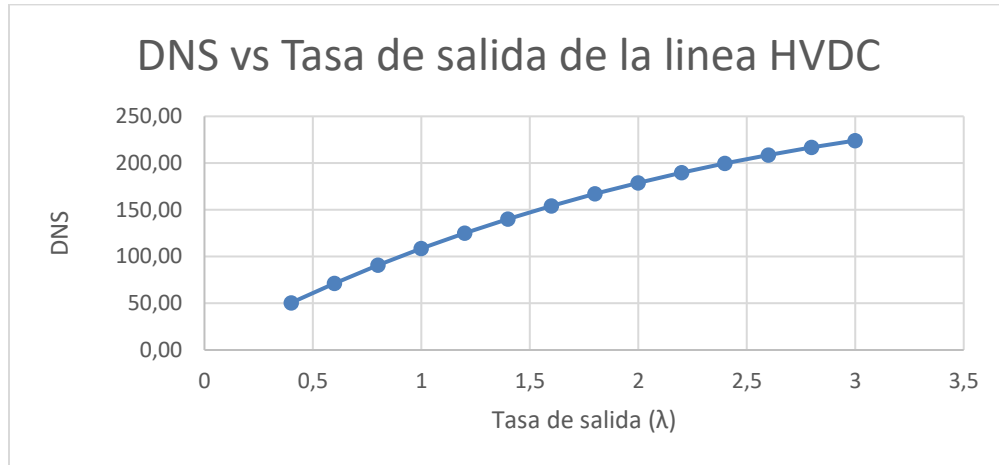


Figura 12 DNS VSC monopolar caso 3

Se puede observar que en las Figura 10, Figura 11 y Figura 12 a medida que aumenta la tasa de salida de las líneas, la demanda no suministrada (DNS) también incrementa. Observando más a detalle los resultados en las tablas de ANEXOS, calculando el error relativo se muestra un incremento del 0,33% en las estaciones VSC monopolares con respecto a las bipolares.

Con los valores de probabilidad de estado presentados en la Tabla 12 y los datos de confiabilidad mostrados en la Tabla 3 y las ecuaciones descritas en EVALUACION DE CONFIABILIDAD DE REDES MTDC se calculó el LOLP Y LOLE, como se aprecia en las siguientes tablas:

Tabla 15 LOLP para una estación VSC monopolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	LOLP (%)	LOLP (%)	LOLP (%)
Hidosogamoso	3,04%	3,04%	3,035%
La Tasajera	4,23%	4,23%	2,16%
El Quimbo	3,51%	3,51%	3,51%
Llano Sánchez	0,00%	0,00%	4,18%
Total	7,13%	7,13%	7,13%

Tabla 16 LOLE para una estación VSC monopolar por nodo

Nodos	Caso Base	Caso 2	Caso 3
	LOLE (días al año)	LOLE (días al año)	LOLE (días al año)
Hidosogamoso	11,079	11,079	11,079
La Tasajera	15,458	15,458	7,902
El Quimbo	12,829	12,829	12,829
Llano Sánchez	0,000	0,000	15,274
Total	26,040	26,040	26,040

Se puede observar de la Tabla 15 y Tabla 16 Tabla 9 los resultados de LOLP y LOLE respectivamente para cada nodo y el total del sistema, en cada uno de los casos propuestos. Se analizo los datos que se obtuvieron en la Tabla 15 con los obtenidos en la Tabla 10 se ve un incremento de 0,33% en la probabilidad de perdida de carga (LOLP) utilizando estación VSC monopolar, al igual con la perdida de carga esperada (LOLE).

Se realizó un estudio variando la tasa de salida de las líneas (λ) desde 0,4 a 3 fallas /100 km /año. A continuación, se presentan las gráficas de LOLP vs Tasa de salida del total de las líneas HVDC en los 3 casos:

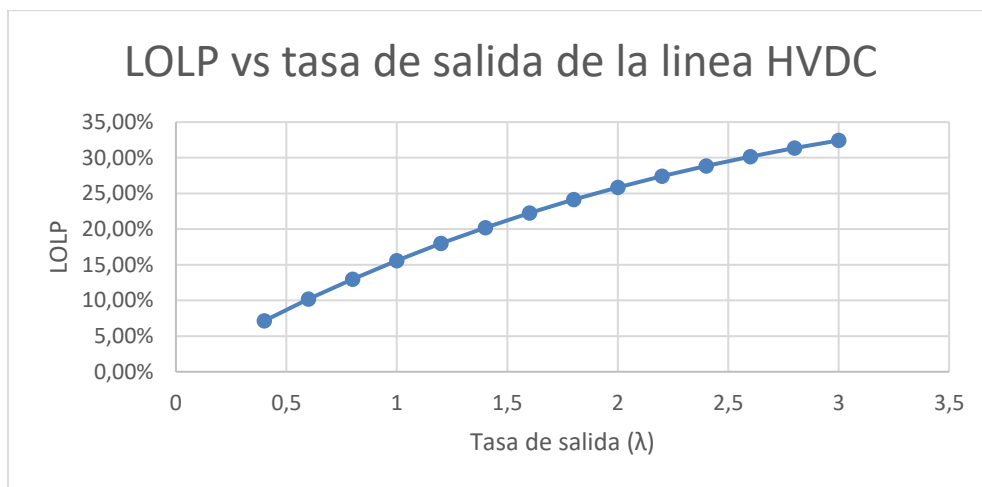


Figura 13 LOLP VSC monopolar caso base

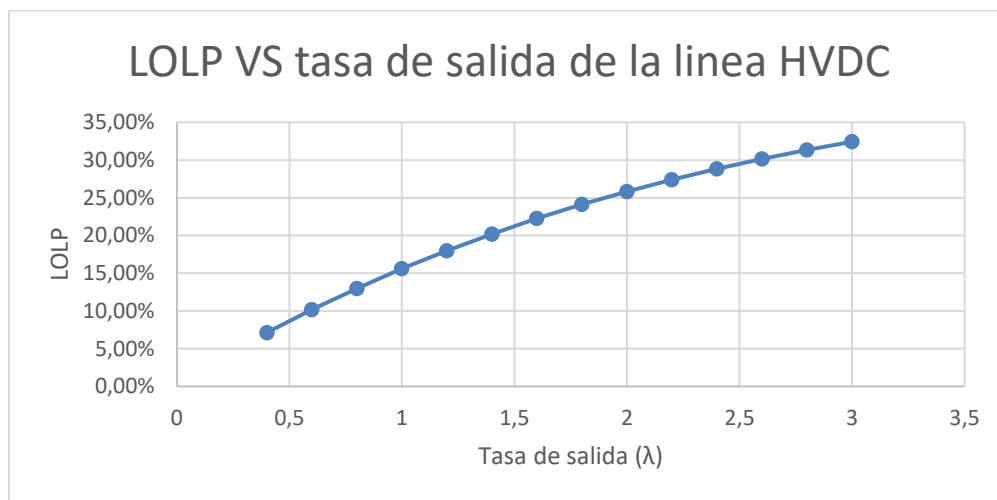


Figura 14 LOLP VSC monopolar caso 2

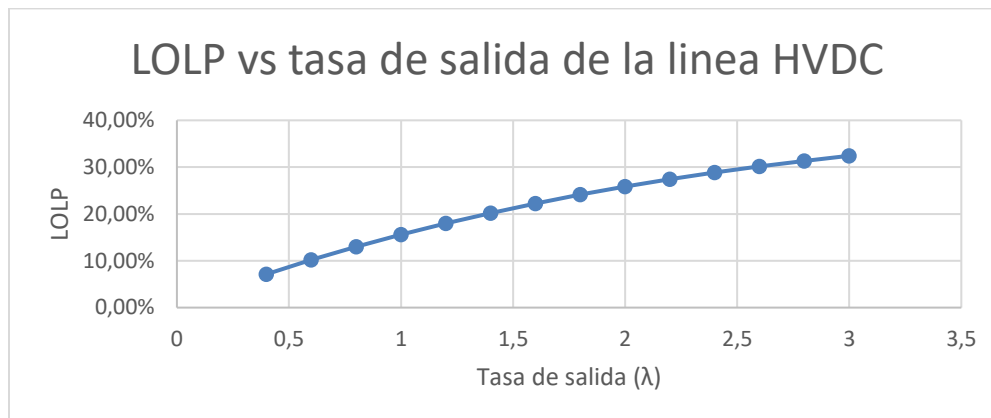


Figura 15 LOLP VSC monopolar caso 3

Se puede observar que a medida que aumenta la tasa de salida, la probabilidad de pérdida de carga (LOLP) también incrementa. Observando más a detalle los resultados en las tablas de ANEXOS, calculando el error relativo se muestra una reducción del 3,74% en las estaciones VSC monopolares con respecto a las bipolares.

5 CONCLUSIONES

En este proyecto se propuso un análisis de confiabilidad de una red multiterminal en corriente continua (MTDC) utilizando estaciones VSC bipolares en Colombia entre Colectora II, Hidrosogamoso, la Tasajera y Quimbo. Con interconexión con Venezuela entre Cuatricentenario con Hidrosogamoso y con Panamá entre LL. Sánchez con la Tasajera.

Se concluye que, con las variaciones de la tasa de salida de las líneas para el análisis de sensibilidad se obtienen valores muy grandes en los índices de confiabilidad (DNS y LOLP). En Colombia no se cuenta con la reglamentación para líneas de transmisión DC. Por ende, se recomienda realizar una reglamentación de los valores de la tasa de salida para redes MTDC.

Las políticas de deslastre empleadas para cada caso influyen en los resultados de los indicadores de confiabilidad utilizados, por ende, entre mejor sean las políticas de deslastre, mejores resultados en los indicadores cuando ocurra una contingencia en la red MTDC.

Con relación a las estaciones VSC bipolares y monopolar simétrica se concluye que, con las VSC monopolares se presenta un aumento de 0,33% en la demanda no suministrada (DNS) y energía no suministrada (ENS) y una reducción de 3,74% en probabilidad de pérdida de carga (LOLP), en relación con la VSC bipolar. Estos cambios son significativos debido a que los valores se encuentran en MW, por consiguiente, las estaciones VSC bipolares cuentan con un mejor rendimiento en la demanda no suministrada, pero con una mayor probabilidad de pérdida de carga con respecto a las estaciones VSC monopolares.

6 AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por darme la oportunidad de estudiar y del sacrificio que hicieron por mí.

Agradezco a mis familiares por siempre preocuparse por mí y motivarme a seguir adelante.

Agradezco a mi asesor, Mario Ríos, por su guía y la asesoría que me brido a lo largo de mi proyecto de grado.

Agradezco a mis amigos y compañeros que me acompañaron a lo largo de mi vida universitaria y al apoyo que me dieron para llegar donde estoy.

7 REFERENCIAS

[1] F. Acero & M. A. Rios, *Planning MTDC Grids based Graphs Theory*, *Int J Elec & Comp Eng*, Vol. 9, No. 1, February 2021. Disponible en <http://ijece.iaescore.com/index.php/IJECE/article/view/22920>

[2] G. Migliavacca, *Advanced Technologies for Future Transmission Grids*, Springer-Verlag London, 2013.

[3] F. A. Acero, *Planeamiento de sistemas MTDC*, Tesis de maestría en ingeniería eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, 2020.

[4] C. E. Junco, *Análisis de confiabilidad de cuatro nodos de una red MTDC planeada para el sistema eléctrico colombiano para el 2040*, Tesis BA, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, 2020.

[5] G. J. Mendoza-Gómez, *Análisis técnico y económico para MTDC en SEN Occidente con interconexión Colombia-Venezuela en HVDC, integrando recursos energéticos eólicos del Golfo de Venezuela*, Proyecto de grado de ingeniería eléctrica, Departamento de ingeniería eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá, 2020.

[6] K. Lindén, B. Jacobson, M.H.J. Bollen, J. Lundquist, “*Reliability study methodology for HVDC grids*”, CIGRÉ. [Internet]. Disponible en e-cigre.org/publication/B4-108_2010-reliability-study-methodology-for-hvdc-grids.

8 ANEXOS

Tabla 17 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso base

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	55,63	7,41%
0,6	78,38	10,43%
0,8	99,45	13,22%
1	118,92	15,81%
1,2	136,90	18,19%
1,4	153,49	20,39%
1,6	168,75	22,41%
1,8	182,78	24,27%
2	195,65	25,98%
2,2	207,42	27,54%
2,4	218,17	28,97%
2,6	227,96	30,27%
2,8	236,85	31,44%
3	244,89	32,51%

Tabla 18 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso 2

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	55,45	7,41%
0,6	78,26	10,43%
0,8	99,37	13,22%
1	118,89	15,81%
1,2	136,92	18,19%
1,4	153,54	20,39%
1,6	168,85	22,41%
1,8	182,91	24,27%
2	195,81	25,98%
2,2	207,61	27,54%
2,4	218,39	28,97%
2,6	228,21	30,27%
2,8	237,12	31,44%
3	245,18	32,51%

Tabla 19 E(DNS) y LOLP VSC bipolar caso 3

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	50,40	7,41%
0,6	71,19	10,43%
0,8	90,43	13,22%
1	108,23	15,81%
1,2	124,67	18,19%
1,4	139,82	20,39%
1,6	153,77	22,41%
1,8	166,59	24,27%
2	178,35	25,98%
2,2	189,11	27,54%
2,4	198,94	28,97%
2,6	207,89	30,27%
2,8	216,01	31,44%
3	223,36	32,51%

Tabla 20 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso base

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	55,81	7,13%
0,6	78,64	10,17%
0,8	99,77	12,99%
1	119,31	15,59%
1,2	137,35	17,99%
1,4	153,99	20,20%
1,6	169,30	22,24%
1,8	183,38	24,12%
2	196,28	25,84%
2,2	208,10	27,41%
2,4	218,88	28,85%
2,6	228,70	30,16%
2,8	237,62	31,35%
3	245,69	32,43%

Tabla 21 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso 2

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	55,63	7,13%
0,6	78,51	10,17%
0,8	99,69	12,99%
1	119,28	15,59%
1,2	137,37	17,99%
1,4	154,04	20,20%
1,6	169,40	22,24%
1,8	183,51	24,12%
2	196,45	25,84%
2,2	208,29	27,41%
2,4	219,11	28,85%
2,6	228,95	30,16%
2,8	237,89	31,35%
3	245,98	32,43%

Tabla 22 E(DNS) y LOLP VSC monopolar caso 3

Tasa de salida λ	E(DNS)	LOLP
0,4	50,56	7,13%
0,6	71,42	10,17%
0,8	90,73	12,99%
1	108,58	15,59%
1,2	125,07	17,99%
1,4	140,28	20,20%
1,6	154,27	22,24%
1,8	167,13	24,12%
2	178,93	25,84%
2,2	189,73	27,41%
2,4	199,59	28,85%
2,6	208,57	30,16%
2,8	216,72	31,35%
3	224,09	32,43%