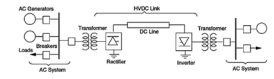


Índices de calidad del suministro eléctrico para sistemas multiterminales HVDC en topologías radiales y anilladas



Energy quality index for multiterminal HVDC transmission systems at radial and ring topologies



José Manuel Rodríguez, Vicente Venegas-Rebollar y Edgar Lerymirko Moreno-Goytia

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA. PGIIE Programa de Graduados en Investigación e Ingeniería Eléctrica. Avenida Tecnológico #1500, Col. Lomas de Santiaguito - Morelia, Michoacán (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7987> | Recibido: 07/03/2016 • Aceptado: 02/06/2016

ABSTRACT

- In this paper an energy quality index that considers time-varying disturbances, as sags and voltage harmonics, in transmission systems interconnected with wind farms is presented. The disturbances have been extensively studied in distribution system which has helped to establish the maximum permissible levels to avoid damage to the equipment connected. On transmission systems there is a growing interest in the energy quality due to the presence of distributed generation as wind farms. Although so far there is no a specific study that indicate power quality index for a transmission systems levels. There are several parameters which must be taken into account, such as the magnitude and frequency of a disturbance, in order to evaluate the power quality. These parameters are obtained directly by the meters developed for this purpose. By a statistical analysis of the disturbances characteristics, these are evaluated and classified into three levels (A1, A2, A3) depending on the signal quality measured at any particular section. Also it is established a Short and Long Term Index allowing a complete evaluation of the quality of the system. The proposed Index are applied to several case studies which demonstrate the performance of the index proposed here.
- Key Words:** Multiterminal Transmission, Harmonics, Index, Power Quality, Sags, Wind Farms.

RESUMEN

En este artículo se presenta un índice de calidad de la energía que considera perturbaciones variantes en el tiempo, como las caídas de voltaje y los armónicos, en los sistemas de transmisión interconectadas con los parques eólicos. Las perturbaciones han sido ampliamente estudiadas en el sistema de distribución, esto ha ayudado a establecer los niveles máximos permisibles para evitar daños en los equipos conectados. En los sistemas de transmisión hay un creciente interés en la calidad de la energía debido a la presencia de la generación distribuida como parques eólicos. Aunque hasta el momento no hay un estudio específico que indique el Índice de calidad para niveles de potencia de los sistemas de transmisión. Existen varios parámetros que deben tenerse en cuenta, tales como la magnitud y la frecuencia de la perturbación, con el fin de evaluar la calidad de la energía. Estos parámetros se obtienen directamente por los medidores desarrollados para este propósito. Mediante un análisis estadístico de las características de las perturbaciones, éstos se evalúan y se clasifican en tres ni-

veles (A1, A2, A3) en función de la calidad de la señal medida en cualquier sección particular. También se estableció un índice de corto y largo tiempo que permite una evaluación completa de la calidad del sistema. Los índices propuestos se aplican a varios casos estudios que demuestran el desempeño del índice que aquí se plantearon.

Palabras Clave: Transmisión Multiterminal, Armónicos, Índices de Calidad de Potencia, Caídas de Voltaje, Parques Eólicos.

1. INTRODUCCIÓN

El interés en la calidad de la energía está creciendo en los últimos años, debido a las formas en que las perturbaciones afectan a las cargas [1]. La baja calidad en distribución afecta el funcionamiento de los equipos conectados a la red, debido a que la mayoría de ellos son muy sensibles a las perturbaciones debido a que se construyen con electrónica de potencia [2].

La literatura hace referencia a normas aplicables a los sistemas de energía, pero sólo consideran una única perturbación, que podría ser caídas de voltajes, armónicos o fluctuaciones, los cuales son los más dominantes en todas las redes eléctricas [3]. En la actualidad la única forma de verificar que la calidad de la señal eléctrica es aceptable es mediante el uso de estas normas. Para establecer la calidad de un sistema de transmisión es habitual aplicar las normas IEC 519 e IEEE 1159, las cuales evalúan las perturbaciones (armónicos y las caídas de voltaje) cada uno por separado sin tomar en cuenta ninguna perturbación ajena a la que considera la norma. Estas normas no ofrecen un estado completo de la calidad del sistema, debido a que en la realidad se pueden presentar más de una perturbación en el punto de medición, por lo que es necesario un análisis de la señal de manera más global, incluso aplicando métodos de variantes en el tiempo para obtener una evaluación más realista de la calidad de la señal eléctrica.

Los armónicos pueden ser generados por la presencia de los parques eólicos [4], mientras que las caídas de voltaje se generan principalmente por otras circunstancias de funcionamiento, tales como fallos eléctricos y mecánicos. Las variaciones de tensión causadas por los armónicos se propagan a través de cientos de millas sin ser evidenciado hasta que afecta a equipos sensibles a estas variaciones. Las caídas de tensión pueden causar un sinfín de fallos en la red debido a la reducción del voltaje y la potencia tanto a corta como a larga distancia [5].

Los sistemas de Transmisión de Alto Voltaje en Corriente Directa (High Voltage Direct Current - HVDC) han facilitado la inclusión

de la generación distribuida, como la energía renovable. La gran cantidad de parques eólicos desarrollados en el mundo, ha motivado la investigación acerca de las perturbaciones generadas por su interconexión con la red eléctrica [6]. Anteriormente, el interés en la propagación de las perturbaciones era solamente para sistemas de transmisión de corriente alterna, más tarde se centró en los sistemas HVDC como puede verse en diversas bibliografías [7], [8]. Hoy en día, la aplicación de los sistemas HVDC es constante debido a la utilización de la energía renovable, por lo que el estudio de las perturbaciones en las redes multiterminales es inminente. Un punto importante a considerar, es que cada sistema HVDC en la etapa de CA, se produce y transporta la energía de diferentes maneras, este estudio se centra en el desarrollo del índice de calidad para cualquier sistema, debido a que la medición se toman en la etapa rectificadora e inversora, sin tener en cuenta la trayectoria antes o después, respectivamente, sólo se centran en el enlace HVDC.

los equipos conectados. El Índice se clasifica por medio de un proceso estadístico tomando consecutivamente varias muestras para medir las perturbaciones variantes con el tiempo. Al implementar el índice en sistemas MTDC, la energía eléctrica transmitida es evaluada en diferentes secciones del sistema para posteriormente determinar de este modo la propagación de la perturbación y su comportamiento a lo largo de la red.

2. ARMÓNICOS Y CAÍDAS DE VOLTAJE

Los armónicos son un fenómeno que causa problemas a los usuarios y los servicios eléctricos, lo que puede conducir a dañar el equipo conectado al sistema. La distorsión armónica es originada por las características no lineales de los equipos y las cargas conectadas a la red eléctrica. Otra fuente de armónicos es debido a la conmutación de los rectificadores aplicado en parques eó-

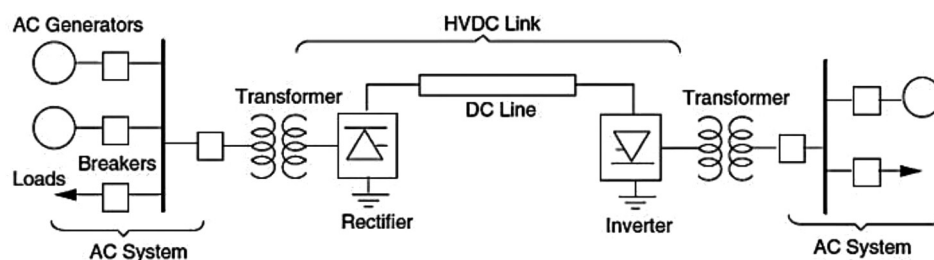


Fig. 1: Enlace HVDC

La evaluación del impacto de las caídas de voltaje y los armónicos en cargas de baja tensión se ha documentado anteriormente. Por otra parte, en comparación con el análisis de baja tensión, no hay gran cantidad de estudios que evalúan el impacto de estas perturbaciones en sistemas de transmisión y subtransmisión, los que están disponibles se encuentran orientados a transmisión en corriente alterna (CA), y sólo unos pocos a transmisión en CD con contribuciones a mejorar los sistemas de control y protección [10] - [11], sin embargo no evita por completo que la perturbación continúe propagándose en el sistema. También existe un gran interés en el estudio de las perturbaciones variante en el tiempo [12], debido a que permite un análisis más exhaustivo del sistema y no se limita a una sola ventana de medición.

Los parámetros eléctricos en líneas de transmisión aéreas se determinan por la resistencia, inductancia y capacitancia calculadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$R_o = \frac{\rho l}{A} \Omega \quad (1)$$

$$L = 4\pi \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} (H / m) \quad (2)$$

$$C_{ab} = \frac{q_a}{v_{ab}/2} = \frac{2\epsilon_0}{\ln(D/r)} (F / m) \quad (3)$$

En el presente artículo se propone una clasificación de las perturbaciones mediante el uso de índices en función de su magnitud y frecuencia de aparición con el fin de establecer un criterio de calidad limitante para evitar cualquier daño que pueda ocurrir a

los equipos [5]. La necesidad de verificar constantemente la inyección de armónicos es importante debido a sus diferentes efectos sobre los sistemas de transmisión, tales como la distorsión en equipos de control, lo que afecta a las condiciones de conmutación. Los armónicos también causan numerosos problemas de funcionamiento en los sistemas de protección, como el funcionamiento incorrecto de los fusibles, interruptores y sistemas de protección digital, mientras que su principal efecto a largo plazo es el calentamiento de las líneas de transmisión. Es posible calcular la magnitud y la corriente RMS de los armónicos con las siguientes ecuaciones:

$$Armonic_n = C_n \cos(k\omega_o t + \phi_n) = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} (k\omega_o t + \phi_n) \quad (4)$$

$$I_{RMSn} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_n^2 dt} = \sqrt{\frac{A_n^2 + B_n^2}{2}} \quad (5)$$

Las caídas de voltaje consiste en una reducción entre 0,1 y 0,9 p.u. de voltaje rms desde la mitad de un ciclo hasta un minuto. Este es un problema común de los sistemas de transmisión de potencia y representa el 87% de todas las perturbaciones en la red. La caída de voltaje se asocia generalmente con fallas del sistema, arranque de motores de alta potencia, cargas de gran excitación, energización de transformadores de potencia y condiciones del entorno como un rayo. Otra causa importante de las caídas de voltaje es el disparo de las protecciones de los sistemas de energía [5], sus efectos dependen de la duración y magnitud, ya que afecta de manera significativa la señal y la potencia transmitida en el sistema eléctrico. La pérdida de energía (LE) se define como la interrupción de la alimentación de voltaje a lo largo del tiempo que dure la perturbación, y es determinado en la ecuación (6).

$$L_E = \int_0^1 [1 - V(t)^2] dt \quad (6)$$

Una etapa importante en este trabajo es el desarrollo de los medidores para obtener la información necesaria de la señal eléctrica. En este sentido, algunos autores han propuesto diferentes metodologías para el análisis de la señal [5]. Los medidores convencionales suelen tomar una muestra de la señal a una hora fija y, después de un tratamiento de datos, proporcionan la información de dicha medición. Sin embargo, las perturbaciones en realidad no son estáticas, sino que varían con el tiempo, por lo que pueden tomar valores diferentes durante un tiempo de medición. Debido a lo anterior, existe la necesidad de implementar medidores variantes en el tiempo para evaluar el sistema de manera más eficiente en comparación con los medidores convencionales. Esto se consigue mediante el muestreo y registro de la información de cada ventana de medición para ser evaluado posteriormente, la ventaja de utilizar una evaluación estadística variante en el tiempo de las perturbaciones es analizar y evaluar la calidad de la señal para tiempos cortos y largos, por lo que el índice se propone para lapsos de 10 minutos y 2 horas, los cuales son recomendados por la norma IEC-61000-4-15.

3. ESTÁNDARES DEL ÍNDICE PROPUESTO

Para el desarrollo del índice propuesto, se consideran las normas IEC-61000 e IEEE-519. La norma IEC está enfocado a analizar las caídas de voltaje mientras que la norma IEEE está orientado a los armónicos. Ambas normas indican que las perturbaciones deben ser evaluadas por separado. Considerando las normas mencionadas, algunas de las características de la forma de onda se aplican para el desarrollo del índice, incluyendo:

- Frecuencia (Hz)
- Magnitud del Voltaje (V)
- Forma de Onda, expresada a través de componentes armónicos.
- Amplitud modulada.

También es importante determinar los intervalos de tiempo apropiados durante el cual se tomarán las mediciones, la norma IEC-61000-4-15 propone las siguientes ventanas de observación:

- Ventana de observación básica: 200 ms
- Intervalos muy cortos: Promedios de 3 segundos considerando todos los ciclos en este intervalo.
- Intervalos cortos (10 minutos): Promedios estadísticos de los intervalos muy cortos.
- Intervalos largos (2 horas): Promedios estadísticos de intervalos cortos.

Estos intervalos de tiempo se incluyen en los medidores con el fin de tener el índice propuesto estandarizado que cumpla con las normas vigentes. El propósito de utilizar los intervalos de tiempo en los medidores es analizar las perturbaciones variantes en el tiempo.

4. ÍNDICES DE CALIDAD DE POTENCIA

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema multiterminal considera una etapa de CA y una etapa de CD. El enlace de CA se utiliza para transportar la energía desde los puntos de generación convencional o distribuida a la estación rectificadora

del sistema HVDC. Ambas etapas están expuestas a sufrir perturbaciones debido a diferentes tipos de fallos. Hay nuevos estudios que se refieren a fallos originados en líneas de transmisión en corriente directa, [13]. Algunas de las fallas que se consideran en la etapa de CD son:

- Fallas línea a tierra y línea a línea.
- Fallas de equipos.
- Fallas de dispositivos de conmutación en CD.

Hoy en día, no hay una norma o estudios específicos que establezcan tolerancias, magnitudes o límites de variaciones de voltaje en la línea de transmisión de CD, en futuros trabajos se llevarán a cabo un análisis para determinar un índice adecuado para la transmisión en CD, por el momento este artículo se centra en la etapa de corriente alterna. Investigaciones recientes han demostrado que un cambio de voltaje en el lado de CD, se refleja a través de la estación de inversora a las líneas de transmisión de corriente alterna [14].

En los sistemas de distribución de CA se ha determinado los niveles permitidos de baja tensión para mantener el equipo funcionando correctamente y los niveles de voltaje que deben ser considerados para desconectar el equipo de operación. Varios autores han desarrollado estudios de tolerancia para varias cargas y equipos de control, ya que estos son extremadamente sensibles a las caídas de voltaje [15], [16]. Para los niveles de voltaje de transmisión no se debe permitir una caída de voltaje del mismo nivel que en los sistemas de distribución. A partir de lo anterior, las tolerancias existentes para un sistema de distribución puede ser tomado como referencia para proponer la clasificación de las caídas de voltaje en los sistemas de transmisión con los siguientes niveles: A_1 , A_2 y A_3 , cada uno clasificado en función de la magnitud y el tiempo de duración.

Las diferentes áreas se denotan debido al nivel del voltaje y el tiempo de duración, las cuáles se describen de la siguiente manera:

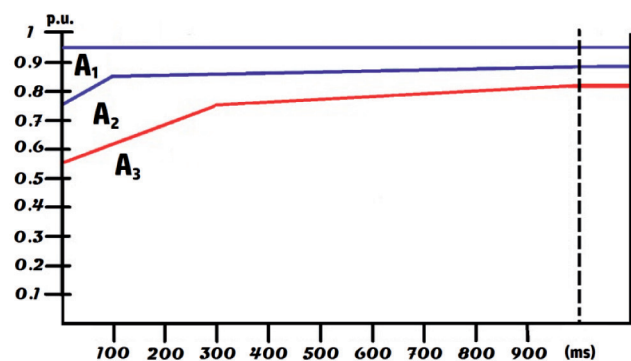


Fig. 2: Tolerancia de los índices para caídas de voltaje en sistemas de transmisión de CA

A_1 .- Inicialmente, la variación del voltaje considerada es de 0,75 p.u. hasta 0,95 p.u. pero a medida que aumenta la duración de la perturbación el rango del voltaje se reduce continuamente. Las perturbaciones dentro de esta área no representan un problema importante para el sistema. Esta falla no debe estar presente durante más de un minuto de lo contrario, se debe considerar como una caída de voltaje permanente.

A_2 .- Para este índice, las caídas de voltaje empiezan de un rango de 0,55 p.u. a 0,75 p.u.; estos valores sólo se permite para caídas de tensión instantáneos. Sin embargo, conforme la duración

de la caída de voltaje aumenta, el rango se reduce hasta llegar a un rango de 0,80 a 0,85. Además, no debe durar más de un minuto o causará daños en el sistema. En esta zona, el sistema ya está en condiciones de fallo. Es posible que algunos equipos conectados salgan de la operación en función de su sensibilidad.

A_3 .- Representa el área en la que, definitivamente produce un mal funcionamiento del equipo conectado al sistema, por lo que tiene el índice de más baja calidad. El tiempo de duración de la caída de voltaje modifica los niveles de voltaje.

La clasificación de los índices de armónicos debe ser compatible con el índice de las caídas de voltaje con el objetivo de evaluar ambas perturbaciones en un índice único de calidad. Por lo tanto, se clasifican en A_1 , A_2 y A_3 , en función de la magnitud de los armónicos y la distorsión armónica total (THD). Los niveles de los armónicos se especifican en diferentes normas internacionales, sin embargo, varios países tienen sus propios niveles de tolerancia.

En este estudio, los armónicos se analizarán de acuerdo con la norma IEEE-519, por lo que los medidores virtuales desarrollados para medir las perturbaciones deben ser capaces de dar suficiente información para completar la tabla I, a partir de la cual se pueden analizar los armónicos, y su diferencia con el límite establecido por la norma. La tabla I incluye el resultado del índice (A_1 , A_2 y A_3) en la fila "Calidad del Armónico", clasificando las perturbaciones de acuerdo con sus tolerancias.

A pesar de que los límites de los armónicos están claramente definidos por la norma IEEE-519, el índice de calidad armónica debe identificar el porcentaje fuera del límite máximo de la perturbación. Al analizar las condiciones de funcionamiento del equipo conectado al sistema eléctrico, el índice propuesto considera si las magnitudes de los armónicos están fuera de las tolerancias armónicas, de ser así, el índice indica una calidad de A_1 . Si la suma de los porcentajes de armónicos (última columna de la Tabla I) es mayor del 10% el índice armónicos cae al nivel A_2 . El cambio de A_2 a A_3 se presenta cuando los armónicos y la distorsión armónica total superan los límites permitidos.

Armónico	Límite	Medida	Cumple	Falla	%
		.			
2	1.6	0.5	x		-
3	4	4.3		x	7.5
5	5	2.0	x		-
7	4	1.7	x		-
9	1.2	0.3	x		-
11	3	1.1	x		-
13	2.5	0.4	x		-
15	0.3	0.0	x		-
THD límite	THD Medido	Cumple		Falla	%
1.5	0.7	x			-
Índice de Calidad Armónico		A1			
A ₁ .- Buena Calidad, armónicos y THD dentro de los límites					
A ₂ .- Armónicos fuera del límite y THD dentro del límite					
A ₃ .- Armónicos y THD fuera del límite					

Tabla I: Tolerancia de los índices armónicos en sistemas de transmisión de CA interconectada con sistemas MTDC

5. ELABORACIÓN DE LOS ÍNDICES DE TIEMPO CORTO Y LARGO

Es de vital importancia resaltar la metodología utilizada en la elaboración de los índices de calidad. Tomando como referencia los tiempos de muestreo indicados en las normas anteriores y la aplicación de los percentiles (utilizado en el índice del *flicker-meter*), se aplica un análisis mediante estadística inferencial, lo que da como resultado diferentes niveles de calidad para las señales eléctricas en función de la magnitud de la perturbación continua en el sistema.

El índice de tiempo corto y el índice de tiempo largo evalúan las condiciones del sistema en períodos de tiempo de 10 minutos y 2 horas, respectivamente. Para obtener el índice, los analizadores toman varias mediciones que son útiles para determinar el comportamiento de la perturbación en un rango de tiempo y no sólo para un instante. Cuando se hace una medición para un solo instante, existe la posibilidad de tener perturbaciones que no siempre se encuentran en la red, y que solo se presentaron en ese instante, esta es la razón por lo que la evaluación debe considerar lapsos de tiempo predeterminados, con la finalidad de proporcionar información más veraz sobre el comportamiento del sistema eléctrico, en comparación con la obtenida a partir de una medición en un solo punto del tiempo. La duración de índice de tiempo corto y largo se han tomado de la norma IEC 61000-4-15.

El índice de tiempo corto (Short Time Index - STI) cuantifica la gravedad de la perturbación durante un período de 10 minutos, según la norma IEC-61000, mientras que el índice de tiempo largo (Long Time Index - LTI) es la acumulación de 12 STI a lo largo de 2 horas.

Las mediciones se basan en una clasificación y una distribución acumulativa de los datos tomados para cada ventana de muestreo (S_w). Para cada ventana se le asigna un valor de A_1 , A_2 o A_3 , dependiendo de la gravedad de la perturbación medido en este instante. De acuerdo con la norma, la ventana de muestreo debe ser cada 200 ms:

$$S_w = 200 \text{ ms}$$

Así que a lo largo de cinco muestras se acumula 1 segundo (S_{ws}), estas se evalúan resultando en un índice A_1 , A_2 o A_3 para este lapso:

$$S_{ws}(1 \text{ sec}) = 5 \text{ samples } (S_w) = A_1, A_2 \text{ or } A_3$$

Las 5 muestras se revisan con el fin de evaluar el lapso de 1 segundo, se da prioridad a los niveles A_3 , después a A_2 y finalmente a A_1 . Siguiendo el orden indicado, si el S_{ws} tiene al menos dos índice A_3 , al S_{ws} se le asigna el índice A_3 . Si esta condición no se cumple el siguiente índice de revisar es A_2 . Entonces, si hay al menos dos índices A_2 , el S_{ws} toma el índice A_2 . Por último, si la última condición no se cumple entonces el S_{ws} es un índice A_1 .

Mediante la acumulación de 60 S_{ws} , el índice evalúa la totalidad de un minuto, en esta sección se denomina como ventana de muestreo por minuto (S_{wm}), que se compone de 60 ventanas de muestreo por segundo, continuando con la prioridad, si al menos hay 15 valores A_3 de S_{ws} , el S_{wm} toma el valor A_3 , pero si esta condición no se cumple se revisa la cantidad de niveles A_2 , si hay 25 A_2 como mínimo, el S_{wm} toma el índice A_2 . Por último, si la medición no tienen suficientes A_2 S_{ws} , hay una última condición, es necesario un mínimo de 35 A_1 para que la sección entera mantenga el índice A_1 , esta condición es necesaria para asegurar la buena calidad, ya que podría existir la posibilidad de encontrar 10 A_3 , 20 A_2 y 30 A_1 , por lo que los valores de A_3 y A_2 representan un alto

número de ellos sin llegar a los límites mencionados, sin embargo debido a que A_1 no tiene por lo menos $35 S_{WS}$ en el minuto, el S_{WM} toma el índice de A_2 .

Por último, como se menciona en la sección anterior, el STI se desarrolla a partir de $10 S_{WM}$ para completar los 10 minutos que se especifica en la norma IEC 61000-4-15. El STI se clasifica según la importancia del nivel de A_3 a A_1 , por lo que, si hay un mínimo de tres niveles A_3 , el STI toma el índice A_3 , si esta condición no se cumple, es necesario revisar la cantidad de A_2 , si hay al menos cinco niveles A_2 , el STI toma el índice A_2 , sin embargo si el STI tiene al menos siete niveles A_1 , el STI toma el índice de A_1 , pero si es menor de siete la cantidad de A_1 , el STI toma el índice A_2 incluso si no hay suficientes $A_2 S_{WM}$.

El LTI indica el comportamiento del sistema a lo largo de 2 horas, por lo que se conforma a partir de 12 STI, así que si hay por lo menos cuatro niveles A_3 el LTI toma de índice A_3 , en caso de ser menor se verifica la cantidad de A_2 , si hay más de seis, el LTI obtendrá el índice A_2 , sin embargo, si esto no se cumple, se revisa la cantidad de A_1 , si hay al menos siete A_1 , del LTI toma el índice de A_1 , en caso de que no se cumplieran ninguna de las condiciones anteriores, el LTI toma el índice de A_2 :

Como resumen de la forma en que el STI y el LTI se desarrollan, la Figura 3 muestra el diagrama a bloques de su aplicación, se realiza consecutivamente cada paso para obtener el índices en tiempos cada vez mayores desde una ventana de 200 ms al LTI de 2 horas.

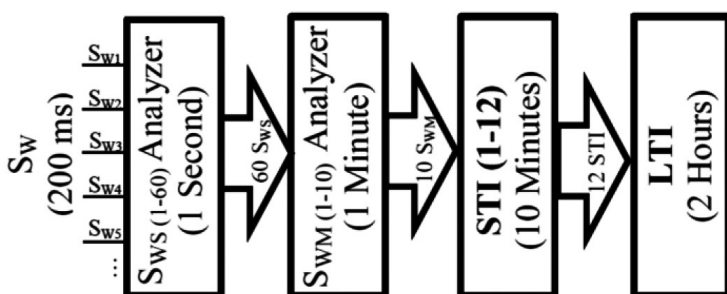


Fig. 3: Diagram Block follow to get the STI and LTI

6. SISTEMA MTDC EN MATLAB-SIMULINK: CASOS DE ESTUDIOS

Para validar el desempeño de los índices de calidad propuestos, se han simulado diferentes casos de estudio, se presenta un sistema HVDC multiterminal que incluye 2 estaciones de generación eléctrica (generación eólica y generación convencional) y 3 inversores que alimentan cargas en CA. Una característica importante de los rectificadores e inversores es que son convertidores VSC, por lo que requieren potencia reactiva que se alimenta de los filtros y banco de condensadores, que se conectan y desconectan con interruptores de potencia por voltaje, los rectificadores e inversores se integran por 3 niveles de diodos IGBT con un control proporcional integral (PI). La línea de generación simulada es de 230 kV en CA, ya que son los niveles de transmisión más aplicado en México, y que puede adaptarse a un sistema HVDC de +/- 200 MVA y 100 kV en CD. Las líneas de transmisión varían de 100 km a 600 km con un total de 1.700 kilómetros en función de la topología utilizada en el sistema multiterminal, las cuales se clasifican en:

Sistema Radial.- En un sistema radial, las cargas tienen una sola alimentación, de modo que un fallo de alimentación causa una interrupción en el suministro eléctrico. Debido a su simplicidad y bajo coste, la topología radial es el más aplicado [17]. En esta topología, los convertidores están conectados por un solo cable de CD. La fiabilidad de este tipo de sistema es menor que en otras topologías propuestas y es probable la pérdida de estaciones de conversión en caso de un fallo en la línea de CD. La topología radial a analizar se muestra en la Figura 4.

Sistema Anillado.- El sistema anillado tiene una alimentación doble y uno de ellos puede afectarse sin causar una interrupción total del suministro eléctrico. La topología en anillo conecta todas las estaciones de conversión en un circuito en serie que resulta en dos cables de CD por estación convertidora, como se muestra en la Figura 5. La ventaja de esta topología es la simplicidad de construcción y operación. En el otro lado, la topología de anillo, así como el sistema radial, tiene una baja fiabilidad y altas pérdidas debido a las largas distancias de transmisión [17].

Sistema Mallado.- Con esta topología, el número de interconexiones aumenta y por lo tanto se mejora la seguridad del servicio, debido a los cables adicionales que se añaden a la red. El

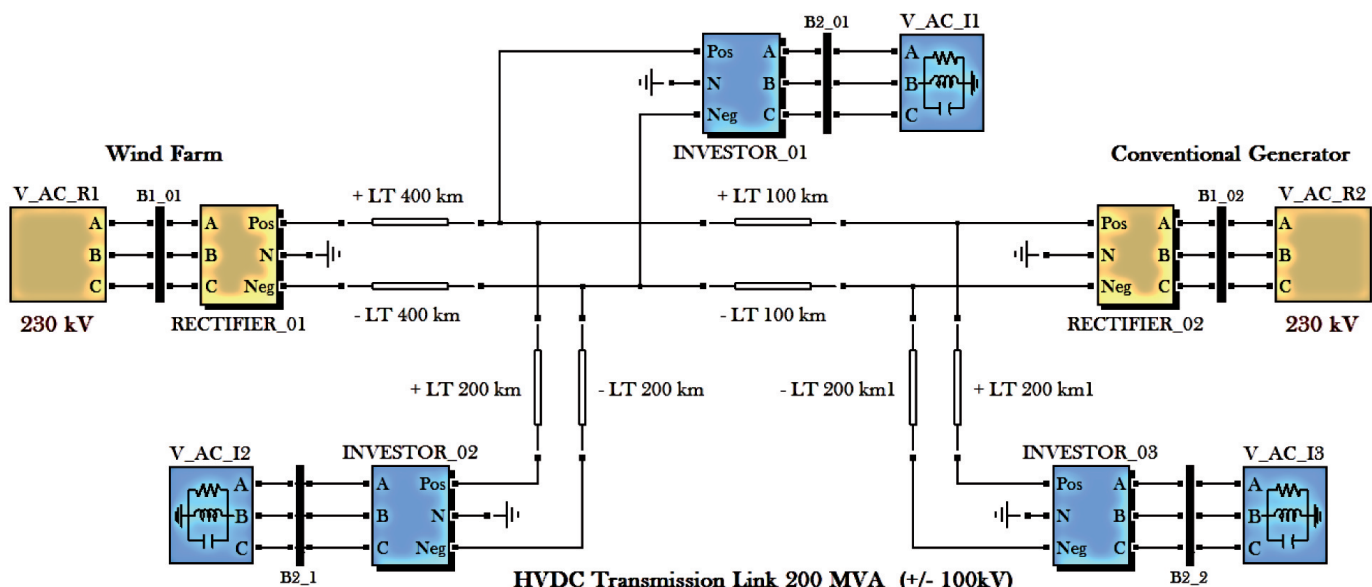


Fig. 4: Sistema de transmisión MTDC radial 2R-3I

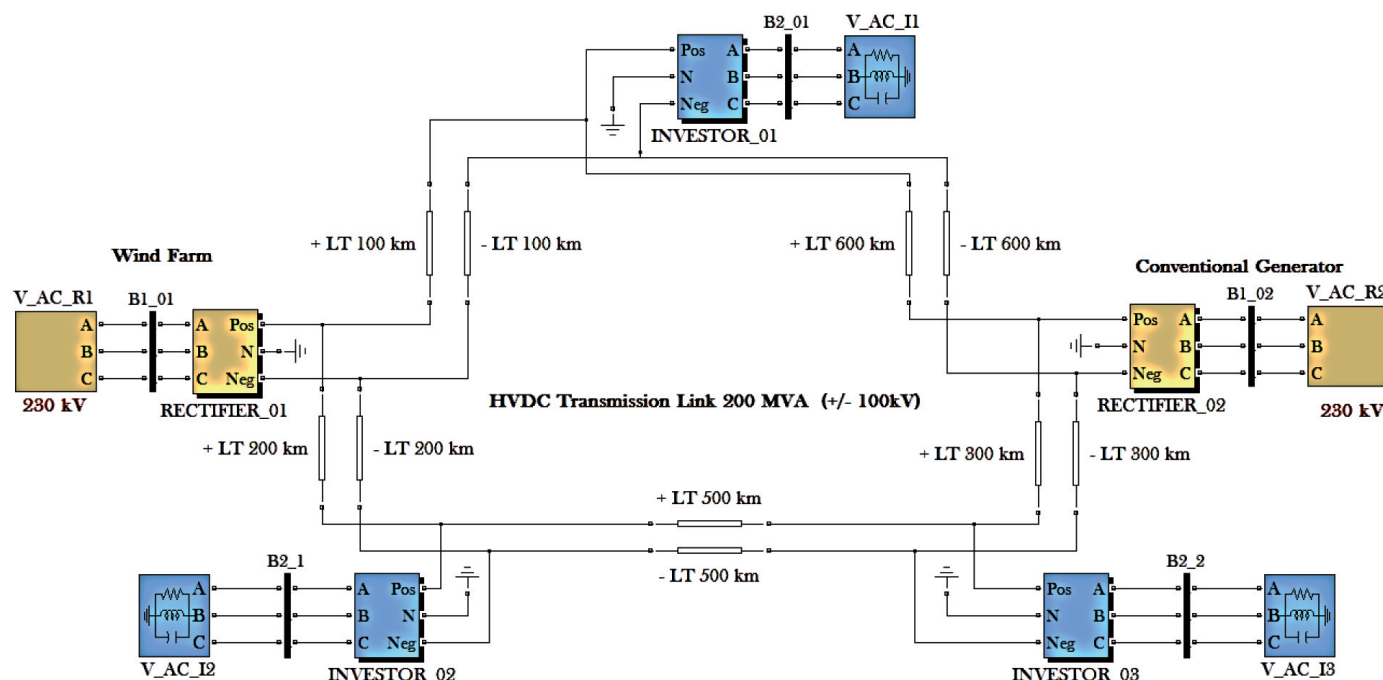


Fig. 5: Sistema de transmisión MTDC anillado 2R-3I

inconveniente de esta topología es el coste más alto debido a las longitudes de las líneas de transmisión en comparación con las otras topologías. La conexión en malla aumenta la fiabilidad, proporciona una mayor flexibilidad para el intercambio de energía entre las áreas de CA, y reduce la distancia entre dos puntos de conexión en la red [17]. Para evaluar el índice propuesto, se consideran los sistemas multiterminales con topología radial y anillada debido a la amplia presencia de estos hoy en día. El sistema de mallado se estudiará en futuros trabajos.

La medición de las muestras necesarias para desarrollar el STI y LTI, se toman de varios puntos del sistema MTDC, de acuerdo con la necesidad de indicar la calidad de la energía de la red, por lo que

cada uno de los índices son evaluados en cada convertidor, con el fin de indicar la calidad en todos los puntos de la red.

El primer caso de estudio que se presenta es el sistema MTDC radial de la Figura 4. Para la simulación, se consideran 3 perturbaciones: la primera perturbación es debido al generador convencional (V_AC_R2), presenta fluctuaciones de voltaje, mientras que la generación en el parque eólico (V_AC_R1) tiene dos perturbaciones, en la primera instancia, una caída de voltaje de 0,3 p.u., posteriormente se inyectan armónicos en la señal.

La Figura 6 muestra el efecto de la caída de voltaje, el cual a pesar que se inicia en el parque eólico, se refleja también en el rectificador asociado a la generación convencional, mientras

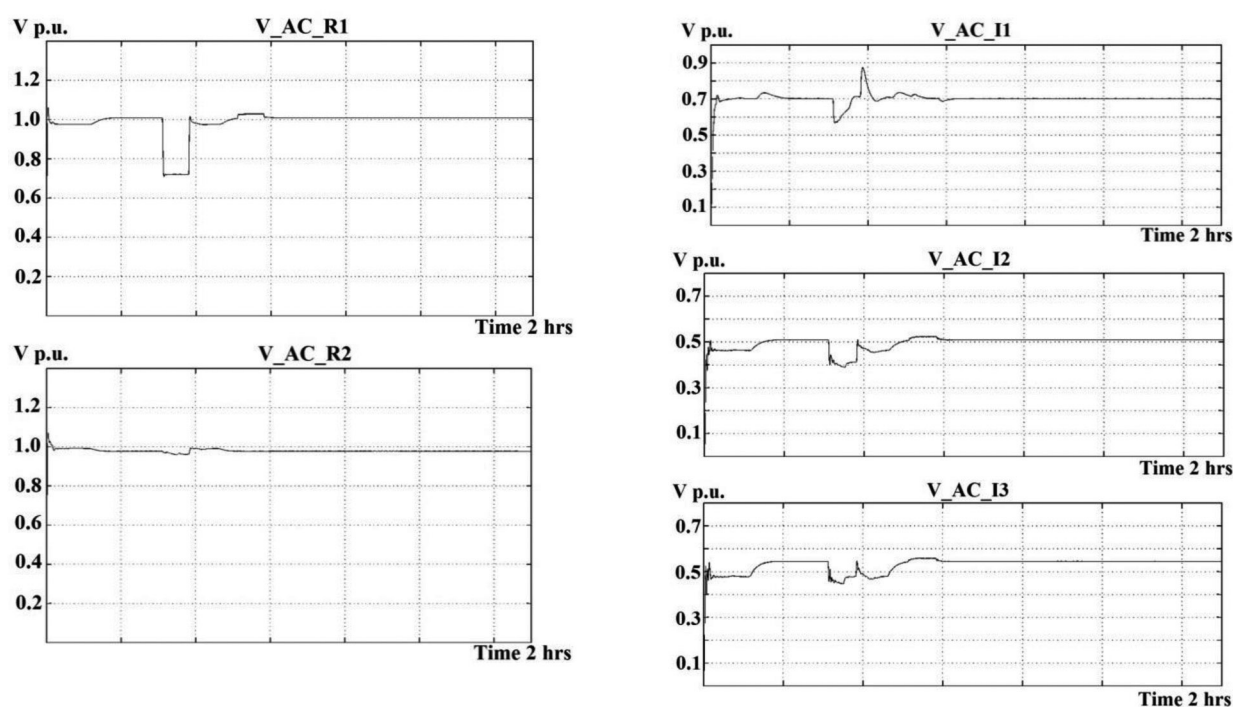


Fig. 6: Voltaje p.u. de los rectificadores e inversores en el sistema MTDC radial

que los armónicos y las fluctuaciones no se reflejan. También se muestran las gráficas de la señal de CA de los tres inversores. Se observa que el sistema multiterminal radial mitiga la propagación de las perturbaciones.

La información de las gráficas se muestran numéricamente en la Tabla II, donde se toman los datos de los medidores desarrollados en la sección III. El índice propuesto determina el nivel de calidad en el índice de tiempo corto (STI) y el índice de tiempo largo (LTI). La tabla II recopila los índices de calidad del sistema multiterminal, en cada una de las estaciones convertidoras, muestra los índices de tiempo corto (STI01-12) y el índice de tiempo largo (LTI).

	Rec. 1 Parque Eólico	Rec. 2 Gen. Conv.	Inv. 1 Carga 1 0.7 p.u.	Inv. 2 Carga 2 0.5 p.u.	Inv. 3 Carga 3 0.5 p.u.
STI-01	A1	A1	A1	A1	A1
STI-02	A1	A1	A1	A1	A1
STI-03	A3	A1	A2	A2	A1
STI-04	A1	A1	A2	A1	A1
STI-05	A2	A1	A1	A1	A1
STI-06	A1	A1	A1	A1	A1
STI-07	A1	A1	A1	A1	A1
STI-08	A1	A1	A1	A1	A1
STI-09	A1	A3	A1	A1	A2
STI-10	A1	A2	A1	A1	A1
STI-11	A1	A1	A1	A1	A1
STI-12	A1	A1	A1	A1	A1
LTI	A2	A2	A1	A1	A1

Tabla II: Índices de Calidad (STI - LTI) a lo largo del sistema multiterminal radial

En la Tabla II se muestra que varios STI son afectados en el momento en que se producen las perturbaciones, y el análisis del LTI, muestra diferentes niveles de calidad en relación al lugar de medición y donde se produjo la perturbación.

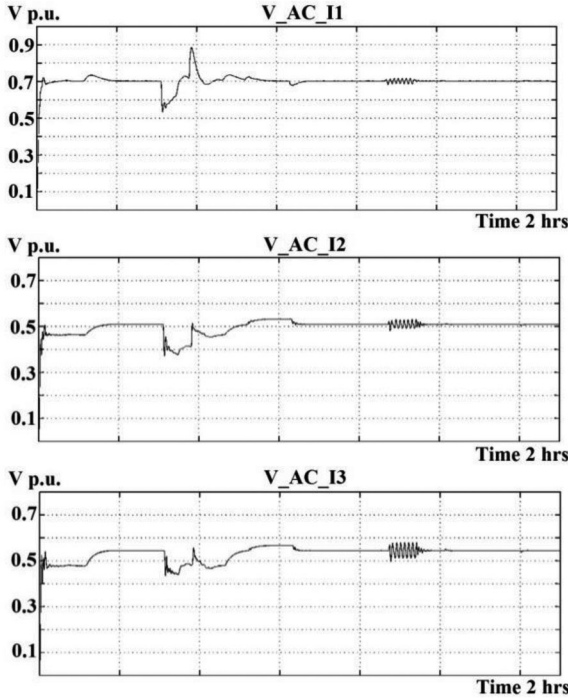
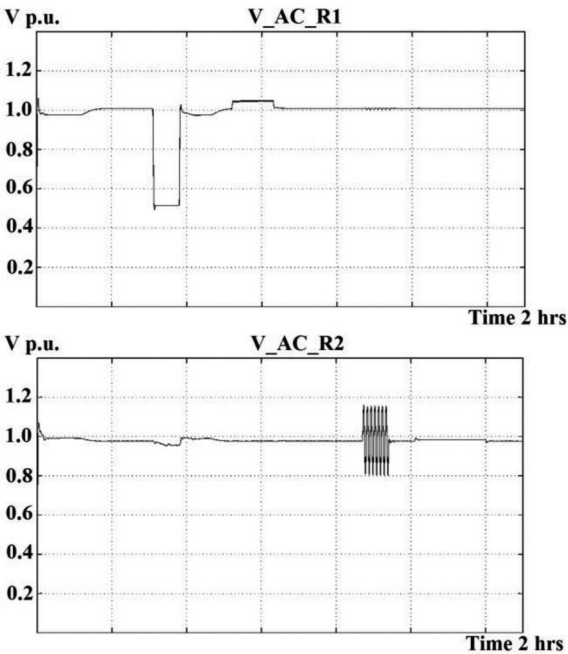


Fig. 7: Voltajes p.u. de los rectificadores e inversores en el sistema MTDC anillado

La siguiente topología implementada en el sistema multiterminal es la conexión en anillo, como se mencionó anteriormente, la respuesta de la red se ve afectada por el aumento en la longitud de las líneas de transmisión. Considerando los mismos niveles, tiempos y orígenes de las perturbaciones que en el caso de la topología radial, el uso del índice de calidad indicara la respuesta del sistema debido a las caídas de voltaje y los armónicos.

La Figura 7 muestra las gráficas de las perturbaciones originadas en los rectificadores (R1-R2) y también muestra las mediciones en las líneas de transmisión de CA que alimentan las cargas (I1-I3).

El índice de calidad de potencia desarrollado se aplica para obtener los índices de tiempo corto y largo presentado en la Tabla III. Comparando la Tabla II y la Tabla III, se puede observar el desempeño del índice para dos topologías diferentes cuando se aplican las mismas perturbaciones

	Rec. 1 Parque Eólico	Rec. 2 Gen. Conv.	Inv. 1 Carga 1 0.7 p.u.	Inv. 2 Carga 2 0.5 p.u.	Inv. 3 Carga 3 0.5 p.u.
STI-01	A1	A1	A1	A1	A1
STI-02	A1	A1	A1	A1	A1
STI-03	A3	A2	A3	A2	A2
STI-04	A1	A1	A1	A1	A1
STI-05	A2	A1	A1	A1	A1
STI-06	A1	A1	A1	A1	A1
STI-07	A1	A1	A1	A1	A1
STI-08	A1	A1	A1	A1	A1
STI-09	A1	A3	A2	A2	A3
STI-10	A1	A2	A2	A2	A1
STI-11	A1	A1	A1	A1	A1
STI-12	A1	A1	A1	A1	A1
LTI	A2	A2	A2	A1	A2

Tabla III: Índices de calidad (STI - LTI) a lo largo del sistema multiterminal anillado

A diferencia de la topología radial, la topología anillada tiene una conexión lateral con la estación que se encuentra cercana, por lo que la perturbación se reflejan inmediatamente por la estación subsiguiente; por lo tanto, en la tabla III muestran con mayor frecuencia índices de menor calidad en las estaciones convertidoras donde se realizaron las mediciones.

7. DISCUSIÓN

Los Índices de Calidad están diseñados para ayudar a establecer si el proceso de transmisión eléctrica es funcional cuando existen perturbaciones. El STI y LTI indica el nivel de calidad eléctrica presente en el sistema en tiempos continuos para un mejor análisis. Aunque las normas IEEE e IEC establecen los límites de perturbaciones específicas para un funcionamiento correcto de los equipos conectados al sistema, el índice de calidad propuesto en este artículo toma en cuenta no sólo una perturbación, sino que es capaz de evaluar varios de ellos al mismo tiempo, análisis que es imposible aplicando únicamente las normas IEEE e IEC.

La evaluación de las perturbaciones para el caso de transmisión en CD es diferente, debido a que hay muchos parámetros y elementos activos, tales como los filtros en los convertidores VSC, que benefician a la atenuación de las perturbaciones, una vez rectificada la señal de CA. Además, para el análisis de los sistemas HVDC requiere la estandarización de las magnitudes de transmisión, como ocurre en CA para dar origen a su normalización.

La Tabla II y III indican los STI y el LTI que existen en cada convertidor del sistema multiterminal de las dos topologías estudiadas: radial y anillada. Cada uno presenta diferentes propiedades de propagación de las perturbaciones, por lo que el desempeño del índice propuesto podría ser utilizado como una herramienta para evaluar la propagación de una perturbación en los sistemas MTDC.

Los índices de calidad confirman el impacto de las conexión de sistemas multiterminales con las dos topologías en práctica, donde el total del STI con el sistema radial son 86% de A_1 , 10% de A_2 y 4% de A_3 , en cambio el sistema anillado tiene un total de 78% de A_1 , 15% de A_2 y 7% de A_3 .

Aunque la propagación de las perturbaciones se produce inevitablemente en las redes eléctricas, se puede concluir que las topologías multiterminales ayudan a mantener el equilibrio en la transmisión de potencia. De esta forma, en el caso de que una terminal presenta una variación de voltaje no deseada (caídas de voltaje), la terminal posterior hace un esfuerzo para compensar la pérdida de potencia; por el otro lado, para el caso de los armónicos, los filtros de la estación convertidora VSC ayuda a mitigar su presencia, y una vez que esta se encuentra en las líneas de transmisión las propiedades inductivas y capacitivas limitan su presencia. Sin embargo, las fluctuaciones se propagan más fácilmente y éstos se reflejan incluso en las cargas conectadas al final del sistema multiterminal, por lo que son un foco de interés para futuros trabajos.

Actualmente se realizan investigaciones especializadas que analizan la calidad de la energía renovable. Sin embargo, sólo toman en cuenta la etapa de generación, por lo que una vez que la energía se encuentra en las líneas de transmisión no hay control en las mediciones que indiquen la calidad con la que va de un punto a otro, dejando de lado la propagación de las perturbaciones que presenten las diferentes fuentes de energía renovables.

Las tolerancias para caídas de voltaje y armónicos se han implementado en los últimos años por las normas IEC 519 y IEEE 1159, limitándose a ser utilizado sólo en los sistemas de transmisión de corriente alterna. Por lo tanto, es necesario desarrollar un

sistema de medición que permitan conocer la operación de calidad en una red de transmisión de corriente directa tal como se ha propuesto para CA.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Granados-Lieberman, "Techniques and Methodologies for Power Quality Analysis and Disturbances Classification in Power Systems", IET Generation, Transmission & Distribution, 2011 DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/iet-gtd.2010.0466>
- [2] Balbas-García, F., Aranda-Sierra, J., Lombillo-Vozmediano, I., Villegas-Cabredo, L. (2015). "The Importance of Energy Efficiency and Proposal of Comparative Analysis: Practical Case of Lighting". *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 4(1). 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7489>
- [3] Klai, Zvonimir, Srećko Nikolovski, and Zorislav Kraus. "Voltage Variation Performance Indices in Distribution Network." *Technical Gazette* 18.4 (2011): 547-551.
- [4] Ortega-Alba, Sergio. "Conditioning for the Implementation of Wind Energy in Airports" *DYNA Energía y Sostenibilidad*. Enero-Diciembre 2. (2013). DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES1026>
- [5] Shareef, Hussain, Azah Mohamed, and Nazri Marzuki. *Voltage Sags and Equipment Sensitivity: A Practical Investigation*. INTECH Open Access Publisher, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/10013>
- [6] Gil Montoya, Francisco, et al. "Power Quality Research Techniques: Advantages and Disadvantages." *DYNA* 79.173 (2012): 66-74.
- [7] Castañeda, Ana María Blanco, et al. "Harmonic Distortion in Public Low-Voltage Grids Comparison of the Situation in Colombia and Germany." *Ingeniería e Investigación* 35.1Sup (2015): 50-57. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1Sup.53286>
- [8] Ortiz, A., et al. "Propagation of Voltage Sags in Industrial Power Networks." *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*. 2010.
- [10] Ortega-Gonzalez, Luis Mauro, Romero-Romero, David, Vasquez-Lopez, Virgilio et al. "Controllers Design Using DC-AC Transformation for Single Phase Inverters Operating in Island Mode". *DYNA Energía y Sostenibilidad*, Enero-Diciembre 2016, vol. 5, no. 1, p.0. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7862>
- [11] Gonzalez-Longatt, Francisco, and Juan Manuel Roldan. "Effects of DC voltage control strategies of voltage response on multi-terminal HVDC following a disturbance." *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*. IEEE, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/UPEC.2012.6398553>
- [12] Huang, Shyh-Jier, and Cheng-Tao Hsieh. "Visualizing time-varying power system harmonics using a Morlet wavelet transform approach." *Electric Power Systems Research* 58.2 (2001): 81-88. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00122-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00122-5)
- [13] Mazdoor Kisan Shakti Sangathan, "Performance Of High-Voltage Direct Current (HVDC) Systems With Line-Commutated Converters", Bureau Of Indian Standards Manak Bhavan, Bahadur Shah Zafar Marg, New Delhi
- [14] Chen, Hairong, Fan Zhang, and Yong Chang. "Improvement of power quality by VSC based multi-terminal HVDC." *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. IEEE, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PES.2006.1709257>
- [15] Zambrano-Aragundy, Xavier, Hernandez, Araceli, Izzeddine, Mohamed et al. "Analysis of the Secondary Protection Effect on Voltage Sags Severity" *DYNA Energía y Sostenibilidad*. Enero-Diciembre 4. (2015):1-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES7546>
- [16] Yang, Jie, et al. "Characteristics and recovery performance of VSC-HVDC DC transmission line fault." *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*. IEEE, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5449063>
- [17] Bucher, Matthias K., et al. "Multiterminal HVDC networks - What is the preferred topology?." *Power Delivery, IEEE Transactions on* 29.1 (2014): 406-413. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2277552>