

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/28249736>

Detección y modificación de fallas en sistemas HVDC usando wavelet

ARTICLE · JANUARY 2008

Source: OAI

READS

34

5 AUTHORS, INCLUDING:



[Gabriel J. López](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

28 PUBLICATIONS 28 CITATIONS

SEE PROFILE



[Jorge W. González](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

29 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

SEE PROFILE



[Andrés Emiro Díez](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

33 PUBLICATIONS 9 CITATIONS

SEE PROFILE



[Idi Isaac](#)

Universidad Pontificia Bolivariana

25 PUBLICATIONS 33 CITATIONS

SEE PROFILE

DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS HVDC USANDO WAVELET

Gabriel J. López^{*†}, Jorge W. González^{*}, Andrés E. Díez^{*}, Idi A. Isaac^{*}, Hugo A. Cardona^{*}

**Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-261, Medellín, Colombia,*

Recibido 12 Abril 2008; aceptado 30 Mayo 2008
Disponible en línea: 27 Junio 2008

Resumen: Este artículo pretende explorar desde el punto de vista del análisis de señales (Transformada de Wavelet), las protecciones aplicadas a los Sistemas HVdc, especialmente para la discriminación, detección y localización de fallas en este tipo de sistemas. Se proponen criterios para la protección de líneas en sistemas HVdc basado en el análisis de Ondas Viajeras mediante “Modulus Maxima”. Se realizan simulaciones con el propósito de corroborar los criterios de protección. La protección es capaz de detectar una falla en la línea de cd y discriminar de otras tales como fracaso en la conmutación y falla en la línea de ca. *Copyright © 2007 UPB.*

Abstract: This paper intends to explore, from the point of view of signals analysis (Wavelet Transform), the protection systems applied to HVdc. Based on the representation of the traveling waves by wavelet Modulus Maxima, the protection criterions for HVdc line are proposed. Simulations are carried out for testing the criterions. The influences of similar faults are discussed. The protection can detect the HVdc line fault well and identify the HVdc line fault clearly from the similar transients, such as commutation failure and ac single phase fault.

Keywords: HVdc, Protective Relaying, Wavelet, Line Fault Identification, Fault Discrimination.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes áreas de investigación que en los últimos tiempos está teniendo un gran auge en cuanto a desarrollo de métodos novedosos y a cantidad de publicaciones en revistas técnicas de impacto internacional, es la relacionada con la localización de las fallas tanto en sistemas de transporte en alta tensión como en sistemas de sub-transmisión y distribución.

En el caso de este trabajo en particular, se va a centrar el análisis en los sistemas HVdc y se debe fundamentalmente a la imperante necesidad de reducir al mínimo el tiempo de indisponibilidad de una línea por culpa de una falla que tal vez no ameritaba el disparo del relé. El crecimiento notorio de la demanda junto con las nuevas estrategias de mercado para el suministro eléctrico en todas sus etapas (generación, transporte, distribución y comercialización), han llevado al sistema de transporte a crecer tanto en

[†] Autor correspondiente. Tel. (+574) 4159015 ext 9586, fax 4118779.
E-mail: gabriel.lopez@upb.edu.co (Gabriel López)

tamaño, como en complejidad y adicionalmente se le exige trabajar cada vez más cerca de los límites críticos de estabilidad.

Todos estos puntos generan dos temas importantes de abarcar: las nuevas exigencias sobre los sistemas de protección en todo su amplio espectro: selectividad, sensibilidad, confiabilidad, rapidez, adaptabilidad, etc., así como la mayor precisión en la localización de las fallas permanentes a fin de reducir los tiempos de reparación y nueva puesta en servicio.

Para poder atacar convenientemente todas estas nuevas condiciones es indispensable el uso adecuado de técnicas modernas de análisis sin desvincularse de los avances en el campo del “hardware” para su efectiva y útil implementación.

Hay dos técnicas que caben mencionar por su aplicación en este campo específico de trabajo:

- Técnicas de Análisis de Señales (Transformada “Wavelets”).
- Técnicas de Inteligencia Artificial (Redes Neuronales).

Solo la primera será tratada en este artículo.

En el campo de las aplicaciones de la Transformada de Wavelet en los Sistemas Eléctricos de Potencia, se ha observado que en el área de las protecciones es donde mas esfuerzos se han realizado para conseguir nuevos medios de discriminación, detección y localización de fallas que sean más rápidas y precisas.

Este trabajo se ha centrado en el diseño de un algoritmo basado en Wavelet para la protección de Fallas de cd, donde la principal ventaja de este algoritmo es la rápida y efectiva detección, discriminación y localización de fallas en una estación HVdc.

2. TRANSFORMADA CONTINUA COMPLEJA DE MORLET

En este trabajo se le ha dado especial atención al uso de la transformada continua compleja, para el análisis de señales a las cuales se les quiere obtener información de sus componentes de alta frecuencia (transitorios y onda viajera).

La transformada continua compleja, funge como un filtro en este caso digital de la señal para obtener su componente fundamental y posteriormente analizarla.

Al aplicar la transformación con la selección adecuada de los parámetros F_b y F_c de la función madre de Morlet. A continuación un ejemplo de la transformada, en la cual se utiliza la ecuación $\varphi(x) = \sqrt{\pi f_b} e^{2\pi i f_c x} \frac{x^2}{f_b}$, donde F_b , es el ancho de banda, y F_c , es la frecuencia central de la función.

Las componentes reales e imaginarias, superpuestas a una señal de referencia, se pueden observar en la Fig. 1. con un ajuste como $F_c = 200$ Hz y $F_b=1$, puede obtenerse una buena representación de las señales con frecuencia fundamental del orden de 50 – 60 Hz.

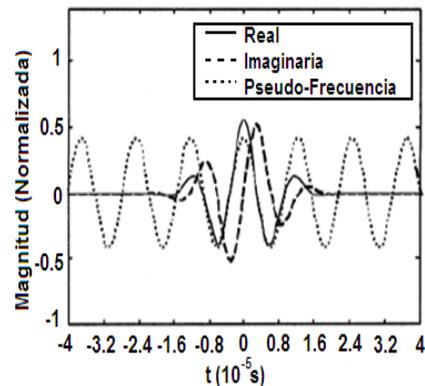


Fig. 1. Wavelet Morlet Compleja, con $F_b= 1.25 \times 10^{-5}$; $F_c= 1$. Tomada de [Shang, L. et al. \(2001\)](#).

La ventaja de trabajar con este tipo de transformaciones es que la función madre (BSpline o C-Morlet – Ver Fig. 2), tienen la propiedad de ser simétricas en frecuencia y biortogonales.

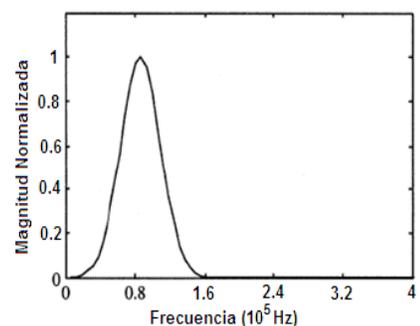


Fig.2. Respuesta en frecuencia de la Wavelet Morlet Compleja. Tomada de [Dong-J. Z. et al. \(2003\)](#).

La conveniencia de utilizar esta función, radica en diversas ventajas que pueden ser numeradas a continuación y que han sido presentadas en ([Tadeusz y Rezmer, 2002](#); [Dong-J. Z. et al., 2003](#); [He et al., 2004](#)).

- Al ser compleja permite calcular de forma sencilla las cantidades fasoriales, con las relaciones entre las componentes reales e imaginarios. $J = (I_{real} + j I_{img})$.
- Es más sensible que el resto de funciones para la detección de singularidades en la señal a analizar y más utilizando lo que se ha denominado una función combinada que no es más que la mezcla de factores determinados en la transformada. Por ejemplo, en el trabajo se va a utilizar como detección de singularidades, la siguiente función combinada $CI = WTR * WTRIPH$, $WTRIPH = |WTR| * |WTI| * WTPH$, $WTPH = \tan^{-1} \left(\frac{WTI}{WTR} \right)$, donde WTR es la componente real de la transformada compleja y WTI es la componente imaginaria de la transformada compleja.

3. SEÑALES DE ALTA FRECUENCIA (ONDA VIAJERA)

Si se tienen las ondas transitorias registradas, puede obtenerse a través del equivalente de tiempos de viaje, la posición del evento que originó un cambio en el medio de propagación (falla). Haciendo un diagrama de Laticce, Ver [Fig. 3](#), se pueden establecer de forma teórica las señales que incidirán sobre los extremos de la línea, así como sus respectivas polaridades (diagrama realizado en base a señales de tensión).

También el efecto de las ondas reflejadas y sus polaridades debe ser estudiado con detalle, para poder diferenciar de forma adecuada a cada uno de dichos eventos.

Para ello, se trabajan con las señales de tensión, ya que las corrientes no dan información útil a este respecto. Adicionalmente, en sistemas trifásicos, es necesario trabajar en el dominio modal, para tener desacoplados los modos aéreos y de tierra, ya que ambos tienen velocidades de propagación distintas ([Johns y Platts, 1996](#)).

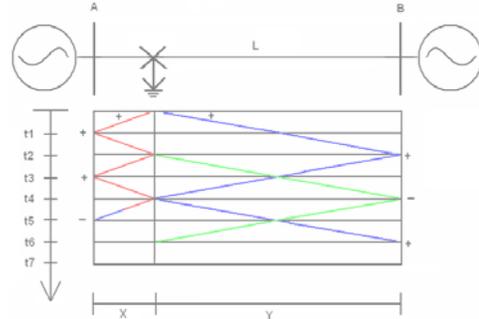


Fig.3. Diagrama de Laticce de un sistema bajo falla.

En función de dicho diagrama, se pueden obtener las ondas incidentes registradas en los nodos A y B, Ver [Fig. 4](#) (representadas por simplificación como funciones impulsivas – tipo delta de dirac).

Con dicha información puede calcularse la distancia a la falta desde el extremo 1 (de medición) (X) o desde el nudo B (Y), en base a las siguientes expresiones $X = \frac{v(t_3 - t_1)}{2}$,

$Y = \frac{v(t_3 - t_1)}{2}$, donde v es la velocidad de propagación de la onda electromagnética y $(t_3 - t_1)$, $(t_6 - t_2)$ son los intervalos de tiempo entre la llegada de dos señales de polaridad positiva.

La precisión de la localización bajo esta premisa depende de la exactitud en el registro de dichos intervalos de tiempo. Esto depende de forma significativa de la frecuencia de muestreo y de la detección precisa de la incidencia de cada señal.

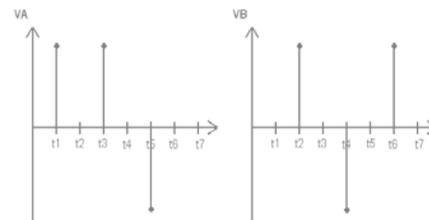


Fig. 4. Esquema reducido de las señales registradas en los nodos A y B (con sus respectivas polaridades).

Una de las formas propuesta en la literatura para resolver este aspecto, se basa en la aplicación de la transformada Wavelet para la obtención de las componentes de alta frecuencia y su posterior

postprocesamiento o limpieza, mediante diversas técnicas como:

- Modulus Maxima (MM).
- Información Combinada (IC).
- Ambos (MM+IC).

Este procedimiento tiene como fuente de error, el retraso real entre la incidencia de la onda y el instante del MM (este puede llegar a ser del orden de 8 μ s ([Wu, et al., 2004](#))).

4. CRITERIO DE PROTECCIÓN DEL RELÉ

Una vez estudiadas las herramientas a utilizar en el algoritmo, se procede con la implementación de los criterios de protección del relé de Onda Viajera basado en transformada de Wavelet ([Shang, L., 2002](#)).

Como primera medida se debe considerar la onda viajera de Tensión inversa como señal de entrada para el relé, debido a que su magnitud es casi cero en condiciones de operación normal y por tanto es mucho más fácil de procesar. Además se tiene un esquema de protección de una terminal puesto que no es requerido tiempo de sincronismo ni comunicaciones como en el caso de las protecciones para dos terminales. A continuación se presenta la ecuación de propagación de una onda viajera $\mu_r = \frac{\mu - Z_c i}{2}$, donde μ_r es la

onda viajera de tensión inversa, μ es la tensión de de cd, i es la corriente de ca, Z_c es la impedancia súbita de la línea de HVdc.

Luego de que ocurre una falla, las ondas viajeras se propagan a lo largo de la línea y generan un cambio abrupto en la onda de Tensión inversa que es medida por el relé de protección. A través del detector de picos de Wavelet ([Shang, L., 2001](#)) y su Modulo Máxima, los cambios súbitos pueden ser detectados y detallados, como se ha explicado anteriormente.

Han sido desarrollados dos criterios para la detección de la falla.

a). Consiste en que la amplitud del primer módulo máxima de Wavelet, denominado $|W_{\max} \mu_r|$, debe ser mayor que el valor establecido K_{Setting} . Esta referencia puede ir desde 100 para sistemas HVdc de 500 kV ([Shang, L., 2002](#)). A continuación se presenta la expresión $|W_{\max} \mu_r| > K_{\text{Setting}}$.

b). El segundo criterio tiene en cuenta la polaridad del primer Modulo Maxima de Wavelet, la cual debe ser negativa para líneas HVdc que operen con polaridad positiva de tensión.

En el caso de la localización de la falla, esta se puede obtener simultáneamente a la detección, usando la ecuación, $L_{MF} = \frac{v \times \Delta t}{2}$, donde L_{MF} es la distancia en km desde la falla hasta el punto de medida, Δt es el tiempo de retardo en segundos y v es la velocidad de la onda viajera en km/s.

Lo que se pretende es determinar según un intervalo de tiempo, a que distancia del punto de referencia se produjo la falla, partiendo, como se mencionó anteriormente, de la polaridad y la magnitud del pico. A continuación se explica el método utilizado para tal propósito:

Este considera que la reflexión desde el punto de falla es diferente que la que se produce desde la terminal de línea, tomando el primer caso como factor de reflexión negativo y el segundo como factor de reflexión positivo. El tiempo de retardo esta determinado por el intervalo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad, teniendo en cuenta que luego del primer negativo el siguiente positivo determina el intervalo.

Para determinar el comportamiento de este método frente a posibles eventos, se tienen aquí presentes varios casos que reúnen las condiciones que se presentan en un sistema real.

Con esto se pretende ver la respuesta de Wavelet ante cualquier caso.

En la [Fig. 5](#) se muestra un esquema resumido del algoritmo implementado para la operación del relé.

5. SIMULACIÓN DIGITAL CASO ESPECÍFICO: INTERCONEXIÓN COLOMBIA-PANAMÁ

La protección de onda viajera se usa preferiblemente para sistemas HVdc porque no tiene tantos problemas como en HVac (la protección puede no operar cuando la falla ocurre durante el cruce por cero de la tensión). Sin embargo, las fallas de conmutación en las estaciones convertoras y las fallas monofásicas de

líneas en el lado de ca son muy similares a las fallas de línea en el lado de cd. Por lo que se tiene que tener como prioritario para la protección de línea en HVdc que las diferentes clases de falla puedan ser identificadas claramente y la correcta acción sea tomada lo más pronto posible.

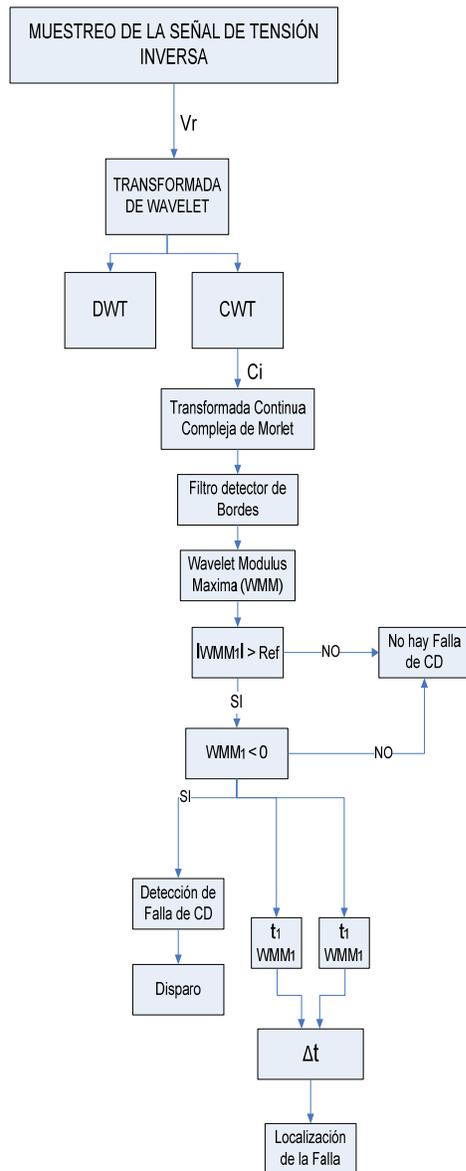


Fig. 5. Diagrama de bloques del algoritmo implementado.

5.1. Descripción del Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico puede desagregarse en tres subsistemas claramente diferenciados: Estación convertidora emisora, línea de transmisión y estación convertidora receptora. (Ver Fig. 6).

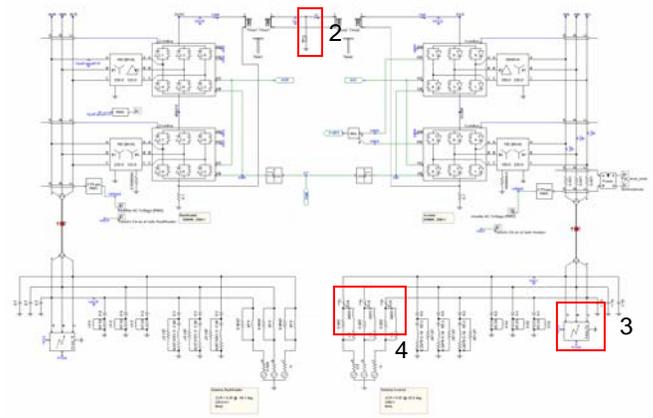


Fig. 6. Sistema Eléctrico general.

Las estaciones convertidoras extremas se encuentran conectadas a sendos equivalentes de Thevenin de redes ca, con igual o diferente frecuencia (igual para este caso en particular), mientras que la línea de transmisión corresponde a una línea aérea.

El extremo emisor se compone de un generador y de una impedancia que representa la tensión y la impedancia de Thevenin vista entre el extremo emisor y el sistema de potencia al que pertenece, igual aplica para el extremo receptor.

La tensión equivalente de la red es 236.25 kV para el extremo emisor y en el receptor es de 215,05 kV, el primero es mayor para asumir un descenso en la tensión en la impedancia equivalente entregando aproximadamente 230 kV al módulo rectificador mientras que el segundo asume una tensión a la salida del rectificador de 230 kV. La frecuencia es de 60 Hz.

La línea de cd mide 574km y la velocidad de la onda se estima en 296112km/s.

Cada extremo tiene dos circuitos de filtrado y un banco de capacitores asociados en derivación. Los filtros se encargan de mitigar los armónicos de ca generados por las unidades convertidoras y en asocio con el banco, suministran la potencia reactiva requerida para la conmutación de las mismas.

Conectados al mismo barraje de ca, se encuentran los primarios de los transformadores convertidores, encargados principalmente de adaptar el nivel de tensión a la tensión de las válvulas, aislar el sistema, mitigar los armónicos de secuencia cero y mediante la conexión

adecuada brindar el desfase para la conexión de los convertidores de seis pulsos en serie para conformar los puentes de 12 pulsos.

En el secundario de los transformadores convertidores se conectan las válvulas convertidoras, que para el caso que nos ocupa son tiristorizadas y activadas por conmutación natural.

Estas válvulas se encargan de controlar la tensión, la corriente y por ende la potencia del enlace cd, mediante la variación de sus ángulos de disparo.

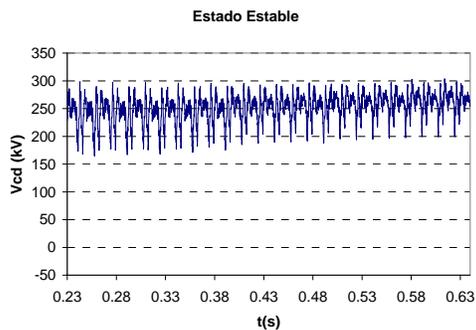
5.2. Transitorios en Sistemas HVdc

Para el análisis de falla en sistemas HVdc, se estudian varios casos que fueron simulados, y que muestran ondas de tensión y corriente de la línea de cd en la terminal del rectificador cuando ocurren diferentes eventos, con el propósito de poder comparar cada uno de los efectos ocasionados a la onda y permitir diferenciar fácilmente entre cada caso en particular.

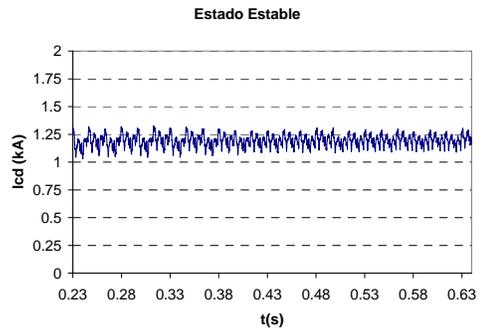
En el sistema descrito anteriormente, Ver [Fig. 6](#), se demarcan claramente los diferentes tipos de fallas a las que es sometido el Sistema HVdc:

- 1- Condiciones de operación normal.
- 2- Corto circuito en línea de HVdc.
- 3- Corto circuito en la línea del lado de ca de la estación inversora.
- 4- Falla de conmutación en la estación inversora.

A continuación se muestran las formas de onda de las fallas anteriormente descritas.

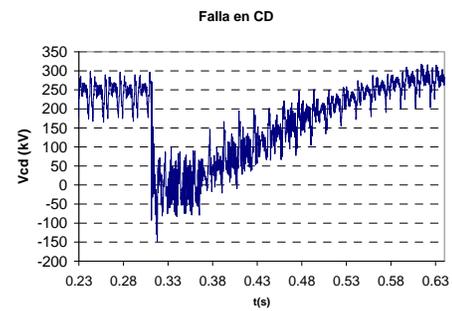


(a)

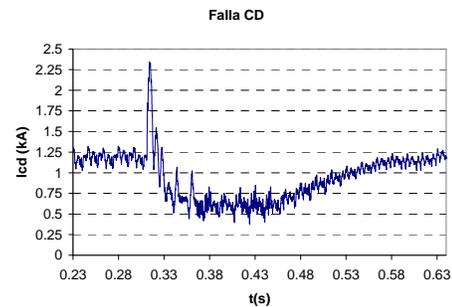


(b)

Fig. 7. Funcionamiento en Operación Normal. (a) Tensión, (b) Corriente.

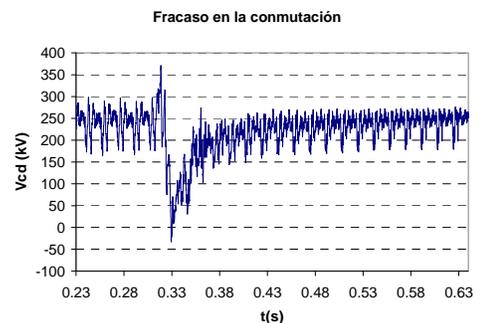


(a)



(b)

Fig. 8. Falla en línea de cd. (a) Tensión, (b) Corriente.



(a)

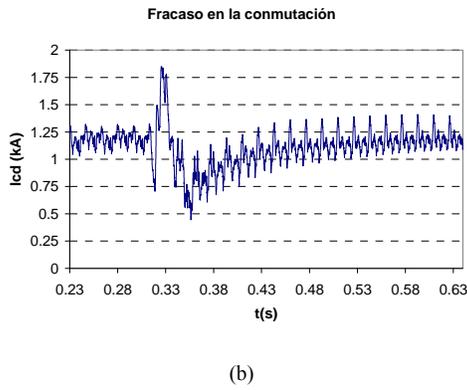


Fig. 9. Fracaso en la conmutación. (a) Tensión, (b) Corriente.

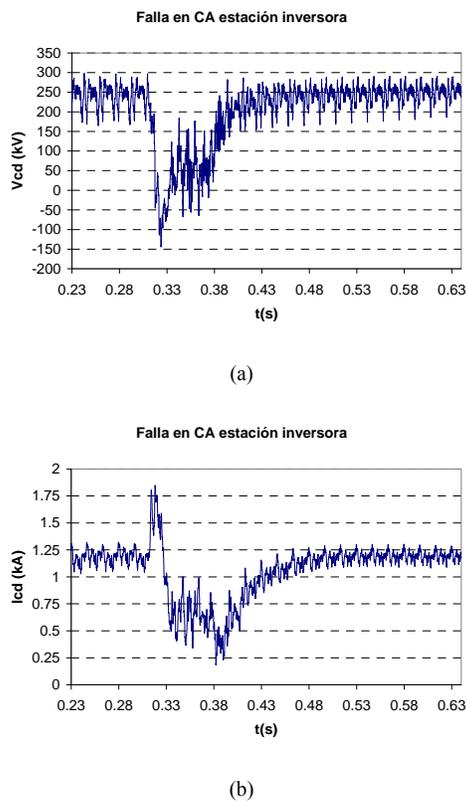


Fig. 10. Falla en el lado de ca de la estación inversora. (a) Tensión, (b) Corriente.

Puede apreciarse que diferentes tipos de falla generan transitorios similares. Usado métodos tradicionales estos transitorios son muy difíciles de diferenciar en un rango de tiempo de 3 a 5 ms. Y aun más difícil si existe ruido.

Para mejorar los sistemas de detección de falla mediante onda viajera se han desarrollado diferentes métodos algorítmicos que facilitan y mejoran el trabajo de las protecciones

tradicionales. Dentro de estos métodos podemos encontrar la transformada de Wavelet que consiste en bloques lógicos que procesan una señal de onda viajera y la convierten en información para los relés de protección del sistema.

6. APLICACIÓN DEL ALGORITMO AL SISTEMA HVdc PROPUESTO

Con el objetivo de dar una idea más amplia del modo de operación del relé, y de sus criterios de protección ya mencionados, se aplicarán las diferentes fallas en el sistema HVdc simulado para el caso específico de la Interconexión Colombia-Panamá (Ver [Fig. 11](#)).

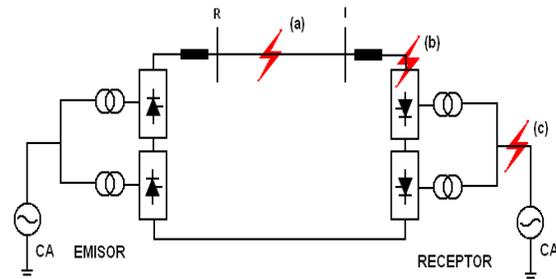


Fig. 11. Ubicación de Fallas. (a) Falla en línea de CD. (b) Fracaso en la conmutación. (c) Falla de ca lado Inversor.

6.1. Respuesta frente a falla de una línea de cd

Con el objetivo de poner a prueba el relé y sus criterios de protección, se simulan fallas en la línea de HVdc a diferentes distancias y con diferentes resistencias de falla.

En la [Fig. 12](#), se aprecia una falla de cd ubicada a 100km de la estación rectificadora y con una resistencia de falla de 0Ω . El primer módulo máxima tiene una magnitud aproximada de 1400, que supera el punto de referencia de 100 además su polaridad es negativa lo que nos indica que una falla ha sido detectada. El intervalo de tiempo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad es de 0.679ms, aplicando la formula $L_{mf} = \frac{v \times \Delta t}{2}$ tenemos que la distancia de la falla hasta la terminal es de 100.678, Ver [Fig. 13](#). Luego la falla fue detectada y localizada correctamente.

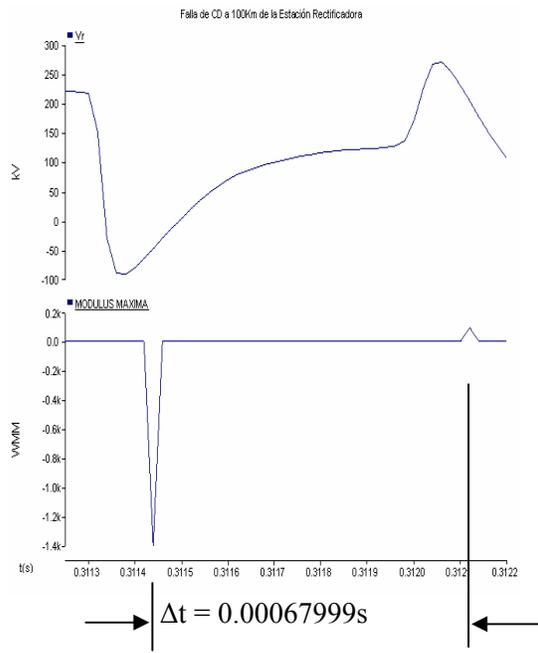


Fig. 12. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 0Ω ubicada a 100km de la estación rectificadora.



Fig. 13. Distancia de falla detectada por el relé.

La [Fig. 14](#), muestra una falla a 100km de la estación rectificadora de 50Ω , en este caso la magnitud del primer módulo máximo es de 800 aproximadamente, superando nuevamente el valor de referencia establecido, además la polaridad de este primer WMM es negativa, indicando que el relé detecto con éxito la falla. El intervalo de tiempo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad es de 0.66ms, indicando según la ecuación que la falla fue detectada a 97.717km de la estación rectificadora, Ver [Fig. 15](#).

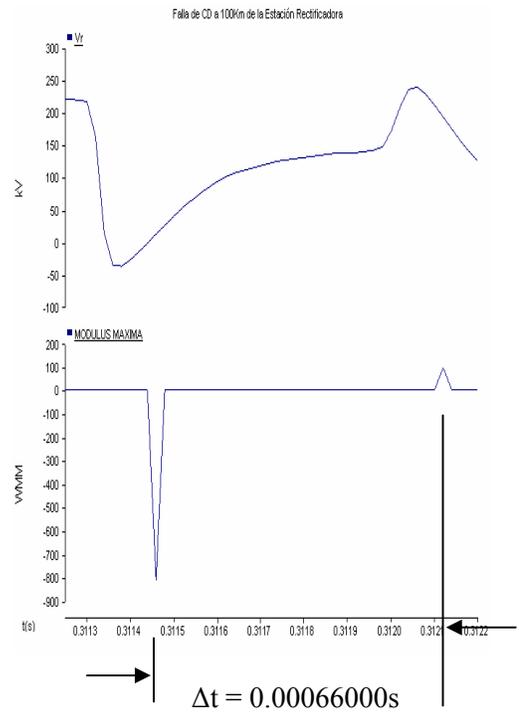


Fig. 14. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 50Ω ubicada a 100km de la estación rectificadora.



Fig. 15. Distancia de falla detectada por el relé.

Para una falla a 200km de la estación rectificadora de 0Ω , la magnitud del primer módulo máximo es de 1100, superando el valor de referencia establecido, además la polaridad de este primer WMM es negativa, indicando que el relé detecto nuevamente con éxito la falla. El intervalo de tiempo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad es de 1.3599 ms, indicando según la ecuación que la falla fue detectada a 201.356km de la estación rectificadora, Ver [Fig. 16](#).

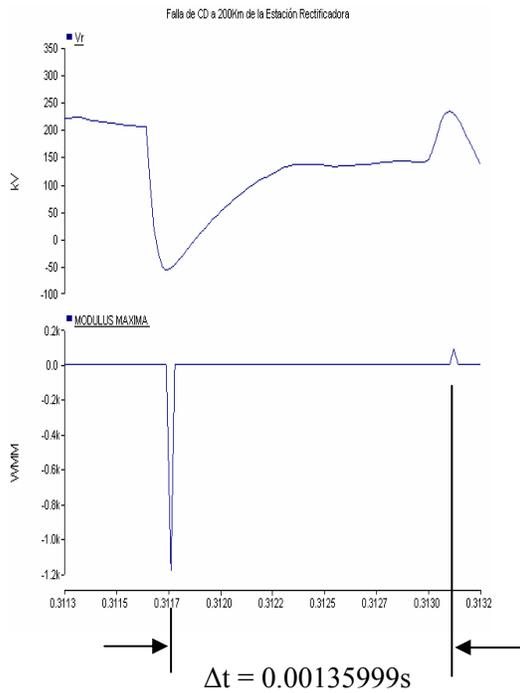


Fig. 16. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 0Ω ubicada a 200km de la estación rectificadora.

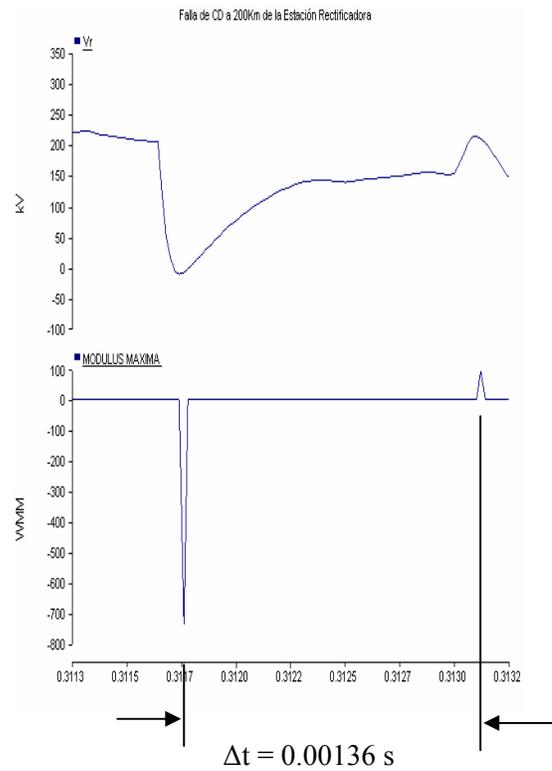


Fig. 18. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 50Ω ubicada a 200km de la estación rectificadora.



Fig. 17. Distancia de falla detectada por el relé.

Para una falla a 200km de la estación rectificadora de 50Ω , la magnitud del primer módulo máximo es de 750 aproximadamente, superando el valor de referencia establecido, además la polaridad de este primer WMM es negativa, indicando que el relé detectó con éxito la falla. El intervalo de tiempo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad es de 1.36 ms, indicando según la ecuación que la falla fue detectada a 201.356km de la estación rectificadora, Ver Fig. 18.

En el quinto caso se tienen una falla a 300km de la estación rectificadora de 0Ω y 50Ω , (ver Fig. 19 y 20 respectivamente), dicha falla supera la mitad de la distancia total de la línea (576km). El primer módulo máxima de wavelet tiene una magnitud de 550 aproximadamente, el cual supera los 100 que se tienen como parámetro y además su polaridad es negativa por lo tanto la falla en el sistema HVdc ha sido detectada. En este caso la onda reflejada desde la terminal R alcanza la terminal I antes de que lo haga la falla reflejada, como se aprecia en la forma de onda de la tensión. El intervalo de tiempo entre los dos primeros módulos máxima con diferente polaridad para la falla de 0Ω es de 2,0599ms y 1,9766 ms para la falla de 50Ω , esto nos indica que la falla ocurrió a 304,995km y a 292,655km (Ver Fig. 21 y 22 respectivamente). Las fallas han sido detectadas y ubicadas correctamente.

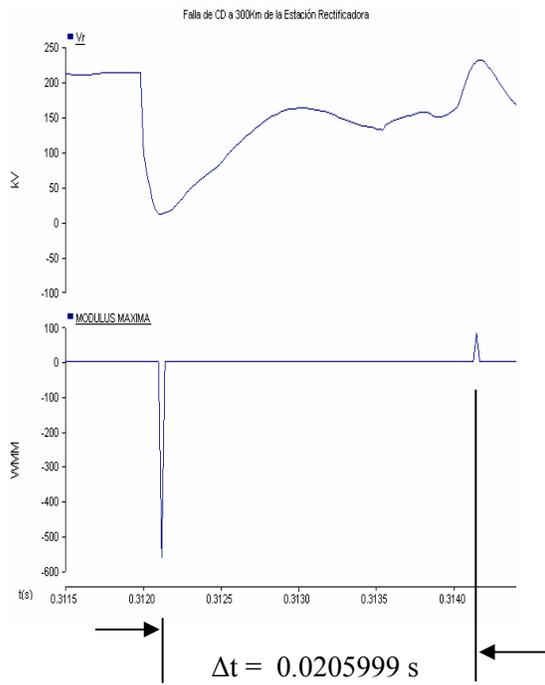


Fig. 19. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 0Ω ubicada a 300km de la estación rectificadora.

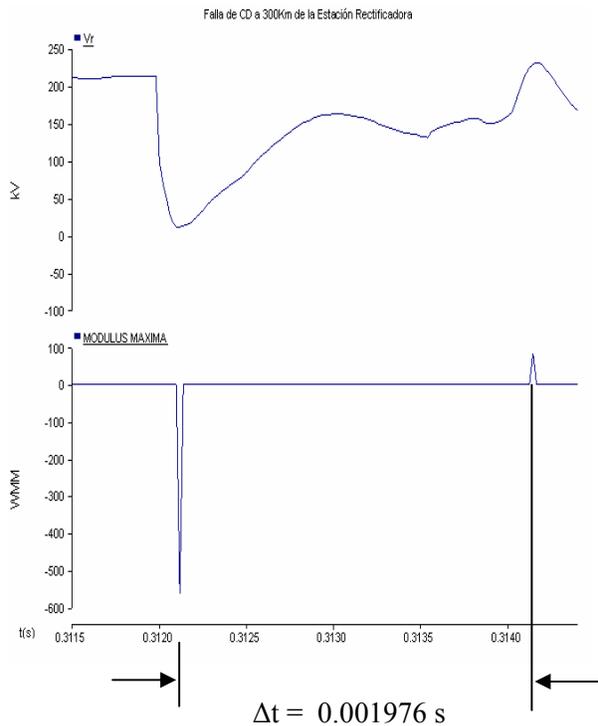


Fig. 20. Respuesta del WMM ante una falla de CD de 50Ω ubicada a 200km de la estación rectificadora.



Fig. 21. Distancia de falla detectada por el relé.



Fig. 22. Distancia de falla detectada por el relé.

6.2. Comportamiento durante falla de conmutación

En el caso de falla de conmutación en la estación inversora, el primer módulo máxima es menor de 10 (Ver Fig. 23) lo que está muy por debajo de 100 que es el patrón de referencia, indicando que falló uno de los criterios de detección de fallas de CD, por lo tanto la operación del relé es nula.

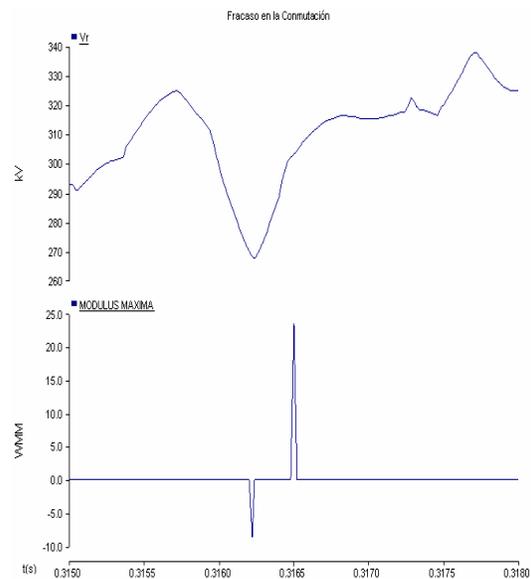


Fig. 23. Respuesta del WMM ante un fracaso en la conmutación de la estación inversora.

6.3. Respuesta ante falla de línea en el lado de ca de la estación inversora

En la [Fig. 24](#) se puede apreciar el efecto que tiene la falla de línea de ca en la estación inversora. Así como en el caso anterior podemos apreciar que la magnitud del primer módulo máxima no supera el valor de referencia que es 100. Por tanto este tipo de falla no genera un evento de operación de las protecciones.

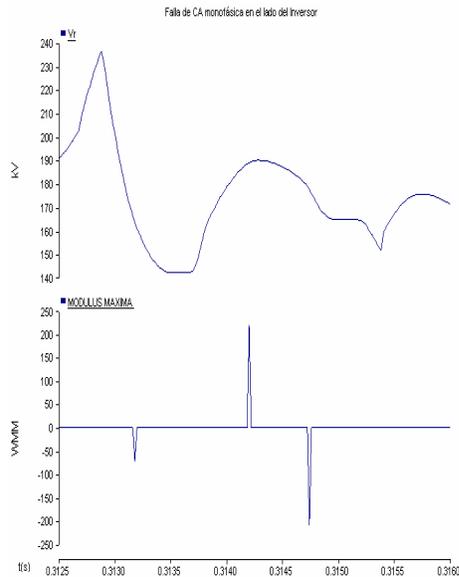


Fig. 24. Respuesta del WMM ante una falla monofásica en estación inversora.

6.4. Respuesta ante Operación Normal

La [Fig. 25](#) muestra la respuesta del WMM ante una condición de operación normal en el sistema HVdc. Se observa que todos los WMM se mantienen por debajo del valor de referencia 100. Por lo tanto no existe ninguna influencia en la operación del relé.

Cuando ocurre una falla en una línea de transmisión, es necesario desconectarla del resto del sistema eléctrico de potencia, función que es realizada por los relés de protección. El principio más utilizado actualmente es el de distancia; en la práctica, los relés de distancia se utilizan en combinación con sistemas de comunicación para mejorar su selectividad en la protección de líneas de transmisión, sin embargo, una de sus principales limitaciones es su velocidad de operación. Para preservar la estabilidad del sistema eléctrico de potencia se requieren tiempos de liberación de fallas muy reducidos, del orden de unos pocos ciclos de frecuencia fundamental.

Esto es particularmente importante en sistemas eléctricos débiles, como los que existen en los países de Latinoamérica. Una alternativa de solución de estas limitaciones del principio de protección de distancia consiste en utilizar las componentes de alta frecuencia de las señales debidas a las ondas viajeras generadas por la falla como información para la función de protección. Esta es la llamada protección de onda viajera.

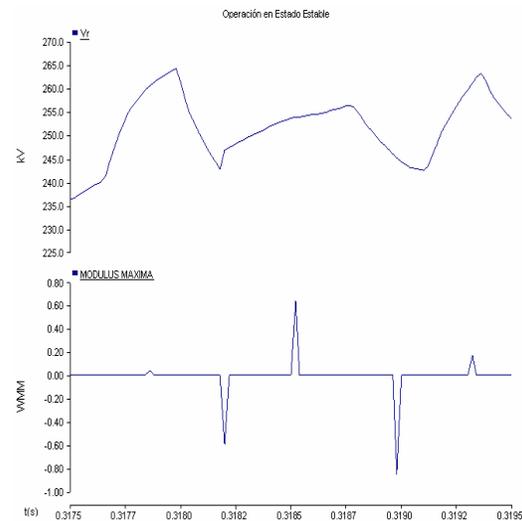


Fig. 25. Respuesta del WMM ante una condición de operación normal.

En la [Fig. 26](#), se observa la interrupción de flujo de potencia debido a una falla en la línea de cd que es detectada efectivamente por el relé de protección implementado. Inmediatamente la falla ha sido detectada, el relé opera entre 3 a 5 ms e interrumpe el flujo de potencia, con el objetivo de aislar la falla y de esta manera evitar que se presente un colapso de tensión inminente.

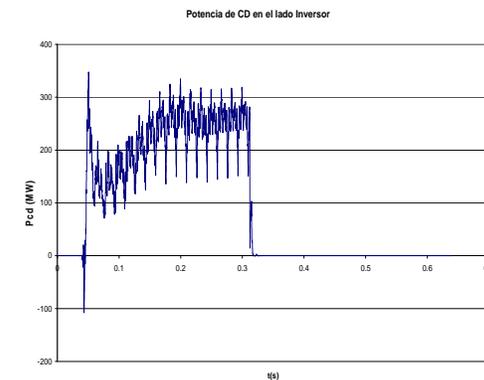


Fig. 26. Flujo de potencia de rectificador a inversor.

7. CONCLUSIONES

La Transformada de Wavelet, se convierte en una herramienta poderosa, tanto para la detección de singularidades en señales y como filtro para extraer bien sean las componentes de alta frecuencia o la componente a frecuencia fundamental, para su posterior procesamiento en técnicas de onda viajera o fasoriales.

Se destaca la importancia que tiene el relé para la operación confiable y segura de un sistema HVdc, debido a su alto poder en la detección y posterior discriminación de eventos, con lo cual se evitan disparos indeseados de las protecciones, que ocasionarían un mal funcionamiento en términos de confiabilidad se refiere.

Se comprueba la efectividad del algoritmo en la discriminación de eventos que generan transitorios similares, gracias al procesamiento detallado de las señales mediante WTMM (Modulus Maxima de la Transformada de Wavelet).

Las sensibilidades realizadas muestran que la protección desarrollada es influenciada fuertemente por la resistencia de falla, especialmente en lo que tiene que ver con la localización exacta de la falla. Lo anterior se puede mejorar ajustando los filtros del detector de singularidades.

Si bien el algoritmo planteado en este trabajo utiliza la información transitoria (onda viajera), tienen la gran desventaja de no detectar o ubicar fallas muy cercanas a la barra de medición, pues ocurre una superposición de las componentes de los distintos rebotes.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen las contribuciones realizadas por todos los miembros del Grupo TyD de la UPB.

REFERENCIAS

Ainsworth J.D., A. Gavrilovic, and H.L. Thanawala. (1980). Static and synchronous compensators for HVdc transmission convertors connected to weak AC systems. *28th Session CIGRE, 1980, Paper 31-01.*

Dong-J. Z; Wu, Q.H.; Bo, Z.Q.; Caunce, B (2003). Transient positional protection of transmission lines using complex wavelets analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery* **Volume:** 18, Issue: 3. p 705-710.

He, H.; Cheng, S.; Zhang, Y.; Nguimbis, J. (2004). Analysis of Reflection of Signal Transmitted in Low-Voltage Powerline With Complex Wavelet. *IEEE Transactions on Power Delivery* **Volume:** 19, Issue: 1. p 86-91.

Johns A.T. y Platts J.R. Digital Protection for Power Systems. (1996). *IEE Power No 15.*

Shang, L. Herold, G. G, Jaeger, J., Krebs, R. and Kumar, A (2001). High-Speed Fault Identification and Protection for HVdc Line Using Wavelet Techniques. *Proceeding of IEEE PPT*, Porto.

Shang. L. Wavelet Transform Applications in Power Systems. Erlangen, (2002). 179p. Trabajo de Grado (PhD). *The Faculty of Engineering Sciences of the Friedrich-Alexandre University of Erlangen-Nuremberg.*

Tadeusz L, J. Rezmer. (2002). Wavelet Transforms for real time estimation of trasmission line impedance under transient conditions. *Electrical Engineering* **84** 63-70. Springer - Verlag 2002.

Wu, Q.H.; Zhang, J.F.; Zhang, D.J. (2003). Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Power Delivery*. **Volume:** 18, Issue: 4. p 1127-1133.

SOBRE LOS AUTORES

Gabriel J. López

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. gabriel.lopez@upb.edu.co

Jorge W. González

Ingeniero Electricista, PhD. Es profesor de tiempo completo de UPB y miembro del Grupo TyD de la misma universidad. jorgew.gonzalez@upb.edu.co

Andres E. Díez

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. ediez@geo.net.co

Idi A. Isaac

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. idi.isaac@upb.edu.co

Hugo A. Cardona

Ingeniero Electricista y MSc de la UPB. Actualmente realiza sus estudios de Doctorado. Es profesor de tiempo completo de la UPB. Es miembro del Grupo TyD de la misma universidad. hugo.cardona@upb.edu.co