

Artículo de investigación

Estrategia de rechazo de carga basada en un método simple para mitigar la recuperación retardada de la tensión inducida por falla

Load shedding strategy based on a simple method to mitigate fault-induced delayed voltage recovery

Gustavo Araujo Suárez^a, Carmen Vásquez Stanescu^a^aUniversidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Barquisimeto, Venezuela.DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6841734>

Recibido: 25-05-2022

Aceptado: 12-07-2022

Resumen

La FIDVR representa una importante amenaza para la operación segura y confiable de los sistemas eléctricos de potencia con carga dominada por motores de inducción. En este trabajo se propone una estrategia de rechazo de carga basada en el tiempo de recuperación crítico (CRT) de la tensión para mitigar la FIDVR. El CRT permite identificar las barras más efectivas principalmente responsables de la FIDVR, mientras que la desviación del CRT determina la cantidad de carga a desconectar en cada barra efectiva según la severidad de la FIDVR. Los resultados obtenidos mediante la simulación de la estrategia en el DPL de Power Factory DigSilent en el sistema 39 Bus New England demostraron que es capaz de identificar la ubicación y la cantidad de carga más efectiva para mitigar la FIDVR. Comparado con el esquema convencional UVLS la estrategia propuesta logra una recuperación rápida de la tensión y requiere de una menor cantidad de carga a desconectar. Se concluye que la estrategia de rechazo de carga propuesta responde adaptivamente a la severidad de la FIDVR para desconectar la mínima cantidad de carga con la finalidad de mejorar la estabilidad de tensión de corto plazo.

Palabras clave: FIDVR, rechazo de carga, inestabilidad de tensión de corto plazo, motor de inducción.

Código UNESCO: 3306.09 - Ingeniería y tecnología eléctricas, transmisión y distribución.

Abstract

FIDVR represents a major threat to the safe and reliable operation of electrical power systems with load dominated induction motors. In this paper, a load shedding strategy based on the critical recovery time (CRT) of voltage is proposed to mitigate FIDVR. The CRT allows to identify the most effective load mainly responsible for the FIDVR, while the CRT deviation determines the amount of load to be disconnected in each effective bus according to the severity of the FIDVR. The results obtained by simulating the strategy in the Power Factory DigSilent DPL on the 39 Bus New England system showed that it is capable of identifying the most effective location and amount of load to mitigate FIDVR. Compared with the conventional UVLS scheme, the proposed strategy achieves a fast voltage recovery and requires a smaller amount of load to be disconnected. It is concluded that the proposed load shedding strategy responds adaptively to the severity of the FIDVR to disconnect the minimum amount of load in order to improve short-term voltage stability.

Keywords: FIDVR, load shedding, short term voltage instability, induction motor.

UNESCO Code: 3306.09 - Electrical engineering and technology, transmission and distribution.

PUBLICACIONES EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA, revista científica de publicación continua, dos números al año, editada en la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA) en la ciudad de Barquisimeto, Venezuela, bajo la Licencia CC BY-NC-SA. ISSN:1856-8890, EISSN:2477-9660. Depósitos legales: pp200702LA2730, ppi201402LA4590.

***Autor de correspondencia.**

Gustavo Araujo Suárez*. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5356-6011>. Correo: garaujo@unexpo.edu.ve. Ingeniero Electricista. Magister en Ingeniería Eléctrica. Candidato a Doctor en el Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Barquisimeto, Venezuela.

Carmen Luisa Vásquez Stanescu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-3470>. Correo: cvasquez@unexpo.edu.ve. Ingeniero Electricista. Magister en Ingeniería Eléctrica. Doctora en Ciencias Técnicas.

1. Introducción

A partir de la década pasada la recuperación retardada de la tensión inducida por falla (FIDVR, en sus siglas en inglés) está ocurriendo con mayor frecuencia hasta el punto que hoy día se considera como una importante amenaza que pone en riesgo la estabilidad y la operación segura y confiable de los sistemas eléctricos. La razón de ello es la alta concentración de motores de inducción en los actuales sistemas eléctricos de potencia debido al creciente uso de unidades de aire acondicionado, sobre todo en la temporada de mayor calor [1]. Algunos incidentes recientes relacionados con la FIDVR han sido documentados en la literatura científica [2], [3].

La FIDVR se define como un fenómeno en el cual la tensión del sistema eléctrico de potencia cae y permanece en niveles reducidos durante varios segundos después del despeje de una falla ocurrida en el sistema de transmisión o distribución [4]. Los motores de inducción de torque constante y baja inercia, correspondiente a los compresores de las unidades de aire acondicionado, en respuesta a esta caída de tensión disminuyen su velocidad y se bloquean. Bajo esta condición de rotor bloqueado estos motores demandan un alto consumo de potencia reactiva, lo que agrava aún más la disminución de la tensión iniciada por la falla y retardando su recuperación al valor normal [5].

Este proceso de recuperación retardada de la tensión debida al bloqueo de los motores de inducción, corresponde al caso más típico de problemas relacionados con la estabilidad de tensión de corto plazo [6]. Eventos severos de FIDVR pueden extenderse a regiones cercanas y conllevar a una inestabilidad de la tensión o a un colapso rápido de la misma e inclusive a un apagón de una importante área del sistema eléctrico. Dejando tras de sí pérdidas contables en el sector industrial y comercial, en las empresas eléctricas por un servicio no prestado, e incomodidad y molestias en el sector residencial.

La solución más popular que ha sido propuesta desde el lado de la demanda de la energía eléctrica como medida de mitigación para hacer frente a la FIDVR y reducir su impacto, es el esquema convencional de rechazo de carga por tensión (UVLS, en sus siglas en inglés) por ser una medida económica. Consiste básicamente en desconectar un valor predeterminado de carga cuando la tensión del sistema eléctrico permanece por debajo de un nivel específico para un tiempo predeterminado [7]. No obstante, estos esquema aún no han sido del todo eficientes para desconectar la mínima cantidad de carga para mitigar la FIDVR.

En la literatura científica se han propuesto varias estrategias de rechazo de carga como alternativa de solución a los esquemas convencionales UVLS para mitigar la FIDVR. La tendencia en el diseño y funcionalidad de estas nuevas estrategias es determinar la activación de la estrategia de rechazo de carga con base a la evolución de la recuperación retardada de la tensión y desconectar en la barra de carga más efectiva, bajo un esquema de operación centralizado, la mínima cantidad de carga según la severidad de la FIDVR [8].

En [9], se utiliza la desviación de la energía cinética del motor equivalente para identificar la barra más efectiva y desconectar la carga de acuerdo a la severidad de la FIDVR. Similarmente, los autores en [10] usan la desviación de la velocidad del motor con relación a la velocidad crítica para identificar las barras más efectivas y desconectar en esas ubicaciones un valor preestablecido de carga. Por su parte, en [11] la relación entre el torque electromagnético del motor equivalente y el troque mecánico se usa para formular un índice de estabilidad que activa el rechazo de carga cuando el valor de este índice decae por debajo de un umbral por más de 10 ciclos. El tiempo estimado de recuperación de la velocidad del motor equivalente también se ha usado como señal de activación para desconectar la carga [12]. Mientras que estas estrategias de rechazo de carga responden de acuerdo a la severidad de la FIDVR, su formulación es compleja y dependen de la modelación detallada de la dinámica del motor de inducción. Además, requieren de un gran esfuerzo y tratamiento matemático.

En este trabajo se propone una estrategia de rechazo de carga con una formulación simple basada en el tiempo de recuperación crítico de la tensión. El valor más alto del tiempo de recuperación crítico permite identificar la barra de carga más efectiva, principalmente responsable de la FIDVR. Mientras que la cantidad de carga desconectada en cada ubicación se determina como un porcentaje de la desviación del tiempo de recuperación crítico de acuerdo a la severidad de la FIDVR. Con la estrategia propuesta se logra desconectar una cantidad de carga menor que la desconectada usando el esquema convencional UVLS de cuatro etapas para mitigar la FIDVR.

2. Desarrollo

2.1. Metodología

En el presente trabajo de investigación se propone una estrategia de rechazo de carga basada en el tiempo de recuperación crítico de la tensión (CRTLS) como una solución alterna mejorada del esquema convencional UVLS para mitigar los

problemas de estabilidad de tensión de corto plazo específicamente relacionado con la FIDVR.

Mediante la herramienta de análisis transitorio de Power Factory DigSilent y el método de simulación en el dominio del tiempo se obtiene la tensión postfalla en las barras de carga del sistema 39 Bus New England para una condición de operación y de falla. A partir de la tensión postfalla se determina el CRT de la tensión y su desviación con relación al valor del criterio de recuperación de tensión transitoria para sistemas de transmisión. El valor más alto del CRT de la tensión se usa para identificar las barras de carga más efectivas para el rechazo de carga y calcular la cantidad de carga total a desconectar en cada etapa de la estrategia. Mientras que la desviación del CRT de la tensión se utiliza para determinar la cantidad de carga a desconectar en cada barra para cada una de las etapas de la estrategia de rechazo de carga.

2.2. Criterio de recuperación de tensión transitoria

Después del despeje exitoso de una falla ocurrida en el sistema de transmisión, la tensión del sistema sigue una trayectoria transitoria de recuperación a medida que se recuperan las condiciones de estado estacionario, como se muestra en la Figura 1. Por lo tanto, es necesario contar con un criterio que permite evaluar esta recuperación transitoria de la tensión. Un criterio de recuperación de tensión transitoria (TVRC, en sus siglas en inglés) es un conjunto de medidas exigidas para limitar la respuesta transitoria de la caída de tensión que resulta después de ocurrir una falla en el sistema eléctrico. Existen varios criterios propuestos por la industria eléctrica, entidades regionales o países, los cuales son aplicados de acuerdo a la adecuación y seguridad del sistema eléctrico de potencia donde se requiera su aplicación [13].

El TVRC para sistemas de transmisión propuesto en el estándar de planificación del sistema interconectado PJM de Estados Unidos [14], indica que para contingencias del tipo N-1 se espera que la recuperación de la tensión transitoria posterior al despeje de la falla cumpla con los siguientes criterios, ilustrados en la Figura 1.

- La magnitud de la tensión posterior al despeje de la falla no debe ser inferior al 70 por ciento de su valor nominal.
- Dentro de los 20 ciclos (0,33 s para 60 Hz) posterior al despeje de la falla, la magnitud de la tensión no debe ser inferior al 80 por ciento de su valor nominal.
- Dentro de los 0,5 s posterior al despeje de la falla, la magnitud de la tensión no debe ser inferior al 90 por ciento de su valor nominal.
- Dentro de los 1,5 s posterior al despeje de la falla, la magnitud de la tensión no debe ser inferior al valor mínimo en estado estacionario, típicamente 92-95 por ciento del valor nominal.

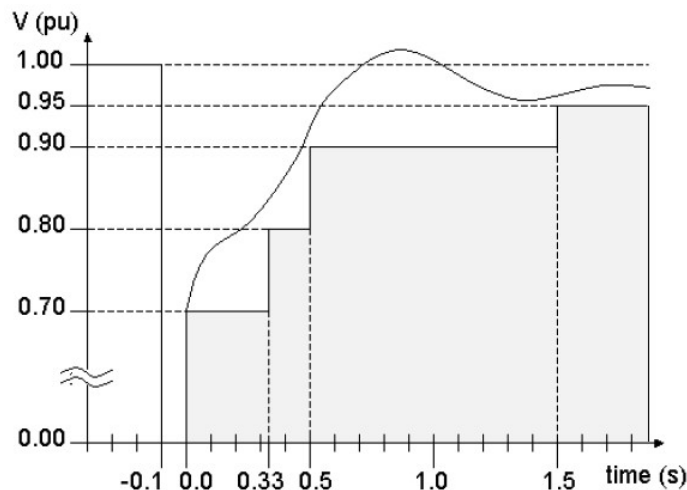


Figura 1: TVRC para el sistema interconectado PJM. Fuente [14]

En este trabajo se adoptó el TVRC para sistemas de transmisión, propuesto en el estándar de planificación del sistema interconectado PJM, para evaluar la recuperación de la tensión después del despeje exitoso de una falla.

2.3. Estrategia de rechazo de carga propuesta

Varias estrategias de rechazo de carga para mitigar la FIDVR se han publicado en la literatura científica durante la década pasada [8]. Cualquiera que sea su criterio de diseño y funcionalidad, el momento de activación, la ubicación y la cantidad de carga a desconectar son los factores críticos que están presentes en todas las estrategias de rechazo de carga y determinan su efectividad en la mitigación de la FIDVR [15].

Para determinar la ubicación y cantidad de carga a desconectar, la estrategia de rechazo de carga propuesta aplica el CRT de la tensión, definido como el tiempo necesario para que la tensión en cada barra de carga se recupere a un valor preestablecido (0,8 p.u.) [9]. El CRT de la tensión lleva consigo información relacionada con la severidad de un evento de FIDVR. Un valor pequeño del CRT significa una recuperación rápida de la tensión. Mientras que un valor alto del CRT corresponde a una recuperación lenta o retardada de la tensión. Por lo tanto, el valor más alto del CRT se puede utilizar para identificar la barra de carga más efectiva principalmente responsable de la FIDVR y desconectar en esta ubicación la carga necesaria para lograr una recuperación rápida de la tensión.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de la estrategia de rechazo de carga propuesta para mitigar la FIDVR.

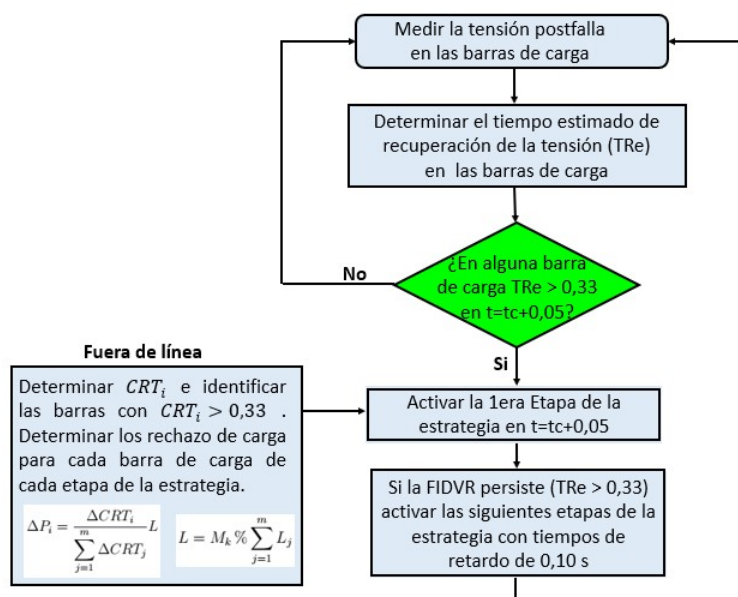


Figura 2: Funcionamiento de la estrategia de rechazo de carga propuesta

Primero, en un ambiente fuera de línea se determina las barras de carga más efectiva principalmente responsable de la FIDVR, la carga total de rechazo para cada etapa y la cantidad de carga a desconectar en cada barra de carga. Para ello, a partir de una condición de operación y de falla se determina con ayuda de una herramienta de análisis transitorio el CRT de la tensión postfalla en las barras de carga del sistema eléctrico mediante la simulación en el dominio del tiempo. Las barras de carga más efectivas se identifican como aquellas cuyo CRT excede el valor de 0,33 s (20 ciclos para 60 Hz), correspondiente al criterio TVRC para $V_{set}=0,8$ por unidad (ver Figura 1).

La carga total de rechazo L para cada etapa de la estrategia CRTLS se determina como un porcentaje M_k % de la sumatoria de la potencia de carga de aquellas barras de carga con $CRT > 0,33$. Mientras que la cantidad de carga desconectada ΔP_i en cada barra de carga más efectiva, para cada etapa, se determina como un porcentaje de la desviación del CRT de acuerdo a la severidad de la FIDVR dado por (2.1).

$$\Delta P_i = \frac{\Delta CRT_i}{\sum_{j=1}^m \Delta CRT_j} L \quad L = M_k \% \sum_{j=1}^m L_j \quad \Delta CRT_i = CRT_i - 0,33 \quad (2.1)$$

donde ΔCRT_i es la desviación del CRT en la barra de carga más efectiva i , m es el número de barras de carga más efectiva con $CRT > 0,33$ y L_i es la potencia total en la barra de carga más efectiva i con $CRT > 0,33$.

Luego, la estrategia CRTLS propuesta se modela en el lenguaje de programación de DigSilent (DPL, en sus siglas en inglés) y se incorpora en el sistema eléctrico. La primera etapa de la estrategia se activa en $t = t_c + T_k$ (t_c es el tiempo de despeje de la falla y $T_k = 0,05$ s), cuando el tiempo estimado de recuperación de la tensión (TR_e) en cualquiera de las barras de carga más efectiva supere el valor de 0,33 s. Si la FIDVR persiste, es decir, si $TR_e > 0,33$, las siguientes etapas se activan en $t = t_c + T_k$ con tiempos de retardo de 0,10 s ($T_k = 0,15$ s ; 0,25 s ; 0,35 s).

El tiempo estimado de recuperación de la tensión, propuesto en [16], se obtiene por aproximación lineal con (2.2) y, además, se utiliza como señal de activación de la estrategia CRTLS.

$$TR_e = T + \frac{(V_{set} - V_T) \cdot \Delta T}{V_T - V_{T-\Delta T}} \quad (2.2)$$

donde TR_e , T y ΔT son el tiempo estimado de recuperación de la tensión, tiempo actual y el intervalo de tiempo, respectivamente; V_T y $V_{T-\Delta T}$ son las tensiones en T y $T - \Delta T$, respectivamente y, finalmente, $V_{set} = 0,8$ p.u. corresponde al valor umbral definido por TVRC (ver Figura 1). Cuando el TRe resulta mayor al tiempo definido por el TVRC (0,33 s o 20 ciclos para 60 Hz) se detecta de manera predictiva la ocurrencia de un evento FIDVR y se activa la estrategia de rechazo de carga.

2.4. Descripción del sistema New England

La estrategia de rechazo de carga propuesta se aplicó al sistema 39 Bus New England para verificar su efectividad y validación comparándola con el esquema convencional UVLS. Este sistema está conformado por 39 barras que incluye 19 barras de carga, 10 generadores, 34 líneas y 12 transformadores. La carga total del sistema es de 6097 MW y 1409 MVar. Los datos para este sistema de prueba se encuentra en [17]. La Figura 3 muestra el diagrama unifilar del sistema 39 Bus New England.

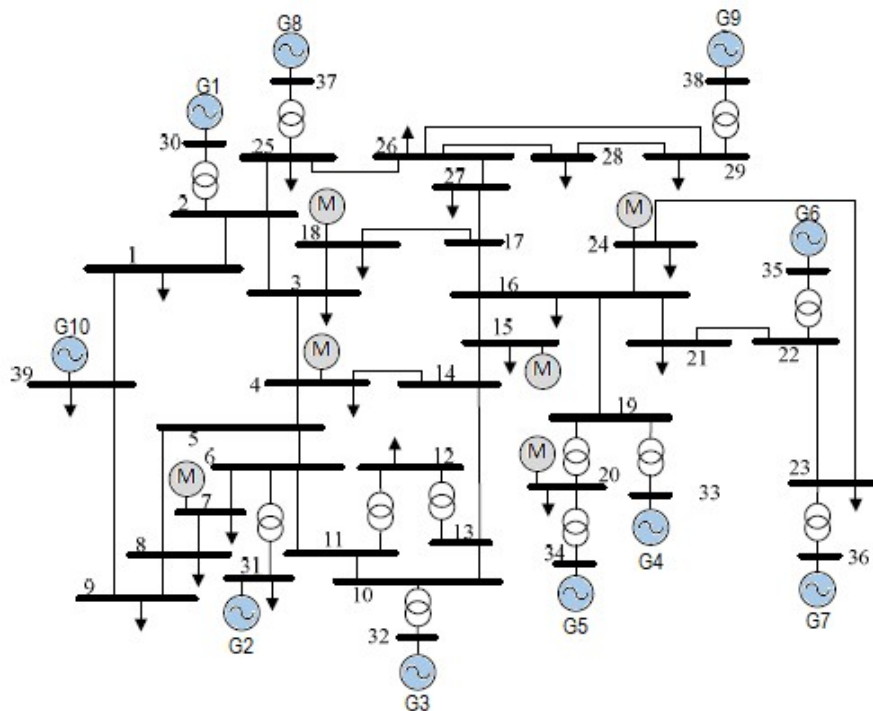


Figura 3: Diagrama unifilar sistema de prueba 39 Bus New England

Para las barras de carga 4, 7, 15, 18, 20 y 24 se adoptó el modelo de carga compuesto que incluye un modelo de carga ZIP para la parte estática y dos modelos de motor de inducción, Motor I y Motor II, para la parte dinámica. En el modelo de carga ZIP, la potencia activa se modela como corriente constante y la potencia reactiva como impedancia constante. El Motor I representa el motor de las unidades de aire acondicionado residencial, mientras que el Motor II representa un agregado de motores pequeños residenciales e industriales. Cada motor tiene una potencia nominal de 20

MW y sus parámetros se muestra en el Cuadro 1. El modelo de carga compuesta se conecta a la barra de transmisión a través de un transformador con $Z= 7\%$ y, además, un banco de condensadores se conecta al lado de baja tensión para garantizar en la barra de carga un nivel de tensión cercano a 1,0 por unidad. El resto de las barras de carga se consideran con el modelo de carga estática ZIP.

Cuadro 1: Parámetros del modelo del motor (en p.u.)

	Rs	Xs	Xm	Rr1	Xr1	Rr2	Xr2	H
Motor I	0,025	0,08	5,0	0,028	0,04	0,07	0,03	0,28
Motor II	0,035	0,094	2,8	0,048	0,163	-	-	0,93

Fuente [18], [19]

Se crearon tres condiciones de operación previa a la falla, con diferente composición de motores en las barras de carga 4, 7, 15, 18, 20 y 24, para analizar el funcionamiento de la estrategia de rechazo de carga. Estas condiciones de operación se identifican como Caso 1, Caso 2 y Caso 3, y se describen en el Cuadro 2.

Cuadro 2: Condiciones de operación previa a la falla

Barra/ Po(MW)	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Modelo
	Estática (MW)	Motor (MW)	Motor %	Estática (MW)	Motor (MW)	Motor %	Estática (MW)	Motor (MW)	Motor %	
4/500	200	300	60	200	300	60	300	200	40	Motor II
7/234	94	140	60	114	120	51	154	80	34	Motor II
15/320	120	200	63	220	100	31	80	240	75	Motor I
18/158	58	100	63	98	60	38	78	80	51	Motor I
20/628	248	380	61	368	260	41	468	160	26	Motor I
24/309	129	180	58	69	240	78	109	200	65	Motor II

Además, se consideraron tres tipos de fallas: falla trifásica en la línea 16-17 cercana a la barra 16, falla trifásica en la barra 4 y falla trifásica en la barra 21, identificadas como Falla 1, Falla 2 y Falla 3, respectivamente. Todas aplicadas en $t= 0,1$ s y ninguna implica la pérdida de un elemento del sistema. En el Cuadro 3 se describen las condiciones de estas fallas, ubicación, tiempo de despeje de la falla (t_c) y duración.

Cuadro 3: Condiciones de la falla

	Ubicación	t_c (s)	Duración (ms)
Falla 1	Línea 16-17	0,20	100
Falla 2	Barra 4	0,26	160
Falla 3	Barra 21	0,26	160

2.5. Resultados de la simulación y análisis

La Figura 4 muestra la recuperación de la tensión en las barras de carga 4, 7, 15, 18, 20 y 24 para el caso 1 con la falla 1. Como se muestra en la Figura 4, el CRT para que la tensión se recupere a un valor de 0,8 p.u. sin aplicar rechazo de carga es 0,962 s, y se debe a la recuperación lenta de la tensión en la barra de carga 7. Este valor excede el valor umbral de 0,33 s correspondiente al TVRC para sistemas de transmisión. En consecuencia, se está en presencia de un evento FIDVR.

El Cuadro 4 muestra los CRT de la tensión obtenidos mediante la simulación en el dominio del tiempo al aplicar el rechazo total de la carga en cada barra de carga del sistema en $t=0,35$ s para el caso 1 con la falla 1.

Cuadro 4: CRT con rechazo de carga en varias barras para el caso 1 con la falla 1

Barra	3	4	7	8	12	15	16	18	21
CRT(s)	0,902	0,300	0,602	0,552	0,842	0,520	0,992	0,850	0,912
Barra	23	24	25	26	27	28	31	39	4 & 15
CRT(s)	1,052	0,600	0,892	0,962	0,872	1,022	0,962	0,512	0,200

Como se observa en el Cuadro 4, los valores más pequeños del CRT de la tensión corresponden mayormente a las barras de carga 4, 7, 15, 18 y 24. El valor más pequeño de 0,3 s ocurre para la barra 4 con carga motora. Para el rechazo total de la carga en esta barra la recuperación de la tensión es rápida y cumple el criterio TVRC. Sin embargo, el segundo valor más pequeño del CRT ocurre para la barra de carga 39 (sin carga motora), esto se debe a que en esta barra se desconecta mucho más carga (1104 MW) que en las barras con carga motora 4 y 15, 500 MW y 320 MW, respectivamente.

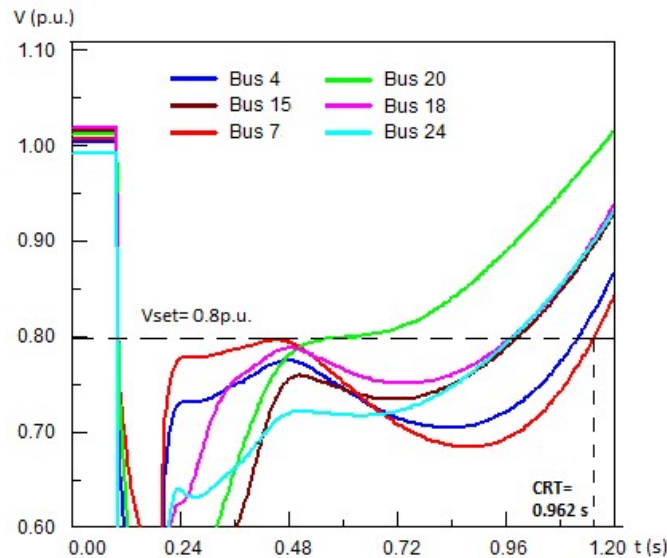


Figura 4: Recuperación de la tensión para el Caso 1 Falla 1

Ahora bien, como se aprecia en el Cuadro 4, si se aplica un rechazo de carga simultáneo en las dos barras de carga con el CRT más pequeño, barras de carga 4 y 15, con 500 MW y 320 MW, respectivamente, se obtiene un CRT de 0,20 s, menor al CRT que se obtiene con un rechazo de carga de 1104 MW en la barra 39. Resulta claro, que con menos cantidad de rechazo de carga aplicado a las barras de carga 4 y 15 se consigue una recuperación más rápida de la tensión y, además, pudiendo recuperarse la tensión dentro de los 0,33 s especificado por el criterio TVRC. Esto demuestra que el CRT de la tensión identifica apropiadamente las barras de carga con carga motora como las barras de carga más efectivas para el mejoramiento de la recuperación retardada de la tensión.

El Cuadro 5 muestra los resultados de la recuperación de la tensión con respecto al CRT al aplicar el rechazo total de carga en cada barra de carga del sistema en $t=0,41$ s para el caso 2 con la falla 3.

Cuadro 5: CRT con rechazo de carga en varias barras para el caso 2 con la falla 3

Barra	3	4	7	8	12	15	16	18	20	21
CRT(s)	0,542	0,330	0,500	0,452	0,592	0,450	0,582	0,550	1,030	0,552
Barra	23	24	25	26	27	28	29	31	39	
TRC(s)	0,632	0,142	0,562	0,592	0,532	0,612	0,662	0,612	0,452	

El ordenamiento de las barras de carga usando los diez valores más pequeños del CRT es **24<4<15<8<39<7<27<3<18<21**. De nuevo los valores más pequeños del CRT se reflejan mayormente en las barras con carga motora. En este caso el valor más pequeño de 0,142 s corresponde a la barra de carga 24, y los dos siguientes a la barra de carga 4 y 15. Por lo tanto, las barras con carga motora corresponden a la ubicaciones más efectivas para realizar las acciones de control de un esquema de rechazo de carga con la intención de mitigar la FIDVR y, además, el CRT de la tensión es capaz de identificar apropiadamente estas ubicaciones principalmente responsables de la FIDVR.

En el Cuadro 6 se muestra los CRT de tensión para las barras con carga motora 4, 7, 15, 18, 20 y 24 para el caso 1 con la falla 1. Como se puede apreciar en el Cuadro 6, en todas las barras ocurre el fenómeno FIDVR al exceder el CRT el valor del criterio TVRC de 0,33 s. Para mitigarlo, se implementa la estrategia CRTLS y luego se lo compara con el esquema convencional UVLS. El esquema convencional UVLS de cuatro etapas se adoptó de la siguiente manera: la

etapa 1 desconecta hasta el 15 por ciento de la carga total en 0.05 s posterior al despeje de la falla, la etapa 2 desconecta hasta el 10 por ciento de la carga total en 0,15 s posterior al despeje de la falla, las etapas 3 y 4 igual a la etapa 2 pero con retardo de activación de 0,10 s. La ubicación de desconexión corresponde a la barras de carga con tensión inferior a 0,8 p.u. y, finalmente, cada etapa se activa cuando el TR_e es superior a 0,33 s.

Para el diseño de la estrategia CRTLS, primero se determina la carga total de rechazo L para cada etapa de la estrategia. Esta cantidad se asume igual a un porcentaje de la sumatoria de la carga total de cada barra con carga motora que resulte con un $CRT > 0,33$ s. Para la primera etapa este porcentaje $M_k \%$ es del 15 por ciento, mientras que para las demás etapas es del 10 por ciento. Como se observa en el Cuadro 6 las barras que participan en esta sumatoria son las barras 4, 7, 15, 18, 20 y 24. Por lo tanto, se obtiene una carga total de rechazo de 322,26 MW para la etapa 1 y 214,84 MW para las demás etapas. Luego esta cantidad de carga total de rechazo se reparte entre las barras con $CRT > 0,33$ s de acuerdo a la severidad de la FIDVR.

El ordenamiento de las barras más efectivas usando la desviación ΔCRT es $7 > 4 > 15 > 24 > 18 > 20$. Este ordenamiento describe la severidad de la FIDVR en cada barra de la siguiente manera, la barra 7 con el ΔCRT más grande igual a 0,632 s tiene la recuperación más lenta de la tensión y, por lo tanto, le corresponde la cantidad más grande de rechazo de carga en esta ubicación con respecto a las demás. Le sigue la barra 4, y así sucesivamente hasta llegar a la barra 20 con el ΔCRT más pequeño igual a 0,092 s y la recuperación más rápida de la tensión, y por lo tanto, le corresponde la cantidad más pequeña de rechazo de carga a aplicar.

Ahora bien, la cantidad de rechazo de carga $\Delta P_i \%$ en cada barra más efectiva se determina como un porcentaje de la desviación del CRT de acuerdo a la severidad de la FIDVR dado por (2.1). Finalmente, el esquema CRTLS se activa en su primera etapa en $t = t_c + 0,05$ s cuando el $TR_e > 0,33$ s. Si la FIDVR persiste, es decir, si $TR_e > 0,33$ s, las siguientes etapas se activan con tiempos de retardo de 0,10 s.

Los resultados de la aplicación de la estrategia CRTLS y el esquema convencional UVLS para el caso 1 con la falla 1 se resumen en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Resultados de la estrategia CRTLS y el esquema UVLS para el Caso 1 Falla 1

Barra	4	7	15	18	20	24
CRT(s)	0,922	0,962	0,792	0,692	0,422	0,782
ΔCRT (s)	0,592	0,632	0,462	0,362	0,092	0,452
ΔP_i (%)	22,84	24,38	17,82	13,97	3,55	17,44
ΔP_i (MW)	73,60	78,57	57,43	45,02	11,44	56,20
Etapa I: Rechazo de carga en barras 4, 7, 15, 18, 20, 24 \Rightarrow 322,26 MW						
Rechazo de carga total 322,26 MW					CRT= 0,222s	
Estrategia convencional UVLS:						
Etapa I: Rechazo de carga en barras 4, 7, 15, 18, 20, 24 \Rightarrow 322,26 MW						
Etapa II: Rechazo de carga en barra 15, 20, 24 \Rightarrow 125,66 MW						
Rechazo de carga total 447,92 MW					CRT= 0,192s	
Sin aplicar rechazo de carga CRT= 0,962s						

Como se puede apreciar en el Cuadro 6 ambas estrategias CRTLS y UVLS logran mitigar la FIDVR pudiendo recuperarse la tensión dentro de los 0,33 s especificado por el criterio TVRC. La estrategia CRTLS para lograr una recuperación de la tensión por encima de 0,8 p.u. con un $CRT = 0,222$ s debió ejecutar una etapa de la estrategia con un rechazo de carga total de 322,26 MW. Mientras que el esquema convencional UVLS debió activar dos etapas para un rechazo de carga total de 447,92 MW y lograr una recuperación de la tensión por encima de 0,8 p.u. con un $CRT = 0,192$ s.

En la Figura 5, se muestra estos valores del CRT sobre la recuperación de la tensión en la barra 24 al aplicar ambas estrategias de rechazo de carga. Aunque el esquema UVLS logra una recuperación más rápida de la tensión, requirió un 39 por ciento más de rechazo de carga que la estrategia CRTLS para satisfacer el criterio TVRC. En consecuencia, la implementación de la estrategia CRTLS en el sistema 39 Bus New England mitiga la FIDVR de manera más eficiente que el esquema UVLS debido a que requiere una menor cantidad de rechazo de carga.

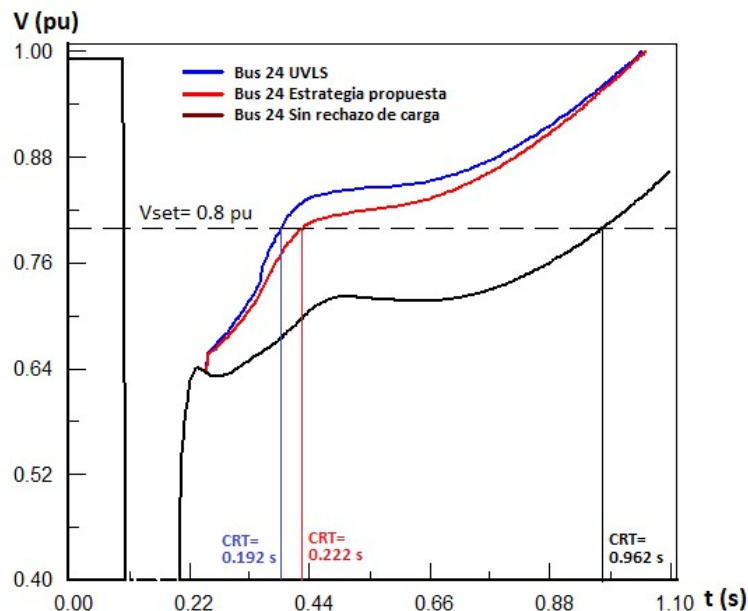


Figura 5: Recuperación de la tensión con CRTLS y UVLS para el Caso 1 Falla 1

En el Cuadro 7 se resume los resultados al aplicar ambas estrategias de rechazo de carga para el caso 3 con la falla 2. La Figura 6 muestra la recuperación de la tensión para este caso de operación.

Cuadro 7: Resultados del esquema UVLS y la estrategia CRTLS para Caso 3 Falla 2

Barra	4	7	15	18	20	24
CRT(s)	0,492	0,552	0,102	0,022	0,022	0,102
Δ CRT(s)	0,162	0,222	-0,228	-0,308	-0,308	-0,228
ΔP_i (%)	42,19	57,81	0	0	0	0
ΔP_i (MW)	46,41	63,6	0	0	0	0
Etapa I: Rechazo de carga en barras 4, 7 \Rightarrow 110,01 MW						
Rechazo de carga total 110,01 MW CRT= 0,11s						
Estrategia convencional UVLS:						
Etapa I: Rechazo de carga en barras 4, 7, 15, 24 \Rightarrow 204,36 MW						
Rechazo de carga total 204,36 MW CRT= 0,09s						
Sin aplicar rechazo de carga CRT= 0,552s						

Como se puede observar en el Cuadro 7, la recuperación retardada de la tensión solo ocurre en las barras 4 y 7. Por lo tanto, la carga total de rechazo para la etapa 1 es de 110,01 MW y para las demás etapas 93,8 MW.

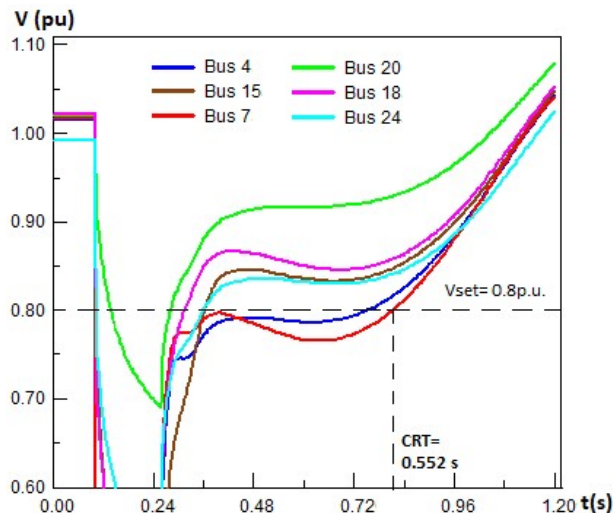


Figura 6: Recuperación de la tensión para el Caso 3 Falla 2

Después del despeje de la falla, ambas estrategias logran mitigar la FIDVR y satisfacer el criterio TVRC como se muestra en la Figura 7. Aunque, el esquema UVLS logra una recuperación de la tensión tan solo un poco más rápido con un CRT igual a 0,09 s, requiere 204,36 MW de rechazo de carga total para satisfacer el criterio TVRC, que representa 86 por ciento más del rechazo de carga comparado con la estrategia CRTLS que aplica 110 MW de rechazo de carga para mitigar la FIDVR con un CRT de 0,11 s.

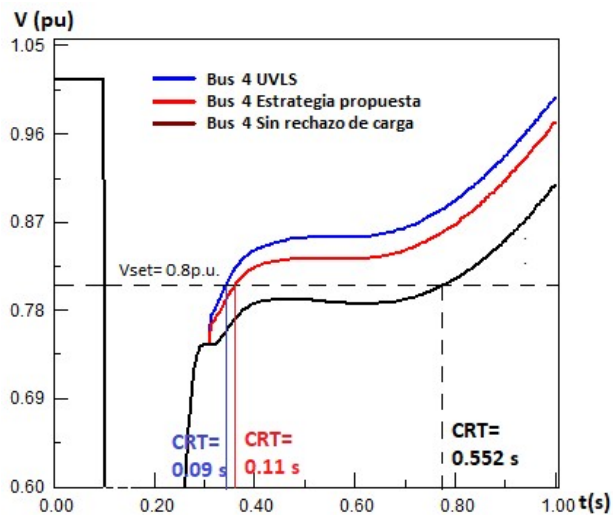


Figura 7: Recuperación de la tensión con CRTLS y UVLS para el Caso 3 Falla 2

Cabe mencionar, que un valor negativo para ΔCRT en el Cuadro 7 significa que en esa barra no hay una recuperación retardada de la tensión y, por lo tanto, no requiere aplicar rechazo de carga.

Finalmente, en el Cuadro 8 se resume los resultados de aplicar la estrategia CRTLS y el esquema UVLS para el caso 3 con la falla 3. Ambas estrategias activaron todas sus etapas para tratar de mitigar la FIDVR. La estrategia CRTLS tuvo que activar tres etapas con un rechazo de carga total de 315 MW para poder recuperar la tensión por encima de 0,8 p.u. dentro de los 0,33 s, cumpliendo con el criterio TVRC. Sin embargo, el esquema UVLS ejecutó las cuatro etapas para una carga total de rechazo de 363 MW, y a pesar que mejoró la recuperación de la tensión al llevar el CRT de 0,692 s (sin aplicar la estrategia) a 0,402 s, las acciones de rechazo de carga no fueron suficientes para recuperar la tensión a un valor por debajo de 0,33 s y cumplir con el criterio TVRC, como se obser en la Figura 8.

Cuadro 8: Resultados del esquema UVLS y la estrategia CRTLS para Caso 3 Falla 3

Barra	4	7	15	18	20	24
CRT(s)	0,582	0,562	0,692	0,382	0,072	0,692
ΔP_i (s)	0,252	0,232	0,362	0,052	-0,258	0,362
ΔP_i (%)	20	18,41	28,73	4,13	0	28,73
ΔP_i (MW)	45,60	42	65,50	9,42	0	65,50
Etapa I: Rechazo de carga en barras 4, 7, 15, 18, 24 \Rightarrow 228,06 MW						
Etapa II: Rechazo de carga en barra 24 \Rightarrow 43,67 MW						
Etapa III: Rechazo de carga en barra 24 \Rightarrow 43,67 MW						
Rechazo de carga total 315,35 MW CRT= 0,25s						
Estrategia convencional UVLS:						
Etapa I: Rechazo de carga en barras 15, 20, 24 \Rightarrow 188,49 MW						
Etapa II: Rechazo de carga en barra 24 \Rightarrow 30,86 MW						
Etapa III: Rechazo de carga en barra 24 \Rightarrow 30,86 MW						
Etapa IV: Rechazo de carga en barras 4, 15, 24 \Rightarrow 112,86 MW						
Rechazo de carga total 363.07 MW CRT= 0,402s						
Sin aplicar rechazo de carga CRT= 0,692s						

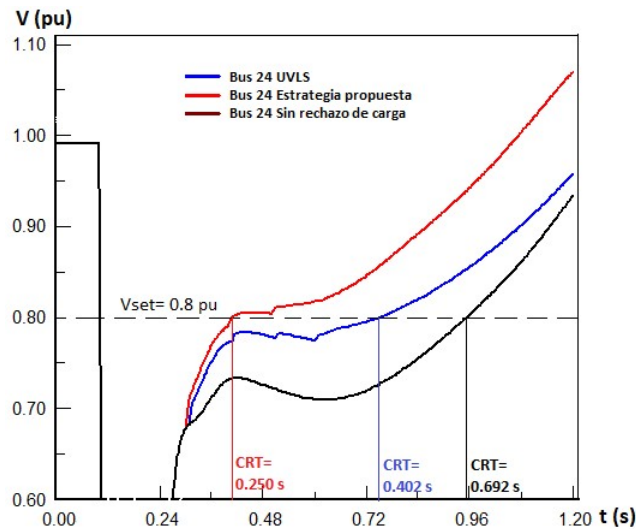


Figura 8: Recuperación de la tensión con CRTLS y UVLS para el Caso 3 Falla 3

3. Conclusiones

El tiempo de recuperación crítica de la tensión se puede utilizar apropiadamente para detectar la manifestación de un evento FIDVR y evaluar su severidad. En este trabajo se propuso una estrategia de rechazo de carga con una formulación simple basada en el tiempo de recuperación crítica de la tensión para mitigar la FIDVR. La estrategia identifica apropiadamente las barras de carga más efectivas principalmente responsable de la FIDVR para desconectar una cantidad de carga predeterminada en cada etapa y, además, en cada ubicación efectiva desconectar una cantidad de carga que es determinada por la desviación del tiempo de recuperación crítica de acuerdo a la severidad de la FIDVR.

La estrategia se determinó para varias condiciones de operación y falla mediante simulaciones fuera de línea y se probó en el sistema 39 Bus New England. Los resultados obtenidos al aplicar la estrategia propuesta demostró una recuperación rápida de la tensión y requiere de una menor cantidad de rechazo de carga comparada con el esquema convencional UVLS y, además, cumple el criterio de recuperación de la tensión transitoria para sistemas de transmisión.

El cálculo de la estrategia de rechazo de carga basada en el tiempo de recuperación crítica se puede extender a un conjunto más grande de condiciones de operación y falla con la intención de generar una base de datos adecuada para

entrenar un algoritmo de aprendizaje automático. Es en esta dirección que se continuará investigando con el fin de lograr el desarrollo de una nueva estrategia de rechazo de carga inteligente en línea basada en datos para mitigar la FIDVR.

Referencias

- [1] H. Saber; M. R. Karimi; E. Hajipour; N. Farzin; S. M. Hashemi; A. Agheli; H. Ayoubzadeh; M. Ehsan. Investigating the effect of ambient temperature on fault-induced delayed voltage recovery events. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(9):1781–1790, 2020.
- [2] S. R. Moghadam; E. Hajipour; N. Farzin; M. Vakilian; M. Ehsan. Improvement in voltage recovery delay phenomenon caused by air conditioners specific performance. In *2019 International Power System Conference (PSC)*, pages 523–529, Tehran, Iran, 2019. IEEE.
- [3] AEMO. Black system south australia 28 sep 2016. Technical report, 2016.
- [4] NERC. A technical reference paper for fault induced delayed voltage recovery. Technical report, NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommittee, 2009.
- [5] S. Adhikari; J. Schoene; N. Gurung; A. Mogilevsky. Fault induced delayed voltage recovery (FIDVR): Modeling and guidelines. In *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Atlanta, GA, USA, 2019. IEEE.
- [6] N. Hatziaargyriou; J. Milanovic; C. Rahmann; V. Ajarapu; C. Canizares; I. Erlich; D. Hill; I. Hiskens; I. Kamwa; B. Pal; P. Pourbeik; J. Sanchez-Gasca; A. Stankovic; T. Van Cutsem; V. Vittal; C. Vournas. Definition and classification of power system stability – revisited & extended. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(4):3271–3281, 2021.
- [7] R. Verayiah; A. Mohamed; H. Shareef. Review of under-voltage load shedding schemes in power system operation. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(7):99–103, 2014.
- [8] G. Araujo-Suárez; C. L. Vásquez. Estrategias de rechazo de carga para mitigar la recuperación retardada de tensión inducida por falla: desarrollo y tendencias. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, 15(2):51–60, 2021.
- [9] H. Bai; V. Ajarapu. A novel online load shedding strategy for mitigating fault-induced delayed voltage recovery. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1):294–304, 2011.
- [10] E. A. Tapia; D. G. Colomé. Mitigación de la recuperación retardada de tensión inducida por falla mediante desconexión de carga basada en el comportamiento dinámico de la carga. *Revista Técnica “Energía”*, 16(1):23–31, 2019.
- [11] A. Mahari; H. Seyedi. A fast online load shedding method for mitigating FIDVR based on novel stability index. In *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pages 1–6, Mashhad, Iran, 2013. IEEE.
- [12] Y. Dong; X. Xie; K. Wang; B. Zhou; Q. Jiang. An emergency-demand-response based under speed load shedding scheme to improve short-term voltage stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5):3726–3735, 2017.
- [13] D.J. Shoup, J.J. Paserba, and C.W. Taylor. A survey of current practices for transient voltage dip/sag criteria related to power system stability. In *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004*. IEEE, 2004.
- [14] Exelon transmission planning criteria. Technical report, PJM Transmission Planning Department, March 11, 2009.
- [15] R. M. Larik; M. W. Mustafa; M. N. Aman. A critical review of the state-of-art schemes for under voltage load shedding. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(5):1–26, 2019.
- [16] S. Mark Halpin, Robert A. Jones, and Lee Y. Taylor. The mva-volt index: A screening tool for predicting fault-induced low voltage problems on bulk transmission systems. 23:1205–1210, 2008.
- [17] DigSILENT Power Factory. 39 bus new england system. Technical report, DigSILENT GmbH.
- [18] J. W. Shaffer. Air conditioner response to transmission faults. *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(2):614–621, 1997.
- [19] Standard load models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(3):1302–1313, 1995.

Como citar

G.A. Araujo-Suárez y C.L. Vásquez Stanescu, *Estrategia de rechazo de carga basada en un método simple para mitigar la recuperación retardada de la tensión inducida por falla*, *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*, vol 16, no 2, pp. 69–80, 2022. <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>

Fuente de financiamiento

Los autores declaran que la investigación presentada en este artículo fue realizada sin recibir financiamiento económico otorgado por parte de alguna institución.

Contribuciones intelectuales de los autores

Concepción y diseño del trabajo: GAAS. Adquisición, análisis o interpretación de los datos: GAAS. Redacción y/o revisión crítica del manuscrito: GAAS, CLVS. Todos los autores han leído y aceptado la versión final del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no presentar conflicto de intereses.