

Coordinación de protecciones y análisis de fallas en circuitos de distribución, caso del circuito Y410

Protection coordination and fault analysis in distribution circuits, case study of circuit Y410

Luis Benigno Corrales Barrios^{I,*}, Daniel Salas Garcés^{II}, Jorday Arostegui Morell^{III}, Kirenia de la Caridad Viamontes Rabelo^I

^IUniversidad de Camagüey, Cuba

^{II}Empresa Eléctrica Las Tunas, Cuba

^{III}Empresa Eléctrica Camagüey, Cuba

*Autor de correspondencia: luis.corrales@reduc.edu.cu

Recibido: 12 de agosto de 2023

Aprobado: 14 de octubre de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) 

RESUMEN/ABSTRACT

El circuito Y410 de la red de distribución del municipio Camagüey posee una gran extensión, su traza es rural, y posee un elevado número de interrupciones. En la sección inicial se tienen clientes importantes como el Frigorífico y el IPVCE. A partir de que la mayor cantidad de afectaciones no ocurren en esta parte inicial, se propuso estudiar este circuito con el objetivo de mover de posición el Nulec Y230 hasta la posición del desconectivo C214. Además, se estudió la posibilidad de sincronizar a este circuito el PSFV "Antonio Pías Gómez I" y el PSFV "Antonio Pías Gómez II" de 2.5 MWp cada uno. El circuito se modeló, realizándose el flujo de cargas, el estudio de los niveles de cortocircuito y la coordinación de protecciones eléctricas. Los resultados del estudio permitieron la conexión de los sistemas fotovoltaicos, pero no el movimiento del Nulec Y230 a la posición de la C214.

Palabras clave: circuitos de distribución, coordinación de las protecciones, fallas en un circuito, simulación.

The Y410 circuit of the distribution network of the municipality of Camagüey has a large extension, its layout is rural, and it has a high number of interruptions. In the initial section there are important clients such as Frigorífico and IPVCE. Since the greatest number of effects do not occur in this initial part, it was proposed to study this circuit with the objective of moving the Nulec Y230 from its position to the position of the disconnector C214. In addition, the possibility of synchronizing the PSFV "Antonio Pías Gómez I" and the PSFV "Antonio Pías Gómez II" of 2.5 MWp each to this circuit was studied. The circuit was modeled, carrying out the flow of loads, the study of short circuit levels and the coordination of electrical protections. The results of the study allowed the connection of the photovoltaic systems, but not the movement of the Nulec Y230 to the position of the C214.

KeyWords: distribution circuits, coordination of protections, faults in a circuit, simulation.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un país depende de su grado de industrialización y este a su vez necesita de las fuentes de energía, especialmente de la energía eléctrica [1-3]. Los sistemas de protección se utilizan para evitar los efectos nocivos de las fallas que pueden ocurrir. El sistema debe protegerse con un sistema de protección efectivo para minimizar el daño al personal responsable, la red de distribución eléctrica y los dispositivos en caso de mal funcionamiento. [1, 4]. La red de distribución del municipio Camagüey posee cuatro subestaciones de transmisión de 110/13.8 kV, y su red de distribución es radial, flexibilizando la operación del sistema [5].

Cómo citar este artículo:

Luis Benigno Corrales Barrios y otros. Coordinación de protecciones y análisis de fallas en circuitos de distribución, caso del circuito Y410. Ingeniería Energética. 2023. 44(3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Un sistema de protección bien diseñado y adecuadamente coordinado es vital para asegurar que el sistema eléctrico de potencia opere dentro de los requerimientos y parámetros previstos. La operación de las protecciones, ligadas a la automática, permiten aislar las fallas tan rápido como sea posible para minimizar los daños. Los costos económicos y los beneficios de un sistema de protección deben ser tenidos en cuenta con el fin de obtener un apropiado balance entre los requerimientos del sistema y los recursos financieros disponibles. Toda protección debe ser lo suficientemente sensible para que opere con rapidez incluso ante pequeñas fallas [1, 6]. Los estudios de coordinación de protección del sistema son importantes en las redes del sistema de energía para garantizar la continuidad del servicio en el sistema [6-9].

El objetivo de la coordinación del relé de protección es lograr la selectividad sin que se vea afectada la sensibilidad y el tiempo de eliminación de las fallas. La coordinación de relés es un aspecto importante en el diseño del sistema de protección, ya que los esquemas de coordinación deben garantizar una operación de los relés rápida, selectiva y confiable, para aislar las secciones defectuosas del sistema de energía [10]. Las protecciones de los sistemas de distribución son parte integral de estos, tienen como tarea evitar el daño de un conjunto de equipos o dispositivos interconectados que cumplen una función determinada por causa de una falla esta podría iniciarse de manera simple y después extenderse sin control en forma encadenada. El sistema de protecciones debe aislar la parte donde se ha producido la falla buscando causar el menor daño posible al sistema[1].

Para poder realizar una correcta coordinación de protecciones es conveniente, la utilización de un software computacional que permita ejecutar un adecuado análisis de cortocircuito, que conlleva un buen flujo de carga. La conexión de Parques solares a la red de distribución complejiza la operación de la red y además hace que los circuitos radiales se conviertan en circuitos de doble alimentación en el horario que el Parque está generando y se mantenga como un circuito radial en el horario de no generación[11].

MATERIALES Y MÉTODOS

Se simuló el flujo de carga, posteriormente se realizó el estudio de cortocircuitos y por último se realizó el ajuste de coordinación de las protecciones eléctricas. Así, de esta forma se examina la situación actual del circuito para realizar comparaciones y determinar el óptimo funcionamiento del mismo.

Para el desarrollo de la investigación se estudiaron tres casos de ajuste y coordinación de protecciones:

1. En el primer caso se analizó el circuito en las condiciones que se encuentra actualmente.
2. En el segundo caso se movió el re-cerrador automático Schneider Electric de la serie N (NULEC) desde la Y230 hasta la C214 comprobando que, en este, sigan cumpliendo los parámetros necesarios en caso de una falla o condición anormal a lo largo de la línea, así como su coordinación con las demás protecciones del circuito.
3. Como tercer caso se introdujo la posibilidad de sincronizar a este circuito el PSFV "Antonio Pías Gómez I" y el PSFV "Antonio Pías Gómez II" de 2.5 MWp cada uno y se comprobó nuevamente el correcto funcionamiento de las protecciones del circuito.

El estudio está basado en las redes de distribución existentes del circuito Y410 con tensión 13.8 kV de la ciudad de Camagüey, el cual comprende operación bajo configuración radial. Es preciso mencionar que la filosofía de la protección en la red de media tensión (13.8 kV) está basada en la activación de las funciones de protección de sobre-corriente de cada uno de los mecanismos de resguardo ubicados en los suministradores que componen el sistema eléctrico; ante diferentes fallas que se pudieran presentar en el sistema eléctrico a estudiar[4]. Existen diferentes características de funcionamiento de los relés de protección. La característica general de funcionamiento de estos dispositivos se puede representar mediante la ecuación (1).

$$T = \frac{A \cdot D}{(M^N) - C} + BD + K \quad (1)$$

Donde:

- T tiempo de operación del dispositivo de sobre-corriente.
- I corriente de falla detectada por el dispositivo
- $M = I/I_a$, es la relación entre la corriente real por el dispositivo (I) y la corriente de ajuste del mismo (I_a).

El resto de los coeficientes se toman de acuerdo a los valores de las constantes asociadas a cada tipo de curva, según la tabla 1.

Tabla 1. Valores de las constantes asociadas a cada tipo de curva para los relés de sobre-corriente con características de tiempo inverso [12]

Tipo de curva	Valores de las constantes					
	A	B	C	N	K	R
S Tiempo corto (short inverse)	0.2663	0.03393	1.000	1.2969	0.028	0.500
L Tiempo largo (long inverse)	5.6143	2.18592	1.000	1.0000	0.028	15.75
D Tiempo definido (definite time)	0.4797	0.21359	1.000	1.5625	0.028	0.875
M Moderadamente inversa (moderately inverse)	0.3022	0.12480	1.000	0.5000	0.028	1.750
I Inversa (inverse)	8.9341	0.17966	1.000	2.0938	0.028	9.000
V Muy inversa (very inverse)	5.4678	0.10814	1.000	2.0469	0.028	5.500
E Extremadamente inversa (extremely inverse)	7.7624	0.02758	1.000	2.0938	0.028	7.750
B Muy inversa (very inverse) de BS142	1.4636	0.00000	1.000	1.0469	0.028	3.250
C Extremadamente inversa (extremely inverse) de BS142	8.2506	0.00000	1.000	2.0469	0.028	8.000
F Tiempo constante (fixed time)	0.0000	1.00000	0.000	0.0000	0.000	1.000

Las curvas están definidas según la norma IEEE Standard PC37.112/D2 excepto la B y C, que están definidas según la norma British standard BS 142.

Coordinación relé con re-cierre–fusible

La coordinación de los relés de protección es necesaria para obtener disparos selectivos en los relés. La primera regla de los relés de protección es que el relé debe dispararse ante un fallo en su zona. Y la segunda regla es que los relés no deben disparar por un fallo fuera de su zona, excepto para respaldar un relé o un disyuntor averiado. Para coordinar este respaldo protección con la característica del relé primario se asegurará que el relé de respaldo debe tener un retardo de tiempo suficiente para permitir que el relé primario, y su interruptor despeje la falla [1, 10].

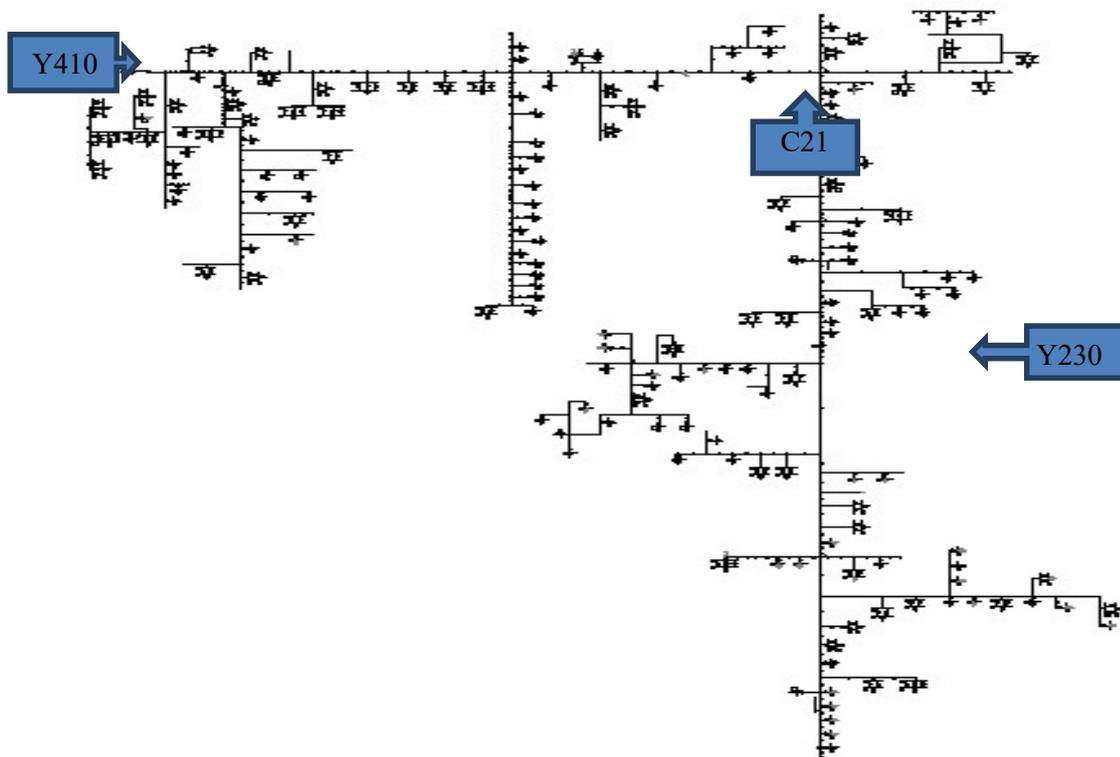
El riesgo y la incertidumbre del sistema de distribución han aumentado en conjunto con su complejidad, lo que tiene un impacto negativo en la confiabilidad general del sistema. La fiabilidad del sistema de distribución depende de que el equipo de protección responda de manera oportuna. Los fusibles, los re-cerradores, los disyuntores y los relés son parte de los mecanismos de protección del sistema de distribución. Deben sincronizarse de manera precisa para detener el flujo de corriente de falla. Debido a que aproximadamente el 80% - 90% de las fallas en los sistemas de distribución de energía son temporales, las empresas de servicios públicos comúnmente usan el re-cierre automático para minimizar la interrupción sostenida por el cliente [13].

El restaurador hace dos disparos instantáneos, antes que el fusible comience a fundirse, después de los cuales pasa a una característica con retardo de tiempo, oportunidad en la cual el fusible se funde, aislando la falla. Existen dos reglas básicas para la coordinación restaurador fusible:

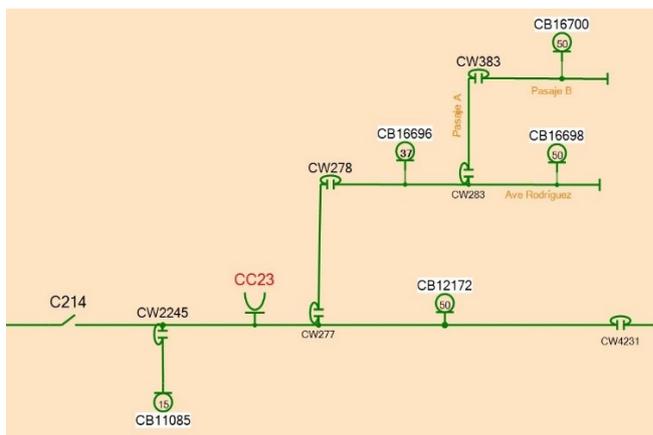
1. El tiempo mínimo de fusión del fusible debe ser mayor que el valor resultante de multiplicar por un factor el tiempo de operación del restaurador en sus operaciones instantáneas.
2. El tiempo máximo de limpieza del fusible debe ser menor que el tiempo de operación del restaurador en sus operaciones con retardo de tiempo [1].

RESULTADOS

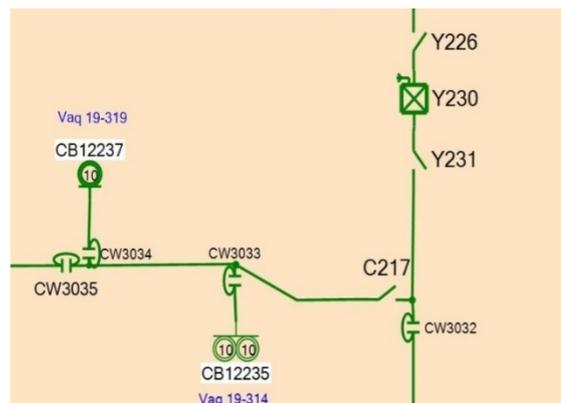
Para el estudio de coordinación de protecciones del circuito Y410, se realizaron el flujo de carga, el cálculo de cortocircuito, posteriormente se escoge y aplica el sistema de protección y su correcta ubicación. Para llegar a ese objetivo se verificó la selección de fusibles, la protección de sobre-corriente de fases, la protección de sobre-corriente de Tierra para finalmente plantear los ajustes necesarios de protecciones. El circuito general se muestra en la figura 1.a, C214 en el monolineal del circuito Y410, en la figura 1.b. y Y230 en el monolineal del circuito Y410b en la figura 1.c.



a)



b)



c)

Fig. 1. a) Monolineal del circuito Y410 inicial b) C214 en el Monolineal del circuito Y410 c) Y230 en el Monolineal del circuito Y410

Primer caso: Análisis del circuito actual

Entre los elementos de protección que comprende el circuito Y410, se encuentran un NULEC Y230, así como cada uno de los fusibles instalados por alta en los transformadores de distribución ubicados debajo de este, para los cuales hay instalados fusibles tipo K “Latinos”. Para llevar a cabo el estudio se contó con la modelización del circuito, el cual considera la demanda real del sistema. Los resultados de la corrida del flujo de potencia y la obtención de los niveles de cortocircuito, fueron utilizados para chequear que los dispositivos de protección soportaran las cargas, sin operar y que tuvieran la suficiente sensibilidad para operar para las fallas mínimas.

El problema encontrado fue que no hay coordinación entre el re-cerrador NULEC Y230 y los fusibles de protección de los transformadores de distribución ubicados debajo de este, para los cuales hay instalados fusibles tipo K “Latinos”. Se pudo comprobar que los fusibles cumplen con las características necesarias para que operen en caso de fallas mínimas en los transformadores. El NULEC Y230 tiene un relé de sobre-corriente cuya corriente nominal secundaria es de 1 A, la corriente de carga máxima se obtiene del cálculo de flujo de carga $I_{\text{carga máxima A p}} = 1,304 \text{ A}$, como se muestra en la figura 2. La curva seleccionada es extremadamente inversa, con 4 re-cierres, dos en esta curva y dos en la de tiempo definido.

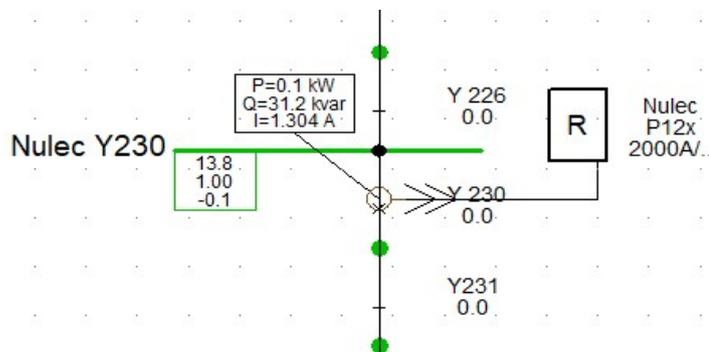


Fig. 2. Resultado de flujo de carga en la Y230

Coordinación

Para la coordinación del NULEC con los fusibles tipo K de los transformadores de distribución se analizaron los casos del transformador que posee el menor nivel de cortocircuito en la barra siguiente (transformador CB12205 de 50 kVA), así como el transformador que tiene el mayor nivel de cortocircuito en la barra siguiente ($\tau\rho\rho\nu\sigma\phi\rho\rho\mu\alpha\delta\sigma\rho$ CB1309 $\delta\epsilon$ 10 kVA) tomando como referencia la barra en la que se encuentra situado el re-cerrador. Ambos se muestran en las figuras 3 y 4.

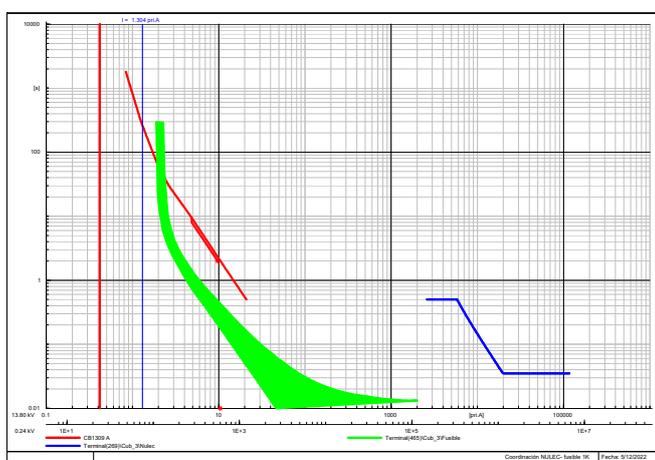


Fig. 3. Coordinación NULEC Y230 con fusible de 1K que protege al transformador CB1309 de 10 kVA

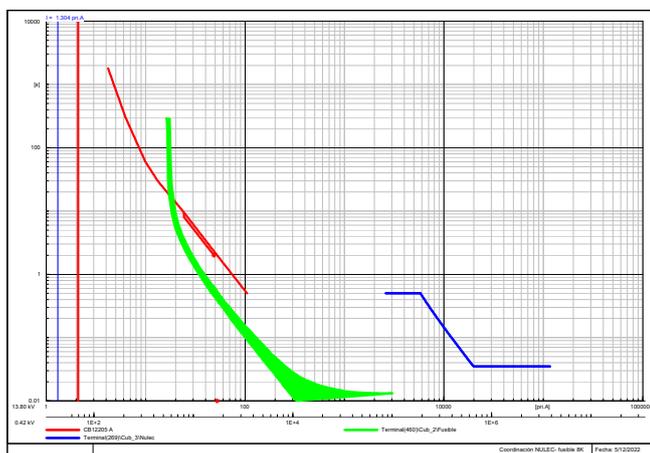


Fig. 4. Coordinación NULEC Y230 con fusible de 8K que protege al transformador CB12205 de 50 kVA

Como se observa, ninguna de las curvas, tanto la del re-cerrador como la de los fusibles, opera por los cortocircuitos, por lo que no son sensibles ambas protecciones. Las características de tiempo inverso (roja) y tiempo definido (azul) quedan muy alejadas de las características del fusible (verde), por lo que, para una falla dada el fusible aislaría siempre antes de que el restaurador opere, por lo que no se cumple la primera condición, lo que impediría la posibilidad de que ante una falla transitoria esta se elimine sin necesidad de fundirse el fusible. Estos dos problemas hacen que no haya coordinación, ni la suficiente sensibilidad, para las protecciones. La solución sería acercar más el re-cerrador a los transformadores, poner otros intermedios o colocar fusibles en los ramales, no solamente por alta en los transformadores de distribución. Por otra parte, se está pensando en reconvertir ese circuito en dos con memos longitud de línea y por ende con menor carga cada uno.

Segundo caso: Cambiar el NULEC desde la Y230 hasta la zona C214

Teniendo en cuenta los resultados de coordinación del primer caso, podemos concluir que al mover el NULEC hacia la C214 tampoco será posible la coordinación de este con los fusibles por los mismos motivos explicados anteriormente (se aleja aún más de los fusibles): No obstante, se muestran los resultados en las figuras 5 y 6. La solución también sería colocar más re-cerradores o fusibles en los ramales hasta lograr la suficiente sensibilidad y la coordinación. En este caso la corriente de carga máxima obtenida del cálculo de flujo de carga fue $I_{\text{carga máxima Ap}} = 1,817 \text{ A}$, como se muestra en la figura 7.

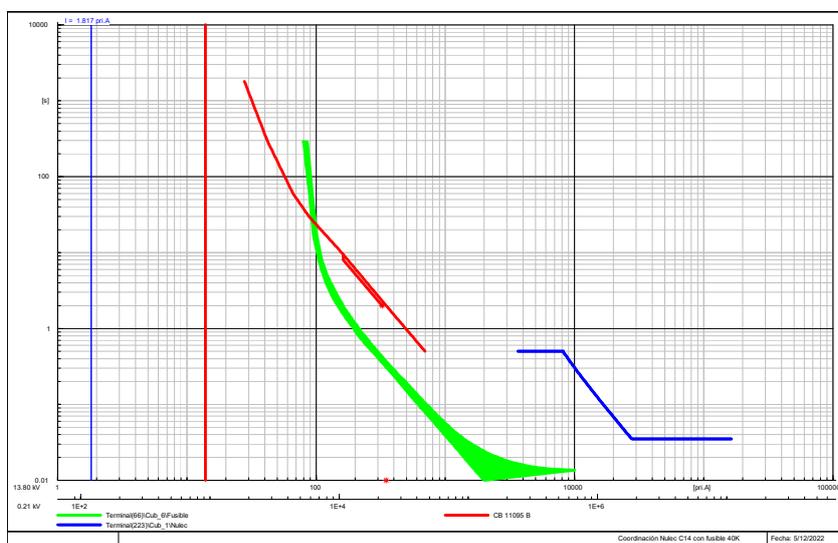


Fig. 5. Coordinación del Nulec C214 con fusible 40K que protege al transformador CB 11095 de 333 kVA

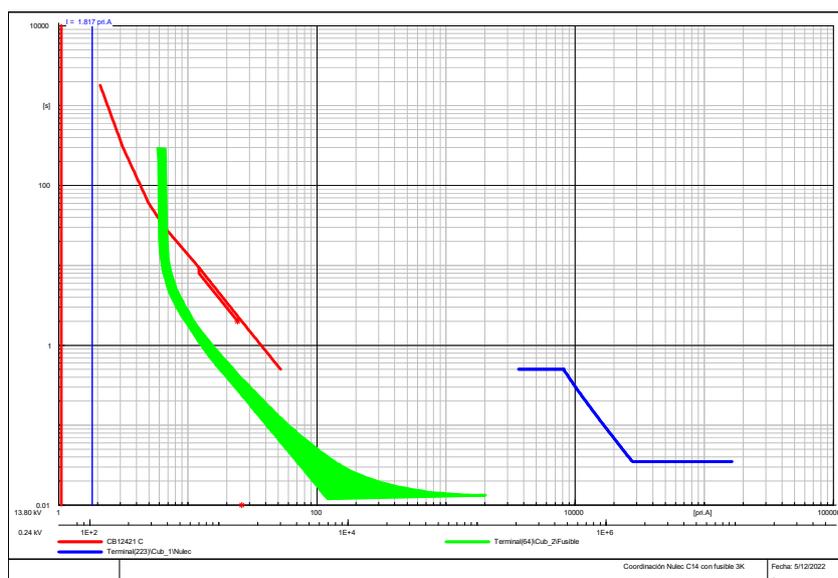


Fig. 6. Coordinación Nulec C214 con fusible 3K que protege al transformador CB12421 de 25 kVA

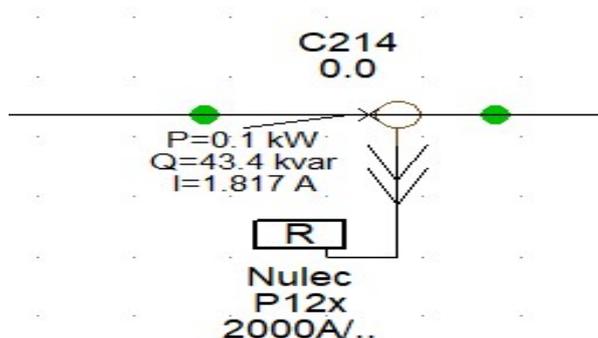


Fig. 7. Resultado de flujo de carga en la C214

Tercer caso: Cambiar el PSFV "Antonio Pías Gómez I" y el PSFV "Antonio Pías Gómez II" de 2.5 MWp cada uno a la línea principal del circuito

Después de introducir los PSFV se realizó un estudio de flujo de potencia instantáneo, se comprobó que no existen problemas de tensión en las barras y nodos cercanos a la instalación. Las cargas por las líneas se mantienen, por lo que no es necesario hacer cambio de calibre de conductor y se pueden mantener los ajustes de las protecciones. El resultado del flujo de carga se observa en la figura 8.

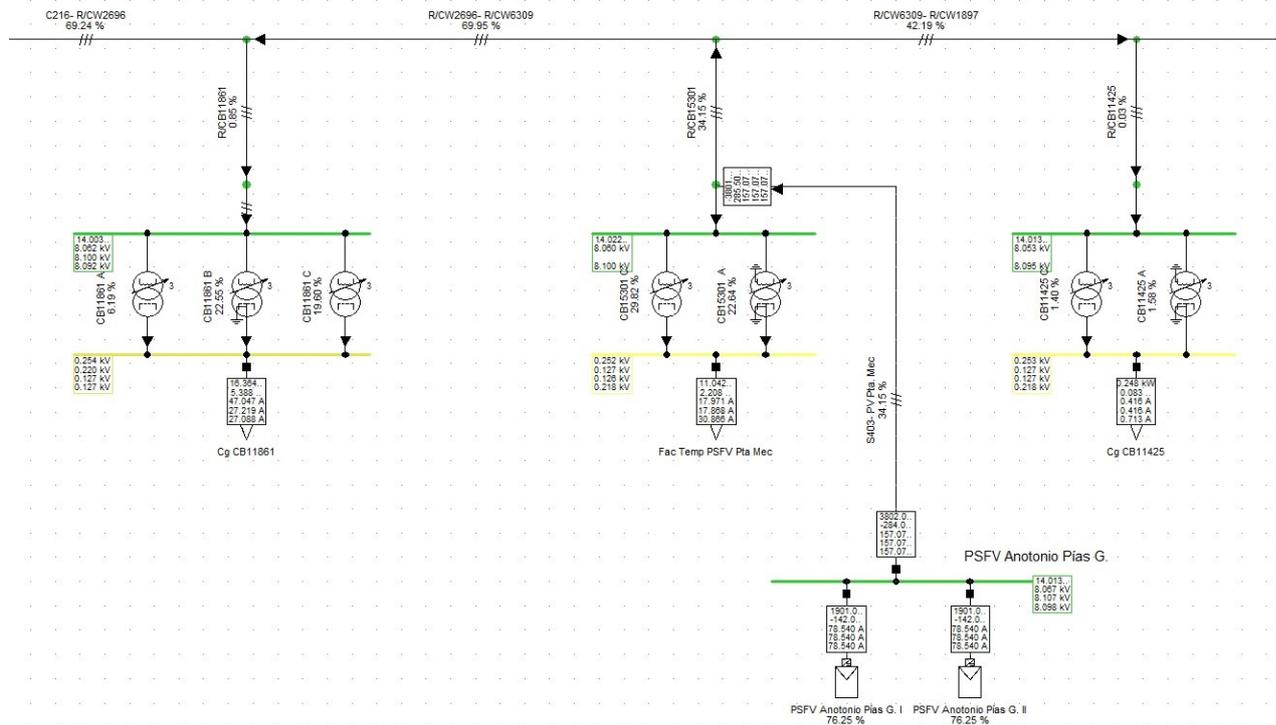


Fig. 8. Ubicación del PSFV en el circuito

CONCLUSIONES

El circuito Y410 tiene dificultades con sus protecciones, en especial el re-cerrador no coordina con los fusibles instalados. Se realiza la recomendación de poner más re-cerradores o fusibles en los nodos y realizar de nuevo la coordinación. Aparte de esto, las protecciones no tienen la suficiente sensibilidad para operar. Mover el NULEC de la Y230 hasta la C214 no es conveniente, ya que no resolvería el problema de coordinación de protecciones, incluso lo agravaría en gran medida. El estudio de flujo de carga demostró que es posible conectar los dos Parques "Antonio Pías" al circuito y reanalizar el ajuste de las protecciones, según la nueva conexión. Se debe plantear un nuevo esquema de alimentación del circuito y a la vez realizar un estudio de sus protecciones, con la incorporación de más re-cerradores del tipo NULEC, ya que es un circuito muy extenso.

REFERENCIAS

- [1]. Corrales Barrios, Luis. "Protección de los sistemas eléctricos". Segunda edición. Camagüey: Universidad de Camagüey, 2022. p. 265. Disponible en: https://drive.google.com/file/d/1CRGaYw10dvXaZeCBs4nrsAV7kg8IDcyd/view?usp=share_link
- [2]. Díaz Urbina, Claudia Janeth. "Análisis del impacto sobre las protecciones eléctricas al instalar sistemas solares fotovoltaicos en una red de distribución con nivel de tensión 13.2 kV. 2015". Universidad Nacional de Colombia. Tesis Doctoral. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57305>
- [3]. Alcalá González, Daniel. "Coordinación de protecciones en redes eléctricas con generación distribuida". Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid. Leganés. 2016. p. 274, Tesis doctoral. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/23706#preview>
- [4]. Gündüz, Berkay, *et al.* "Arc-Flash Hazard Calculations in a Electrical Distribution System with Distributed Generation for Electrical Safety Audit". International Journal of Safety and Security Engineering [online], vol. 11, p. 509–516. Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjvIjvXjqOBAXXamGoFHfWfAioQFnoECBEQAO&url=https%3A%2F%2Fwww.iieta.org%2Fdownload%2Ffile%2Ffid%2F62709&usg=AOvVaw1l1aGsTI0VsP5nQI4lnwIz1&opi=89978449>

- [5]. Arostegui Morell, Jorday, *et al.* "Reconfiguración de bloques de carga en la red de distribución del municipio Camagüey". *Ingeniería Energética*, 2023, vol. 44, n.1, p. 1-10. ISSN 1815-5901. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/3291/329175192002/html/>
- [6]. Tejeswini, M. V., *et al.* "An advanced protection coordination technique for solar in-feed distribution systems". *Ain Shams Engineering Journal*, 2019, vol. 10, n. 2, p. 379-388. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919300668>
- [7]. Piñeros, J. F., *et al.* "Coordinación de protecciones retos y necesidades para la seguridad del sistema". 18^o Encuentro Regional Iberoamericano de Cigre, Brasil. 2019. Disponible en: http://www.cigrecolombia.org/Documents/Memorias/Workshop-B5-22-10-2019/B5.21_674.pdf
- [8]. Ibarra, Merla, *et al.* "Simulación y protección de sistemas eléctricos de distribución tipo radial mediante etap con y sin generación distribuida". 2018. Tecnológico Nacional de México. Disponible en: <http://repositorio.tecnm.mx:8080/jspui/handle/123456789/37>
- [9]. Gamboa, Reynato Andal, *et al.* "System Protection Coordination Study for Electrical Distribution System". IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD). 2018. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8710793>
- [10]. Lim, Sung-Hun; Lim, Seung-Taek. "Analysis on coordination of over-current relay using voltage component in a power distribution system with a SFCL". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, vol. 29, n. 5, p. 1-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8665871>
- [11]. Nikolaidis, Vassilis C., *et al.* "Optimal Recloser-Fuse and Distribution Network Protection Coordination including Distributed Generation Relays". En 2022 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). IEEE, 2022. p. 1-6. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9898147>
- [12]. IEEE Standard. "PC37.112/D2: Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays". New York : IEEE, Julio 2017. p. 1-22. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7979704>
- [13]. Kumari, Rani, *et al.* "Reliability Assessment of Distribution System Considering Protection Coordination". 2nd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET). Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9847765>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

Luis Benigno Corrales Barrios: <http://orcid.org/0000-0003-3064-2066>

Supervisó el trabajo del equipo de investigaciones. Análisis e interpretación de los datos y análisis de los resultados de las corridas en el DigSilent Power Factory. Participó en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Daniel Salas Garcés: <http://orcid.org/0009-0006-0325-5617>

Análisis e interpretación de los datos y análisis de los resultados de las corridas en el DigSILENT Power Factory. Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Jorday Arostegui Morel: <http://orcid.org/0000-0001-9330-6161>

Análisis e interpretación de los datos y análisis de los resultados de las corridas en el DigSilent Power Factory. Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Kirenia de la Caridad Viamontes Rabelo: <http://orcid.org/0000-0002-8395-3282>

Análisis e interpretación de los datos y análisis de los resultados de las corridas en el DigSilent Power Factory. Búsqueda de información, participó en el diseño de la investigación, en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.