

Simulación de Esquemas de Protección en Sistemas de Generación Fotovoltaica Conectados a la  
Red Usando el Software ATP-EMTP

Diego Londoño-Mantilla y Fabián Delgado-López

Proyecto de grado para optar al título de ingeniero electricista

Director:

Jairo Blanco Solano

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2022

## Agradecimientos

*A mis padres y hermanos, quienes han sido mi más sólido apoyo y fuente de motivación para crecer personal y profesionalmente. Gracias por estar siempre presentes de manera incondicional en buenos y malos momentos, guiándome por un buen camino y llenándome de inspiración para ser cada vez una mejor versión de mí.*

*A mi familia en general, quienes son lo más valioso que tengo y con quienes puedo contar siempre. Ahora que culmino mis estudios, les dedico a ustedes este logro, como una meta más alcanzada. Orgulloso de tenerlos a mi lado en este momento tan importante de mi vida.*

*A mis amigos, por todos los momentos y experiencias compartidas, que fueron causa de disfrutar de esta etapa, apoyándonos y aprendiendo mutuamente.*

*Gracias por ser quienes son y por creer en mí.*

*Diego Londoño Mantilla*

### Agradecimientos

*Quiero agradecer a Esperanza Delgado, mi abuela Mery y Olga Chávez, mis madres. Quienes siempre han estado ahí, ofreciéndome lo mejor y motivándome cada día a ser una mejor persona.*

*También quisiera agradecer a Diego Londoño, mi compañero de tesis, por su amistad y paciencia.*

*Por último, pero no por eso menos importantes, a mis familiares y amigos, quienes con su compañía y consejos lograron darme el apoyo necesario para cumplir esta meta.*

*Fabián Delgado López*

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Funciones de Protección en Sistemas de Generación Distribuida .....	11
2. Revisión de Literatura.....	15
3. Implementación en ATPDraw .....	19
4. Evaluación de desempeño de los esquemas.....	24
5. Conclusiones .....	27
Referencias Bibliográficas .....	29
Apéndices.....	32

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema de generación fotovoltaica simulado en el software ATPDraw .....	20
Figura 2. Sistema de distribución IEEE de 34 nodos, con punto de conexión del sistema de generación distribuida fotovoltaica.....	21
Figura 3. Relés de protección implementados en el punto del usuario y el punto de conexión del sistema de generación distribuida. ....	22
Figura 4. Módulos para simulación de fallas en el software ATPDraw. ....	23

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Funciones de protección mínimas para generadores distribuidos basados en inversores con capacidad instalada entre $0.25 \text{ MW} < P < 1 \text{ MW}$ y niveles de tensión 1, 2 y 3 .....	12
Tabla 2. Ajustes de funciones de protección 27, 59 y 81 para generadores basados en inversores de capacidad instalada $> 0.25 \text{ M W}$ .....	13
Tabla 3. Revisión de literatura científica en temas afines con la generación distribuida y las protecciones eléctricas del sistema. ....	15
Tabla 4. Ajustes de tiempo y magnitud de las funciones de protección. ....	24
Tabla 5. Descripción de cada evento de falla implementado en la evaluación de los esquemas. ....	25
Tabla 6. Resultados de la detección de fallas por las funciones de protección. ....	26
Tabla 7. Descripción códigos ANSI de las funciones implementadas. ....	26

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Características relés: .....	32
Apéndice B. Estado estable.....	35
Apéndice C. Señales de interés de la evaluación de los esquemas de protección .....	38

## Resumen

**Título:** Simulación de Esquemas de Protección en Sistemas de Generación Fotovoltaica Conectados a la Red Usando el Software ATP-EMTP\*

**Autores:** Diego Londoño-Mantilla y Fabián Delgado-López\*\*

**Palabras clave:** Generación distribuida; protecciones; ATPDraw; simulación; sistema fotovoltaico; esquemas, coordinación; fallas; sistema de distribución; estándares; normas.

### Descripción:

La generación distribuida en los sistemas de energía eléctrica ha presentado un crecimiento en los últimos años, conllevando al desarrollo de nuevos estándares y regulaciones para evitar un aumento en el riesgo de un mal funcionamiento de las protecciones de tales sistemas. Este trabajo de grado realiza una evaluación de los esquemas de protección que desde la regulación del sector eléctrico colombiano se han definido para sistemas de generación fotovoltaica con capacidades mayores a 0.25 MW y menores o iguales a 1 MW, conectados a niveles de tensión 1, 2 y 3. Para ello, se realiza la revisión de literatura y una implementación de un sistema de distribución con generación distribuida fotovoltaica dentro de los rangos acordes al caso de estudio, en el software ATPDraw. Los esquemas son evaluados ante 15 eventos de falla en diferentes puntos del sistema, obteniendo resultados satisfactorios en la detección y desconexión del sistema de generación distribuida en los casos en que debían actuar las protecciones. Con esto, es posible observar un correcto funcionamiento de los esquemas exigidos y la variedad de herramientas que brinda el software, con posibilidad de ajustar los parámetros de cada función de protección, implementación de funciones de protección más específicas mediante montaje y programación de estas, ajuste de cada uno de los elementos del sistema según la necesidad de caso, entre otras; lo que podría facilitar futuros estudios para el desarrollo de la integración de generadores distribuidos al sistema eléctrico de potencia.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Jairo Blanco Solano Doctor en Ingeniería

### Abstract

**Título:** Simulation of Protection Schemes in Photovoltaic Generation Systems Connected to the Grid Using the ATP-EMTP Software \*

**Authors:** Diego Londoño-Mantilla y Fabián Delgado-López \*\*

**Keywords:** Distributed generation; protections; ATPDraw; simulation; photovoltaic system; schemes, coordination; faults; distribution system; rules.

#### Description:

Distributed generation in electric power systems has shown growth in recent years, leading to the development of new standards and regulations to avoid an increase in the risk of a malfunction of the protections of such systems. This degree work makes an evaluation of the protection schemes that from the regulation of the Colombian electricity sector have been defined for photovoltaic generation systems with capacities greater than 0.25 MW and less than or equal to 1 MW, connected to voltage levels 1, 2 and 3. For this, a literature review and an implementation of a distribution system with photovoltaic distributed generation within the ranges according to the case study are carried out in the ATPDraw software. The schemes are evaluated in 15 fault events at different points of the system, obtaining satisfactory results in the detection and disconnection of the distributed generation system in cases where the protections should act. With this, it is possible to observe a correct operation of the required schemes and the variety of tools provided by the software, with the possibility of adjusting the parameters of each protection function, implementation of more specific protection functions by assembling and programming them, adjustment of each one of the elements of the system according to the need of the case, among others; which could facilitate future studies for the development of the integration of distributed generators to the electrical power system.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Director: Jairo Blanco Solano Doctor en Ingeniería

## Introducción

El continuo desarrollo e integración de las energías renovables se ha impulsado debido al impacto ambiental que generan las fuentes de generación tradicionales, como las centrales termoeléctricas a base de combustibles fósiles o incluso las hidroeléctricas de las cuales proviene la mayor parte de la energía en Colombia, y que, si bien aprovecha los recursos renovables, generan un impacto ambiental y social (Alfonso García, 2019).

Por lo anterior, el uso de la generación distribuida (GD) basada en energías renovables ha tenido un gran crecimiento y promoción al desarrollo en los últimos años, con la creación de normas y leyes que brindan ciertos beneficios a quienes las implementan (Mendes et al., 2018; Consejo de Regulación de Energía y Gas., 2021).

No obstante, en la integración de generación distribuida al sistema eléctrico se pueden presentar problemas en estabilidad de frecuencia y tensión, calidad de la potencia, intermitencia de potencia generada, funcionamiento inadecuado de relés, cambios en la magnitud y dirección del flujo de potencia, condiciones de isla no deseadas, entre otros; esto depende de la ubicación de las fuentes de generación, el tamaño, la tecnología y la forma en que se conecten al sistema (Akmal et al., 2019).

La coordinación de las protecciones también puede verse afectada debido al incremento en las corrientes de falla, lo que conlleva a daños de equipos (Huang et al., 2021).

Para los sistemas de distribución existentes, los relés de sobrecorriente pueden ser suficientes para garantizar una protección adecuada. Sin embargo, con los problemas mencionados

anteriormente, aumenta el riesgo de un mal funcionamiento y lleva a la necesidad de protecciones y coordinación de protecciones más sofisticadas (Akmal et al., 2019).

Es por esto que se han desarrollado estudios para estandarizar y reglamentar la conexión de estas nuevas fuentes al sistema de potencia existente, evitando un gran aumento en el riesgo de un mal funcionamiento de sus componentes (Consejo Nacional de Operación, 2022). Sin embargo, es posible que algunas de esas reglas y estudios previos a la integración sean una barrera para su desarrollo, debido a la complejidad de estos análisis y las múltiples consideraciones que se deben tener para un correcto dimensionamiento y coordinación con el sistema a conectarse.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo de grado se realiza la implementación de un caso de estudio con generación distribuida fotovoltaica de 0.44 MW conectada en el sistema de distribución IEEE de 34 nodos con tensión nominal de 24.9 kV, implementando mediante simulación en ATPDraw los esquemas de protecciones necesarios para evaluar su desempeño en relación con los requerimientos exigidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) y el Consejo Nacional de Operación (CNO).

## **1. Funciones de Protección en Sistemas de Generación Distribuida**

Con la entrada en rigor de la normativa CREG 030 de 2018, y sus actualizaciones recientes (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2018; CREG 174 de 2021), todos los sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red deben contar con un esquema de protecciones estandarizado por el Consejo Nacional de Operación (CNO) con el fin de disminuir los riesgos en

la operación del Sistema Interconectado Nacional (SIN). En el acuerdo 1522 (Consejo Nacional de Operación, 2022) se encuentran las funciones de protección mínimas clasificadas de acuerdo con el nivel de tensión, de potencia, y de la tecnología utilizada.

Para generadores distribuidos basados en inversores, que generen entre 0.25 MW y 1 MW, el esquema de protecciones exigido incluye protecciones de baja tensión (27), sobrecorriente de fases y tierra (51/51N), sobretensión (59), sobretensión de secuencia cero (59N), frecuencia (81) y anti-isla. Dependiendo de la protección, se exige en el punto de conexión o en el punto del usuario generado, según lo presentado en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Funciones de protección mínimas para generadores distribuidos basados en inversores con capacidad instalada entre  $0.25 \text{ MW} < P < 1 \text{ MW}$  y niveles de tensión 1, 2 y 3*

<b>Función de Protección</b>	<b>PC</b>	<b>UG</b>
Bajatensión (ANSI 27)	<b>X</b>	
Sobrepotencia adelante (ANSI 32)	<b>X</b>	
Sobrecorriente de fases y tierra ANSI (51/51N) o (51V/51VN) o (67V/67VN)		
Sobretensión (ANSI 59)	<b>X</b>	
Sobretensión de secuencia cero (ANSI 59N)	<b>X</b>	
Frecuencia (ANSI 81U/O)		
Anti-isla		<b>X</b>

*Nota.* Tomado de Consejo Nacional de Operación, 2022.

En la Tabla 1, los espacios no marcados con “X” son los requisitos en el punto de conexión (PC) o en la unidad generadora (UG).

Para cada función de protección exigida, el acuerdo 1522 de 2022 (Consejo Nacional de Operación, 2022) brinda una especificación con más detalle.

En el caso de la protección baja tensión y sobretensión, para potencias mayores a 0.25 MW, se debe garantizar la actuación con medida segregada por fase y Fase-Tierra.

Además, para las funciones de protección 59, 27 y 81, el estándar brinda los ajustes de tensión y frecuencia con los que se debe cumplir para niveles de tensión 1, 2 y 3 con capacidad instalada mayor a 0.25 MW, según la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Ajustes de funciones de protección 27, 59 y 81 para generadores basados en inversores de capacidad instalada > 0.25M W*

<b>Función</b>	<b>Ajuste</b>	<b>Temporización</b>
Etapa 1: Bajatensión (ANSI 27)	0.8 p.u.	*
Etapa 2: Bajatensión (ANSI 27)	0.6 p.u.	*
Etapa 1: Sobretensión (ANSI 59)	1.15 p.u.	2.5 s
Etapa 2: Sobretensión (ANSI 59)	1.25 p.u.	0.5 s
Bajafrecuencia (ANSI 81 U)	57 Hz	0.5 s
Sobrefrecuencia (ANSI 81 O)	63 Hz	0.5 s

*Nota.* Tomado de Consejo Nacional de Operación, 2022.

Los ajustes de temporización para la función 27 se deben definir de acuerdo con el Estudio de Ajuste y Coordinación de Protecciones (EACP) y deben ser acordados con el Operador de Red (OR).

Para la función de sobrecorriente de fases y tierra "deberá estar en capacidad de interrumpir los aportes de corrientes de corto circuito de la red ante fallas en el sistema de generación y se debe coordinar con las protecciones del sistema de potencia" (Consejo Nacional de Operación, p.15, 2022).

La función de sobretensión de secuencia cero se debe implementar en caso de realizar la conexión al sistema con un transformador no aterrizado, para detectar fallas a tierra.

Los ajustes de los valores permitidos para la protección de frecuencia los brinda el estándar. La medición de dicha frecuencia puede ser monofásica a nivel del inversor o del PC.

En cuanto a la protección anti-isla, la cual detecta y desconecta el sistema de generación cuando hay un corte del alimentador principal, el estándar aclara que no puede ser del tipo Vector Shift, debido a que opera casi instantáneamente ante cambios repentinos en la impedancia del sistema. Este esquema depende de los resultados del estudio de conexión. Si se usa la protección ROCOF (tasa de cambio de frecuencia) se debe ajustar el valor indicado por el CND, el cual es 2 Hz/s para el año 2020.

Adicionalmente, se exige que los inversores para conectarse al sistema de distribución deben cumplir con el estándar de pruebas IEEE 1547 (Photovoltaics et al., 2018), o aquel que lo sustituya o modifique, y con el alcance de la UL1714 o IEC 62109. Estos estándares brindan especificaciones técnicas y las pruebas que se deberían cumplir para conectarse al sistema de potencia como fuentes de energía distribuida, incluyendo máquinas síncronas, de inducción o inversores. Se clasifican mediante categorías, considerando el propósito y el tipo de generación, entre otras. Por cada categoría se especifican valores de respuesta y comportamientos ante diferentes condiciones, como islas intencionales y no intencionales y perturbaciones de frecuencia y tensión con los que deben cumplir los equipos.

## 2. Revisión de Literatura

Se realiza una revisión de la literatura con el fin de obtener información relevante, acorde con el contexto de investigación e identificar propuestas para el estudio de los esquemas y funciones de protección en generación distribuida fotovoltaica. Obteniendo una base de casos previamente estudiados y conocer los avances que se han tenido en esta área de estudio.

### Tabla 3.

*Revisión de literatura científica en temas afines con la generación distribuida y las protecciones eléctricas del sistema.*

<b>1 Título</b>	Impact of Distributed Generation on Protection of Power system (Bhise et al., 2017)
<b>Objetivo</b>	Evaluar el impacto de la GD en las protecciones del sistema de potencia mediante simulaciones mostrar el efecto de cada tipo de falla en este tipo de sistemas.
<b>Metodología</b>	Se simula un sistema de potencia radial en el software PSCAD / EMTDC y se analizan corrientes de falla y de carga. Se estudia el impacto de la generación distribuida en el sistema durante de fallas LT, LL y LLLT con y sin protecciones. La fuente y el GD se protegen de fallas de corriente usando protecciones de sobrecorriente de 4kA y 2kA.
<b>Resultados</b>	La generación distribuida podría causar niveles de corrientes de fallas más altos, para los que no fueron dimensionados los dispositivos de protección ya instalados, por lo tanto, se exponen a un mayor esfuerzo eléctrico del normal. Para lidiar con los problemas a los que se exponen las protecciones con la implementación de GDs, se propone un limitador de corriente de falla de estado sólido (SSFCL) en serie con el GD, con beneficios en simplicidad, estructura, control y respuesta rápida.
<b>2 Título</b>	

---

Solutions for the Distributed Photovoltaic Access Distribution Network Relay Protection (Lei et al., 2020)

**Objetivo**

Proponer un esquema de protección basado en las condiciones operativas del sistema de potencia con el impacto en la corriente de falla que provoca la GD.

**Metodología**

Se analizan parámetros de tensión, corriente y frecuencia del sistema de GD durante el proceso de detección de isla para determinar si cumple con el principio de conservación de energía. Además, de acuerdo con el cambio repentino en tensión y corriente del sistema y del GD se define si ocurre una falla o un área de ocurrencia de fallas.

**Resultados**

Se encontró que efectivamente se puede lograr una protección del sistema analizando las características y la variación de tensión y corriente de este durante el proceso de detección de isla.

**3 Título**

A Review on the Methods for Mitigate the Impacts of Photovoltaic Distributed Generation in Power Systems Protection (Mendes et al., 2018)

**Objetivo**

Estudiar nuevas estrategias de protección, usando nuevos equipos y funciones diferentes a la de sobrecorriente. Además, se analizan los esquemas de protección que podrían reducir el efecto de la GD en el sistema.

**Metodología**

Se realiza una búsqueda de trabajos anteriores sobre el impacto de la alta penetración de generación distribuida e igualmente se indaga sobre las posibles soluciones.

**Resultados**

Propone la inserción de más relés de distancia y/o protecciones con comunicación. Se sugiere la utilización de la tensión como parámetro para protección ya que normalmente su valor no se ve afectado por la alta penetración de GD.

**4 Título**

Voltage based protection for 10kV distribution network with photovoltaic integration (Xie et al., 2016)

**Objetivo**

Presentar una forma de proteger el sistema contra subtensiones con inclusión de GD, basándose en la caída de tensión y corriente para detectar la falla y determinar la línea afectada.

**Metodología**

---

El método consiste en usar el voltaje como el criterio principal combinado con la corriente como criterio auxiliar para determinar la línea defectuosa y si debe o no actuar la protección. Se realiza una mejora al método de protección se subtencción de tiempo inverso mediante un factor de aceleración de baja tensión. Luego, mediante simulaciones en PSCAD se evalúa la lógica de protección planteada.

### **Resultados**

Las simulaciones en PSCAD demuestran la efectividad y racionalidad del esquema propuesto, siendo capaz de operar rápida y selectivamente. La protección, sin comunicación, puede determinar si la falla está dentro del alcance de la protección y entre mayor sea la caída de tensión, más rápido actúa.

## **5 Título**

Calculation of Maximum Distributed Photovoltaic Access Capacity Considering Protection Operation Characteristics (Huang et al., 2021)

### **Objetivo**

Analizar la influencia de GDs conectados al sistema de potencia en las protecciones de ruptura rápida y proponer un método de cálculo para la potencia máxima que podrían entregar los GDs sin causar un mal funcionamiento de estas.

### **Metodología**

Teniendo en cuenta la influencia en el aumento de la corriente y el factor de potencia de los PV distribuidos durante fallas, basado en un sistema de distribución de 10kV con GD y las características del comportamiento de este durante una falla trifásica, considerando la magnitud absoluta de la variación en corriente causada por el GD, para llegar a una expresión matemática para el cálculo de la capacidad máxima de acceso de GD al sistema.

### **Resultados**

Al realizar el análisis planteado, considerando diversos factores y expresiones matemáticas propias de los sistemas PV, se obtiene la expresión para calcular el máximo acceso PV y evitar el mal funcionamiento de la protección aguas abajo. Los resultados de la simulación muestran que efectivamente dicho cálculo puede evitar un mal funcionamiento de la protección de ruptura rápida actual al haber un acceso PV excesivo en el sistema de potencia.

## **6 Título**

Assessing Solar PV Inverters' Anti-Islanding Protection (Bravo et al., 2014)

### **Objetivo**

Realizar una revisión del potencial de funcionamiento en isla de inversores solares fotovoltaicos, contribuyendo al desarrollo de estándares para funciones avanzadas de protección en los mismos.

### **Metodología**

Mediante pruebas de laboratorio con simuladores de red, de carga, y de sistemas fotovoltaicos, se evalúa el desempeño de los inversores estableciendo una

condición de operación nominal y luego abriendo un interruptor para desconectar la fuente que simula la red y generar la condición de isla.

### **Resultados**

Al realizar múltiples pruebas en inversores estadounidenses y alemanes, los resultados no indicaron que se mantendrían conectados cuando se interrumpe la fuente principal, no se obtuvo evidencia de que las características avanzadas de los mismos provoquen un comportamiento incorrecto. Sin embargo, se encontraron algunos casos poco probables en los que se generaría una condición de isla, los cuales sugieren tener en cuenta en futuros análisis para la creación de estándares de integración de generación distribuida.

Se puede observar que con la inclusión de energías renovables como generación distribuida cercana a los lugares de consumo se han generado cambios en el comportamiento de los sistemas de potencia, llevando a afectaciones en las protecciones eléctricas existentes, las cuales se están investigando cada vez con más profundidad para lograr incentivar el desarrollo de estas nuevas tecnologías que brindan grandes beneficios desde ambientales hasta económicos. Dichas investigaciones abarcan temas como el desarrollo de nuevos esquemas de protección que sean más eficientes, efectos que puedan causar en el sistema bajo diferentes casos de análisis, propuestas desde diferentes puntos de vista para mejorar el comportamiento y los beneficios que brindan, métodos para facilitar los análisis necesarios para la inclusión de estos y formas de analizar mediante simulaciones la respuesta de los sistemas para casos comunes en sistemas de distribución local; además de estudios y pruebas de laboratorio con equipos que se deben implementar para la conexión, de forma que se puedan tener en cuenta para proyectos futuros y ahorro de tiempo en estudios preliminares. Se aprecia entonces, un gran aporte para el desarrollo de futuras tecnologías más limpias y convenientes teniendo en cuenta el crecimiento de la demanda energética en el mundo, apoyando como comunidad un avance necesario y permitiendo tener una base cada vez más sólida para seguir investigando.

### 3. Implementación en ATPDraw

ATPDraw es un preprocesador gráfico en la plataforma MS-Windows para la versión ATP del programa EMTP, el cual es una herramienta muy potente de simulación digital con muchas aplicaciones en la actualidad. En éste, el usuario puede construir sistemas eléctricos seleccionando de una lista muy completa los componentes necesarios para su caso; luego ATPDraw genera el archivo de entrada en el programa de simulación ATP en el formato apropiado.

Este software permite representar con alto detalle los transitorios electromagnéticos de los elementos de un sistema eléctrico.

Para el propósito de este trabajo de grado de evaluar los esquemas de protección planteados por el CNO para generadores distribuidos basados en inversores mediante simulaciones en ATPDraw, se presentan ciertas necesidades como la obtención del sistema de distribución con niveles de tensión acordes con el rango de análisis, el sistema de generación fotovoltaica pertinente, las funciones de protección exigidas, la forma de simular las fallas para poner a prueba la lógica de actuación de estas y la medición adecuada de las señales para una correcta lectura del comportamiento del sistema.

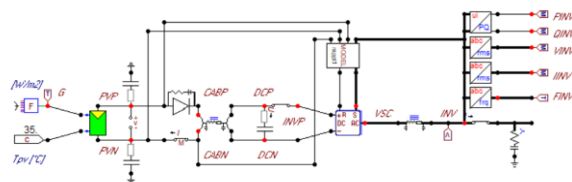
ATPDraw cuenta con una página web (ATPDraw™, 2021) en la que se pueden encontrar múltiples cosas de utilidad mediante foros y casos de estudio realizados previamente.

El sistema de generación fotovoltaico (Figura 1) se precisa a partir de una búsqueda de estudios realizados anteriormente en ésta área, en el que se emplea un algoritmo de MPPT para el inversor del sistema, que actualmente es el algoritmo más implementado en proyectos de este tipo;

el campo fotovoltaico es representado por fuentes de corriente que reciben valor de un objeto programado en MODELS (lenguaje de programación técnico enfocado a la simulación en el dominio del tiempo usado como interfase entre ATP y programas externos), y controlado con funciones TACS (Transient Analysis of Control Systems). Este sistema fotovoltaico está diseñado para generar 54MW a 440V y entregarlos a una red de 120 kV. Sin embargo, se realizaron las adaptaciones necesarias para el caso de estudio de este trabajo de grado, variando la cantidad de paneles solares en paralelo que posee el sistema, finalmente generando 0.44 MW a 440 V, y por medio de un transformador elevarlo a la tensión de la barra a conectarse (24,9 kV).

### Figura 1.

*Sistema de generación fotovoltaica simulado en el software ATPDraw*



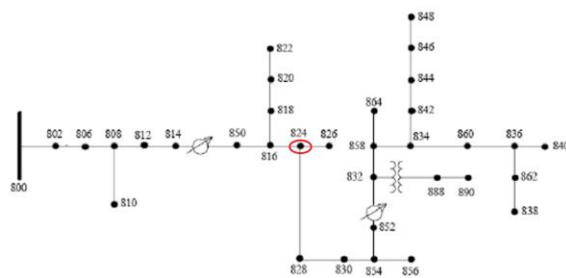
*Nota.* Tomado de ATPDraw™, 2021.

El sistema de distribución al que se conecta el sistema fotovoltaico (Figura 2), se obtuvo de la página oficial de ATPDraw en un caso de estudio realizado, el cual se basa en la información brindada por la IEEE del sistema de 34 nodos, que tiene una tensión nominal de 24.9kV, caracterizado por ser largo y ligeramente cargado con carga desbalanceada, dos reguladores en línea, un transformador para un área de 4.16kV, y capacitores en paralelo. El circuito cuenta con reconectores y fusibles en ciertas áreas del sistema y modelado de cargas tipo ZIP.

El nodo seleccionado para conectar el sistema de generación fotovoltaica mediante un transformador Yd1, es el 824, ya que, los resultados de la conexión e inyección de potencia al sistema de distribución son satisfactorios.

### Figura 2.

*Sistema de distribución IEEE de 34 nodos, con punto de conexión del sistema de generación distribuida fotovoltaica*



*Nota.* Tomado de ATPDraw™, 2015.

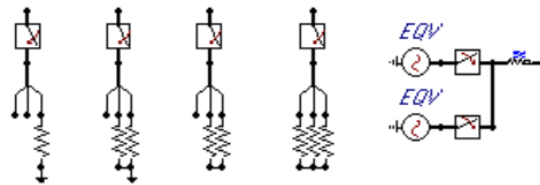
El software cuenta con una librería de elementos a disposición para implementar en las simulaciones, entre los que se encuentran herramientas para el análisis de sistemas de potencia. De allí se obtuvieron los relés que se implementaron en el punto de usuario y punto de conexión del sistema de generación distribuida (Figura 3). Cada relé tiene diferentes opciones de configuración dependiendo de su función; para los relés 27 y 59 se debe ingresar la tensión base con la que actuará, el porcentaje de operación de la etapa 1, la etapa 2, y los tiempos de actuación de cada etapa; para el relé 81 se ingresa la frecuencia máxima y mínima permitida en cada etapa y los tiempos de actuación; para el relé 51 se ingresa la corriente mínima de operación y el tiempo de actuación; para el caso de la protección anti-isla se realiza el montaje de la función ROCOF (Rate of Change of Frequency), que se basa en medida de la tasa de cambio de la frecuencia del sistema



a la nominal, con un interruptor temporizado para que después de 1 segundo se desconecte la fuente inicial y sea reemplazada por la que tiene la variación de frecuencia o tensión generando la perturbación deseada; para las condiciones de isla se abre un interruptor después de un estado estable desconectando la alimentación principal del sistema. Con esto se puede evaluar el comportamiento de los relés implementados según las exigencias de los esquemas planteados por el CNO.

#### Figura 4.

*Módulos para simulación de fallas en el software ATPDraw.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

#### 4. Evaluación de desempeño de los esquemas

Una vez realizada la implementación del caso de estudio en el software ATPDraw es posible llevar a cabo las simulaciones necesarias para evaluar el comportamiento del sistema y la lógica de los esquemas de protección planteados por el CNO bajo condiciones de falla en distintos puntos del sistema, mediante la medición de las señales de tensión, corriente, potencia activa, frecuencia y estados de los relés en el sistema de generación distribuida y el nodo de conexión de este. En el Anexo 2, se observan las señales de interés medidas en estado estable con un comportamiento adecuado del sistema.

Los ajustes de las funciones de protección que se implementaron para las simulaciones se pueden observar a continuación en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Ajustes de tiempo y magnitud de las funciones de protección.*

Ajustes Relés	Tiempo (s)		Valor		
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 1	Etapa 2	
UG	27	2.5	0.5	0.8 p.u.	0.6 p.u.
	59	2.5	0.5	1.15 p.u.	1.25 p.u.
	81	0.5	0.5	63 Hz	57 Hz
	51	0.5		1.2 p.u.	
	81	0.5	0.5	63 Hz	57 Hz
PCC	51	0.5		1.2 p.u.	
	AI	0.6		2 Hz/s	

Luego de caracterizar cada función de protección con los tiempos y magnitudes indicados por el esquema de protección del CNO. Se procede a realizar 15 simulaciones de diferentes eventos

de falla, en distintos puntos del sistema para evaluar la respuesta de las funciones de protección implementadas. La descripción de cada evento de falla realizado se observa en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

*Descripción de cada evento de falla implementado en la evaluación de los esquemas.*

<b>Descripción fallas evaluadas</b>				
<b>Evento</b>	<b>Tipo de falla</b>	<b>Duración</b>	<b>Val.</b>	<b>Nodo</b>
1	Falla monofásica a tierra	Permanente	0.01 $\Omega$	828
2	Bifásica a Tierra	Permanente	0.01 $\Omega$	850
3	Falla monofásica a tierra	Permanente	0.01 $\Omega$	802
4	Bifásica	0.4 s	0.02 $\Omega$	812
5	Falla monofásica a tierra	Permanente	0.01 $\Omega$	844
6	Falla monofásica a tierra	0.3 s	0.01 $\Omega$	806-1
7	Falla monofásica a tierra	0.5 s	0.01 $\Omega$	816
8	Trifásica	0.2 s	0.01 $\Omega$	806-2
9	Sobrefrecuencia	Permanente	64 Hz	800
10	Sobrefrecuencia	Permanente	62 Hz	800
11	Bajafrecuencia	Permanente	55 Hz	800
12	Sobretensión	Permanente	1.3 p.u.	800
13	Sobretensión	Permanente	1.15 p.u.	800
14	Desconexión fuente principal	Permanente		800
15	Bifásica	Permanente	0.01 $\Omega$	UG

Al realizar las simulaciones de los eventos de falla y medir las señales del accionamiento de los relés, corriente en el sistema de distribución, corriente en los reconectores del sistema de distribución relacionados con la falla y demás señales del sistema. Es posible caracterizar el resultado de cada evento simulado y si la respuesta es adecuada, según el ideal funcionamiento de las funciones de protección, observando los tiempos de actuación de los relés en cada efecto generado por las fallas y si efectivamente el sistema de generación distribuida se desconecta del sistema de distribución en caso de ser necesario.

El resumen de los resultados de los primeros relés en detectar las fallas se encuentra a continuación en la Tabla 6. Además, en la Tabla 7, se describe la función de protección de cada relé según su código ANSI.

**Tabla 6.**

*Resultados de la detección de fallas por las funciones de protección.*

Evento	Primeros relés en detectar el evento						
	UG			PCC			
	27	59	81	51	81	51	AI
1	✓		✓	✓	✓	✓	
2	✓		✓	✓	✓	✓	
3				✓		✓	
4	✓			✓		✓	
5							
6				✓		✓	
7	✓			✓		✓	
8				✓		✓	
9			✓		✓		
10							
11							✓
12		✓					
13		✓					
14						✓	
15				✓		✓	

**Tabla 7.**

*Descripción códigos ANSI de las funciones implementadas.*

ANSI	Descripción
27	Relé de mínima tensión
59	Relé de sobretensión
81	Relé de frecuencia
51	Relé de sobreintensidad temporizado
AI	Anti-isla

*Nota:* Adaptado de códigos ANSI para protecciones.

Es posible observar en la tabla 6, que, ante cada evento de falla, dependiendo del tipo, actúan diferentes relés a la vez, debido a que tienen el mismo tiempo de acción, según la necesidad del caso; enviando la señal a los interruptores y desconectando satisfactoriamente el sistema de generación distribuida fotovoltaica.

También se puede detallar que en algunos casos ninguno de los relés actúa. Esto se debe a que para esos escenarios la falla ocurre en un punto del sistema en el que actúan y despejan la falla otras protecciones de ese sector, evitando que el sistema de GD se desconecte cuando no debe, siendo este también un comportamiento adecuado del esquema evaluado.

En el Anexo 3, se muestran algunas de las señales de interés de los eventos evaluados, donde se puede detallar la actuación de los relés, una descripción de las señales del evento evaluado y la desconexión del sistema de generación distribuida del sistema de distribución.

## **5. Conclusiones**

El presente trabajo de grado fue desarrollado en el marco del proyecto interno de investigación de capital semilla titulado: “Método de estimación de estado para la gestión operativa en redes de distribución de energía eléctrica que incorporan fuentes no convencionales de energía renovable”, financiado por la Universidad Industrial de Santander a través del código VIE-UIS 2691.

Al analizar los resultados obtenidos de las simulaciones, es posible observar un correcto funcionamiento de los esquemas de protección exigidos para la integración de generadores distribuidos fotovoltaicos, entre los rangos analizados, al Sistema Interconectado Nacional; ya que

el esquema detecta los eventos de falla y determina de forma adecuada si el sistema de GD debe desconectarse o no del sistema de potencia. Este comportamiento permite notar el correcto dimensionamiento de los esquemas, lo que contribuye a disminuir el riesgo de daños de equipos y eventos inapropiados, dando lugar a una implementación de nuevas fuentes de energía con menor impacto ambiental, de manera segura y evitando reestructurar todo el sistema debido a los problemas que generan.

Además, se evidencia la versatilidad que tiene el software ATPDraw para análisis de este tipo, brindando medios alternativos donde realizar los estudios necesarios para el desarrollo e integración de estas nuevas tecnologías.

**Referencias Bibliográficas**

- Akmal, M., Al-Naemi, F., Iqbal, N., Al-Tarabsheh, A., & Meegahapola, L. (2019). Impact of Distributed PV Generation on Relay Coordination and Power Quality. *IEEE Milan PowerTech*, 1-6. doi:10.1109/PTC.2019.8810791
- Alfonso García, R. A. (2019). *Caracterización energética para la evaluación de los impactos ambientales reales y potenciales del consumo energético, Caso estudio conjunto residencial Abedul en Soacha, Cundinamarca*. [Trabajo de pregrado] Universidad El Bosque. <https://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/2135>
- ATPDraw™. (2015). #40 *IEEE34NODE*. <https://www.atpdraw.net/showpost.php?id=40&kind=0>
- ATPDraw™.(2021).#43pv50mw\_mppt1.  
<https://www.atpdraw.net/showpost.php?id=6093&kind=2>
- Bhise, D. R., Kankale, R. S., & Jadhao, S. (2017). Impact of distributed generation on protection of power system. *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 399-405. doi:10.1109/ICIMIA.2017.7975644
- Bravo, R. J., Robles, S. A., & Muljadi, E. (2014). Assessing solar PV inverters' anti-islanding protection. *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2668-2671. doi:10.1109/PVSC.2014.6925478.
- Consejo de Regulación de Energía y Gas. (2018). *Resolución 030*. [http://apollo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/\\$FILE/Creg030-2018.pdf](http://apollo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/$FILE/Creg030-2018.pdf)

- Consejo de Regulación de Energía y Gas. (2021). *Resolución 174* .  
[https://www.creg.gov.co/sites/default/files/creg174-2021\\_compressed.pdf](https://www.creg.gov.co/sites/default/files/creg174-2021_compressed.pdf)
- Consejo Nacional de Operación. (2022). *Acuerdo 1522*. <https://www.air-e.com/Portals/aire/documentos/creg-074/02-1-acuerdo-1522.pdf>
- Huang, Z., Zhu, Y., Sun, T., Liu, H., Chao, C., & Zheng, X. (2021). Calculation of Maximum Distributed Photovoltaic Access Capacity Considering Protection Operation Characteristics. *6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 1091-1094. doi:10.1109/ICPRE52634.2021.9635381
- Photovoltaics, D. G., & Storage, E. (2018). IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std*, 1547-2018.
- Lei, D., Yang, Y., Hu, M., Meng, Q., & Liu, L. (2020). Solutions for the Distributed Photovoltaic Access Distribution Network Relay Protection. *5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 1492-1496. doi:10.1109/ACPEE48638.2020.9136487
- Mendes, M. A., Vargas, M. C., E., B. O., & Simonetti, D. S. (2018). A review on the methods for mitigate the impacts of photovoltaic distributed generation in power systems protection. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 1-6. doi:10.1109/SBSE.2018.8395867
- Menezes, T., Tresso, Y., Schäffer, G., Moura, F., Mendonça, M., Rezende, P., & Castillo, M. (2017). Analysis and computer modelling of a Rate of Change of Frequency Relay for islanding detection in the software ATPDraw. *Renewable Energy and Power Quality Journal 1 (15)*, 344-349.
- Xie, R. R., Zheng, T., Zhang, Z. K., & Zhang, P. Z. (2016). Voltage based protection for 10kV distribution network with photovoltaic integration. *IEEE PES Asia-Pacific Power and*

*Energy Engineering Conference (APPEEC), 2429-2433.*

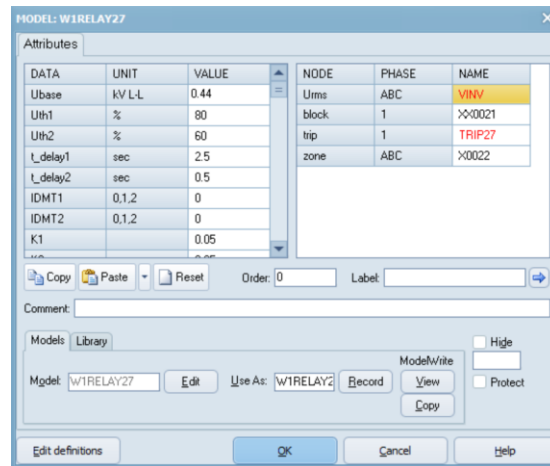
doi:10.1109/APPEEC.2016.7779921

## Apéndices

### Apéndice A. Características relés:

#### Figura 5.

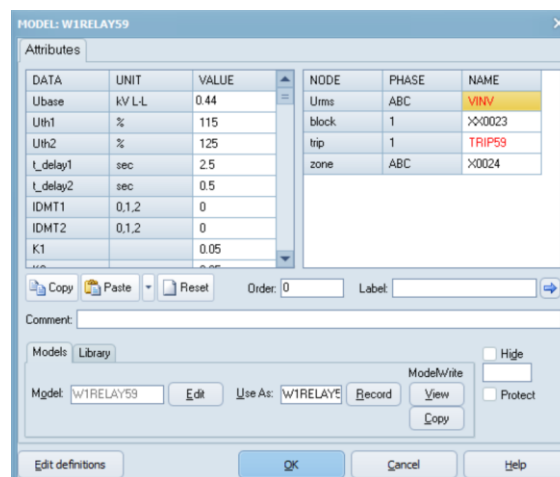
*Característica relé de subtensión (UG).*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

#### Figura 6.

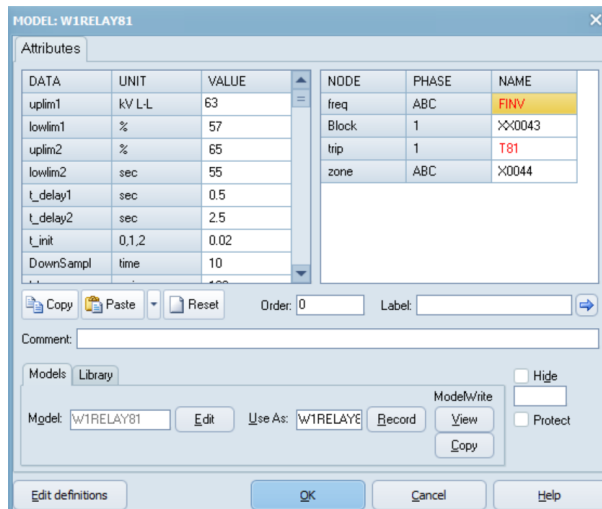
*Característica relé de sobretensión (UG).*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

#### Figura 7.

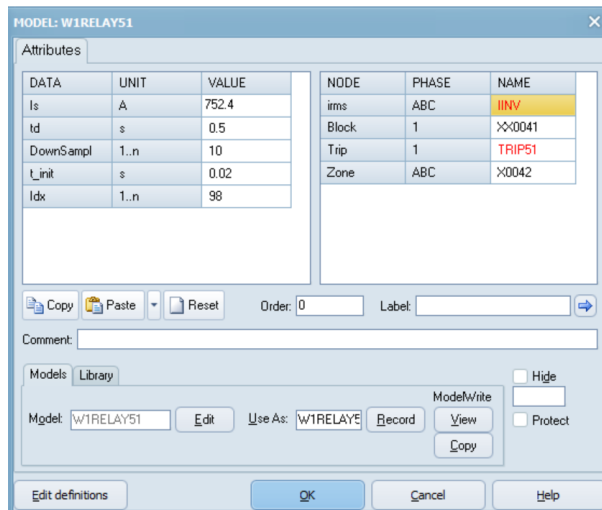
*Característica relé de frecuencia (UG y PCC).*



Nota: Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Figura 8.

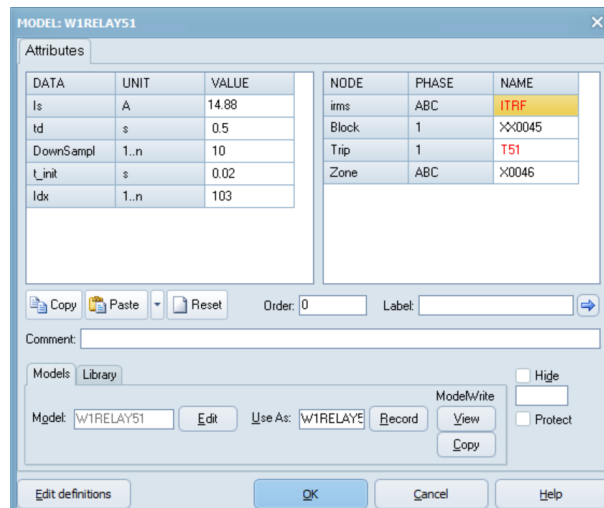
*Característica relé de sobrecorriente (UG).*



Nota: Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 9.**

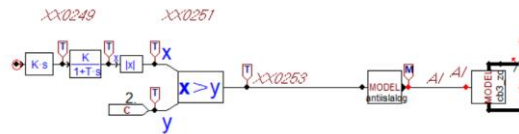
*Característica relé de sobrecorriente (PCC).*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 10.**

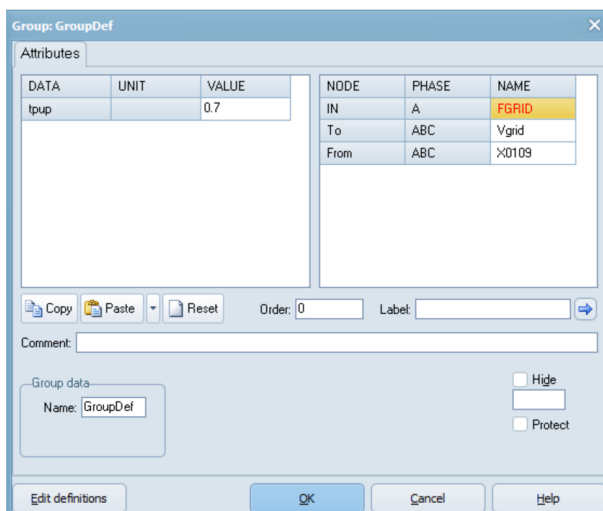
*Implementación función ROCOF para sistema anti-isla con ajuste planteado por el CND.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 11.**

*Característica de tiempo función ROCOF (PCC).*

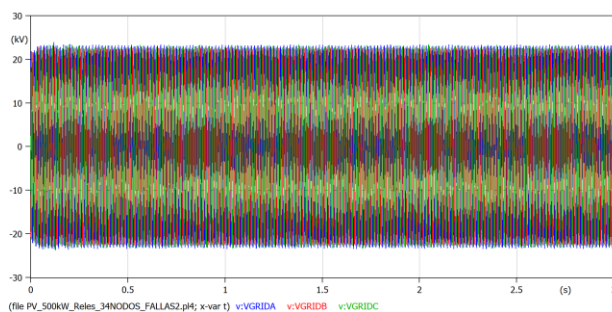


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

## Apéndice B. Estado estable

### Figura 12.

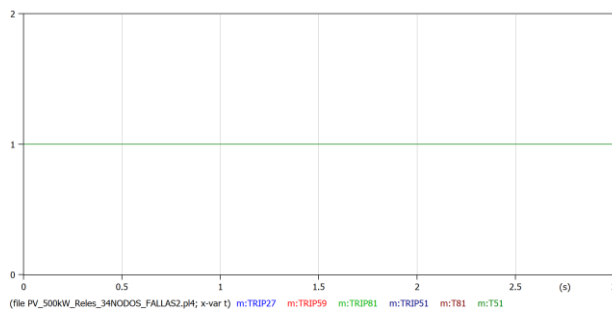
*Tensión en el nodo de conexión a la red (824).*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Figura 13.

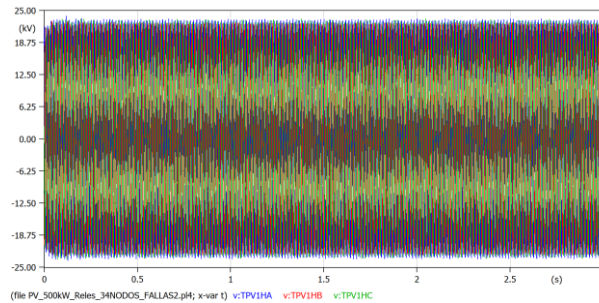
*Estado de los relés implementados.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Figura 14.

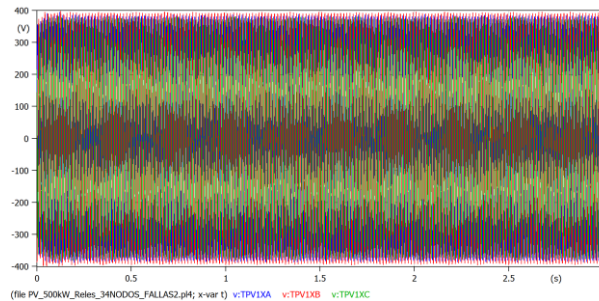
*Tensión en alta del transformador.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Figura 15.

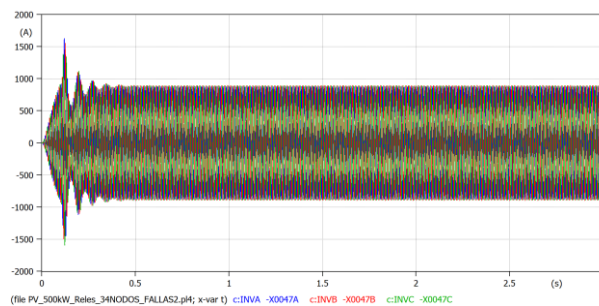
*Tensión en baja del transformador.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Figura 16.

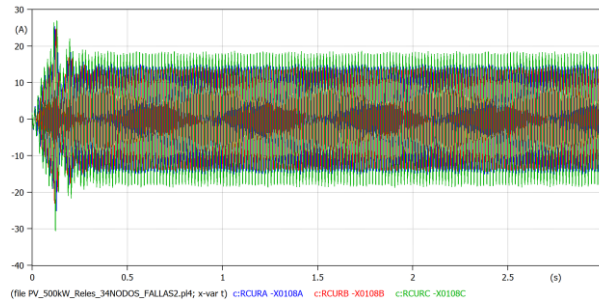
*Corriente que sale del inversor.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 17.**

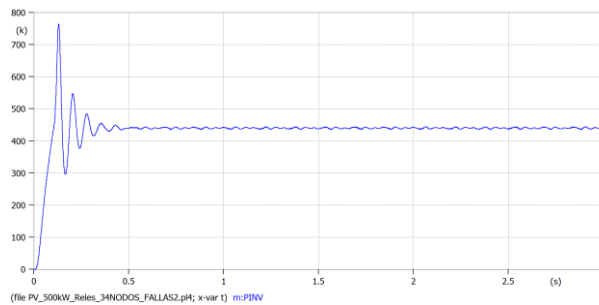
*Corriente que sale del transformador.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 18.**

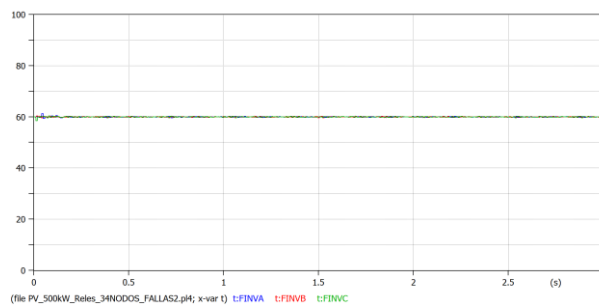
*Potencia generada por el sistema de generación fotovoltaica.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

**Figura 19.**

*Frecuencia que ve el inversor.*



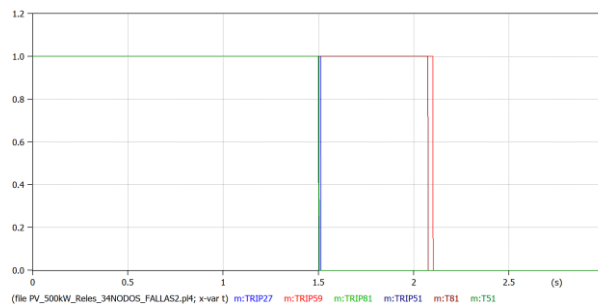
*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

### Apéndice C. Señales de interés de la evaluación de los esquemas de protección

- Falla monofásica a tierra en el nodo 828:

#### Figura 20.

*Estado de los relés.*

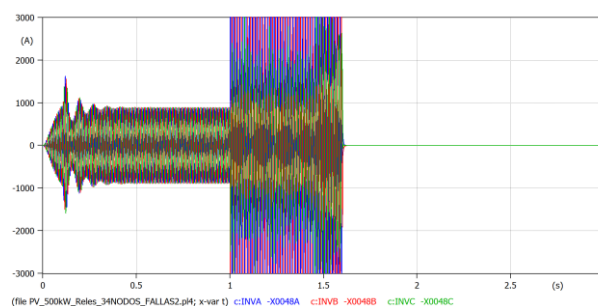


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Se observa la actuación de los relés 51, 81, y 27 cuando ocurre una falla monofásica a tierra en el segundo 1, enviando la señal al relé 0.5 segundos después, acorde con la configuración de tiempo de las funciones implementadas.

#### Figura 21.

*Corriente que sale del sistema de generación fotovoltaica (UG).*



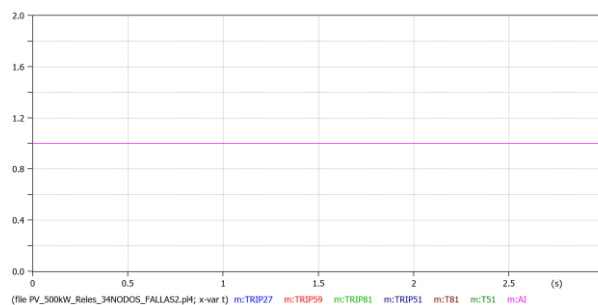
*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Se puede detallar la desconexión del sistema de generación distribuida, dejando de enviar corriente al sistema de distribución una vez actúan las protecciones, aproximadamente 0.02 segundos después de que los relés envían la señal, debido al retardo de acción del interruptor.

- Falla monofásica a tierra permanente en el nodo 844:

### Figura 22.

*Estado de los relés.*

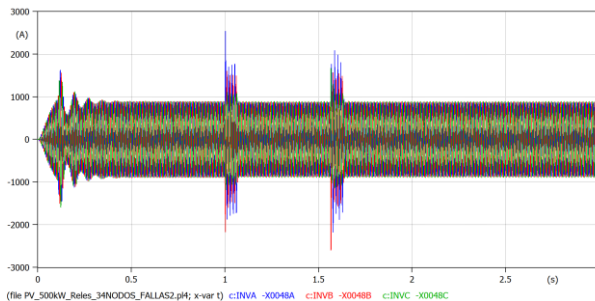


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Es posible observar en la figura 22, que ninguno de los relés actúa. Siendo este un comportamiento adecuado debido a que el lugar de ocurrencia de la falla es lejano al punto de conexión del sistema de GD.

**Figura 23.**

*Corriente que sale del sistema de generación fotovoltaica (UG).*

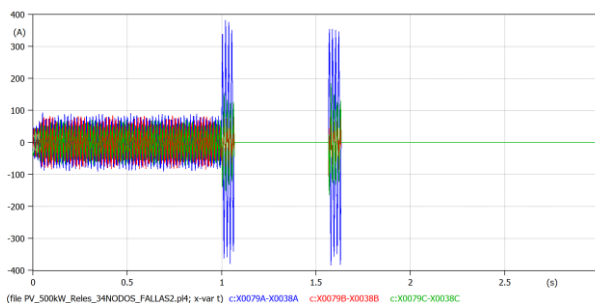


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

En la figura 23, se observan unas perturbaciones en la señal de corriente del sistema de GD debido a la falla ocurrida, sin embargo, no se interrumpe el suministro en ningún momento.

**Figura 24.**

*Corriente del reconector cercano al lugar de la falla.*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

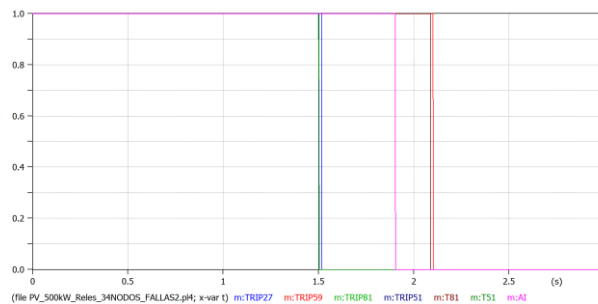
Se puede observar en la señal de corriente que pasa por el reconector cercano al lugar de ocurrencia de la falla que luego de 0.1 segundos, aproximadamente, debido a la magnitud de la

falla, desconecta esa parte del sistema, para luego intentar conectarlo nuevamente, y al notar que la falla permanece, lo mantiene desconectado.

- Falla monofásica durante 0.5 segundos en el nodo 816:

### Figura 25.

*Estados de relés.*

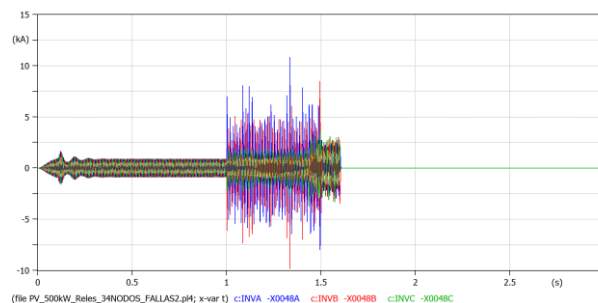


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Las primeras funciones en actuar son las 51 y 27, 0.5 segundos después de ocurrir la falla, lo cuál es un comportamiento adecuado de las protecciones.

### Figura 26.

*Corriente que sale del sistema de generación fotovoltaica (UG).*

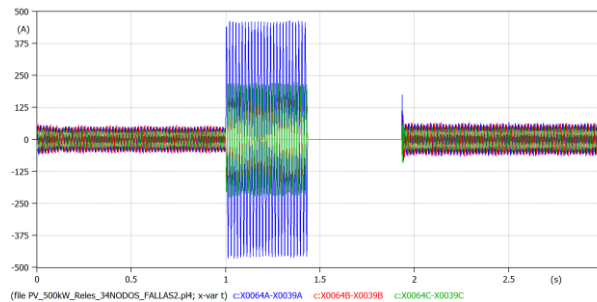


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Se observa que, al ocurrir la falla, se eleva la corriente en el sistema de GD, causando la desconexión del sistema de GD del de distribución.

### Figura 27.

*Corriente del reconnector cercano al lugar de la falla.*



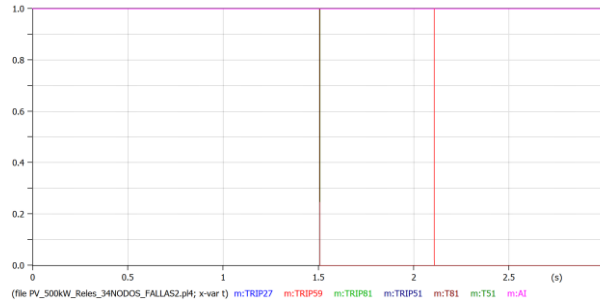
*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Debido a que la falla sólo dura 0.5 segundos, el reconnector logra restablecer el modo de operación estable una vez se ha extinguido la falla. Sin embargo, como se observó anteriormente, el sistema de GD ya se había desconectado pues la falla supera los tiempos de ajuste de los relés.

- Sobrefrecuencia en fuente principal de 64 Hz, nodo 800:

### Figura 28.

*Estados de relés.*

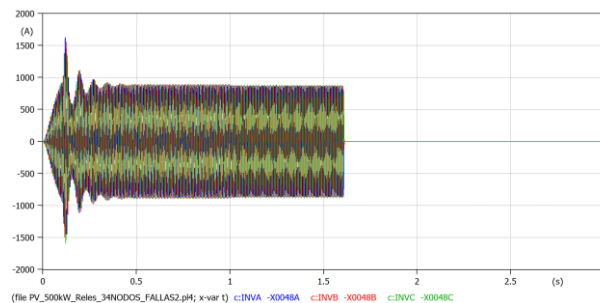


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Se observa que las funciones 81 son las primeras en actuar en este caso, acorde con la característica programada, realizando una activación de las protecciones adecuada.

### Figura 29.

*Corriente que sale del sistema de generación fotovoltaica (UG).*



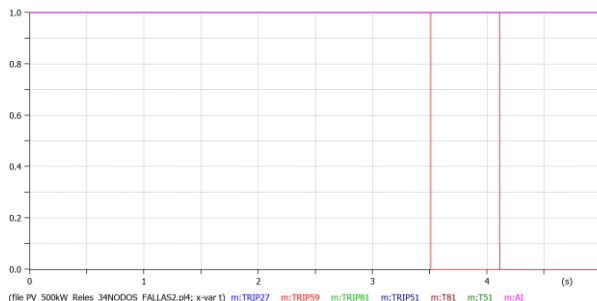
*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

En la figura se puede apreciar un correcto funcionamiento del esquema 81, interrumpiendo el suministro de corriente al sistema de distribución 0.52 segundos después de detectarlo, acorde con su característica y el tiempo de acción del interruptor.

- Sobretensión fuente principal de 1.15 p.u. nodo 800:

**Figura 30.**

*Estados de relés.*

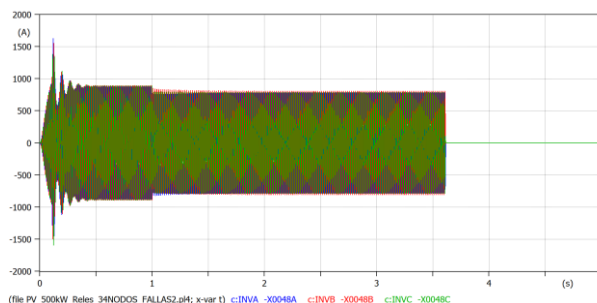


*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Se observa que el primer relé que actúa es el 59 debido al aumento en la tensión del sistema. Sin embargo, actúa 2.5 segundos después de que ocurre el aumento de tensión, debido a que la magnitud de la perturbación entra en la segunda etapa de acción del relé, para la cual tiene un tiempo de activación mayor.

**Figura 31.**

*Corriente que sale del sistema de generación fotovoltaica (UG).*



*Nota:* Figura tomada de la simulación realizada en ATPDraw.

Debido al aumento de la tensión se observa una disminución en la corriente, que se mantiene hasta que el relé 59 envía la señal para desconectar el GD del sistema de distribución.